

高速 TCP 变种协议与 DCCP 协议的公平性研究

王尧功, 潘理, 李建华

(上海交通大学电子工程系, 上海 200240)

摘要: 通过 ns-2 仿真, 测试 4 种主流高速 TCP 变种与 DCCP 在不同网络环境下的公平性。仿真结果表明, 在与 DCCP 的公平性方面, 4 个变种由优到劣依次为 CUBIC, HS-TCP, BIC, STCP。测试结果有助于更全面地评价各种高速 TCP 变种, 可以指导新变种的设计。

关键词: 高速 TCP 变种; DCCP 协议; 公平性

Research on Fairness Between High Speed TCP Variants and DCCP

WANG Yao-gong, PAN Li, LI Jian-hua

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

【Abstract】 This paper uses ns-2 simulation to evaluate the fairness between four mainstream high speed TCP variants and DCCP in various network environments. Simulation shows that, concerning fairness to DCCP, the performances of the four variants are as follow: CUBIC(best), HS-TCP, BIC, STCP(worst). The results contributes to a more comprehensive assessment of the high speed TCP variants and also provides guidelines for the design of new variants.

【Key words】 high speed TCP variants; DCCP; fairness

1 概述

TCP 协议是传输层最重要的协议之一。随着各种高速网络的普及, TCP 在大带宽时延积网络中出现了性能下降。这是因为 TCP 的加性增大策略过分保守, 难以充分利用底层网络提供的巨大带宽。为了解决这一问题, 大量高速 TCP 变种协议被提出, 如 HS-TCP^[1], STCP^[2], BIC^[3], CUBIC^[4]等。

UDP 协议是传输层的另一个重要协议, 由于它自身不包含拥塞控制机制, 因此其滥用可能导致 Internet 出现拥塞崩溃。为了防止上述问题, IETF 提出了 DCCP 协议^[5]。

高速 TCP 变种和 DCCP 协议分别作为 TCP 和 UDP 的改进方案, 在未来的网络环境中, 它们必定是共存的, 因此, 它们之间的公平性是一个十分关键的问题。

文献[6]在评价各种高速 TCP 变种时, 主要侧重于考察它们对 TCP 的后向兼容性, 而较少涉及对 DCCP 协议的影响。本文通过 ns-2 仿真, 分别测试了 4 种主流高速 TCP 变种与 DCCP 协议(TCP-like)的公平性, 考察了一系列网络参数对公平性的影响。

2 相关算法简介

2.1 TCP 及其高速变种

TCP 的拥塞控制算法为加性增大和乘性减小, 可用如下公式表达:

$$\text{确认: } cwnd \leftarrow cwnd + \frac{a}{cwnd}$$

$$\text{丢包: } cwnd \leftarrow cwnd - b \times cwnd$$

其中, $a=1$; $b=0.5$ 。如前所述, TCP 的机制过分保守, 导致其在大带宽时延积网络中性能下降, 各种高速 TCP 变种通过改进上述机制以适应高速网络的需求。

HS-TCP 利用当前窗口 $cwnd$ 的大小作为链路带宽时延积的估计, 让参数 a 和参数 b 随 $cwnd$ 变化, 而不是固定为 1 和 0.5。通过动态调整 a, b , HS-TCP 提高了其在大带宽时

延积网络下的性能。

STCP 采用了如下更激进的办法:

$$\text{确认: } cwnd \leftarrow cwnd + a$$

$$\text{丢包: } cwnd \leftarrow cwnd - b \times cwnd$$

其中, a, b 分别为 0.01 和 0.125。这样每当窗口乘性减小后, 只需要固定数目的 RTT 即可恢复到原来的大小(假定在此期间没有发生丢包), 而与窗口本身的大小无关。值得注意的是, STCP 的拥塞控制机制不再是加性增大、乘性减小, 而是乘性增大、乘性减小。

BIC 把拥塞控制看作一个查找问题来处理: 丢包前的窗口大小为上限, 丢包后的窗口值为下限, 拥塞控制就是要在两者之间找出合适的窗口大小。BIC 采用二分法来进行查找: 在发生丢包时, BIC 仍然采用乘性减小的策略, 减小后的窗口值为 W_{\min} , 减小前的窗口值为 W_{\max} 。BIC 采用折半查找的方法直接让 $cwnd$ 跳到 W_{\min} 和 W_{\max} 的中点, 如果没有发生丢包, 则把当前窗口值设为新的 W_{\min} , 然后对新的 W_{\min} 和 W_{\max} 继续进行折半查找, 直到跳到两者中点所需的增量小于一个门限值 S_{\min} 时, $cwnd$ 就直接跳到 W_{\max} 。当 $cwnd$ 达到 W_{\max} 后, BIC 进入探测阶段, 采用慢启动的算法探测新的 W_{\max} 。

CUBIC 采用了如下的 3 次函数来确定拥塞窗口的大小:

$$W_{cubic} = C(t - K)^3 + W_{\max}$$

其中, C 是一个比例因数; t 表示从上一次窗口减小到现在所经过的时间; W_{\max} 是减小前的窗口大小; $K = \sqrt[3]{W_{\max} b / C}$ 。由 CUBIC 的窗口调整函数可见, 它摆脱了对 RTT 的依赖, 使

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2007AA01Z457); 上海市科委基金资助项目(07QA14033)

作者简介: 王尧功(1985-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 计算机网络; 潘理, 副教授; 李建华, 教授、博士生导师

收稿日期: 2008-06-30 **E-mail:** wangyaogong@sju.edu.cn

拥塞窗口大小由经过的绝对时间决定。

为了保持对 TCP 的后向兼容, 以上 4 种高速 TCP 变种都采用了 TCP 模式的机制, 即当网络处于高拥塞状态时, 各种高速变种依然按照标准 TCP 的算法调整其窗口, 只有在大窗口情况下才使用其自身的机制。

2.2 DCCP

DCCP TCP-like 的拥塞机制几乎完全模拟了 TCP 的拥塞控制机制, 如慢启动、加性增大、乘性减小等, 但它与 TCP 仍然有所不同, 主要表现在以下 3 个方面:

(1) DCCP 对确认也进行了拥塞控制, 而 TCP 没有。

(2) DCCP 是基于数据报的协议, 其相关参数都以数据报为单位, 而不是像 TCP 那样以字节为单位。

(3) 作为一个不提供可靠性保证的协议, DCCP 不重传丢失的报文, 因此, 它不包含 TCP 的快速重传和快速恢复机制。

由于以上 3 点不同, 不能简单地认为对 TCP 的后向兼容性和对 DCCP 的公平性是等价的, 因此有必要单独研究各种高速 TCP 变种与 DCCP 的公平性问题。

3 仿真测试

3.1 仿真环境

仿真所采用的拓扑是经典的哑铃状网络, 所有数据流共同竞争一条瓶颈链路, 如图 1 所示。参与竞争的数据流包括高速 TCP 变种协议流、DCCP 协议流以及背景数据流。仿真总时间为 300 s, 每个数据流的启动时间是在 1 s~30 s 范围内随机产生的, 以避免相位效应。接入链路的时延也是随机的 (0.1 ms~1.9 ms 之间), 这样各个数据流的 RTT 有轻微的差异, 进一步减小了相位效应的影响。所有统计数据都只考虑了后 150 s 的情况, 以确保链路已经进入稳态。

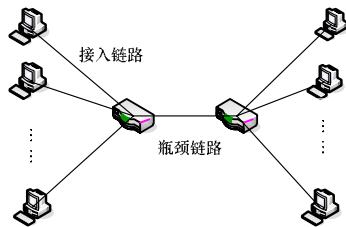


图 1 仿真拓扑

3.2 参数设定

网络参数的设定对仿真结果有直接影响, 不同网络环境下的测试结果可能相差很大。为了全面考察高速 TCP 变种和 DCCP 的公平性, 本文分别测试了以下 4 个影响因素在不同取值下的仿真情况:

(1) 瓶颈链路带宽: 瓶颈链路带宽在 10 Mb/s(以太网)~622 Mb/s(OC-12)间变化;

(2) 瓶颈链路时延: 瓶颈链路时延在 10 ms~150 ms 间变化;

(3) 瓶颈链路缓冲区大小: 缓冲区大小在链路带宽时延积的 5%~200%间变化;

(4) 背景数据流: 分别测试了有无背景流 2 种情况。

对以上各种因素的逐一测试表明, 拥塞控制算法的仿真测试是十分复杂的, 各种因素都可能会影响测试结果。因此在用仿真测试考察各种拥塞控制算法时, 一定要全面考察各种不同的网络环境, 否则容易产生以偏概全的结论。

3.3 评价指标

本文采用经典 Jain 公平性指数作为公平性的评价指标:

$$F(x) = \frac{(\sum x_i)^2}{n(\sum x_i^2)}$$

它是一个归一化的指标, 取值范围为 0~1。当所有分量相等时为 1(最佳公平性), 当 1 个分量攫取了全部资源时为 $1/n$ (n 是参与竞争的分量数)。

对于本文研究的高速 TCP 变种和 DCCP 的公平性问题, 由于只有 2 个分量来竞争瓶颈链路的带宽(不记录背景数据流), 因此 Jain 公平性指数的范围为 0.5~1。当 Jain 公平性指数小于 0.9 时, 协议流之间的公平性就已经很差了, 因为此时一个流所攫取的带宽至少已经是另一个的 2 倍。

4 仿真结果及其分析

4.1 测试方法

如前所述, 4 个因素均可能影响仿真的结果, 为了清晰地观察每一个因素的影响, 笔者采取了如下的方法进行测试: 在每种影响因素中选取一个典型值, 当考察某一影响因素时, 其他影响因素均固定为其典型值, 仅让被考察因素变化。

各个影响因素的取值如表 1 所示, 其中, 带星号(*)的取值即为该因素的典型值。

表 1 各个影响因素的取值

影响因素	取值
瓶颈链路带宽/(Mb·s ⁻¹)	10, 100*, 155, 300, 622
瓶颈链路时延/ms	10*, 25, 50, 100, 150
瓶颈链路缓冲区/(%BDP)	5, 10, 20, 50, 100*, 200
背景数据流	有*, 无

4.2 瓶颈链路带宽的影响

图 2 给出了在不同瓶颈链路带宽下各种高速 TCP 变种对 DCCP 的 Jain 公平性指数, 图中还给出了 TCP SACK 与 DCCP 的公平性指数以作为参照。

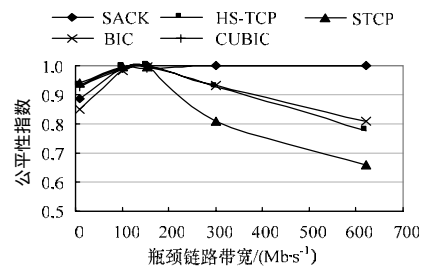


图 2 瓶颈链路带宽对公平性的影响

可以看出所有协议在 100 Mb/s~155 Mb/s 间达到最佳公平性, 随着带宽继续增大, TCP SACK 和 CUBIC 保持了对 DCCP 的良好公平性, 而另外 3 个协议则出现了不同程度的公平性下滑, 尤其是 STCP 最为严重。另一个值得注意的现象是所有协议在 10 Mb/s 时的公平性反而不如 100 Mb/s。从理论上说小带宽情况下所有高速 TCP 变种都处在 TCP 模式, 应该对 DCCP 表现出良好的公平性, 但就连 TCP SACK 都出现了公平性下滑, 这是由小带宽下各个协议流丢包的不同步造成的。几乎所有关于公平性的理论分析都基于同步丢包的假设, 而在小窗口情况下这一假设并不成立, 此时公平性受很多随机因素影响, 因此, 仿真结果与理论分析不符。

4.3 背景数据流的影响

4.2 节中的仿真在没有背景数据流的情况下被重复了一遍, 结果如图 3 所示。易见, 各变种间的相对优劣同上一节的测试结果一致, 即 SACK 和 CUBIC 最佳, HS-TCP 和 BIC 次之, STCP 最差。但在没有背景数据流的情况下, 公平性指数的绝对数值出现了整体性下降。这说明加入背景数据流

有助于提高协议间的公平性，与文献[6]中的结果吻合。背景数据流之所以如此重要，主要有以下 2 方面原因：(1)背景数据流的存在增加了网络的随机因素，减小了相位效应发生的可能性。(2)很多拥塞控制协议的设计都基于高度统计复用的假设，背景流的引入满足了这一假设。

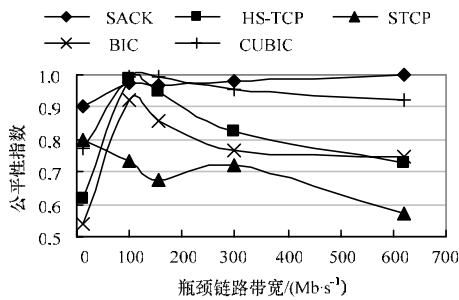


图 3 背景数据流对公平性的影响

由此可见，在通过仿真来测试各种高速 TCP 变种的性能时，一定不能忽略背景数据流的作用，否则得出的结果可能没有意义，因为在实际网络中背景数据流几乎总是存在的。

4.4 瓶颈链路时延的影响

图 4 分别给出了 5 种协议在不同瓶颈链路时延下对 DCCP 的公平性指数。

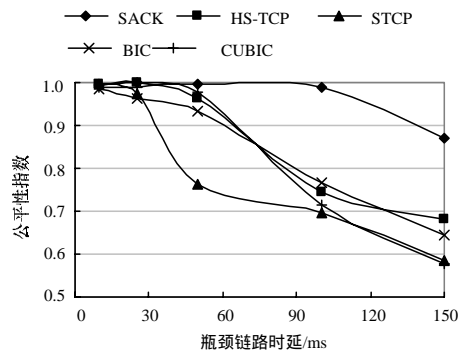


图 4 瓶颈链路时延对公平性的影响

如图 4 所示，随着 RTT 增大，所有协议的公平性都出现了下降。其中 STCP 最先出现明显下降，它在 RTT 约为 100 ms 时(即链路时延为 50 ms 时)就出现了明显下降，另外 3 个变种则在 RTT 约为 200 ms 时才出现明显下降。由此可见，HS-TCP、BIC 和 CUBIC 对 DCCP 公平的区间比 STCP 宽。

4.5 瓶颈链路缓冲区大小的影响

图 5 给出了瓶颈链路缓冲区大小的变化对公平性的影响。由图可知，HS-TCP 和 CUBIC 对缓冲区大小不敏感，在 5%~200%BDP 的范围内始终保持了良好的公平性。相反，STCP 和 BIC 则在缓冲区较小时出现了明显的公平性下降。可见缓冲区大小也对公平性存在一定影响。传统的仿真中往往把缓冲区大小固定为链路的带宽时延积，但现实中不一定是这样。尤其是在高度复用的链路上，缓冲区可能远小于链路带宽时延积。因此，在考察各种拥塞控制机制时，应当注意它们对缓冲区大小是否敏感。

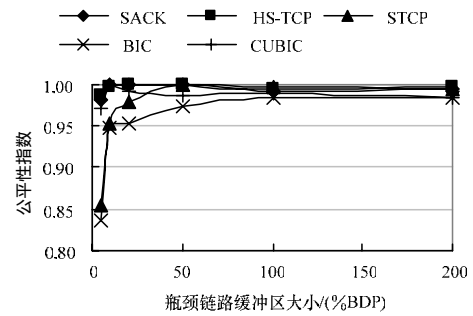


图 5 瓶颈链路缓冲区大小对公平性的影响

5 结束语

本文的大量仿真表明，高速 TCP 变种协议的行为是十分复杂的，各种因素都会对仿真结果产生影响。因此，在考察和评价这些变种的优劣时不能轻易下结论，需要把它们放在各种不同网络环境下进行全面考察。

从前述仿真结果可以看出，在本文考察的 4 种高速 TCP 变种中，表现最好的是 CUBIC，它在各项测试中的表现都至少不低于平均水平，而在不同瓶颈链路带宽的测试中则表现出了高于其他变种的良好公平性。仅次于 CUBIC 的变种是 HS-TCP，除了在大带宽下对 DCCP 的公平性不如 CUBIC 以外，在其他各项测试中 HS-TCP 的表现都与 CUBIC 相同。BIC 和 STCP 在仿真测试中的表现较差，尤其是 STCP 在大带宽、长时延或者较小的缓冲区时都出现了明显的公平性下降。综上所述，在与 DCCP 的公平性方面，本文考察的 4 个高速 TCP 变种的表现由好到坏依次为：CUBIC、HS-TCP、BIC、STCP。

当然对 DCCP 的公平性只是评价各种高速 TCP 变种的一个方面，要全面评价一个变种协议还需要综合考虑它在其他方面的性能。本文的工作有助于更全面地评价各种高速 TCP 变种的优劣，也有助于今后的高速 TCP 变种协议的设计。

参考文献

- [1] Floyd S. HighSpeed TCP for Large Congestion Windows[S]. RFC 3649, 2003.
- [2] Kelly T. Scalable TCP: Improving Performance in High-speed Wide Area Networks[J]. Comput. Commun. Rev., 2003, 33(2): 83-91.
- [3] Xu L, Harfoush K, Rhee I. Binary Increase Congestion Control (BIC) for Fast Long-distance Networks[C]//Proc. of IEEE INFOCOM'04. Hong Kong, China: [s. n.], 2004: 7-11.
- [4] Rhee I, Xu L. CUBIC: A New TCP-friendly High-speed TCP Variant [C]//Proc. of the 3rd International Workshop on Protocols for Fast Long-distance Networks. Lyon, France: [s. n.], 2005: 3-4.
- [5] Kohler E, Handley M, Floyd S. Datagram Congestion Control Protocol(DCCP)[S]. RFC 4340, 2006.
- [6] Ha S, Kim Y, Le L, et al. A Step Toward Realistic Performance Evaluation of High-speed TCP Variants[C]//Proc. of the 4th International Workshop on Protocols for Fast Long-distance Networks. Nara, Japan: [s. n.], 2006: 2-3.