

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416515

智能网络中基于流量预测的加权公平调度算法*

金子龙¹ 钱亮² 赵晨³ 崔晓松³ 潘成胜³(1.南京信息工程大学软件学院 南京 210044; 2.南京信息工程大学计算机学院 南京 210044;
3.南京信息工程大学电子与信息学院 南京 210044)

摘要: 智能网络中多业务流在时延和带宽方面有不同的传输需求,且自相似流量的突发性加剧了时延和丢包率。针对此问题,提出一种基于流量预测的改进 WFQ 调度算法(LPR-WFQ),该算法通过 TLGP 策略基于流量的均值和方差对流量进行分级,在贝叶斯估计思想的基础上通过计算条件转移概率来预测未来流量等级,基于预测结果和到达速率均值动态调整权重,从而降低时延和丢包,提高服务质量,并且优化了虚拟结束时间计算方式。仿真结果表明,与其他调度算法相比,该算法在时延、时延抖动、吞吐率和丢包四种性能方面分别提升 6.01%、9.66%、5.37%、38.57%,说明算法可以满足差异化服务需求下的性能要求。

关键词: 智能网络;链路汇聚;队列调度;PFQ;WFQ

中图分类号: TP393;TN919 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5025

Improved WFQ algorithm combined with traffic prediction
in the intelligent networkJin Zilong¹ Qian Liang² Zhao Chen³ Cui Xiaosong³ Pan Chengsheng³

(1. College of Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. College of Computer Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

3. College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In intelligent networks, multiple service flows have different transmission requirements in terms of delay and bandwidth, and the burstiness of self-similar traffic exacerbates delay and packet loss rate. To address this problem, an improved WFQ scheduling algorithm based on traffic prediction (LPR-WFQ) is proposed. This algorithm uses the TLGP strategy to classify traffic based on the mean and variance of traffic. Based on the Bayesian estimation idea, it predicts future traffic levels by calculating conditional transition probabilities. The weights are dynamically adjusted based on the prediction results and the mean arrival rate, thereby reducing delay and packet loss, improving service quality, and optimizing the calculation method of virtual finish time. Simulation results show that compared with other scheduling algorithms, this algorithm improves the delay, delay jitter, throughput and packet loss by 6.01%, 9.66%, 5.37% and 38.57% respectively, indicating that the algorithm can meet the performance requirements of differentiated services.

Keywords: intelligent network; link aggregation; queue scheduling; PFQ; WFQ

0 引言

天地一体化网络是按照“天基组网、地网跨代、天地互联”的思路,以地面网络为基础、以天基网络^[1]为延伸,覆盖太空、空中、陆地、海洋等自然空间,为天基、陆基、海基等各类用户活动提供信息保障的基础设施。随着网络中节点计算、存储和通信转发能力的大幅提升,天地一体化网络向天地一体化智能网络方向不断演进^[2]。

天地一体化智能网络的关键节点具有计算和存储功能,网络流量的强突发性进一步增强。同时,在智能网络中时延敏感流量和带宽敏感流量并存,时延敏感流量的数据包较小,重要性和实时性较高,而带宽敏感流量对传输带宽有较高的需求,这两种流量对排队时延、传输带宽等有不同的传输要求。并且,网络流量自相似性会导致持续的突发,进而导致队列排队时延和丢包率增加。因此,迫切需要在天地一体化智能网络中,构建一种能够满足业务流服务质

收稿日期:2024-07-25

* 基金项目:国家自然科学基金(61931004)项目资助

量需求,降低突发^[3]影响,减少时延和丢包率队列调度算法。

目前,传统的调度算法有先进先出调度(first in first out, FIFO)^[4]、优先级调度(priority queueing, PQ)^[5]、加权轮询调度(weighted round robin, WRR)、差额加权轮询调度(deficit weighted round robin, DWRR)^[6]、加权公平调度(weighted fair queueing, WFQ)^[7-8]等。这些传统调度算法存在一些缺点:FIFO无法区分不同优先级的业务流,无法满足多业务流差异化传输需求;PQ算法会导致低优先级队列长时间无法被调度,出现“饥饿”现象,无法处理突发导致的丢包率增加的问题;WRR等轮询类算法和WFQ等分组公平算法权值固定,无法根据突发的流量变化动态调整,导致队列的时延和丢包增加,且计算复杂度和开销较大。

针对上述缺点,为满足服务质量需求,出现了许多改进算法:刘乐等^[9]提出一种基于队列实时大小的可变权重轮询调度算法(priority queueing and changeable DWRR, PCDWRR),算法在DWRR基础上,结合PQ算法保证高性能同轴电缆宽带接入(high performance network over coax 3.0, HINOC3.0)中的协议报文业务实时调度,并且能够根据队列中缓存报文数的大小实时调整权重,该算法能够保证高优先级实时业务的服务质量但对低优先级缺乏公平性,不适合差异化服务场景;秦剑秀等^[10]提出了一种基于服务分类和带宽分配的加权公平队列调度算法(service class and bandwidth allocation based WFQ, SCBAWFQ),该算法设计了一种迭代带宽分配法,对每个会话服务的优先级进行了标记,在整个网络带宽不充足的情况下,算法可以保证拥有高优先级的实时性业务的服务质量,算法能保持公平性并保证实时业务的服务质量;杜轶等^[11]提出一种基于队列长度的动态加权公平队列调度算法(dynamic weighted fair queueing based on queue length, DQL-WFQ),该算法对业务进行区分,根据业务的重要程度进行权重分配,不同的业务具有不同的初始权重大小,对区分之后的业务在转发的过程中能够根据当前队列的数据包的数量进行动态的权值调整,算法能够降低重要业务的时延与丢包率;陈治兆^[12]提出一种M级优先级队列的改进型DRR调度算法(M priority queue DRR, MDRR),该算法设置一个时延保障队列,用于存放内部处理耗时接近处理时延时间要求的网络包,当时延保障队列有网络包时,立即进行调度输出。时延保障队列为空时,调度输出采用传统的DRR算法对各优先级队列进行调度,算法能够提供公平性和时延;Guo等^[13]提出一种动态加权最早截止日期优先(dynamic weight earliest deadline first, DWEDF)算法,基于每个数据包的加权剩余生命周期,缓冲和安排队列内的数据包,包括轻队列和重队列,该算法提供基于时延的公平性,避免出现饥饿现象;Chen等^[14]提出一种突发容忍增强型单队列WFQ调度算法(enhancing WFQ packet scheduler with single queue, SQ-EWFQ),使用单个FIFO队列调度数据

包,暂时增加突发流的权重,在足够长的时间间隔内限制流可以排队的字节总数该算法有效处理TCP流的突发,优化了吞吐量和丢包;Guo等^[15]提出一种基于队列组的WFQ调度算法(queue-group-based weight fair queueing scheduler, QGWFQS),当队列的头包被调度并且同一队列中还有剩余的包时,该队列的新头包将进行标记计算和潜在调度,当需要选择队列进行调度时,比较队列组中所有积压队列的头数据包所对应的标签,确定最小标签,该算法优化了资源利用率和公平性;Babu等^[16]提出一种与改进人工神经网络(improved artificial neural network, IANN)结合的DWRR优先级调度算法,接受数据后通过IANN确定优先级,由DWRR进行调度输出,该算法主要优化视频传输的性能;Gao等^[17]提出一种由排队级别的逻辑层次结构组成的近似加权公平排队的分层分组调度(Gearbox),使用排列成逻辑级别的FIFO队列,通过使用不同粒度的队列调度具有不同预期延迟的数据包,该算法实现了公平性并优化了时延和丢包性能;冉成等^[18]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,对虚拟队列(virtual output queue, 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,该算法能有效提升公平性并保证时延性能;Wu等^[19]提出一种结合令牌桶和动态分配带宽的加权公平队列调度算法(an scheduling algorithm based on token bucket and improved WFQ, SIWFQ),通过令牌桶算法控制流量,根据队列长度调整分配带宽,该算法可以提升端到端时延性能。文献[7]、[10]、[11]、[13]、[16]、[19]的算法主要根据队列中流量变化调整参数,文献[12]、[14]、[17]的算法主要是控制队列入队和出队,以上这些算法缺少对流量曲线和算法复杂度的考虑;文献[15]优化了复杂度,但是对于队列情况和流量曲线缺少考虑。

由上述可知,目前算法主要根据到达队列的流量情况进行的,缺少对于流量曲线的考虑,并且目前的算法无法有效对不同服务质量需求的流量进行差异化服务。因此,本文的改进算法(improved WFQ scheduling algorithm based on traffic prediction combined with arrival rate, LPR-WFQ)的设计思想如下:1)对不同需求流量进行区分,将不同服务需求的流量分别进行不同的队列进行调度;2)通过对流量曲线进行预测分级调整权值参数,并在此基础上,基于现有的DQL-WFQ和SIWFQ算法调整权值的设计思想,根据到达队列的流量速率进一步调整权值参数;3)通过计算队列首部数据包的虚拟结束时间优化算法复杂度。

最后,在Ubuntu中通过NS3和Matlab对该算法与其他算法在流量模型下进行仿真实验,并根据实验结果比较算法性能。

1 WFQ调度算法

WFQ调度算法的基本思想是为各队列中每个数据包

维护一个虚拟结束时间,同时也为每个队列分配一个权值进行输出带宽分配比例的设置,当调度器准备调度一个数据包进行转发时,它在等待调度的所有数据包中选取一个虚拟结束时间最小的数据包进行转发,WFQ 框架如图 1 所示。

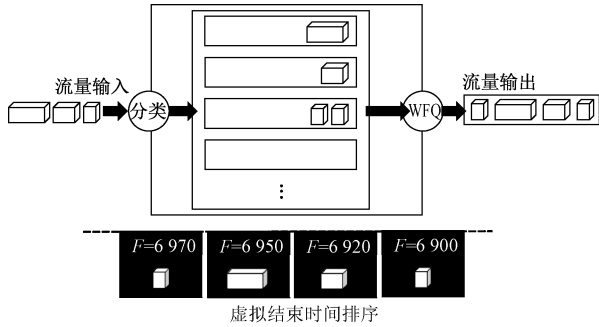


图 1 WFQ 算法

Fig.1 WFQ algorithm

WFQ 算法定义如下:

1) 系统虚拟时间初始化和计算。开始时系统虚拟时间初始化为 0,每当有数据包到达或离开都作为一个事件,当事件发生时对 $V(t)$ 进行更新,公式如下:WFQ 算法定义如下:

$$V(t_{j-1} + \tau) = V(t_j - 1) + \frac{\tau}{\sum_{i \in B_j} \phi_i}$$

$$\tau \leq t_j - t_{j-1}, j = 2, 3, \dots \quad (1)$$

其中, $V(t)$ 是 t 时刻的系统虚拟时间, t_j 表示第 j 个事件发生的时刻。 V 的变化率为:

$$\partial V(t_j + \tau) / \partial \tau = \frac{1}{\sum_{i \in B_j} \phi_i} \quad (2)$$

有数据包排队的队列接受的服务速率为 $\phi_i \times \partial V(t_j + \tau) / \partial \tau$, ϕ_i 是队列 i 的权值。

2) 虚拟开始时间和虚拟结束时间初始化和计算。两者初始化为 0,根据数据包到达时的系统虚拟时间计算虚拟开始时间和虚拟结束时间,计算公式如下:

$$S_i^k = \max(F_i^{k-1}, V(a_i^k)) \quad (3)$$

$$F_i^k = S_i^k + \frac{L_i^k}{r_i} \quad (4)$$

其中, a_i^k 为数据包到达时刻, L_i^k 为该数据包的大小, r_i 为该队列的预约服务率。

2 LPR-WFQ 调度算法

鉴于上述现有算法的缺点,本文提出一种 LPR-WFQ 算法,该算法在 WFQ 算法基础上,分成 3 种类型的队列,分别为时延敏感队列(time sensitive, DS)、带宽敏感队列(bandwidth sensitive, BS)、尽力而为队列(best effort, BE),流量根据到达时间先后进入到队列,根据未来流量水平结果和到达速率来调整不同类型业务的权值,保障业务

的服务质量。

2.1 性能指标

1) 平均排队时延:排队时延是指数据包在所排队列中等待被发送到出链路的时间,平均排队时延即队列所有数据包的排队时延的平均值。

$$qd(i) = Rn(i) - Tn(i) \quad (5)$$

$$Avg_{qd} = \frac{qd(i)}{N} \quad (6)$$

式中: $qd(i)$ 为第 i 个数据包的排队时延, Avg_{qd} 为平均排队时延, $Rn(i)$ 为第 i 个数据包转发出队列的时间, $Tn(i)$ 为第 i 个数据包到达队列的时间, N 为队列的数据包总数。

2) 平均时延抖动:时延抖动是两个连续数据包的时延的绝对差值,平均时延抖动即队列所有时延抖动值的平均值。

$$Avg_{jitter} = \frac{abs(qd(i+1) - qd(i))}{N - 1} \quad (7)$$

式中: Avg_{jitter} 为队列的平均时延抖动。

3) 吞吐率:吞吐率是队列成功输出的数据大小占队列被发送数据大小的比率。

$$Tp = \frac{Tnp}{Rnp} \quad (8)$$

式中: Tp 为队列吞吐率, Tnp 为队列成功输出的数据大小, Rnp 为队列输入的数据大小。

4) 总丢包率:丢包率是队列丢失的数据包数与队列被发送的数据包的总数的比率。总丢包率即所有队列丢包数与所有数据包的比率。

$$PLR = \frac{Pn - On}{Pn} \quad (9)$$

式中: PLR 为总丢包率, Pn 为所有数据包数量, On 为队列成功输出的数据包数。

2.2 流量自相似性

对于一个平稳离散时间序列 $X = (X_i; i = 1, 2, 3, \dots)$, 定义 m 重聚集时间序列^[20]为:

$$X^{(m)} = (X_k^{(m)}; k = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

其中, $X_k^{(m)} = (X_{km-m+1} + \dots + X_{km}) / m$, 如果对于所有 $m = 1, 2, 3, \dots$, 方差和自相关函数满足如下要求时则称过程 X 为具有参数 β 的精确自相似过程:

$$\begin{cases} \text{Var}(X^{(m)}) = \text{Var}(X) / m^\beta \\ r^{(m)}(k) = r(k) \\ 0 < \beta < 1 \end{cases} \quad (11)$$

其中,当 $k \rightarrow \infty$ 时, $r(k) \sim k^{-\beta}$ 。由于历史原因,采用 Hurst 参数表征自相似性,二者关系为: $H = 1 - \beta/2$, 即 $0.5 < H < 1$ 。

如果对于所有足够大的 k , 方差和自相关函数分别满足:

$$\begin{cases} \text{Var}(x^{(m)}) = \text{Var}(X)/m^\beta \\ r^{(m)}(k) \rightarrow r(k) \\ m \rightarrow \infty \end{cases} \quad (12)$$

则 X 称为渐近(二阶)自相似过程。

重尾分布对于产生自相似性具有重要意义。重尾分布对于自相似性的重要性在于: Taqqu 等从理论上证明了无穷多个独立的具有重尾分布的更新回报过程的迭加强收敛于典型的自相似过程分数布朗运动(fractional Brownian motion, FBM)^[20]。这里的更新回报过程是指 Packet-Train 模型中的 ON/OFF 过程, 具有严格交替的 ON 和 OFF 周期, 其中, ON 周期的时间或者 OFF 周期的时间或者二者具有重尾特性。在 ON 周期, 以“背靠背”的方式连续发送数据; 在 OFF 周期, 不发送数据。而且:

$$\begin{cases} H = (3 - \alpha)/2 \\ \alpha = \min(\alpha_{ON}, \alpha_{OFF}) \end{cases} \quad (13)$$

其中, α_{ON} 是 ON 周期重尾特性参数, α_{OFF} 是 OFF 周期重尾特性参数。该计算公式是理想情况下的结果, 实际情况中, H 值一般在 α_{ON} 和 α_{OFF} 之间。

具有重尾分布的如 pareto 分布, 分布函数为:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{\theta}{x}\right)^\alpha, & x \geq \theta \\ 0, & x < \theta \end{cases} \quad (14)$$

参数 θ 决定了该随机变量可取的最小值, 参数 α 决定了该随机变量的均值和方差。若 $\alpha \leq 2$, 则该分布具有无限方差; 若 $\alpha \leq 1$, 则该分布具有无限方差和均值。

2.3 流量水平分级机制

首先根据 TLGP(traffic level grade prediction)^[21] 策略进行预测, 假设 $\{X(t), t \in T\}$ 是一个广义平稳随机过程, 其具有有限的均值和方差, 分别为 μ 和 σ , V 为一段时间上的聚合流量, 为描述流量水平 L 的“高”和“低”, 以均值为中心将其划分为 6 个范围, 来代表当前流量较大或当前流量较小, 则公式为:

$$L = \begin{cases} 1, & V \in (-\infty, \mu - 2\sigma) \\ 2, & V \in [\mu - 2\sigma, \mu - \sigma) \\ 3, & V \in [\mu - \sigma, \mu) \\ 4, & V \in [\mu, \mu + \sigma) \\ 5, & V \in [\mu + \sigma, \mu + 2\sigma) \\ 6, & V \in [\mu + 2\sigma, +\infty) \end{cases} \quad (15)$$

假设 V_1, V_2 分别为 $(t-T, t]$ 和 $(t, t+T]$ 上的总流量。 L_1, L_2 分别为 $(t-T, t]$ 和 $(t, t+T]$ 上的流量水平变量。将流量序列 X 划分成 N 个时长为 T 的连续、不重叠的段。对于每一对相邻的段 V_1 和 V_2 , 它们的流量级别分别为 l_1 和 l_2 。令 n_{l_1} 表示满足 $L_1=l_1$ 的块数, n_{l_2} 为 $L_1=l_1$ 条件下满足 $L_2=l_2$ 的块数, 则流量水平条件转移概率为:

$$Pr\{L_2 = l_2 | L_1 = l_1\} = \frac{n_{l_2}}{n_{l_1}} \quad (16)$$

条件转移概率计算式 $Pr\{L_2 = l_2 | L_1 = l_1\}$ 表示在最

近的过去的总流量为 $L_1=l_1$ 的条件下, 最近的未来的总流量 $L_2=l_2$ 的概率。

根据当前流量水平 $L_1=l_1$ 预测下一时间段的流量水平为:

$$\bar{l} = \sum_{l_2=1}^6 l_2 Pr\{L_2 = l_2 | L_1 = l_1\} \quad (17)$$

2.4 权值调整策略

根据流量水平预测值调整权值。记 $\Delta\omega_{bDS}, \Delta\omega_{bBS}, \Delta\omega_{bBE}$ 分别为 3 种类型队列经预测值调整的权值增量的权值增量, $\bar{l}_{DS}, \bar{l}_{BS}, \bar{l}_{BE}$ 分别为 3 种队列预测值, $\max\Delta\omega_{bDS}, \max\Delta\omega_{bBS}, \max\Delta\omega_{bBE}$ 分别表示各队列调整的最大阈值。其中 BE 流由于对排队时延和传输带宽的服务需求较小, 分配带宽优先给其他两类流分配, 当 BE 流队列的水平预测值过大时才分配更高的带宽, 权值调整公式为:

$$\Delta\omega_{bDS} = \begin{cases} \max\Delta\omega_{bDS} \frac{\bar{l}_{DS} - 2}{2}, & \bar{l}_{DS} < 2 \\ \max\Delta\omega_{bDS} \frac{\bar{l}_{DS} - 3}{2}, & 2 \leq \bar{l}_{DS} \leq 4 \\ \max\Delta\omega_{bDS} \frac{\bar{l}_{DS} - 4}{2}, & \bar{l}_{DS} > 4 \end{cases} \quad (18)$$

$$\Delta\omega_{bBS} = \begin{cases} \max\Delta\omega_{bBS} \frac{\bar{l}_{BS} - 2}{2}, & \bar{l}_{BS} < 2 \\ \max\Delta\omega_{bBS} \frac{\bar{l}_{BS} - 3}{2}, & 2 \leq \bar{l}_{BS} \leq 4 \\ \max\Delta\omega_{bBS} \frac{\bar{l}_{BS} - 4}{2}, & \bar{l}_{BS} > 4 \end{cases} \quad (19)$$

$$\Delta\omega_{bBE} = \begin{cases} -\max\Delta\omega_{bBE}, & \bar{l}_{DS} \geq 4, \bar{l}_{BS} \geq 4 \\ \max\Delta\omega_{bBE} \frac{\bar{l}_{BE} - 4}{2}, & \bar{l}_{BE} \geq 4, \bar{l}_{DS} < 2, \bar{l}_{BS} < 2 \\ 0, & \bar{l}_{BE} \geq 4, \bar{l}_{DS} \geq 4, \bar{l}_{BS} \geq 4 \\ \max\Delta\omega_{bBE} \frac{\bar{l}_{BE} - 3}{2}, & 2 \leq \bar{l}_{DS} \leq 4 \\ \max\Delta\omega_{bBE} \frac{\bar{l}_{BE} - 2}{2}, & \bar{l}_{DS} < 2 \end{cases} \quad (20)$$

根据速率门限值调整权值增量。通过上述策略能够获得不同的流量水平, 并据此计算相应水平的权重。然而, 在同一水平下, 流量突发仍可能呈现不同的情况, 因此, 需要对权值增量调整进一步优化。以下根据流量到达队列的速率与速率门限值的对比来动态调整权值的增量。假设测量到一定时间间隔 Δt 内队列的数据包到达速率的均值为 R_{avg} , 初始化为 0, 到达速率的门限上限值和下限值分别为 R_{max} 和 R_{min} , 经过流量水平预测值调整的权值增量为 $\Delta\omega_b$, 速率均值与速率门限值比较而调整的权值增量最大值为 $\max\Delta\omega_a$ 。则权值调整公式如下:

$$\begin{cases} \Delta\tau\omega = \Delta\tau\omega_b, R_{avg} \leq R_{min} \\ \Delta\tau\omega = \Delta\tau\omega_b + \frac{R_{avg} - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \max\Delta\tau\omega_a, R_{min} \leq R_{avg} \leq R_{max} \\ \Delta\tau\omega = \Delta\tau\omega_b + \max\Delta\tau\omega_a, R_{avg} \geq R_{max} \end{cases} \quad (21)$$

根据以上二次调整权值增量的策略,可以得到最终各个队列的权值,假设各队列初始权值分别为 WI_{DS} 、 WI_{BS} 、 WI_{BE} , 经过二次调整的权值增量分别为 $\Delta\tau\omega_{DS}$ 、 $\Delta\tau\omega_{BS}$ 、 $\Delta\tau\omega_{BE}$, 3 种类型队列最终权值分别为 W_{DS} 、 W_{BS} 、 W_{BE} , 则各队列权值为:

$$\begin{cases} W_{DS} = WI_{DS} + \Delta\tau\omega_{DS} \\ W_{BS} = WI_{BS} + \Delta\tau\omega_{BS} \\ W_{BE} = WI_{BE} + \Delta\tau\omega_{BE} \end{cases} \quad (22)$$

2.5 LPR-WFQ 算法设计

本文提出的 LPR-WFQ 算法对业务流进行了分类,将它们划分为 3 种不同类型的队列:DS 队列、BS 队列和 BE 队列,为了简化流程描述,这些队列被分别标记为队列 1、2 和 3。在调度过程中,流量根据到达时间先后进入队列,LPR-WFQ 算法分别计算每个队列的流量水平值和到达速率均值。基于这些计算结果,算法通过条件转移概率预测未来的流量变化,并根据预测值和速率均值进行双重权值调整。LPR-WFQ 算法流程如图 2 所示。分组选择策略为最小虚拟结束时间优先(smallest virtual finished time first, SFF)。本文算法的虚拟结束时间计算方法如下:

1) 当 p_i^k 到达队列 i 时,若队列 i 原本不为空,则不更新 F_i ,若队列 i 原本为空,则更新 F_i :

$$F_i = \max\{F_i, V(t_i^k)\} + L_i^k / r_i \quad (23)$$

其中, p_i^k 表示第 i 个队列第 k 个数据包, F_i 表示第 i 个队列的虚拟结束时间, t_i^k 表示数据包 p_i^k 的到达时刻, $V(t_i^k)$ 表示 p_i^k 到达时的系统虚拟时间, L_i^k 表示数据包 p_i^k 的大小, r_i 表示第 i 个队列的预约速率, $r_i = \omega_i / \sum \omega_i B$, ω_i 为第 i 个队列的权值, B 为总带宽。每当所有队列都为空,即所有队列中的数据包全部发送完毕,此时应将系统的虚拟时间和各队列的虚拟结束时间 F_i 都清为 0。

2) 当 p_i^k 离开队列 i 时,若队列 i 为空,则不更新 F_i ,若队列 i 不为空,则更新 F_i :

$$F_i = F_i + L_i^{k+1} / r_i \quad (24)$$

当队列头部的第一个数据包变更时, F_i 需按照上述规则进行更新。根据这些规则也需要为队列中的每个包计算虚拟结束时间,但这一计算仅在该包成为队列头部首个包时执行。

3 仿真实验

为验证算法的有效性,本文实验在虚拟机 VMware 15.5 上进行,操作系统为 Ubuntu 20.04,处理器 AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics 2.90 GHz,通过平台

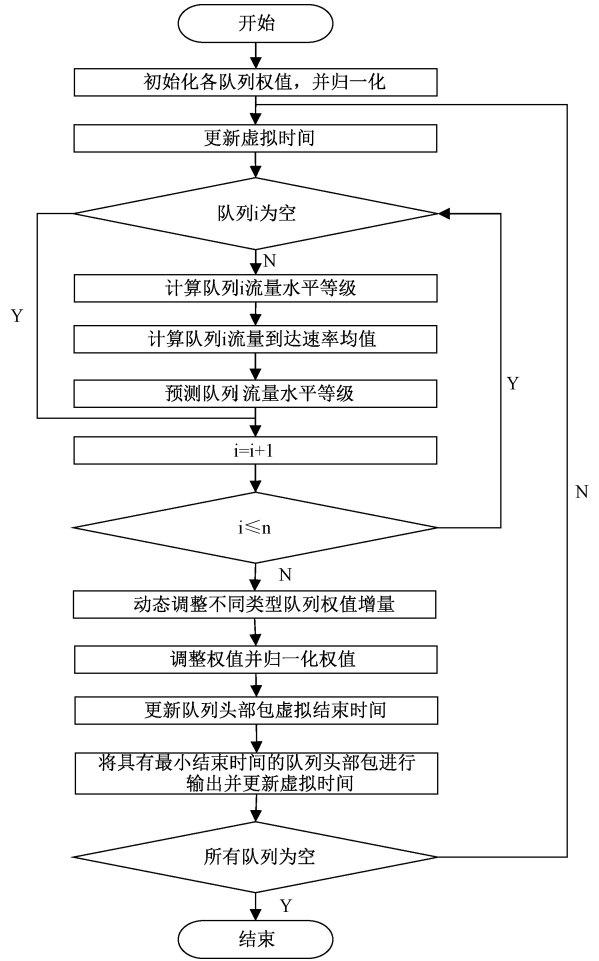


图 2 LPR-WFQ 算法

Fig. 2 LPR-WFQ algorithm

NS3 3.33 进行流量传输,并通过 MATLAB 2018 输出结果。

本文研究的队列调度机制是对一个节点内的业务流进行调度,因此为简化模型,本次仿真中使用的网络拓扑如图 3 所示。

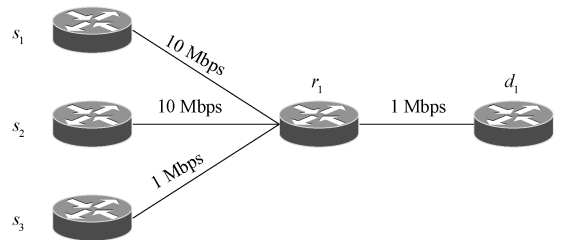


图 3 仿真拓扑图

Fig. 3 Simulation topology diagram

其中, s_1, s_2, s_3 分别为 3 个源节点,发送时延敏感流量、带宽敏感流量和尽力而为流量至汇聚节点 r_1 。节点 s_1, s_2 至汇聚节点 r_1 的发送速率 10 Mbps,节点 s_3 至汇聚节点 r_1 的发送速率为 1 Mbps。调度算法处于节点 r_1 中,

r_1 的服务速率为 1 Mbps。 d_1 为目的节点。相关仿真设置如表 1 所示,在源节点中本文利用基于 Pareto 分布的 ON/OFF 叠加不同流模拟自相似流量。

表 1 设置列表
Table 1 Setting list

参数	s_1	s_2	s_3
分布	Exponent, pareto	pareto	pareto
最大生成速率	1.22 Mbit/s	1.83 Mbit/s	125 Kbit/s
ON/OFF 流叠加数	100	100	10

3.1 条件转移概率

为了计算流量水平等级,取 $T_1 = T_2 = 5$ s。通过实验可以计算得到如下的流量水平条件转移概率表,如表 2~4 所示。

表 2 流量水平条件转移概率表 (DS 流)

Table 2 Transfer probability of traffic levelcondition (DS)								
L_1	L_2	1	2	3	4	5	6	\bar{l}
1		0.24	0.62	0.10	0.05	0	0	1.95
2		0.09	0.40	0.35	0.15	0.01	0	2.61
3		0.02	0.15	0.41	0.34	0.07	0.01	3.32
4		0	0.04	0.34	0.44	0.17	0.01	3.78
5		0	0.01	0.15	0.49	0.31	0.04	4.21
6		0	0	0	0.26	0.48	0.26	5.00

表 3 流量水平条件转移概率表 (BS 流)

Table 3 Transfer probability of traffic levelcondition (BS)								
L_1	L_2	1	2	3	4	5	6	\bar{l}
1		0.63	0.30	0.06	0	0	0	1.42
2		0.06	0.52	0.30	0.10	0.01	0	2.47
3		0.01	0.18	0.48	0.31	0.03	0	3.18
4		0	0.02	0.24	0.56	0.17	0.01	3.93
5		0	0	0.01	0.46	0.41	0.06	4.47
6		0	0	0	0.11	0.56	0.33	5.22

表 4 流量水平条件转移概率表 (BE 流)

Table 4 Transfer probability of traffic levelcondition (BE)								
L_1	L_2	1	2	3	4	5	6	\bar{l}
1		0.13	0.42	0.32	0.13	0	0	2.45
2		0.11	0.31	0.29	0.28	0.01	0.01	2.79
3		0.02	0.14	0.40	0.34	0.09	0.01	3.37
4		0	0.10	0.29	0.41	0.18	0.02	3.73
5		0	0.03	0.28	0.40	0.24	0.05	4.00
6		0	0.04	0.17	0.54	0.17	0.08	4.08

从这些表中可以看出当前时间当流量水平 L_1 偏低时,即代表此时流量较少, L_2 通常也偏低;反之,若 L_1 较高,即代表此时流量整体较高,则 L_2 同样倾向于较高。综合来说流量水平 L_2 处于 3、4 的可能性更高一些。

3.2 调度算法对比

本文将从以下 4 个方面进行算法的比较:DS 流排队时延、DS 流排队时延抖动、BS 流吞吐量和总丢包率。

图 4 为 DS 流平均排队时延对比图,本文提出的 LPR-WFQ 调度算法相对于其他算法具有更好的 DS 流的排队时延性能。如表 5 所示,相较于 WFQ、DWRR、SIWFQ、DQL-WFQ 算法,平均排队时延从 7.18、7.79、7.05、6.88 ms 降低至 6.77 ms,分别降低 5.59%、12.99%、3.99%、1.48%。这是由于本文的 LPR-WFQ 算法中 DS 流拥有较高的优先级,根据流量水平和到达速率调整可以获得一个较合理的权值,从而在虚拟结束时间排序中处于较靠前的位置,因而可以有效减少流量突发对时延的影响。

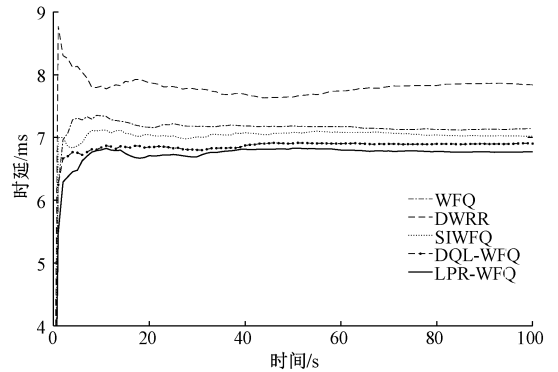


图 4 DS 流排队时延

Fig. 4 Queue delay of DS

表 5 排队时延平均值

Table 5 Average of queue delay							ms
值	WFQ	DWRR	SIWFQ	DQL-WFQ	LPR-WFQ		
平均值	7.18	7.79	7.05	6.88	6.77		

图 5 为 DS 流平均时延抖动对比图,本文提出的 LPR-WFQ 调度算法相对其他算法的 DS 流有较好的时延抖动

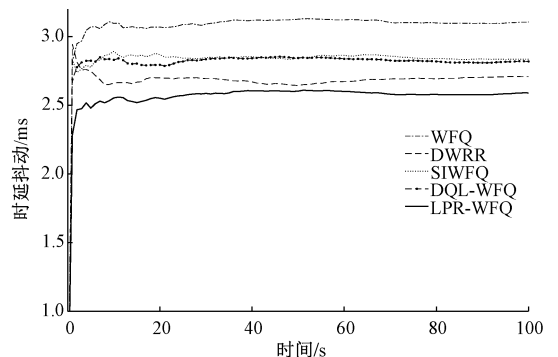


图 5 DS 流时延抖动

Fig. 5 Delay jitter of DS

性能。如表 6 所示,相较于 WFQ、DWRR、SIWFQ、DQL-WFQ 算法,平均排队时延抖动降低了约 16.76%、3.76%、9.52%、8.60%。这是因为本文的 LPR-WFQ 算法能够更好地保持流量的虚拟结束时间排序中的差距,使得各流量时延更一致。

表 6 时延抖动平均值

Table 6 Average of delay jitter ms

值	WFQ	DWRR	SIWFQ	DQL-WFQ	LPR-WFQ
平均值	3.09	2.69	2.84	2.82	2.57

图 6 为 BS 流平均吞吐率对比图,从图中可以看出 LPR-WFQ 算法拥有最好的吞吐率性能。如表 7 所示,相较于 WFQ、DWRR、SIWFQ、DQL-WFQ 算法,平均吞吐率提升了约 1.84%、17.88%、1.20%、0.55%。因为本文的 LPR-WFQ 算法能够差异化服务,为带宽敏感流量分配合理的带宽,使得其获得更多的服务时间。

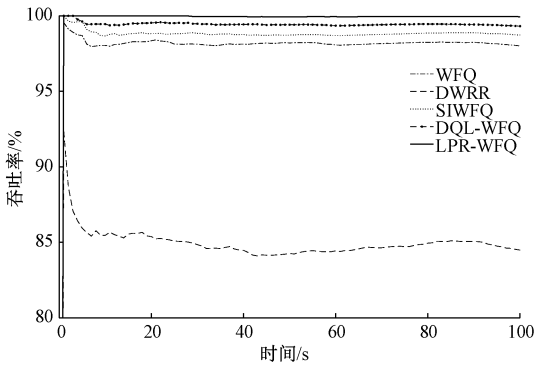


图 6 BS 流吞吐率

Fig. 6 Throughput rate of BS

表 7 吞吐率平均值

Table 7 Average of throughput rate %

值	WFQ	DWRR	SIWFQ	DQL-WFQ	LPR-WFQ
平均值	98.21	84.97	98.84	99.45	99.96

图 7 为平均丢包率对比图,本文提出的 LPR-WFQ 调

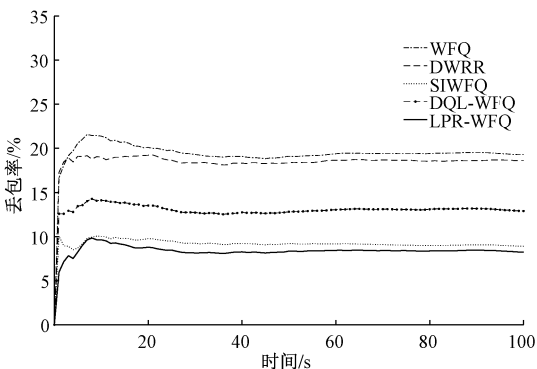


图 7 丢包率

Fig. 7 Packet loss rate

度算法相较于其他算法具有最好的丢包率性能。如表 8 所示,相较于 WFQ、DWRR、SIWFQ、DQL-WFQ 算法,平均丢包率分别降低了约 56.60%、54.35%、8.16%、35.15%。这是因为在流量突发的情况下,本文的 LPR-WFQ 能够更贴近实际的流量变化做出更合理的权值调整,减少了队列由于流量突发导致从缓存队列中溢出的数据数量。

表 8 丢包率平均值

Table 8 Average of packet loss rate %

值	WFQ	DWRR	SIWFQ	DQL-WFQ	LPR-WFQ
平均值	19.53	18.60	9.22	13.08	8.42

通过仿真实验的结果分析可以发现 LPR-WFQ 算法在处理具有突发特性的差异化业务流场景中,相较于其他几种调度算法表现出了更优的性能。

4 结 论

本文基于流量预测并结合到达速率,提出 LPR-WFQ 队列调度算法。基于贝叶斯估计思想计算条件转移概率来预测未来流量等级,设计基于流量等级结合到达速率均值的权值动态调整策略,并优化虚拟结束时间计算方法。仿真结果表明,LPR-WFQ 与已有算法相比,该算法能够提升流量传输的性能,并且具有更低的虚拟结束时间计算复杂度和开销。

在未来的研究工作中,可结合深度学习或神经网络等技术,动态提取调度队列中的不同参数特征,精准预测队列、流量、带宽等状态,自适应调整调度参数,以提高调度算法的精确度和泛化性。

参考文献

[1] 周黎明,张治中,卞雨靖,等.面向业务优先级的宽带卫星 ATDM 前向链路资源调度算法[J].电子测量技术,2023,46(11):151-158.
ZHOU J M, ZHANG ZH ZH, BIAN Y J, et al. Service priority-oriented forward link resource scheduling algorithm for broadband satellite ATDM [J]. Electronic Measurement Technology, 2023,46(11):151-158.

[2] 石怀峰,王成功,蔡睿妍,等.天地一体化智能网络节点静态处理与缓存策略[J].计算机工程,2021,47(1):30-36.
SHI H F, WANG CH G, CAI R Y, et al. Node static processing and caching strategy in space-ground integrated intelligent network [J]. Computer Engineering, 2021,47(1):30-36.

[3] 张焱,陈峰,谢泽堃,等.突发流量自适应的 6TiSCH 网络分布式 PID 调度[J].电子测量与仪器学报,2023,

- 37(9):142-148.
- ZHANG Y, CHEN F, XIE Z K, et al. Distributed PID scheduling in 6TiSCH network with burst traffic adaptation[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023,37(9):142-148.
- [4] 刘天旭. 面向跨链异构网络的传输机制研究[D]. 四川:电子科技大学,2023.
- LIU T X. The research on transmission mechanism for cross-chain heterogeneous network [D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology of China,2023.
- [5] ATTAR H, KHOSRAVI M R, IGOROVICH S S, et al. Review and performance evaluation of FIFO, PQ, CQ, FQ, and WFQ algorithms in multimedia wireless sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2020, 16(6), DOI: 10.1177/1550147720913233.
- [6] 刘乐. HINOC 系统中 QoS 机制研究与优化[D]. 南京:南京邮电大学,2022.
- LIU L. Research and optimization of QoS mechanism in HINOC system[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications,2022.
- [7] 李欣桥. 智融标识网络优先级队列调度机制设计与实现[D]. 北京:北京交通大学,2022.
- LI X Q. Design and implementation of priority queue scheduling mechanism of smart integration identifier network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2022.
- [8] 李秉权,张松,王兆伟,等. WFQ 与 WRR 调度算法的性能分析与改进[J]. *北京理工大学学报*,2015,35(3): 316-320.
- LI B Q, ZHANG S, WANG ZH W, et al. Performance analysis and improvement about WFQ and WRR schedule algorithm[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*,2015,35(3):316-320.
- [9] 刘乐,郭宇锋,王俊峰. 一种应用于 HINOC 系统的改进 DWRR 调度算法[J]. *计算机仿真*,2023,40(3): 390-394.
- LIU L, GUO Y F, WANG J F. An improved DWRR scheduling algorithm for HINOC system [J]. *Computer Simulation*,2023,40(3):390-394.
- [10] 秦剑秀,宋建霖,戴小文. 改进 WFQ 算法在列车网络调度中的应用研究[J]. *计算机应用研究*,2019, 36(11):3302-3305.
- QIN J X, SONG J L, DAI X W. Research on application of improved WFQ algorithm in train network scheduling [J]. *Application Research of Computers*,2019,36(11): 3202-3305.
- [11] 杜辙,郭宗莲,岳丽全. 队列长度动态加权公平调度算法在列车网络中的应用[J]. *计算机应用研究*,2020, 37(S1):76-78.
- DU ZH, GUO Z L, YUE L Q. Application of queue length dynamic weighted fair scheduling algorithm in train networks [J]. *Application Research of Computers*, 2019,37(S1):76-78.
- [12] 陈治兆. 基于 FPGA 的 SDN 网络包处理器数据平面设计[D]. 四川:西南科技大学,2023.
- CHEN ZH ZH. Design of data plane in SDN network packet processors based on FPGA [D]. Sichuan: Southwest University of Science and Technology,2023.
- [13] GUO M, MUKHERJEE M, GUAN Q SH, et al. Delay-based packet-granular QoS provisioning for mixed traffic in industrial internet of things[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*,2022,6(4): 2128-2143.
- [14] CHEN W, TIAN Y, YU X, et al. Enhancing fairness for approximate weighted fair queueing with a single queue[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2024, DOI:10.1109/TNET.2024.3399212.
- [15] GUO Y F, GUO ZH C, SONG X Y, et al. QGWFQS: A queue-group-based weight fair queueing scheduler on FPGA [J]. *Micromachines*, 2023, 14(11): 2100.
- [16] BABU M M, REDDY P C, SAM R P. A novel cross-layer based priority aware scheduling scheme for QoE guaranteed video transmission over wireless networks[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2022, 81(20): 28129-28164.
- [17] GAO P X, DALLEGGIO A, XU Y, et al. Gearbox: A hierarchical packet scheduler for approximate weighted fair queueing[C]. *19th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 22)*, 2022: 551-565.
- [18] 冉成,苏皓,孙晔,等. 高性能输入排队交换机的公平调度算法研究[J]. *国外电子测量技术*,2023,42(2):

- 114-119.
- RAN CH, SU H, SUN Y, et al. Research on fair scheduling algorithm of high-performance input queuing switch[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(2): 114-119.
- [19] WU Z Q, QIN H CH, SONG X M, et al. The improvement of scheduling algorithm based on token bucket and weighted fair queue [C]. 2023 12th International Conference of Information and Communication Technology (ICTech), 2023: 66-72.
- [20] 王晓婷, 王忆文, 李平. 一种自相似网络流量生成器的设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(8): 54-58.
- WANG X T, WANG Y W, LI P. Design and implementation of self-similar network traffic generator [J]. The Design and Implementation of Microelectronics and Computer, 2016, 33(8): 54-58.
- [21] 魏德宾, 潘成胜, 杨力, 等. 基于自相似网络流量预测的自适应随机早期检测算法[J]. 通信学报, 2023, 44(6): 154-166.
- WEI D B, PAN CH SH, YANG L, et al. Adaptive random early detection algorithm based on self-similar network traffic prediction[J]. Journal of Communications, 2023, 44(6): 154-166.

作者简介

金子龙, 博士, 教授, 主要研究方向为无线网络。

E-mail: zljn@outlook.com

钱亮, 硕士研究生, 主要研究方向为智能网络队列调度。

E-mail: qianliangyyy@163.com

赵晨(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为智能通信技术。

E-mail: zhaochen@nuist.edu.cn

崔骁松, 博士研究生, 主要研究方向为智能网络流量理论及其关键技术。

E-mail: 202211180002@nusit.edu.cn

潘成胜, 博士, 教授, 主要研究方向为智能网络流量理论。

E-mail: 003150@nuist.edu.cn