

拥塞窗口优化调整的 TCP 控制策略设计

张 龙¹, 王 辉²

(1 河南科技大学 电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003;

2 河南科技大学 现代教育技术与信息中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 针对传统 TCP 协议在复杂网络环境下应用具有一定局限性, 提出了一种拥塞窗口优化调整的 TCP 控制策略. 该控制策略在拥塞避免阶段通过对数增长函数来动态调整拥塞窗口的变化, 在发送端连续收到 3 次重复 ACK 或 timeout 时根据当前网络带宽对拥塞窗口进行较为合理的调整. 仿真实验证明: 该控制策略在不同网络环境下与传统 TCP 控制策略相比, 吞吐量有所提高, 改善了网络性能.

关键词: 复杂网络; 拥塞窗口; 吞吐量

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)12-0125-04

Congestion Window Optimization Control Strategy of TCP Design

ZHANG Long¹, WANG Hui²

(1 School of Electronic Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2 Modern Educational Technology and Information Center, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: In view of the traditional TCP control protocol used in the limitations of heterogeneous network, the congestion window optimization TCP control strategy is proposed. The control strategy carries the logarithmic function to dynamically adjust the congestion window's changes in congestion avoidance phase. when the transmitting terminal receives 3 times of repetitive ACK or timeout in a row, adjust the congestion window reasonably according to the current network bandwidth. Simulation results show that the control strategy increases the throughput and improves the network performance compared with the traditional TCP control strategy in different network environment.

Key words: complex network; congestion window; throughput

1 引言

在当前广泛使用的 TCP-Reno 协议中, 采用的是 AIMD (Additive Increase Multiplicative Decrease) 加法增大, 乘法减小的方法^[1]. 这种方法在有线环境下取得了很好的效果, 但如果直接将 TCP-Reno 协议应用在异构网路环境, 由于异构网络环境的特点, 拥塞窗口^[2]值将会频繁的减半, 降低网络吞吐量, 影响网络性能. 因此, 在异构网络下, 如何对拥塞窗口进行合理有效的调整, 成为当前研究的热点. 本文通过对 TCP-Reno 协议的分析, 提出了

一种新的拥塞控制机制(TCP-LU), 该控制策略将从两个方面对 TCP-Reno 协议进行改进, 实现拥塞窗口的优化调整. 通过 NS2 仿真软件对其验证, 实验结果表明该方法能够提高网络性能.

2 TCP-Reno 拥塞控制算法分析与改进

2.1 TCP-Reno 拥塞控制算法的分析

在 TCP-Reno 协议的拥塞避免阶段, 网络负荷较重, 容易发生拥塞, 拥塞窗口值呈线性增长方式, 每经过一个往返时间 RTT 拥塞窗口增加 1, 式(1)为其增长公式, 其中 $a(x)$ 为 1.

$$cwnd_{new} = cwnd_{old} + \frac{a(x)}{cwnd_{old}} \quad (1)$$

当 TCP 源端以稳定速率发送数据,达到仅出现 3 次重复 ACK 的稳定状态,拥塞避免阶段窗口值的变化如图 1 所示。

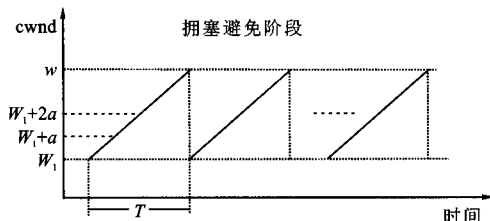


图 1 TCP-Reno 协议在稳态时拥塞窗口变化

图 1 中, W 为稳态时拥塞窗口最大值, W_1 为慢启动门限值, a 为增加因子, T 为稳态情况下出现 3 次重复 ACK 的周期值。

从图 1 中可以看到拥塞窗口在稳态下基本上呈锯齿形变化,拥塞窗口保持固定的增长率,当出现 3 次重复 ACK 时才进行调整,这种增长方式容易造成拥塞周期过短,拥塞窗口振荡等现象,不能实时适应网络网况进行合理的变化,影响了网络性能。根据拥塞窗口的变化,我们利用积分方法来得到 T 时间段内的发送的数据总量^[3],如式(2)所示。

$$th_1 = n * \int_0^T \frac{w - w_1}{T} * t dt \quad (2)$$

假设周期 T 的值为 1,则式(2)可以简化为

$$th_1 = \frac{(w - w_1)}{2} \quad (3)$$

通过以上的简单分析,本文将从以下两个方面来实现拥塞窗口的优化调整。

(1) 在 TCP-Reno 拥塞避免阶段,源端每收到一个 ACK 就将拥塞窗口变大来探测当前网络中可用的剩余带宽,拥塞窗口变化呈线性增长方式,这种增长方式是一种固定的,刚性的增长^[4],使得网络的拥塞周期变短,拥塞窗口不能根据网络状况进行自适应的调整^[5],提前进入下一轮的控制。

(2) 源端在连续收到 3 次重复 ACK 或者 Timeout 时,认为数据很可能发生丢失,则将慢启动门限值(ssthresh)减半,又由于复杂网络的不稳定性,慢启动门限值将会频繁的减半,这种固定的减半策略,降低了网络性能。

2.2 TCP-Reno 拥塞避免策略的改进

针对问题(1),本文选择一种动态的增长方式,其特点是当拥塞窗口值不断变大时,则适当减小增长因子的值,拥塞窗口的保持平稳的速度增长,使拥塞窗口值(cwnd)能够在取值较大的情况下,发送更

多的数据,从而延长拥塞周期,改善网络性能。

由图 2 可知,在理想情况下的拥塞避免阶段,增长因子的变化是随拥塞窗口的变化而变化的,拥塞窗口增大,则要适当的减小增长因子的值,拥塞窗口增大到瓶颈带宽时,则增长因子不再增加,以便保持更长的拥塞周期,提高网络性能。增长因子与拥塞窗口关系函数应具有一阶导数不为 0 的特点,如果为 0,则为原来的线性增长方式。为了能够使拥塞窗口保持平稳的增长,则拥塞窗口值必须能够自适应网络状况的变化,进行合适的调整。通过以上分析,再参考图 2 拥塞避免阶段拥塞窗口增长的趋势,构造的增长因子的函数如式(4)。

$$a(x) = \frac{\ln \lambda x}{1 + \ln \lambda} \quad (4)$$

式中, $x = \frac{1}{cwnd}$, λ 为调节对数函数曲线曲率的压扩参数。从公式的角度分析,可以看出:当拥塞窗口增大时,增长因子值减小,拥塞窗口减小时,增长因子变大,能够自适应的调整拥塞窗口的大小,能够延长拥塞窗口保持较大值的时间,延长拥塞周期。

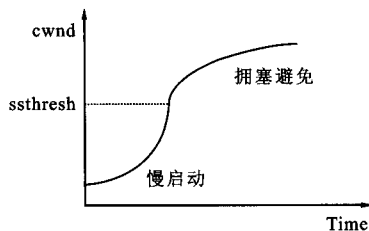


图 2 理想的拥塞窗口变化图

压扩参数(λ)能够反映出增长因子增长快慢的变化情况,其值越大则表明增长因子在初始阶段变化较快,在后阶段变化较慢。当式(4)中自变量 x 为固定值,此时压扩参数(λ)为变量时,压扩参数与增长因子关系如图 3 所示。

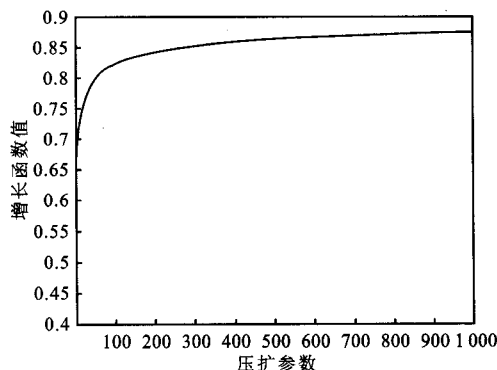


图 3 压扩参数与增长因子关系图

从图 3 中可以看出,压扩参数(λ)的变化增长趋势由大变,在取值在 250 之前增长趋势较为明显,

取值 250 之后增长趋势不明显,因此本文中将 λ 取值为 250.

从理论角度为了更好地验证构造函数思想的有效性,我们同样利用积分的方法根据拥塞窗口的变化,建立数据总量与时间的关系,这里将自变量定义为时间值,发送的数据总量如下.

$$th_2 = \int_0^T \frac{\ln(\beta t)}{1 + \ln\beta} * dt \quad (5)$$

式(6)为稳态下,拥塞窗口的最大值.

$$W = \frac{\ln(\beta t)}{1 + \ln\beta} + W_1 \quad (6)$$

结合式(6),对式(5)进行化简,其中 β 取值为 250,与 λ 的变化方向相反, T 取值为 1,我们可以得到最终结果,如式(7)所示.

$$th_2 \approx \frac{9}{11}(w - w_1) \quad (7)$$

通过对式(3)和式(7)进行对比,我们可以很清楚的看到 th_2 明显大于 th_1 的值,从理论角度能够更好的证明修改后的算法较为合理.

2.3 TCP-Reno 快恢复策略的改进

针对问题(2),当网络源端连续收到 3 次重复的 ACK 或者网络出现数据 timeout 时,源端通过相关算法估计出网络剩余可用带宽^[6],得出慢启动门限值,对网络状况进行分析之后,有针对性的设置慢启动门限值,而不是将窗口值直接减半后赋值给慢启动门限值.具体过程如下.

(1)根据网络状况估计出网络带宽如式(8).

$$BW_k = \frac{k \times \text{packet_size}}{T_k} \quad (8)$$

式中, k 为在 T_k 时间间隔内接收端收到数据包确认的个数,packet_size 为每个数据包的大小, T_k 为取样时间间隔.

(2)利用指数加权过滤方法对采样值进行平滑,如式(9).

$$BW_k = \alpha_k * BW_{k-1} + (1 - \alpha_k) \left(\frac{BW_k + BW_{k-1}}{2} \right) \quad (9)$$

式中, $\alpha_k = \frac{2\tau - \Delta t_k}{2\tau + \Delta t_k}$,通常取值为 19/21. BW_k 为 t_k 时刻的过滤带宽.

(3)通过估计出来得带宽结合最小 RTT 值与报文段的关系可以得出下列关系,如式(10).

$$\text{ssthresh} = \frac{BW_k * \text{RTT}_{\min}}{\text{packet_size}} \quad (10)$$

式中, $\text{RTT}_{\min}$ 为统计周期内的最小往返时延(RTT).

(4)假设 $w_1 = m * w$,根据 AIMD 稳态算法可以得到增长因子 a 与 m 的关系,如式(11)所示,其中 a 值从式(4)中得到.

$$m = \frac{3-a}{3+a} \quad (11)$$

因此我们可以得到稳态时的门限值为

$$\text{ssthresh}_2 = w_1 = m * w \quad (12)$$

式中, w 为稳态时拥塞窗口最大窗口值.

为了确保网络发送端能够更加通畅传送数据,我们取较小的门限值.

$$\text{ssthresh} = \min(\text{ssthresh}_1, \text{ssthresh}_2) \quad (13)$$

当网络出现 3 次重复 ACK 时,我们可根据式(8)~(13)算法,得到一个较为准确的门限值,来改善网络性能.

2.4 TCP-LU 拥塞控制算法的过程

通过对 TCP-Reno 协议进行改进,改进之后的算法命名为 TCP-LU. TCP-LU 的拥塞控制思想为:

(1)慢启动阶段仍然采用 Reno 协议慢启动算法.

(2)拥塞避免阶段采用加性因子来对拥塞窗口进行动态调整,即式(1)中的 $a(x)$ 的值从式(4)中得到,从而延长网络拥塞周期,提高网络性能.

(3)快速重传和快速恢复算法中,当源端连续收到 3 次重复 ACK 时或者 timeout 时,通过估计网络带宽得出新的较为准确的慢启动门限值.

3 TCP-LU 控制算法的仿真与验证

3.1 网络仿真环境及拓扑结构

为了验证新控制算法的有效性,我们将采用网络模拟器 NS2.34 作为仿真工具,在 Linux 操作系统下对新算法进行验证.其网络拓扑如图 4 所示,发送端 S1~S4 和节点 R 位于有线链路中,基站 BS 与接收端 R1~R4 间为一段无线链路,R-BS 为瓶颈链路,节点缓冲区最大存储包数为 10, S1-D1 在第 10 s 开始发送数据, S2-D2, S3-D3, S4-D4 建立 UDP 背景流,分别在 20 s, 30 s, 40 s 以稳定速率发送数据.以下是实验所选用的拓扑结构.

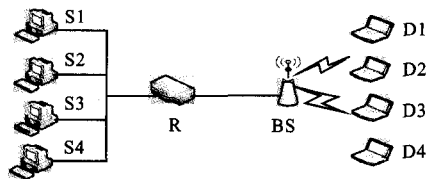


图 4 网络拓扑结构图

3.2 不同协议在同一拓扑下非同时存在的对比

在相同的拓扑环境下 S1-D1 分别采用 TCP-LU 协议和 TCP-Reno 协议进行对比,从图 5 中看到 TCP-LU 协议的平均吞吐量高于 TCP-Reno 协议的平均吞吐量.采用新策略(TCP-LU),可以使得整个网络吞吐量得到了提高,网络性能得到了改善.

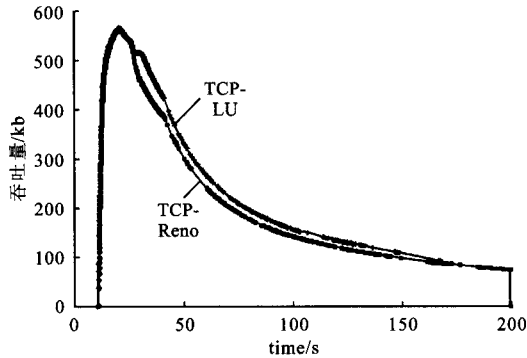


图 5 TCP-LU 与 TCP-Reno 协议平均吞吐量对比

发送端连续收到 3 次重复 ACK 或 timeout 的次数,能够很好的反映网络的状况.下面我们分别将误码率设置为 0.1%、0.4%、0.6%、0.8%和 1.0%的情况下,通过对发送端连续收到 3 次重复 ACK 的次数或 timeout 的次数统计进行对比.

通过表 1 可以看到 TCP-LU 协议和 TCP-Reno 协议随着误码率变大,发送端连续收到 3 重复 ACK 或者 timeout 的次数也逐渐增加.在相同误码率下 TCP-LU 协议少于 TCP-Reno 协议,即拥塞窗口大幅度减少的次数少于 Reno 协议,拥塞周期长于 Reno 协议,能够证明 TCP-LU 算法的有效性.

表 1 不同误码率下,3 次重复 ACK 或 timeout 次数

	$P=0.1\%$	$P=0.4\%$	$P=0.6\%$	$P=0.8\%$	$P=1.0\%$
TCP-Reno	35	44	46	52	54
TCP-LU	30	32	42	45	46

3.3 同一个协议的公平性分析

在同一个拓扑环境下 S1-D1, S2-D2 都采用 TCP-LU 协议,同时在第 10 s 发送数据,对平均吞吐量的变化进行统计分析,从图 6 中可以看到两个流的吞吐量变化基本一致,TCP-LU 协议间在竞争网络资源时,呈现出公平性.

3.4 不同协议在同一拓扑下同时存在的对比

在同一个拓扑且误码率相同情况下,S1-D1、S2-D2 分别采用 TCP-Reno 和 TCP-LU 协议竞争网络资源,通过对吞吐量的对比,从图 7 中可以看到 TCP-LU 没有引起 TCP-Reno 吞吐量明显下降,呈现友好性.

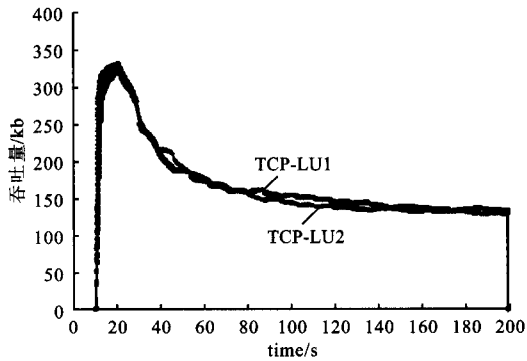


图 6 TCP-LU 协议之间的竞争对比

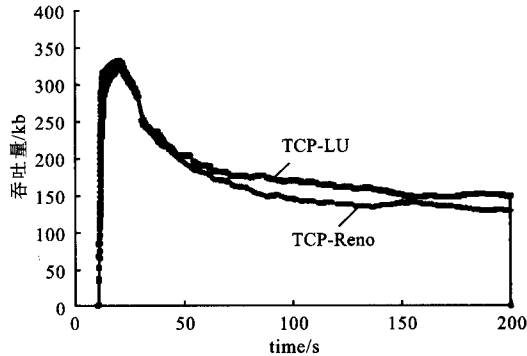


图 7 TCP-LU 与 TCP-Reno 竞争吞吐量对比

4 结束语

本文分析传统 TCP 的不足之处,提出了一种拥塞窗口优化调整的 TCP 控制策略,该控制策略优点是在拥塞避免阶段,拥塞窗口不是固定的变化,而是动态的根据网络状况进行调整.发送端认为网络发生数据丢失时,根据当前带宽较为准确的调整门限值和拥塞窗口值.仿真结果表明,该控制策略在不同的网络负载和不同的误码率下都能取得较好的性能,能够更好适应网络.

参考文献:

[1] Alexander Kesselman, Yishay Mansor. Adaptive AIMD congestion control[C]// proceedings of the Twenty-second Annual symposium on Principle of Distributed computing Algorithmica. New York: ACM,2003:352-359.

[2] Allman M, Paxson V, Stevens W. TCP congestion control [S]. 1999, RFC 2581.

[3] 刘俊. 拥塞窗口自适应的 TCP 拥塞避免算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(6):1472-1475.

[4] 刘俊, 谢华. 一种新的 TCP 拥塞控制算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(13):95-97.

[5] 张丽娟, 杨晓萍, 陈虹, 等. 基于自适应参数设置的 AIMD 算法[J]. 吉林大学学报, 2010, 28(1):77-83.

频率化。

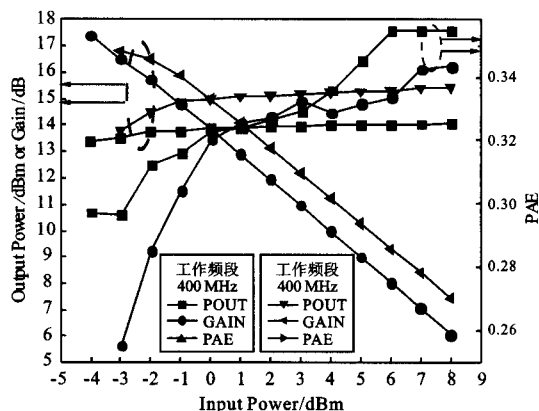


图8 Pout、Gain、PAE vs Pin的测量曲线

参考文献:

- [1] Howard D C, Saha P, Shankar S, et al. A UWB SiGe LNA for multi-band applications with self-healing based on DC extraction of device characteristics[C]// IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), Atlanta, GA; IEEE, 2011:111-114.
- [2] Datta S, et al. A concurrent low-area dual band 0.9/2.4 GHz LNA in 0.13 μ m RF CMOS technology for

multi-band wireless receive[C]// IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS). [s. l.]:IEEE, 2010:280-283.

- [3] Liu X, Lin Y, Neo WC E, et al. Improved power amplifier efficiency using varactor-based tunable matching networks [C] // Proceedings BCTM. [s. l.]: IEEE, 2006.
- [4] Fukada A. Novel 900MHz/1.9GHz dual-mode power amplifier employing MEMS switches for optimum matching[J]. IEEE Microwave and Wireless components Letters, 2004, 14(3):121-123.
- [5] Nam J, Shin J H, Kim B. A handset power amplifier with high efficiency at a low level using load-modulation technique[J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(8):2639-2644.

作者简介:

崔剑慧 女, (1989—), 硕士研究生. 研究方向为模拟/射频集成电路及系统设计.

张科 男, (1981—), 助理研究员. 研究方向为模拟/射频集成电路及系统设计.

田彤 男, (1968—), 博士研究生, 研究员. 研究方向为模拟/射频集成电路及系统设计.

(上接第128页)

- [6] Jins, Yeung D S. A covariance analysis model for DDoS attack Detection[C]// FranceIEEE International Conference on Communications, Paris; IEEE, 2004.

作者简介:

张龙 男, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为计算机网络性能改善.

王辉 女, (1966—), 教授, 硕士生导师. 研究方向为网络性能改善与数据挖掘.