

缓存管理算法及其在无线网络中的应用研究

陈 远, 李乐民

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室 成都 610054)

【摘要】对基于分组丢弃技术的缓存管理算法作了系统的分类,介绍了包括新的基于控制理论和模糊逻辑控制的几种主要的缓存管理算法及其改进算法,并就存在的问题和不足提出了研究建议。提出了适用于无线网络的缓存管理算法设计的四点建议和基本思路。

关键词 分组丢弃; 缓存管理; 主动队列管理; 传输控制协议

中图分类号 TN915.04 文献标识码 A

Buffer Management Algorithms and Its Application in Wireless Networks

Chen Yuan, Li Lemin

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks UEST of China, Ministry of Education Chengdu 610054)

Abstract A systematic classification method aimed at packet-dropping-based buffer management algorithms is present, some dominant algorithms and their variations in today's network are introduced, including some new buffer management algorithms which based on control theories and fuzzy logic, and gives advice on future research for solving the present problems. Because of unique issues in the wireless channel, some modifications are needed when apply these algorithms to wireless network. We present some advices and basic thoughts on this problem.

Key words packet dropping; buffer management; active queue management; transmission control protocol

Internet的分组转发机制基于IP协议所提供的无连接端到端服务,这种无连接的设计赋予了网络极好的伸缩性。然而,如果不对网络的运作规律加以研究并据此改善其运行效果,在重负荷时,网络所能提供的有效吞吐率将会急剧下降,甚至还会发生拥塞崩溃。

缓存管理通常是指利用特定的技术和算法,维护缓存的占用量及缓存的分配方式。在一般情况下,数据源端和目的端将分组丢失作为网络拥塞的信号,据此调整发送速率,所以,从反馈控制的角度来看,如果数据源支持TCP或与之相似的端到端协议,缓存管理所采用的有针对性的分组丢弃就可以对经过该缓存的流的通信效果发生影响,而这正是基于分组丢弃技术的缓存管理所能发挥的一个重要作用。

本文对近几年内出现的分组丢弃缓存管理技术做出一个较为系统的归纳总结,分析比较了几种主要的缓存管理机制的基本原理以及各自优缺点,给出研究建议以供参考,并对将Internet中的缓存管理算法应用到无线网络中提出了需要改进的方向和几点基本思路。

收稿日期: 2004-07-09

基金项目: 国家自然科学基金委员会与香港研究资助局联合科研基金资助项目(60218002)

作者简介: 陈 远(1975-),男,博士生,主要从事IP网络中的服务质量、无线资源管理方面的研究。

1 现有分组丢弃缓存管理算法

最常用的缓存管理策略是尾丢弃(Tail Drop, TD),从实现复杂度上看,它是最简单的,然而尾丢弃会造成业务流对缓存的死锁和产生全局同步效应;同时缓存常时间处于满状态,导致较长的排队等待时延。因此,如何在减小排队时延的同时保证较高的吞吐量成为设计缓存管理算法的主要目标。主动队列管理(Active Queue Management, AQM)采用拥塞避免机制,主动的而非响应性的进行分组丢弃被证明是一种有效的手段,成为近年来端到端拥塞控制研究中的一个热点。

1.1 随机早期检测及其改进算法^[1,2]

随机早期检测(Random Early Detection, RED)是目前研究得最多的一类主动队列管理技术,它采用概率判定机制主动地有选择地丢弃某些分组,利用TCP对发送速率的自适应调节能力,让某些源端降低发送速率,及时阻止拥塞的恶化,并将平均排队时延控制在一定的范围内。RED采用指数加权滑动平均来计算平均队长 avg ,由平均队长决定分组丢弃概率:如果 avg 小于最小门限,允许分组进入缓存;如果 avg 位于最小门限和最大门限之间,计算分组丢弃概率;如果 avg 大于最大门限,分组被丢弃。

虽然RED的有效性经过了实践的验证,但仍然存在一些缺陷。如RED算法的性能对网络状况和参数敏感,很难给出优化的参数配置,算法的稳定性和公平性也存在一些问题,因此,很多RED的改进算法应运而生。将RED的改进算法分成三类:

1) 增强自适应能力的改进RED算法。当流的数目较多时,要维持队列长度必须设置较大的丢弃概率,这样会降低系统的吞吐量。线性的丢弃概率和固定的门限值造成这一现象的根本原因。自适应RED(Adaptive-RED)是一种典型的RED改进算法,它根据网络拥塞程度相应的增大或减小丢弃概率。稳定RED(Stabilized-RED)等算法使用类似的思想对RED进行改进,增强其对网络流量负载变化的自适应能力。

2) 提高公平性的改进RED算法。RED没有提供公平性的保证,其随机选择机制使得发送速率较大的用户流得到的丢弃概率也较大。这种隐含的公平性是比较脆弱的,不同分组长度、不同往返时延(Round Trip Time, RTT)差异、网络中的非响应流都会损害其公平性。平衡RED(Balanced-RED)算法对速率较高的流施加较大的丢弃概率,而流RED(Flow-RED)算法限制单个流的缓存占用量,在一定程度上提高了RED算法的公平性。

3) 支持多业务的改进RED算法。为了满足用户服务区分需要,具有高低优先级位的RED(RED with In/Out bit, RIO)算法将到达分组分为两类,针对不同优先级的分组实施不同的RED算法。基于类似的思想,加权的RED(Weighted-RED)将优先级分得更细,能提供更灵活的服务优先级控制。

1.2 基于控制理论的分组丢弃算法

对RED及其改进算法的研究在很大程度上是依赖于直觉,缺乏全面系统的运用理论工具对算法本身进行分析和研究,借助适当的理论以保证算法的性能是非常必要的。从控制系统的角度分析,网络状态参数具有时变性,缓存管理要求在高吞吐量和低时延之间做出平衡,维持队列长度在期望值之内,控制理论中的设计和分析方法对设计性能良好的缓存管理策略具有很强的理论指导性。比例积分控制器(Proportional Integral, PI)^[3]、随机指数标记(Random Early Marking, REM)^[4]、自适应虚拟队列(Adaptive Virtual Queue, AVQ)等算法在这方面进行了探索性的研究。

1) PI算法将TCP/AQM模型简化为线性系统,利用比例积分控制器将队列长度控制在目标值。如果队长高于目标值,在采样间隔内分组丢弃概率将增加,同时,如果上次采样后队列长度增加,分组丢弃概率也随之增加;反之,如果队长低于目标值或者队长减小,分组丢弃概率也减小。

2) REM算法采用价格(Price)的概念来探测和控制网络的拥塞状态。价格的变化由两方面因素决定:实际队长与期望队长之差;输入速率与输出速率之差。单节点的丢弃概率与价格之间呈指数关系。对于端到端业务流,其丢弃概率与链路上价格总和呈近似的比例关系。

1.3 基于模糊逻辑控制的分组丢弃算法

在现代控制理论中,对于具有动态变化特性、难于建立精确分析模型的系统常常采用模糊逻辑进行控制。由于网络的动态特性及负载的变化,缓存管理算法的参数难于确定、也很难适应网络的变化,因此最

近的文献中提出了一些基于模糊逻辑控制的缓存管理算法。

文献[5]给出了一种典型的模糊逻辑控制的缓存管理算法,它采用缓存队列长度和长度变化作为模糊控制输入,在根据队列长度计算丢弃概率时进一步考虑队列长度是增加还是减小决定相应的丢弃概率,从而更客观地反映出拥塞控制的不同情形,具有更好的早期预测能力和自适应性。

不同的模糊逻辑控制算法的主要区别在于如何定义模糊规则以及如何配置隶属度函数的参数。文献中大多采用类似上述算法的模糊规则,通过缓存队列长度和长度变化作为输入,区别只是在于参数的不同。文献[5]提出了采用基因算法对参数进行配置的方法,而文献[6]则采用缓存队列长度这唯一的输入进行模糊控制,并提出根据计算丢弃概率和实际丢弃概率的差值动态调整模糊规则以适应网络动态变化的思路。

2 设计分组丢弃缓存管理算法时需要注意的问题

现有的分组丢弃算法主要以提高系统有效吞吐量和减小排队时延为设计目标,在进行分析和仿真时大多基于以下假设:所有业务流都是标准的TCP流,且一直都有数据发送或者按照预定的时间启动/停止;所有业务流分组具有相同大小;分析和仿真时业务流数量较小,甚至只有单一TCP流。这些假设影响了算法设计的准确性和实用性。

在设计分组丢弃缓存管理算法时,除了考虑吞吐量和时延这两个指标外,还应该考虑:

1) 算法的公平性,包括不同服务等级之间、相同服务等级的不同业务流之间的公平性。不同的用户应该按照预先定义的服务质量要求公平地分享网络资源。同时公平性能一定程度上提供业务流之间的隔离,防止恶意抢占网络资源,提供保护功能。

2) 算法的稳定性和鲁棒性。一方面算法要适应网络流量负载的变化,目前文献中对RED的改进算法和其他基于控制理论的缓存管理算法大多集中在解决该问题上;另一方面,当网络中有其他非响应流时算法应仍保持稳定,现有文献一般通过流量监控对TCP非友好流等不受缓存管理算法控制的业务流进行检查,并依据相应的策略对其进行惩罚。设计时考虑公平性的缓存管理算法如Balanced-RED、Flow-RED等对TCP友好流都有一定的保护作用。

3) 算法应该对突发业务有较强的适应性。一般认为,业务流的突发性对缓存管理算法的性能有负面的影响。现在网络中大量存在着短时突发、具有ON-OFF特性的网络类(Web-Like)业务,当这类业务流的分组进入缓存时,会影响其他业务流的性能,同时突发业务流的速率会随缓存空间占用量而发生大幅度的振荡。所以,缓存管理算法也应该对突发业务流进行平滑:当新的业务进入网络时,能有较小的响应时间,较快的与其他业务流分享网络资源;即使网络负载较轻,也要通过缓存管理算法对突发业务进行限制,防止其占用过多的缓存空间,影响其他的业务流;当网络拥塞时,避免连续大量的丢弃突发业务的分组,造成速率的急剧下降。

3 分组丢弃缓存管理算法在无线网络中的应用

随着无线网络的飞速发展和人们对服务质量的要求,无线网络逐渐从电路交换向分组交换演进。无线网络上的业务也不仅仅局限于恒定速率的话音业务,高速率、高突发性的数据业务将逐渐成为网络业务的主流。传统的呼叫接纳控制和分组调度并不能避免高突发性业务使网络发生拥塞的可能,因此无线网络中同样需要合理的拥塞控制算法对缓存进行管理,尽可能的避免和缓解拥塞,从而保证服务质量。然而无线信道与有线信道相比具有很大的特殊性,且是随时间变化的,采用分组丢弃算法选择分组进行丢弃不一定能取得好的结果。因此基于无线网络的特殊性,对无线网络中的缓存管理算法设计提出以下四点考虑:

1) 流控协议的影响。TCP协议最早设计用于有线网络,分组丢失可认为主要由于拥塞造成,其加性增加乘性减小(Additive Increase Multiplicative Decrease, AIMD)的策略具有较好的性能。然而无线网络中分组丢失可能由于链路错误造成,采用AIMD策略会降低TCP的性能,分组丢弃算法的可靠性值得怀疑。研究无线TCP的改进算法也是最近研究的热点,利用显式拥塞指示(Explicit Congestion Notification, ECN)、带宽估计、时延抖动等信息对TCP进行改进能一定程度上区分分组丢失是由于网络错误还是拥塞造成的。在设计无线网络的拥塞控制算法时,兼顾使用的无线TCP协议会提高系统性能。

2) 信道条件的影响。丢弃目前信道较差的业务流的分组, 从而通过流控机制降低其发送速率, 而保留信道条件较好的业务流, 将会提高系统的吞吐量, 然而这样会造成信道条件较差的用户的服务质量得不到保证, 因此无线网络中的分组丢弃算法必须在吞吐量和公平性取得均衡。本文提出了一种兼顾信道条件和公平性的无线分组丢弃算法, 根据缓存的拥塞情况自适应的在信道条件和公平性之间取得平衡^[7]。

3) 多瓶颈时设计的考虑。一般缓存管理算法只考虑单一瓶颈, 无线网络(无线局域网、自组织网等多跳网络)中由于信道容量有限, 而且可能出现某些信道条件恶劣的情况, 多瓶颈出现的机会远大于有线网络。REM的价格考虑了端到端整条链路的拥塞情况, 这在无线网络中有一定的参考价值。如何把分段的逐跳链路状况考虑到“价格”中去值得进一步讨论。

4) 如何提供有效服务质量(Quality of Service, QoS)保证。以时延保证为例, 无线网络中需保证发生传输错误重传分组的时延也在允许的最大时延范围之内; 同时, 由于不同用户的速率可能并不相同, 且随网络负载和信道条件动态变化, 因此缓存管理算法需具有对信道速率变化的自适应性, 以保证具有相同的时延。分组调度算法和缓存管理密切相关, 而3G无线网络容量受干扰和功率的限制, 因此缓存管理算法在提供有效的QoS保证时, 需联合考虑调度算法、功率控制的影响。

4 结束语

本文对现有的几种主要的分组丢弃技术及其衍生算法作了归纳总结。在设计新的基于分组丢弃的缓存管理算法时, 算法的公平性、对非响应流的抑制作用以及对突发业务的支持也是衡量算法性能的重要标准。将Internet中的缓存管理算法应用到无线网络时, 结合信道条件和分组重传机制是改进算法性能的重要途径; 同时, 联合调度算法、功率控制的缓存管理算法是提供QoS保证的有效手段。

参 考 文 献

- [1] 林 闯, 单志广, 任丰原. 计算机网络的服务质量(QoS)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [2] 温蜀山. Internet中基于分组丢弃技术的缓存管理算法研究: 学位论文[D]. 成都: 电子科技大学, 2002
- [3] Hollot C V, Misra V. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows[C]. Proc IEEE INFOCOM 2001, 2001. 1 726-1 734
- [4] Athuraliya S, Li V H, Low S H. REM: active queue management [J]. IEEE Network, 2001, 15(3): 48-53
- [5] Fatta D G, Hoffmann F, Re Lo G, *et al.* A genetic algorithm for the design of a fuzzy controller for active queue management [J]. IEEE Trans on System, Man, and Cybernetic, 2003, 33(3): 313-324
- [6] Wang Chonggang, Li Bo, Sohraby K, *et al.* AFRED: an adaptive fuzzy-based control algorithm for active queue management[C]. Proc IEEE Local Computer Networks (LCN' 03), 2003. 12-20
- [7] Chen Yuan, Li Lemin. A wireless packet dropping algorithm considering fairness and channel condition[C]. Proc IEEE International Conference on Communications Circuits and System (ICCCAS' 04), 2004. 369-373

编 辑 漆 蓉