

TCP 网络拥塞控制研究

孔金生,任平英

(郑州大学,河南 郑州 450001)

摘要:在互联网中 TCP (Transmission Control Protocol) 是使用最为广泛的传输控制协议,因此对 TCP 网络拥塞控制的研究也成为了一个热点问题,并且一直在不断地改进与完善。文中在对网络拥塞控制与 TCP 网络拥塞控制原理进行分析的基础上,重点阐述了 TCP 网络拥塞控制算法。列举了现有的 TCP 网络拥塞控制算法,并对其进行分析,对这些算法的优缺点进行了比较,总结了 TCP 拥塞控制目前的研究成果,指明了未来的研究热点和发展方向。

关键词:网络拥塞;TCP 拥塞控制;控制算法;研究热点

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)01-0043-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.01.011

Summary of TCP Network Congestion Control Research

KONG Jin-sheng, REN Ping-ying

(Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In the Internet TCP (Transmission Control Protocol) is the most widely used, so the study of TCP network congestion control has also become a hot topic, and has been in constant improvement and perfection. In this paper, based on analysis of the principle of network congestion control and TCP congestion control, expound the TCP network congestion control algorithm. List the existing TCP network congestion control algorithm, and carry on the analysis, comparing the advantages and disadvantages of these algorithms, summarizing the research achievements of TCP congestion control at present, pointing out the future research focus and developing direction.

Key words: network congestion; TCP congestion control; control algorithm; research hot spot

0 引言

随着计算机应用日新月异的发展,用户对网络需求量的增大,对网络服务质量要求也在提高,这些将会导致网络拥塞崩溃 (Congestion Collapse) 的发生。拥塞崩溃的发生严重降低网络性能,网络拥塞已经成为一个十分严峻的问题。如何有效地解决网络拥塞问题已成为目前最关键的热点问题之一,国内外学者已经在拥塞控制领域开展了大量的研究工作。取得了很大的进展,如 Floyd 和 Jacobson 提出了随机早期探测 (Random Early Detection, RED), 对 RED 作了两项重大改进^[1]。比例-积分 (Proportional-Integral, PI) 算法把 AQM 算法设计问题与控制理论联系起来,在文献[2]中提出了一种新的基于 D 稳定域的 PID 控制器设计,进而提出了一种新的 PID 制动主动队列管理算法。

文献[3]在对拥塞及网络拥塞控制分析的基础上,将人工智能引入到拥塞控制中,提出了网络拥塞的智能化适应控制方法。文献[4]在对端到端拥塞控制算法的研究和改进的基础上,结合当前网络层拥塞控制算法,提出了一种把运输层和网络层拥塞控制算法结合起来的混合式网络拥塞控制算法 TCP。网络拥塞控制的研究虽然一直在不断的改进与完善,但是几乎还都存在着这样或那样的不足之处^[5]。所以对网络拥塞问题的研究还一直是一个热点问题。

文中在分析网络拥塞与拥塞控制机制的提前下,对 TCP 网络拥塞控制算法进行了比较、分析,并将这些算法进行了对比,列举出了各自的缺点和不足之处,总结出了 TCP 网络拥塞控制研究成果,提出了 TCP 网络拥塞控制算法的研究热点。

收稿日期:2013-04-02

修回日期:2013-07-08

网络出版时间:2013-11-12

基金项目:河南省教育自然科学基金计划项目(2011C510002)

作者简介:孔金生(1963-),男,教授,博士后,研究方向为复杂系统的优化与控制、复杂系统的智能信息处理与控制、网络拥塞控制;任平英(1988-),女,硕士,研究方向为复杂系统的优化与控制、网络拥塞控制。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20131112.1634.016.html>

1 网络拥塞与 TCP 网络拥塞控制分析

1.1 网络拥塞与拥塞控制

当网络中存在过多的数据分组时,网络的性能就会下降,这种现象称为拥塞^[5]。拥塞产生的根本原因是网络资源需求超过了所能提供的极限,常常发生在网络资源相对短缺的时候,主要表现为瓶颈链路资源的缺乏。

拥塞是一种持续过载的网络状态,由于网络结构的复杂性使得拥塞的发生成了一个不可避免的问题。在没有任何协商和请求许可机制的资源共享网络的情况下,多个数据分组同时要求服务,并且想要通过同一个服务端口发送数据,但是不可能所有的分组都能够同时得到处理,必须按照一个先后的顺序,这就出现了拥塞现象。当拥塞严重的时候,网络的性能将会急剧下降,甚至造成拥塞崩溃^[5]。

网络拥塞控制属于计算机、优化控制和控制理论学科之间的交叉领域,是指网络节点对网络拥塞发生做出相应的反应措施。拥塞控制考虑的是单主机申请的资源超过网络可以提供的资源时防止整个网络性能下降。

常见的网络拥塞控制:IP 拥塞控制和 TCP 拥塞控制。TCP 拥塞控制是一种基于源端的拥塞控制方式,IP 拥塞控制是通过路由器缓冲区中的分组采取调整和管理措施改善 TCP 拥塞控制的性能,从而达到控制拥塞的目的^[6]。

1.2 TCP 网络拥塞控制分析

互联网上 95% 的数据流使用的都是 TCP,在互联网发展的初始阶段,主要是通过控制 TCP 中滑动窗口端到端的流量来实现 TCP 拥塞控制,采用一种加法增加乘法减少 (Administration) 的拥塞控制方法。也就是说当发送方发现窗口内的报文丢失的时候,就认为是由于网络拥塞造成的报文丢失,就会把窗口大小减半来减小报文的发送,来调整拥塞现象;如果没有发现窗口中的报文发生丢失,就说明当前网络状况很好,就会把窗口的窗口加大,增大报文的发送速率,从而更多、更快地满足用户的需求^[7]。

TCP 的网络拥塞控制算法最初由 V. Jacobson 在 1988 年提出,它只包括“慢启动 (Slow Start)”和“拥塞避免 (Congestion Avoidance)”两个部分,随着后来不断的发展,在 TCP Reno 版本中又加入了“快速重传 (Fast Retransmit)”、“快速恢复 (Fast Recovery)”这两个部分,使得 TCP 拥塞控制方法更加完善。再后来在 TCP New Reno 中又对“快速恢复”进行了改进,近些年又出现了选择性应答 (Selective Acknowledgement, SACK),还有其他方面的大大小小的改进,成为网络研究的一个热点。

2 TCP 拥塞控制算法及其分析

由于 TCP 控制技术在网络拥塞控制中的重要性,国内外很多的研究人员在 TCP 控制方面做了大量的研究工作,不断地改进与完善,有了很大的进展,取得了不少的研究成果。

2.1 TCP 拥塞控制算法

在 TCP 网络拥塞控制算法研究过程中出现了 5 个版本的控制算法:Tahoe-TCP、Reno-TCP、New Reno-TCP、SACK-TCP 和 Vegas-TCP。

2.1.1 Tahoe-TCP

Tahoe-TCP 是 TCP 拥塞的早期版本,该算法把 Jacobson 提出的新算法应用在 TCP 的拥塞控制当中,包含了最基本的 TCP 拥塞控制算法,包括“慢启动”、“拥塞避免”和“快速重传”三个部分。在“快速重传”阶段是根据 3 个重复的确认分组来判定分组丢失的出现,减少“重传时钟”超时等待的过程,减少了时延,提高了传输速率。此外 Tahoe 在往返时延的计算方面也有所改善,它能够更加精确地设置超时重传的时间。

2.1.2 Reno-TCP

Reno 算法是对 TCP 控制算法的改进,是在 Tahoe 的基础上进行改进的。当有一定数量的重复确认字符 (ACK) 发生之后,发送端就会立刻进入“快速恢复”阶段,与以往的 TCP 拥塞控制算法相比较增加了“快速恢复”,以此来提高拥塞恢复的效率。Reno 的“快速恢复”对单个分组从数据窗口丢失的这种情况有了很大的改进,但是对多个分组数据从同一个窗口丢失还是存在着问题,仍然需要继续改进^[8]。

2.1.3 New Reno-TCP

New Reno-TCP 是对 TCP 控制算法的又一改进,针对 Reno 算法有多个分组从同一数据窗口丢失时对重传定时器的等待这一问题。在一个窗口内如果有三个以上的数据分组丢失的话,退出快速恢复阶段之后就会很容易因为拥塞窗口的减小进入“拥塞死锁”状态。一旦出现“拥塞死锁”数据即使丢失,接收端也接收不到后继的重复确认信息,这就导致重传定时器超时的现象。

在 New Reno-TCP 算法中,进入快速恢复阶段之后,只有在接收到全部确认信息后才会退出快速恢复阶段,接收到部分的确认信息的时候并不会退出快速恢复阶段。

2.1.4 SACK-TCP

Sack 算法和 New Reno-TCP 一样关心的是一个窗口内多个分组的丢失,是对 Reno 的又一次改进,使用“选择性重复”的方法恢复同一窗口中多个数据分组丢失。

当 Sack 算法检测到网络拥塞的时候,对重传数据

包丢失到检测到数据包丢失的数据包不会全部发送,而是有选择地确认和重传部分数据包,避免不必要的数据重传,可有效地减短时延,提高网络的传输能力。

2.1.5 Vegas-TCP

Vegas 在 Reno 算法的基础上进行了重大的改进,首先是 Vegas 对重传触发机制的改进,只要收到一个重复的确认字符(ACK)(而不是 3 个 ACK)就能启动重传触发,这样能够及时检测到网络拥塞的发生,避免出现严重拥塞的情况。其次为了减少不必要的分组丢失,在“慢启动”过程中采用了更加小心的方法增加窗口的大小。最后改进的是“拥塞避免”阶段,Vegas 通过观察以往的 TCP 连接中往返时延值的变化来推测拥塞的发生,并采取措施相应地调整拥塞窗口的大小。当往返时延值变大的时候就认为网络有拥塞现象出现,就会减小拥塞窗口,如果往返时延值变小,就会增加窗口大小,来消除网络拥塞,这样理想情况下窗口大小将会趋于一个合适的值上。这样使网络拥塞机制的触发不是依靠包的具体传输时延,而是与往返时延的改变有关^[9]。

2.2 TCP 拥塞控制算法比较

上述的 5 个版本的 TCP 流量控制算法各有自己的优点和缺点,表 1 是以上拥塞控制算法的一个比较。

表 1 TCP 拥塞控制算法的比较

算法类型	优点	缺点
Tahoe-TCP	有效避免了拥塞崩溃的发生,是 TCP 网络拥塞控制的研究基础	没有“快速恢复”阶段,轻网络拥塞情况下,拥塞窗口减小太大,降低了网络传输能力
Reno-TCP	在 Tahoe 的基础上增加了“快速恢复”算法,提高了拥塞恢复的效率	当多个分组从同一个窗口丢失时,还存在着问题,仍然有待于改进
New Reno-TCP	对 Reno 算法的改进,避免了出现“拥塞死锁”现象	在高速的网络中不能有效地利用宽带,这也是现在所有 TCP 拥塞控制的一个通病
SACK-TCP	检测到有拥塞发生时,有选择性重传数据,避免不必要的重传	需要修改接收端 TCP,在实际应用的时候实现比较复杂
Vegas-TCP	采用新的重传触发机制,“慢启动”阶段采用更加谨慎的方式增加窗口大小,改进了拥塞避免阶段调整窗口的措施	与未使用 Vegas 的 TCP 连接在一起,竞争宽带能力弱

2.3 TCP 拥塞控制研究成果

(1)慢启动过程的改进:近几年在针对 Tahoe-TCP 慢启动存在的问题这一方面,研究人员已经提出了一种新的慢启动策略:M. Allman 等人将拥塞窗口的初始值由一个 MSS(Maximum Segment Size)增加到了 4 个;逐步减小了窗口的增长速率,为了使慢启动阶段和拥塞避免阶段的过渡变得平滑将慢启动过程分成多个

阶段。

(2)速率的控制策略:TCP 所使用的窗口控制存在着一定的缺陷,主要表现为:窗口大小限制了传输速率;易造成传送报文的突发。针对这一不足研究者把速率和窗口控制结合在一起,提出了 RBP(Rate-Based Pacing)来克服上面的不足。

(3)不必要的“超时重传”和“快速重传”的减少、显式拥塞控制的使用以及 TCP-Friendly 的拥塞控制的出现^[10]。

3 TCP 拥塞控制算法研究热点

3.1 网络模型及其动力学行为分析

由于网络结构越来越复杂,研究者对真实的网络进行各种建模,以方便研究其内部的一些特性,网络建模在网络技术特别是 TCP 拥塞控制的研究中有着重要的意义,是网络性能研究不可缺少的工具。这方面的研究主要是从网络的数学模型出发,从数学的角度分析网络模型的动力学性质以便对一些有关网络拥塞控制的某些结论进行改进和推广。具体来讲,主要是分析不同类型网络模型的数学模型的平衡点的存在性与全局稳定性,周期解的存在性与全局稳定性,以及概周期解的存在性与全局指数稳定性。近年来,由于考虑到信号传递和交换的速度是有限的,时滞被广泛引入到神经网络模型的研究中。所考虑的模型都为泛函微分方程模型。事实上,和常微分方程相比,泛函微分方程更精确地描述了客观事实,因而备受国内外学者的高度重视。由于网络是一个复杂非线性系统,因此对网络建模的研究也将是一项长期的艰巨的工作。

3.2 网络拥塞预测分析

为了尽量满足用户的网络需求,加强网络管理和改善网络的运行质量已成为当务之急,网络拥塞预测已经成为解决网络拥塞问题的一个热点。在众多影响网络拥塞预测分析的因素中,最重要的就是网络流量。对网络的流量测量与预测的研究对于网络提供者、网管人员来讲都有着非常重要的意义。对网络提供者来说通过网络流量测量与预测,能够了解到自治域之间、网络之间的流量情况及其大致趋势,这些数据可以用在网络优化中,更好地设计路由和负载均衡。对网管人员来讲,通过对网络流量的测量与预测,可以判断网络拥塞,进而实施拥塞控制,降低由于拥塞带来的数据丢失和信息延迟,充分利用网络资源,提高网络服务质量^[11]。

3.3 多瓶颈链路网络拥塞控制算法研究

就目前而言,对 TCP 拥塞控制算法的研究还不是很完善,其中很重要的一个因素就在于网络拓扑的研究上。现有算法的研究大多数都采用单瓶颈链路拓扑

结构,对于多瓶颈链路拓扑结构却少有涉及。在单瓶颈链路拓扑结构条件下研究各种算法理论上是可行的,但是现实的网络结构却是非常复杂的,很多因素的影响是单瓶颈链路所无法模拟的,而这些因素很可能是影响实际网络性能的重要因素,多瓶颈链路拓扑是一种更接近现实网络模型的结构,只有在多瓶颈链路条件下对 TCP 网络拥塞控制算法进行研究,才能更好地揭露算法在实际网络中可能涉及到的难题,因而对多瓶颈链路网络进行深入研究对于实现网络的拥塞控制具有重要意义^[12]。

3.4 基于控制理论的算法研究

控制理论是一门相当成熟的理论,有非常多的方法可以借鉴到拥塞控制中来。近年来国内外的很多学者进行了一些尝试性工作,利用控制理论的方法来解决互联网中的拥塞控制问题。但是由于 Internet 本身是一个复杂非线性结构,使对网络稳定性和动态性能的分析的研究更加困难,因而这方面的研究还不够成熟,有待继续研究。因此,如何有效地将控制理论的思想特别是智能控制方法运用于网络拥塞控制中,将是未来研究的一个难点问题,也是一个热点问题^[13]。

3.5 基于智能优化算法的拥塞控制研究

智能优化算法又称为现代启发式算法,是一种具有全局优化性能、通用性强且适合于并行处理的算法。这种算法一般具有严密的理论依据,而不是单纯凭借专家经验,理论上可以在一定的时间内找到最优解或近似最优解。近年来将智能优化算法应用于拥塞控制也成为了一个热门的研究方向,它主要用来解决那些传统方法无法解决的拥塞控制问题。例如:遗传粒子群优化算法、蚁群优化算法、多 Agent 算法在拥塞控制中的研究已经取得了初步的进展。

4 结束语

文中在介绍网络拥塞与拥塞控制的基础上,重点

介绍了 TCP 网络拥塞控制的原理、控制机制、控制算法。列举出了现有算法,并对其进行分析,对这些算法的优缺点进行了比较。总结了 TCP 拥塞控制目前的研究成果,指明了未来 TCP 控制研究热点的发展方向,为 TCP 控制接下来的研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. IEEE/ACM transactions on networking, 1993, 1(4): 397-413.
- [2] Wang Y J, Schinkel M, Schmitt-Hartmann T. PID and PID-like controller design by pole assignment within D-stable regions[J]. Asian journal of control, 2002, 4(4): 41-52.
- [3] 孔金生, 赵长伟, 万百五. 网络拥塞的智能化适应控制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(7): 1301-1303.
- [4] 王满喜, 胡向晖, 马刘非. 混合式的网络拥塞控制算法[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(3): 642-645.
- [5] 刘翔. 基于智能方法的网络拥塞控制技术的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2007.
- [6] 王秀利. 网络拥塞控制及拒绝服务攻击防范[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2009.
- [7] 陈尚兵, 王彬, 钱积新. TCP 拥塞控制综述[J]. 计算机科学, 2002, 29(5): 32-35.
- [8] 武航星, 慕德俊, 潘文平, 等. 网络拥塞控制算法综述[J]. 计算机科学, 2007, 34(2): 51-56.
- [9] 刘俊, 谢华. 一种改进的 TCP 拥塞控制算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(13): 95-97.
- [10] 李涛. 改进 TCP 拥塞控制算法的仿真及应用研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(6): 181-184.
- [11] 桂晓琳, 许向阳. 基于 Elman 神经网络的网络流量预测[C]//2005 年全国自动化新技术学术交流会会议论文集. 出版地不详; 出版者不详, 2005: 288-291.
- [12] 徐小卜. 一类具有三条瓶颈链路的网络系统稳定性分析[J]. 电脑与电信, 2011(11): 46-48.
- [13] 汪小帆, 孙金生, 王执铨. 控制理论在 Internet 拥塞控制中的应用[J]. 控制与决策, 2002, 17(2): 129-134.

(上接第 42 页)

- problem for data warehouse design and evolution[C]//Proceedings of the ACM third international workshop on data warehousing and OLAP. Mclean, VA, USA: [s. n.], 2000.
- [7] Golfarelli M, Rizzi S. 数据仓库设计: 现代原理与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 229-233.
 - [8] 周丽娟, 柳池, 刘大昕. 在数据仓库中使用实视图优化查询[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(16): 181-183.
 - [9] 吕晓, 陈耿, 朱玉全. 基于聚类的动态物化视图选择研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(15): 3638-3640.
 - [10] 梁银. 基于聚类方法的空间度量物化选择算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(8): 58-60.

- [11] Lawrence M. Multiobjective genetic algorithms for materialized view selection in OLAP data warehouses[C]//Proc of GECOCO'06. Seattle, Washington, USA: [s. n.], 2006.
- [12] 王宜贵. 基于遗传算法的物化视图优化方法[J]. 计算机与现代化, 2011(8): 23-25.
- [13] 武彤, 赵雪, 赵洵. 动态更新实物化视图以提高 OLAP 查询效率[J]. 计算机科学, 2012, 39(B06): 315-317.
- [14] Colby L S, Griffin T, Libkin L. Algorithms for deferred view maintenance[C]//Proc of SIGMOD'96. Montreal, Canada: [s. n.], 1996.

TCP网络拥塞控制研究

作者：[孔金生](#)，[任平英](#)，[KONG Jin-sheng](#)，[REN Ping-ying](#)

作者单位：[郑州大学, 河南 郑州, 450001](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

ISTIC

年，卷(期)：2014(1)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201401011.aspx