

一种路由器队列调度算法 LW-WFQ 的研究

杨晓萍^{1,2} 钮 洋² 胡 玉²

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130022)¹

(吉林大学通信工程学院 长春 130012)²

摘 要 针对路由器主动队列调度算法 WFQ (Weighted Fair Queuing) 在链路拥塞时无法保证低速率实时业务的 QoS (Quality of Service) 要求以及实时性业务突发时会导致延迟抖动加大的问题, 提出了一种队长和权值调整的算法 LW-WFQ。该算法增加了自适应队列管理器和应对突发机制, 减少了分组的排队等待时间。最后以 NS2 为平台, 对 WFQ 及 LW-WFQ 算法的性能进行大量的仿真对比分析, 调节并确定合适的参数, 实验结果证明 LW-WFQ 算法在延迟、抖动等方面的性能有一定程度的提高。

关键词 通信技术, 队列调度算法, 加权公平排队 (WFQ), 路由器

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

Research of Router Queue Scheduling Algorithm LW-WFQ

YANG Xiao-ping^{1,2} NIU Yang² HU Yu²

(State Key Laboratory of Automotive Simulation & Control, Jilin University, Changchun 130022, China)¹

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)²

Abstract The router active Queue scheduling algorithm WFQ (Weighted Fair Queuing) can no more guarantee the QoS requirements of low-rate real-time traffic and a real-time burst will lead to increased delay and jitter problem as congestion occurs, so an algorithm named LW-WFQ (WFQ Base on Length and Weight) was proposed. The algorithm adds an adaptive queue manager and mechanisms which can deal with burst to reduce the waiting time of packets. NS2 is last used as a platform to compare a great deal of performance simulation of WFQ and LW-WFQ, and then we regulated and confirmed the parameters to prove that LW-WFQ had certainly improved the performance of delay and jitter.

Keywords Communication technology, Queue scheduling algorithm, WFQ, Router

随着网络应用种类的增加, 人们对网络服务质量 QoS 的要求越来越高, QoS 保证技术成为研究的重点, 而路由器队列调度算法正是提供服务质量保证的重要机制之一^[1]。队列调度算法是从所有等待服务的队列中, 按照一定的标准选择分组输出到链路上去, 主要是用来管理各流之间带宽的分配^[2]。目前, 比较常用的调度算法有: 先到先服务 FCFS (First Come First Service)、基于轮循的调度算法、基于 GPS (Generalized Processor Sharing) 模型的调度算法、基于时延的调度算法以及核心无状态的 CSFQ 等。

GPS 模型是对流媒体建立的一种理想化的模型。此模型基于如下 3 个假设^[3]: (1) 队列中的业务元无限可分; (2) 队列间具有相同优先级, 调度器可以按照一定的共享比例同时服务所有队列; (3) 为每个业务流提供端到端的延迟上限。但实际网络环境中业务元最小只能细化到分组, 而且对每个分组的的服务是连续的, 不能被中断, 所以 GPS 是无法在实际网络环境中实现的。PFQ (Predict Fair Queuing) 是依据 GPS 模型的近似算法, 由于它能够根据各业务流的权重进行区分服

务而受到广泛关注, 其中最典型的是 WFQ 算法^[4]。

国内大部分对 WFQ 算法的改进研究都是针对链路带宽的分配问题的, 比较典型的如 SCWFQ 算法, 它通过分析分组的包头信息来识别业务流是否为实时性业务流, 然后充分满足实时性业务流的带宽需求, 保证业务流的 QoS 需求。还有一种漏桶 + WFQ 的调度管理策略, 该算法可以为不同的网络数据流在提供 QoS 保证的前提下合理地分配带宽, 但这两种方法都存在友好性的问题。FWFQ 算法加入了权值的改进方法, 在延迟和抖动方面取得了一定的成效, 也满足更多的公平性要求, 但是权值的改变是一个固定值, 不能达到动态调整的目的^[5-7]。本文针对 WFQ 算法无法保证低速率实时业务的 QoS 以及应对业务流突发的问题, 提出将队长和权值动态结合的改进算法 LW-WFQ。

1 WFQ 算法

1.1 算法工作原理

WFQ 是通过计算分组的虚拟结束时间、调度转发虚拟结

本文受教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队、汽车控制的理论、方法与关键技术 (IRT1017), 吉林省自然科学基金项目 (201115030), 吉林省重点科技攻关项目 (20140204087GX) 资助。

杨晓萍 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为网络数据传输的优化控制, E-mail: yxp@jlu.edu.cn; 钮 洋 (1988—), 女, 硕士生, 主要研究方向为网络数据流优化控制; 胡 玉 (1990—), 女, 硕士生, 主要研究方向为路由器队列调度。

束时间最小分组来近似得到 GPS 的调度算法^[8]。该算法引入了虚拟时钟和虚拟时间函数的概念,虚拟时间函数是一个随时间变化的函数,以 t_j 表示第 j 个事件发生的时间, B_j 表示 (t_{j-1}, t_j) 期间处于积压状态(backlogged)的会话集合, ϕ_i 为描述会话 i 的正实数,被称为服务共享参数(预约带宽)或权重,那么系统虚拟时钟 $V(t)$ 的计算表达式为^[9]:

$$\begin{cases} V(0)=0, V(t_{j-1}+\tau)=V(t_{j-1})+\frac{\tau}{\sum_{i \in B_j} \phi_i} \\ \tau \leq t_j - t_{j-1}, j=2, 3, \dots \end{cases} \quad (1)$$

WFQ 在每个分组到达队列的时刻赋予其一个虚拟开始时间和一个虚拟完成时间。

设 p_i^k 表示连接 i 的第 k 个分组, a_i^k 表示 p_i^k 的到达时间, S_i^k 表示 p_i^k 的服务开始时间标签, F_i^k 表示 p_i^k 的结束服务时间标签, L_i^k 表示 p_i^k 的分组长度, r_i 表示连接 i 的预约的服务速率,对所有会话有 $F_i^0=0$,那么 p_i^k 的虚拟开始时间 S_i^k 和虚拟结束时间 F_i^k 的计算如下:

$$\begin{cases} S_i^k = \max(F_i^{k-1}, V(a_i^k)) \\ F_i^k = S_i^k + \frac{L_i^k}{r_i} \end{cases} \quad (2)$$

由文献^[10]以及式(2)可以知道,虚拟结束时间的大小与数据流预约的服务速率有直接的关系,服务速率越小,分组的虚拟结束时间就会越大,也就意味着服务等待的时间越长,排队延迟越大。

1.2 算法存在的缺陷

因为 WFQ 算法是一种公平类的调度算法^[11],它没有区分业务流优先级的功能,每个数据流严格按照权值比例公平地享有带宽。数据流获得的实际服务速率 g_i 由式(3)决定:

$$\begin{cases} g_i \approx \rho_i, & C \geq \sum_{i=1}^N \rho_i \\ g_i \approx \frac{\rho_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i} \times C, & C < \sum_{i=1}^N \rho_i \end{cases} \quad (3)$$

其中, ρ_i 为理论获得的带宽, C 为链路总带宽。从上式可以看出,当带宽不足时,低速率的一些实时性数据流将会受到很大的影响,造成不公平。所以在链路拥塞的情况下,WFQ 算法是无法保证低速率的实时业务的 QoS 要求的。

WFQ 算法中每一个数据流都拥有一个固定的权值^[12],权值作用在带宽分配以及虚拟时间的计算上,在开始运行时根据其权值为每一个数据流分配一个固定的带宽,在后期调度的过程中用来计算分组的虚拟结束时间。分析式(1)可得:当实时性的业务突发时,由于 WFQ 算法的权值没有发生变化,因此分组虚拟结束时间和分配的网络带宽都没有变化,也就意味着分组的转发顺序没有发生变化,导致后面的分组具有更长的等待时间和更大的延迟抖动。

2 LW-WFQ 算法的改进

针对 WFQ 算法的不足,本文提出了一种基于队长和权值调整的算法 LW-WFQ (WFQ Base on Length and Weight)。LW-WFQ 和 WFQ 主要的不同之处在于分组入队之后所属队列的最大队长以及出现业务流突发时的应对策略。图 1 为 LW-WFQ 的算法流程图。其中灰色的部分是在 WFQ 算法基础之上增加的功能部分。

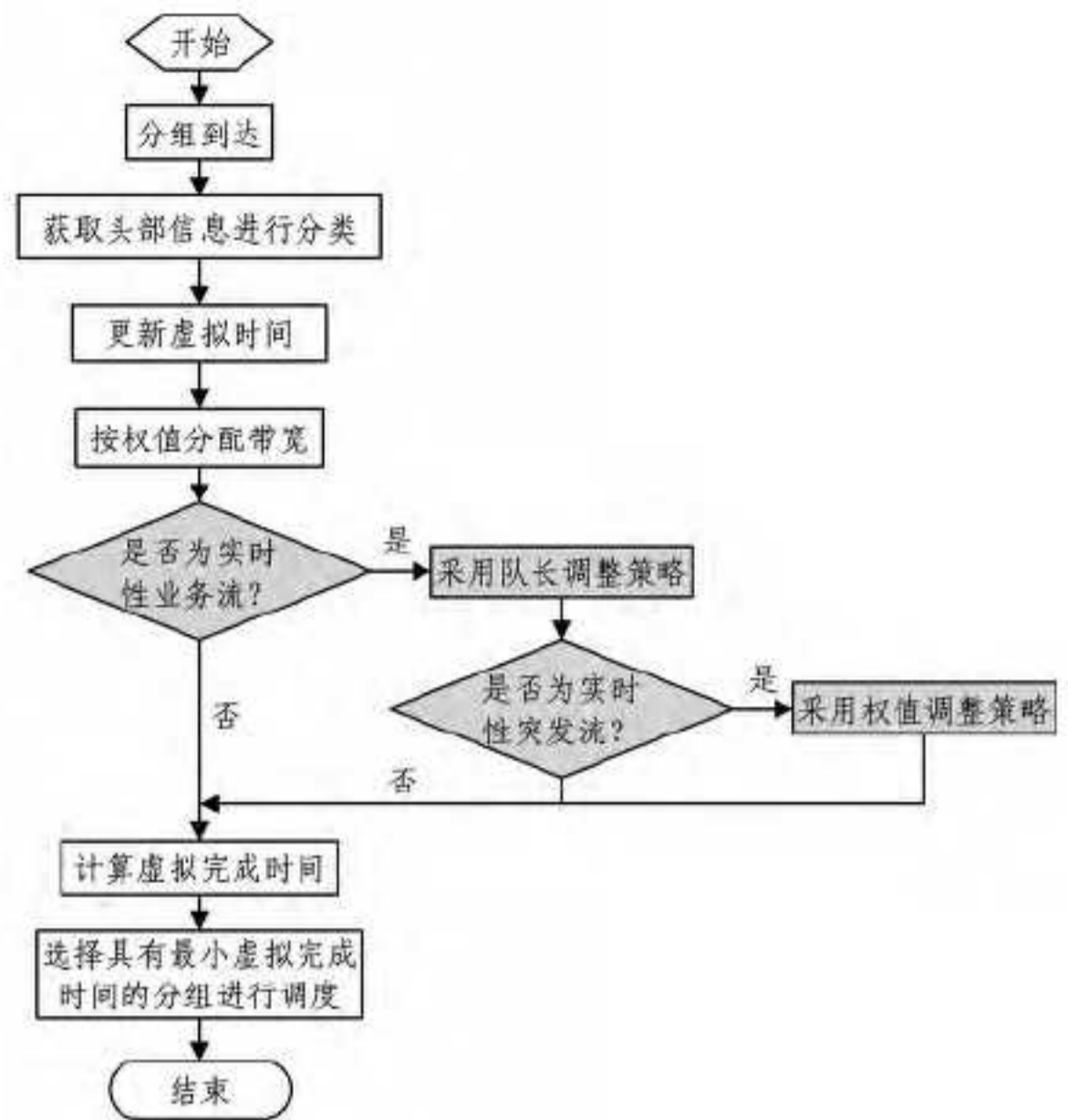


图 1 LW-WFQ 算法流程

当分组进入队列后, LW-WFQ 根据分组包头的信息判定业务流是否属于实时性的业务流,如果属于实时性业务流则采取队长调整策略,如果存在突发,则采用权值调整策略,否则正常进入 WFQ 转发流程。

2.1 数据流队长调整策略

队长策略上的改进主要在于分组经过分类器后入队的过程中增加了一个自适应的队列管理器。LW-WFQ 算法通过读取数据包的包头信息区分数据流优先等级,在此基础上引入丢包参数 α ,通过计算业务流的实时丢包率与 α 进行比较,从而动态地改变队列的最大队长,降低分组的延迟以及抖动等。图 2 为队长调整策略的结构图。

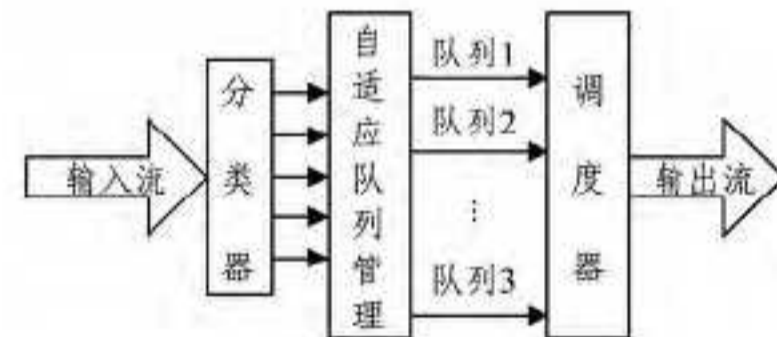


图 2 队长调整策略的结构图

2.2 业务流权值调整策略

根据文献^[13]可得,式(2)等同于式(4):

$$\begin{cases} S_i^k = \max(F_i^{k-1}, V(a_i^k)) \\ F_i^k = S_i^k + \frac{L_i^k}{\omega_i} \end{cases} \quad (4)$$

当业务流存在突发时, LW-WFQ 的调整方法为:令突发业务流分组的权值等于该分组进入队列时该队列的最大队长 $(QL)_{\max}$ 与非突发情况下该队列的权值 ω_i 的乘积:

$$\omega_i^k = (QL)_{\max} \times \omega_i \quad (5)$$

由式(2)可得,权值与虚拟结束时间成反比,当分组的权值增大时,虚拟结束时间就会减小,所以分组在路由器中排队的位置有可能比其他队列分组的位置提前,从而减少了分组排队的时间。因为在每个队列中分组都是遵循 FCFS 策略,所以即使当分组的权值发生变化,计算出来的虚拟结束时间发生了变化,所有分组离去的顺序也不会发生变化,因此调度器能够准确地从队列中调度下一个离开的分组。

LW-WFQ 算法判定业务流突发^[14]的步骤如下:

(1) 增加一个计数器和一个计时器。计数器用来记录到达的分组数目,记录周期设为 30,计时器记录第一个分组和最后一个分组的到达时间 t_1 和 t_2 。设 T_1 为第一个周期内最后一个分组和第一个分组的到达时间间隔,即 $T_1 = t_2 - t_1$;同理可以计算 T_2, T_3, \dots 。

(2) 设 T 为第 n 个周期的时间间隔 T_n 与第一个周期的时间间隔 T_1 的差值,即 $T = T_n - T_1$,计算差值 T 。

(3) 判断差值 T 。当 $T \geq 0$ 时,业务流没有突发;当 $T < 0$ 时,业务流存在突发。

3 仿真实验

3.1 实验环境

实验采用 Linux 下的网络仿真软件 NS2(Network Simulation Version2) 作为仿真工具,运用 C++ 语言将改进算法模块编译到 NS2 中,建立 Otel 脚本文件,运行得出 Trace 文件,并利用 GAWK 和 Gnuplot 等工具分析处理 Trace 文件,最后通过曲线和图表的方式给出仿真结果。

3.2 算法仿真

实验采用如图 3 所示的拓扑结构。

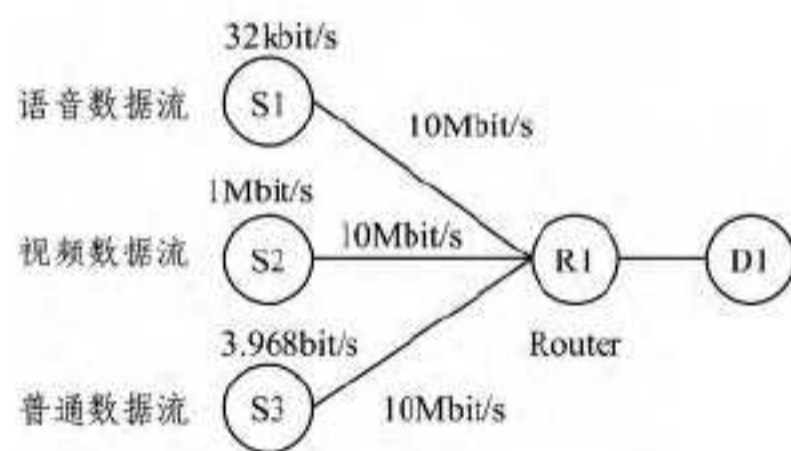


图 3 实验网络拓扑图

源端 S1、S2、S3 分别发送语音、视频和普通数据业务流。R1、D1 为路由器和接收端。源端使用 UDP 协议发送数据,其传输的平均速率分别为 32kbit/s、1Mbit/s、3.968Mbit/s。在仿真实验中,发送的数据采用 CBR(Constant Bytes Rate Stream)流,仿真中通过修改 TCL 文件来设置发送端分组长度和发送速率等参数。本实验将 3 种业务流的分组长度设定为 512B、1000B 和 1024B,即分组最大长度为 1024B。R1 到 D1 间链路带宽分别设置为 5.0Mbit/s(带宽充足)和 4.5 Mbit/s(带宽不足)两种情况,且在每种带宽下分别设置突发速率为 60kbit/s 和 80kbit/s。路由器 R1 分别使用 WFQ 和 LW-WFQ 两种算法,仿真时间为 30s,第 10s 开始突发。

队列调度算法的性能指标主要有时延性能、时延抖动和公平性等,可以通过对比分析这几个性能指标,判断算法的好坏。实验以语音业务流为例进行仿真,在相同条件下对两种算法的延迟、抖动和丢包率进行对比分析。仿真实验采用带宽充足和带宽不足两种情况是为了检验突发速率的大小在不同带宽下业务流延迟和抖动的规律是否存在差异。

图 4 是突发速率为 60kbit/s 时两种带宽下语音业务流的延迟比较。从仿真中我们可以看出业务流的突发对于 WFQ 算法的影响是比较大的,LW-WFQ 则小很多。两种算法的延迟都在 10s 开始上升,WFQ 最先达到稳定状态,LW-WFQ 经过 2~3s 的调节,也进入了稳定状态,并且延迟要比 WFQ 算法下小很多。

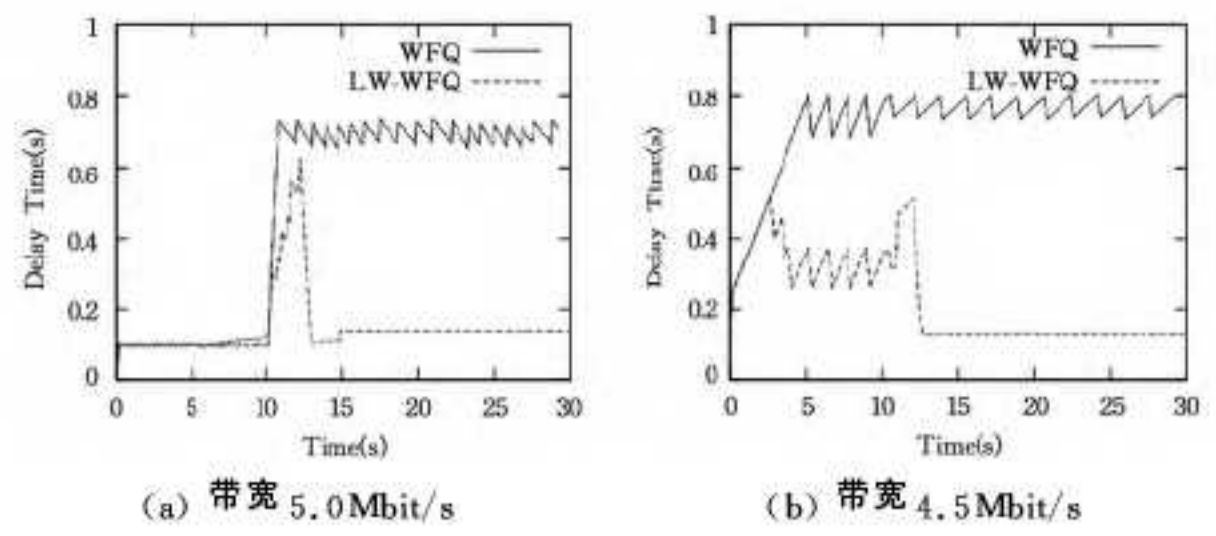


图 4 突发速率为 60kbit/s 时不同带宽下两种算法的延迟对比

图 5 是突发速率为 60kbit/s 时两种带宽下语音业务流的抖动比较。前 10s 两种算法抖动变化均不大,10s 开始有突发后,抖动增大。其中 WFQ 很快进入稳定状态,LW-WFQ 大约第 12s 进入稳定状态,抖动的幅度远小于 WFQ,抖动值约 0.05ms。

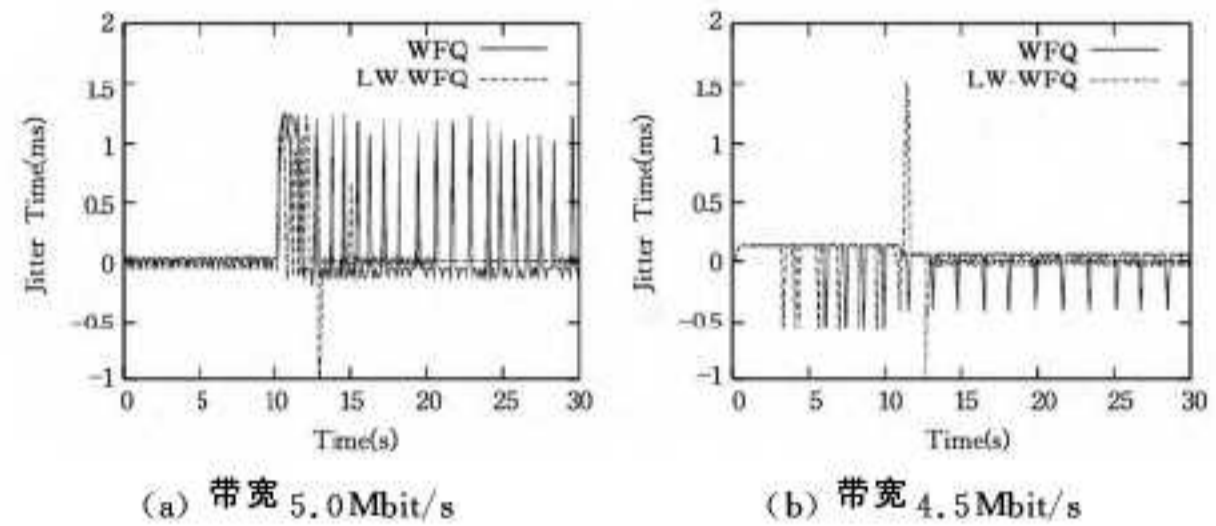


图 5 突发速率为 60kbit/s 时不同带宽下两种算法的抖动对比

图 6 为突发速率为 80kbit/s 时两种带宽下语音业务流的延迟比较。两种算法下的延迟在 10s 开始增大,大约 22s 达到稳定状态。从仿真中可以看出 LW-WFQ 算法下的延迟稍小,但是从突发到稳定所需的时间以及延迟都远大于突发速率为 60kbit/s 时的表现。

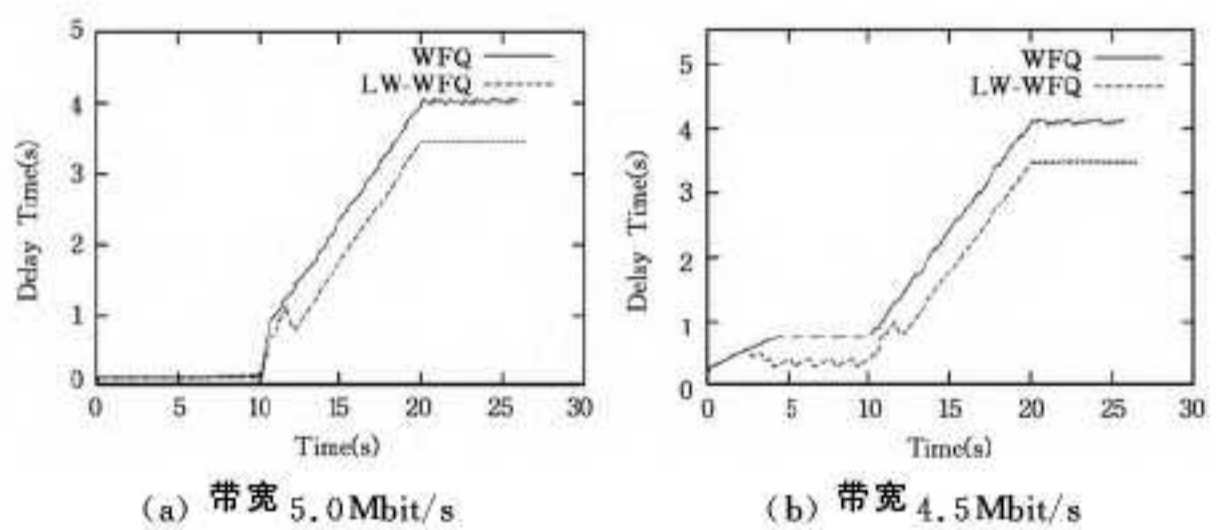


图 6 突发速率为 80kbit/s 时不同带宽下两种算法的延迟对比

图 7 为突发速率为 80kbit/s 时两种带宽下语音业务流的抖动比较。两种算法从 10s 开始,抖动明显增大,而且 LW-WFQ 的性能并没有比 WFQ 好很多,两种算法的调整时间以及抖动的幅度也大于突发速率为 60kbit/s 时的表现。

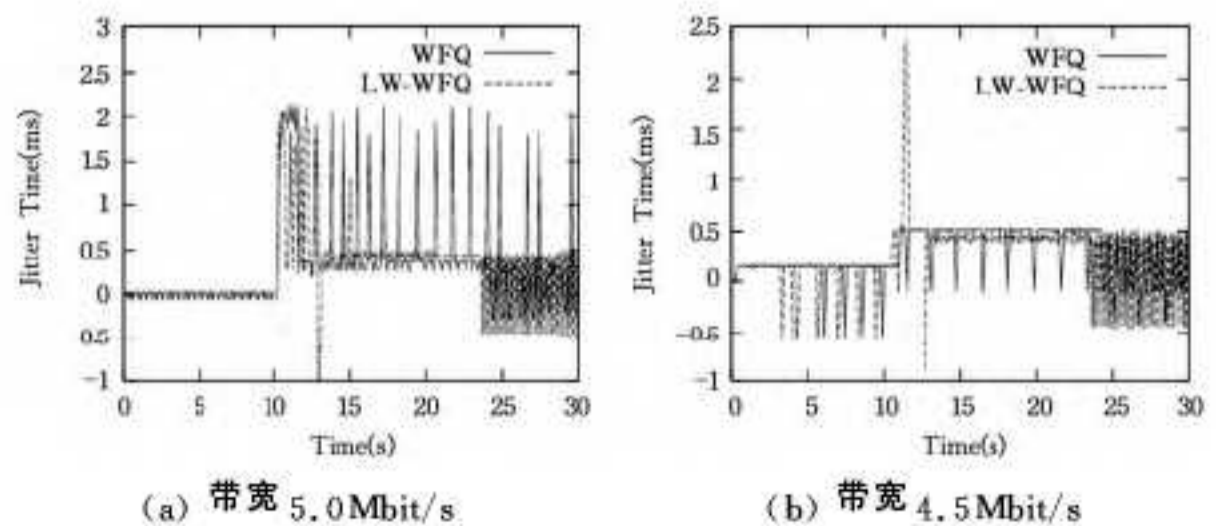


图 7 突发速率为 80kbit/s 时不同带宽下两种算法的抖动对比

图 8 比较了链路带宽为 5.0Mbit/s 和 4.5Mbit/s 时 WFQ 算法和 LW-WFQ 算法下的丢包率。从表中可以明显

(下转第 311 页)

[10] Le Ji-lin, Lui J C S, Chiu Dah-ming. DCAR: Distributed Coding-Aware Routing in Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing(S1063-6927), 2010, 9(4): 596-608

[11] 陈贵海, 李宏兴, 韩松, 等. 多跳无线网络中基于网络编码的多路径路由[J]. 软件学报, 2010, 21(8): 1908-1919

[12] Yan Yan, Zhang Bao-xian, Zheng Jun, et al. CORE: A Coding-Aware Opportunistic Routing Mechanism for Wireless Mesh Networks[J]. IEEE Wireless Communications(S1536-1284), 2010, 17(3): 96-103

[13] Jian zhang, Chen Yuan-zhu, Marsic I. MAC-layer Proactive Mixing for Network Coding in Multi-hop Wireless Networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(2): 196-207

[14] Seferoglu H, Markopoulou A. Video-Aware Opportunistic Network Coding over Wireless Networks[J]. IEEE Journal on selected areas in Communications(S0733-8716), 2009, 27(5): 713-728

[15] Rayanchu S, Sen S. Loss-aware network coding for unicast wireless sessions: design, implementation, and performance evaluation[C]// Proceedings of the 2008 ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York, USA, 2008: 85-96

[16] Liang Y J, Apostolopoulos J G, Girod B. Analysis of packet loss for Compressed Video: Does Burst-Length Matter? [C]// Proceedings of IEEE ICASSP (S1520-6149). Hong Kong, April 2003(5): 684-687

(上接第 272 页)

看出不同带宽下 LW-WFQ 算法的丢包率都小于 WFQ 算法。

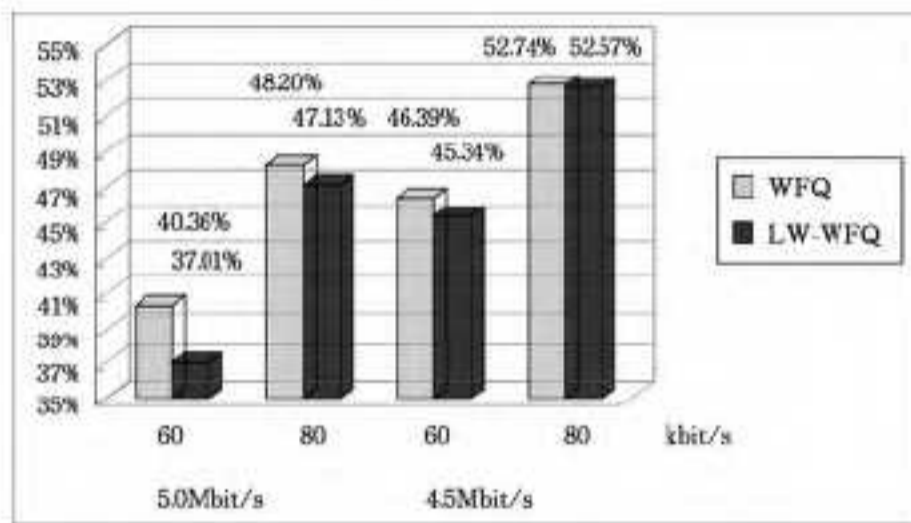


图 8 不同链路带宽和突发速率下两种算法的丢包率对比

从上面的仿真图中我们发现 LW-WFQ 在业务流出现突发的情况下性能比 WFQ 要好。这是因为 WFQ 在面对业务流突发的时候没有采用其他的调整策略,导致了网络拥塞加剧;LW-WFQ 通过队长和权值的双重调整在出现突发时进行了短暂的调整便进入了比较稳定的状态,并且性能优于 WFQ。实验带宽分别为 5.0Mbit/s(带宽充足)和 4.5Mbit/s(带宽不足)两种情况,当突发速率为 60kbit/s 时,算法性能改进比较明显;当突发速率为 80kbit/s 时,无论带宽是哪种状态,LW-WFQ 在延迟和抖动性能上都与 WFQ 性能相近,这说明算法的处理能力有一个范围,当超出范围的时候算法将失去效果。

结束语 LW-WFQ 通过对业务流实时性的分类克服了 WFQ 算法不区分会话优先级的缺陷。当存在实时性业务流时,首先考虑实时业务的延迟需要,通过添加自适应队列管理器对业务流的最大队长进行调整,尽可能满足实时业务的 QoS 要求。同时,LW-WFQ 算法在应对实时性业务流突发的策略上增加了权值的调整,降低了分组的虚拟结束时间,争取改变分组在流间排队等待的位置,加速分组的转发。权值调整策略中最大队长读取的值是自适应对列管理器实时调整的最大队长,所以在面对业务流突发的时候,权值的改变是根据当时的网络情况进行动态调整,不是固定不变的,充分地达到了队长和权值动态结合的目的。此外,在整个转发的过程中 LW-WFQ 没有侵占非实时性业务流的带宽,严格按照业务流初始的权值进行带宽的分配,保证了流间的友好性。从实验仿真结果可以看出,LW-WFQ 算法能够较好地控制实时业务

流的延迟和抖动,降低了链路丢包率,改进了实时业务流的 QoS 性能。

参考文献

[1] 杨永斌,唐亮贵. 队列调度算法在网络中的应用研究[J]. 计算机科学, 2005(7): 56-58

[2] 徐昌彪,鲜永菊. 计算机网络中的拥塞控制与流量控制[M]. 北京,人民邮电出版社, 2007

[3] 尹德斌,谢剑英. 一种新的加权公平队列调度算法[J]. 计算机工程, 2008(4): 28-30

[4] Bennett J C R, Zhang H. Hierarchical Packet Fair Queueing Algorithms[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(5): 675-689

[5] Martinez R, Alfaro F J, Sánchez J L. Evaluating several implementations for the AS minimum bandwidth egress link scheduler [C]// 15th International Conference on Computer Communications and Networks, 2006(ICCCN 2006). IEEE, 2006: 169-176

[6] 许玲. 基于漏桶+WFQ 的 QoS 调度策略分析[J]. 微机发展, 2003(8): 98-100

[7] 王云涛,方建安,张晓辉,等. 基于 TCP Vegas 的网络拥塞控制改进算法[J]. 计算机应用研究, 2009(12): 4645-4647

[8] 董雪源,王晓茹. 用于电力系统信息综合传输的改进加权公平队列调度算法[J]. 中国电机工程学报, 2012(22): 149-156+6

[9] 王红民. 多决策树分类的队列调度算法研究[D]. 郑州,河南工业大学, 2011

[10] 许孙娟,叶家骏,邹君妮. 一种基于优先级共享带宽的加权公平排队算法[J]. 上海大学学报,自然科学版, 2006(2): 1-4

[11] 闵捷,周红琼,王晓东. 一种基于优先级的加权公平队列调度算法[J]. 宁波大学学报,理工版, 2012(2): 42-46

[12] Magana E, Morato D, Varaiya P. Tuning the weights in WFQ schedulers for the maximization of carried best effort traffic[C]// 10th International Conference on Telecommunications, 2003. Piscataway, N J: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003: 917-922

[13] 张伟. 集成服务网络中具有 QoS 支持的分组公平调度算法的研究与实现[D]. 长春,吉林大学, 2004

[14] 李苗,李冬妮,王光兴. 确保 EF 业务服务质量的新型路由结构[J]. 计算机科学, 2004(10): 32-34