

基于滑模控制的显式控制协议带宽补偿算法

尹凤杰¹, 屈美荣¹, 张 蕾¹, 王 静², 刘军国³

(1. 辽宁大学信息学院, 沈阳 110036; 2. 潍坊市标准计量情报所代码办公室, 山东 潍坊 261000;
3. 潍坊市防伪协会技术部, 山东 潍坊 261000)

摘 要: 在动态网络中, 显式控制协议(XCP)带宽设置不当会使链路利用率大幅下降。针对该问题, 提出一种基于滑模控制的 XCP 带宽补偿算法 FC-XCP, 通过设计合理的控制器, 使输出带宽与链路带宽相匹配、网络系统更稳定。仿真结果表明, 与 PII-XCP 算法相比, FC-XCP 能明显提高动态网络的带宽利用率。

关键词: 显式控制协议; 滑模控制; 拥塞控制; 动态网络; 带宽补偿

Explicit Control Protocol Bandwidth Compensation Algorithm Based on Sliding Mode Control

YIN Feng-jie¹, QU Mei-rong¹, ZHANG Lei¹, WANG Jing², LIU Jun-guo³

(1. Faculty of Information, Liaoning University, Shenyang 110036, China;
2. Code Office, Metrological Standard Information Institute of Weifang City, Weifang 261000, China;
3. Technology Department, Weifang Anti-counterfeiting Association, Weifang 261000, China)

【Abstract】 It is difficult to set reasonable output bandwidth in dynamic network for Explicit Control Protocol(XCP), and unreasonable settings of bandwidth will cause the link utilization declining, so this paper proposes a compensation algorithm of XCP bandwidth named FC-XCP. By reasonable controller design, it solves the problem of bandwidth mismatching when the XCP dynamic changes. Simulation experimental results show that compared with PII-XCP, FC-XCP can improve the bandwidth utilization effectively in dynamic networks.

【Key words】 Explicit Control Protocol(XCP); Sliding Mode Control(SMC); congestion control; dynamic network; bandwidth compensation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.04.030

1 概述

在高带宽时延积网络中, 传统 TCP 协议性能大幅降低。针对上述问题, 文献[1]在显式拥塞通告(Explicit Congestion Notification, ECN)的基础上提出了显式控制协议(Explicit Control Protocol, XCP)。XCP 以其较强的公平性、快速的收敛性、几乎为零的丢包率和较短的路由队列长度等优点, 成为基于显式反馈拥塞控制算法的一种标准。在未来的互联网中, XCP 是一个非常具有竞争力的候选协议^[2]。文献[3]通过 NS2 仿真实验对各种 TCP 改进协议的传输性能在吞吐率、时延和丢包率等方面进行了比较, 结果表明 XCP 协议性能表现最好。但在 XCP 协议中, 配置输出带宽 \hat{c} 的设置直接影响瓶颈带宽的利用率, 而在动态高速网络中为链路设置合理的配置输出带宽 \hat{c} 是一个极具挑战性的工作^[4]。文献[4]利用 PII 控制器对配置输出带宽进行补偿, 并在网络参数不变的情况下取得了较好的效果, 但该算法在动态网络环境下(如控制周期内到达包数、链路带宽和控制周期等参数发生变化时), 输出带宽不能很好地与链路带宽相匹配, 网络系统变得不稳定, 也不能保持在高利用率状态。

本文基于 XCP 拥塞问题的动态模型, 设计了基于滑模的 XCP 带宽补偿算法。利用滑模控制器的特性, 使网络系统带宽达到较高的利用率和较强的鲁棒性。

2 XCP 模型及滑模控制器设计

XCP 效率控制器在每个控制周期计算空闲带宽。文献[5]对 XCP 协议进行了严格的数学建模, 并给出了一个重要结

论, 即效率控制器计算出的可分配空闲带宽 ϕ 和瓶颈流的均衡速率 r 均与路由配置输出带宽 \hat{c} 有关, 且 ϕ 与 r 均是 \hat{c} 的增函数。但在动态高速网络中, 输出带宽 c 和链路 l 处总的流数 N 是变化的, 且网络中存在不确定项和干扰项, 这使得为链路 l 设置合理的输出带宽 \hat{c} 变得非常困难。本文采用滑模控制方法对带宽失配进行补偿。

2.1 非线性 XCP 动态模型的改进

文献[2]基于流体流理论建立了 XCP 非线性动态模型。为了在动态网络中使输入速率跟随带宽变化, 提高带宽利用率, 本文借助文献[4]的思想, 引入控制变量 $u(t)$, 并考虑到配置带宽 \hat{c} 与物理带宽 c 的不同, 将文献[2]的 XCP 动态模型修正如下:

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = -\frac{\alpha}{d}[y(t-d) - \hat{c} - u(t)] - \frac{\beta}{d^2}q(t-d) \\ \dot{q}(t) = y(t) - c \end{cases} \quad (1)$$

其中, $u(t)$ 为滑模控制器输出。

令 $x_1(t) = e_q(t) = q(t) - q_d$ (其中, q_d 为目标队列长度), $\dot{e}_q(t) = y(t) - c$, $c - \hat{c} = \varepsilon$, 并忽略时延对 $y(t)$ 、 $q(t)$ 的影响,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61003003); 辽宁省教育厅基金资助项目(20060348)

作者简介: 尹凤杰(1965—), 女, 教授、博士, 主研方向: 网络拥塞控制, 流量控制, 网络优化; 屈美荣、张 蕾, 硕士研究生; 王 静, 工程师; 刘军国, 助理工程师

收稿日期: 2011-07-25 **E-mail:** fjyin66@163.com

则式(1)可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_0(x) + \Delta f + ku(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $f_0(x) = -\frac{\beta}{d^2}x_1(t) - \frac{\alpha}{d}x_2(t)$; $\Delta f = -\frac{\alpha}{d}\varepsilon$; $k = \frac{\alpha}{d}$ 。令 $\varepsilon = \omega_2 c$, 且 $|\omega_2| \leq \delta_2 < 1$; Δf 是由网络参数的变化 $|\varepsilon| \leq \delta_2 c$ 带来的不确定项, 且 $|\Delta f| \leq \delta_1$ 。

2.2 滑模控制器设计

设计滑模控制系统的过程基本可分为 2 步:

(1) 确定切换函数 $s(t)$, 即滑模面, 使滑模面上的滑动模态能够渐近稳定并且具有良好的动态特性。

(2) 设计切换控制量 $u(t)$, 驱动系统状态保持在滑模面上运动, 从而满足追踪要求 $q(t) \rightarrow q_d$ 和 $y(t) \rightarrow c$ 。

切换函数 $s(t)$ 选取如下形式:

$$s(t) = \lambda x_2 + x_1, \lambda > 0 \quad (3)$$

则 $s(t)$ 对应于路由器队列长度和输入速率跟踪带宽变化的组合。

在滑模阶段需要满足以下条件:

$$s(t) = 0, \dot{s}(t) = 0 \quad (4)$$

式(4)可以保证系统保持在滑模面上。此时, 滑模控制函数设为:

$$u_{eq}(t) = -\frac{\lambda f_0(x) + x_2}{\lambda k} \quad (5)$$

在到达阶段需要满足以下条件:

$$s(t)\dot{s}(t) \leq 0 \quad (6)$$

式(6)可以保证系统在有限时间内到达滑模面。满足此条件的滑模控制函数可设计为:

$$u_s(t) = -\frac{|\lambda f_0(x) + x_2| + \lambda \delta_1 + \eta}{\lambda k} \text{sgn}(s) \quad (7)$$

其中, η 为整常数。

滑模控制律为:

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_s(t) = -\frac{\lambda f_0(x) + x_2}{\lambda k} - \frac{|\lambda f_0(x) + x_2| + \lambda \delta_1 + \eta}{\lambda k} \text{sgn}(s) \quad (8)$$

下面证明在该控制律的控制下, 当系统存在扰动时, 网络系统仍能保持稳定。

证明: 选择 Lyapunov 函数:

$$V = (1/2)s^2(t) \quad (9)$$

对 V 求导得到下式:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(t)\dot{s}(t) = s(t)\{\lambda[f_0(x) + ku(t) + \Delta f] + x_2\} \leq \\ &\lambda \delta_1 s(t) - [|\lambda f_0(x) + x_2| + \lambda \delta_1 + \eta] |s(t)| \leq \\ &- [|\lambda f_0(x) + x_2| + \eta] |s(t)| \leq -\eta |s(t)| < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)满足系统稳定的条件。

3 性能仿真分析

将本文算法简称为 FC-XCP, 在 NS2 中对其进行验证。为了考察本文算法在动态网络环境下的鲁棒性, 从带宽利用率、路由队列长度、瓶颈均衡速率等方面将其与原始 XCP、PII-XCP 算法进行了比较, 并考察了上述指标在网络参数 C 和 RTT 变化时以及网络中存在动态流时算法的鲁棒性。在仿真中, 路由的参数设置为: $q_d = 0$, $C = 20$ Mb/s。3 条数据链路的参数设置为: $C_1 = 5$ Mb/s, $C_2 = 7$ Mb/s, $C_3 = 8$ Mb/s, $RTT = 50$ ms, $\alpha = 0.4$, $\beta = 0.226$, $\lambda = 5$, $\eta = 2$, $\delta_1 = 9$ 。

图 1、图 2 给出在路由带宽 C 和各数据流 RTT 均固定时,

XCP、PII-XCP、FC-XCP 的带宽利用率和队列长度比较结果。从中可以看出, 当参数固定时, 算法均能获得较高的链路利用率, 路由队列长度均会逐渐收敛到接近于 0。可见, 在参数固定的情况下, 3 种算法均具有较好的网络性能。

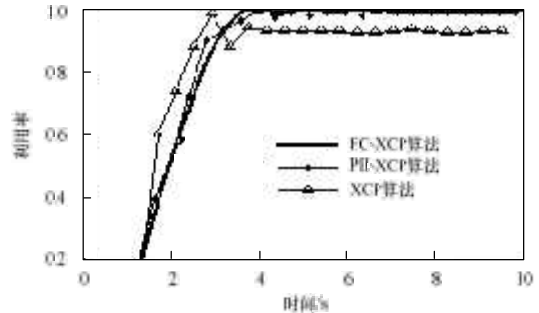


图 1 参数固定时算法的带宽利用率比较

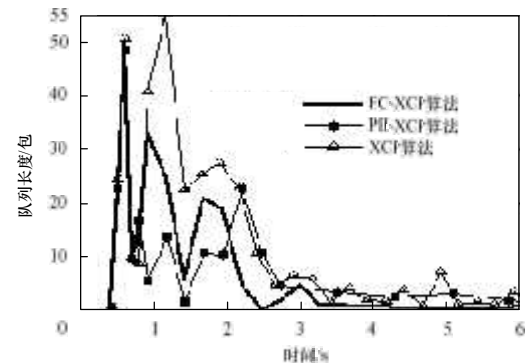


图 2 参数固定时算法的路由队列长度比较

值得注意的是, 式(2)只是一个简化的模型, 忽略了控制周期 d 、网络带宽 C 的变化以及延时对 $y(t)$ 、 $q(t)$ 的影响。为了验证 FC-XCP 算法在动态网络中的鲁棒性, 分别取 C 和 RTT 变化时, 对 XCP、PII-XCP、FC-XCP 算法进行仿真, 结果如图 3、图 4 所示。

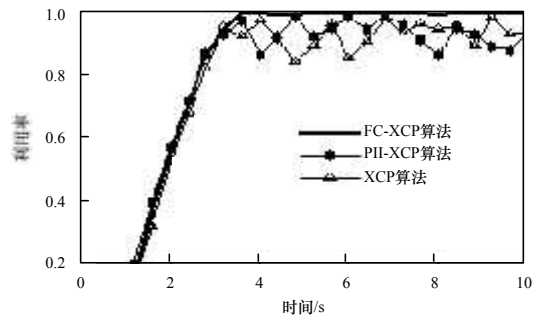


图 3 参数变化时算法的带宽利用率比较

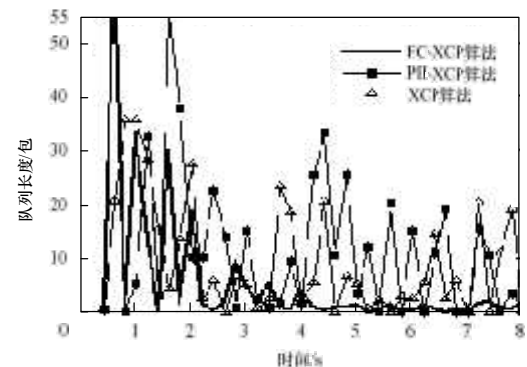


图 4 参数变化时算法的路由队列长度比较

从中可以看出, XCP 和 PII-XCP 的性能显著下降。而 FC-XCP 保持了较好的性能, 链路利用率达到了 100%, 具有较好的鲁棒性, 并且路由器队列长度逐渐趋近于 0。这是由于在动态的网络环境下, XCP 对带宽资源回收和重新分配存在滞后性, 而 PII-XCP 由于 PII 控制器传递函数的参数运算是基于固定网络参数的, 不能随动态网络的变化自行调整, 因此在网络动态变化时, 性能急剧恶化, 不能保持良好的系统稳定性。

为了进一步比较 FC-XCP 算法与 PII-XCP 算法的鲁棒性, 在网络中加入动态流, 对 2 种算法进行仿真比较。C₁ 中为 Web 流和 XCP 流, C₂、C₃ 中为 XCP 流。其中, Web 流按泊松过程到达, 均值为每秒 800 个。Web 流大小服从重尾分布, 均值为每秒 30 个数据包, 参数设置见文献[6]。

图 5 和图 6 给出了在存在动态流并且路由可用带宽和数据流往返时延固定的情况下, 路由带宽利用率和路由队列长度比较。从中可以看出, 存在动态流的情况下, PII-XCP 算法的链路不能被充分利用, FC-XCP 的链路利用率较 PII-XCP 高, 队列长度也较 PII-XCP 稳定。并且 FC-XCP 的路由队列长度不会随 Web 流到达速率的增大而增大。

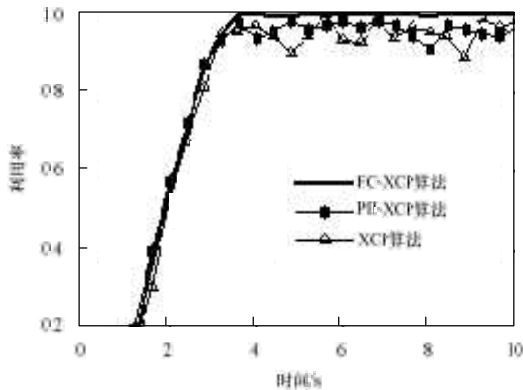


图 5 存在动态流时算法的带宽利用率比较

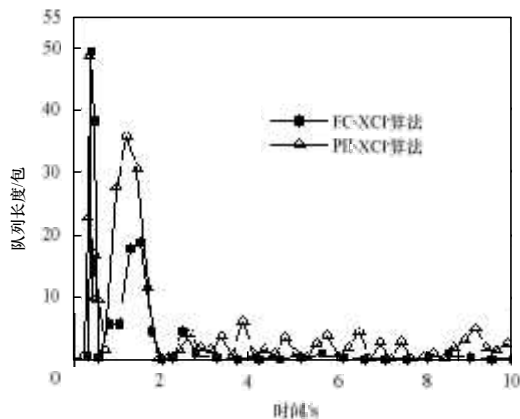


图 6 存在动态流时算法的队列长度比较

图 7 和图 8 给出了存在动态流且路由可用带宽和数据流往返时延均变化时, 算法的路由带宽利用率和路由队列长度比较。可以看出, 当网络参数也变化时, 运行 PII-XCP 协议的路由带宽利用率发生剧烈波动, 路由队列长度收敛缓慢。这是由于 PII-XCP 的控制器是基于固定网络参数设计的, 在动态网络环境下性能下降。而由于滑模控制器对不确定项和干扰项具有很好的鲁棒性, 因此运行 FC-XCP 算法的路由保持了良好的性能。

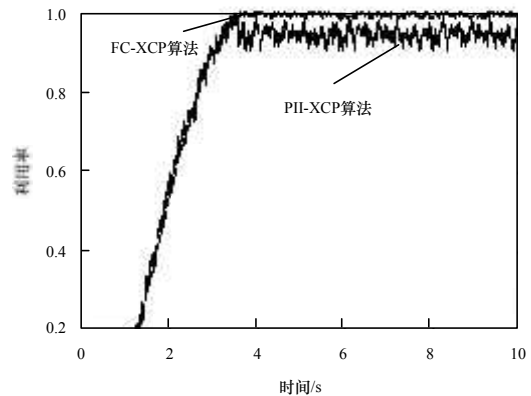


图 7 存在动态流且网络参数变化时算法的带宽利用率比较

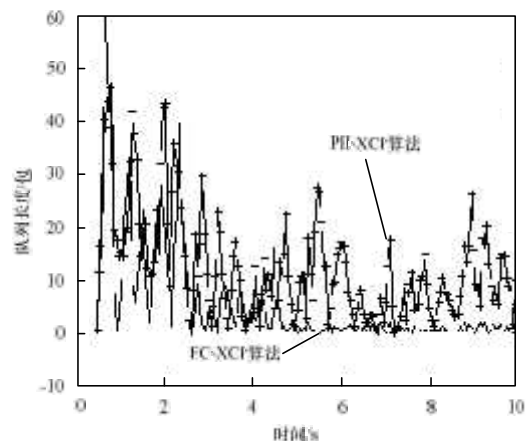


图 8 存在动态流且网络参数变化时算法的队列长度比较

4 结束语

本文提出了一种基于滑模控制的 XCP 带宽补偿算法 FC-XCP, 该算法克服了 XCP 配置带宽设置困难的缺陷, 并且利用滑模控制器的特点解决了动态网络中网络参数随机改变时网络不稳定的问题, 使链路保持较高带宽利用率和较短的路由队列长度。其与 PII-XCP 相比, 更适用于目前现实的动态网络。

参考文献

- [1] Katabi D, Handley M, Rohrs C. Congestion Control for High Bandwidth-delay Product Networks[C]//Proceedings of ACM SIGCOMM '02. Pittsburgh, USA: ACM Press, 2002: 89-102.
- [2] Zhang Yueping, Leonard D, Loguinov D. JetMax: Scalable Max-min Congestion Control for High-speed Heterogeneous Networks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM'06. [S. l.]: IEEE Press, 2006: 1-13.
- [3] 任勇毛, 唐海娜, 李俊, 等. 高速网络 TCP 改进协议 NS2 仿真性能比较[J]. 计算机工程, 2009, 35(2): 6-9.
- [4] 周海瑞, 戴冠中, 郭达伟, 等. 基于 PII 控制器的 XCP 带宽补偿算法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 2004-2009.
- [5] Low S H, Andrew L L, Wyrowski B P. Understanding XCP: Equilibrium and Fairness[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM'05. [S. l.]: IEEE Press, 2005: 1025-1036.
- [6] Crovella M E, Bestavros A. Self-similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(6): 835-846.