

基于不变流形的 FAST TCP 参数选择方法

陈晓龙^{1,2} 章云¹ 刘治¹ 杨玲玲¹

(广东工业大学自动化学院 广州 510090)¹ (茂名学院计算机与电子信息学院 茂名 525000)²

摘要 在各路径 FAST TCP 连接到达服从泊松过程、传送文件长度服从指数分布和瓶颈链路处于重流量服务强度的条件下,利用含有各路径 FAST TCP 连接平均逗留时间的 Lyapunov 函数,证明了若处于不变流形状态,则各路径活跃 FAST TCP 连接平均逗留时间最短,并且在有限的时间内系统可到达该不变流形。针对 FAST TCP 采用静态映射表确定协议参数 α 的缺陷,按照降阶的不变流形中连接数和协议参数的关系,提出了一种在慢时间尺度比例下根据连接数期望值和不变流形迭代搜索协议参数的方法。NS-2 仿真结果表明该方法是有有效的。

关键词 参数选择,不变流形,重流量,服务强度,流模型,逗留时间

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

FAST TCP Preference Method Based on Invariant Manifolds

CHEN Xiao-long^{1,2} ZHANG Yun¹ LIU Zhi¹ YANG Ling-ling¹

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)¹

(School of Computer & Electronics and Information, Maoming College, Maoming 525000, China)²

Abstract When each route FAST TCP connections were assumed Poisson arrival and exponentially distributed document sizes, a Lyapunov function including FAST TCP connection's lingering time was constructed to prove that each route connection lingering time was shortest at the invariant manifolds under the heavy traffic service intensity, and to prove that the invariant manifolds were reached in a finite time. Aiming at the weakness of FAST TCP static mapping protocol parameter method, according to the relation between connection numbers and the protocol parameter in reduced order invariant manifolds, a slow timescale iterative search protocol parameter method based on the expected connection numbers and invariant manifolds was proposed. NS-2 simulation results were presented to verify the effectiveness of this method.

Keywords Preference, Invariant manifolds, Heavy traffic, Service intensity, Fluid model, Lingering time

FAST TCP^[1-5] (简称 FAST) 是加州理工学院网络实验室 Steven H. Low 等人针对高速、长延迟、大容量的高性能网络提出的一种新型传输控制协议。FAST 采用排队延迟和分组丢弃作为拥塞信号,其基于平衡的设计思想使得其在吞吐量、公平性、稳定性和快速响应等性能指标上要优于 TCP Reno, HSTCP 和 STCP 等协议^[1],但也存在难以正确估测 BaseRTT 和选择合适的协议参数两大问题^[2,5]。

在 FAST 现阶段算法的具体实现中,都是假设网络拓扑中各路径 FAST 连接数固定,各源端发送持续的数据流。源端根据吞吐量的大小,采用静态映射表^[1,3,4]来确定协议参数 α 的值,在满足链路资源容量约束的情况下,保证各路径传输流量分配 α 比例公平下,达到网络整体效用最大。

然而现实网络中各路径活跃连接数时刻在变化,若仍采用静态映射选择参数,随着活跃连接的增多,瓶颈链路缓冲队列增加,产生丢包的概率迅速增大,会造成网络振荡加剧,性能降低;同样,随着连接的减少,网络收敛速度慢,利用率低^[8,9]。

所以本文希望解决的问题是各路径活跃的连接数不固定,但假设各路径连接按照泊松过程到达,其传送文件长度服从指数分布,当瓶颈链路处于重流量服务强度时,根据各路径活跃的连接数和丢包情况等局部信息,选择合适的协议参数,使得各路径活跃的连接数保持稳定,各路径泊松到达的连接都能够及时建立、按时传输和离开。本文第 1 节在原有链路、多路径 FAST 网络模型基础上,添加了各路径活跃的 FAST 连接数的随机马尔可夫过程排队模型及逼近该随机模型的相应确定性流模型;第 2 节给出了该随机模型的不变流形的定义,证明了当处于不变流形时,各路径 FAST 连接的逗留时间最短和该不变流形是可到达的;第 3 节根据降维的不变流形下的特性,提出了根据各路径活跃的 FAST 连接数及其变化趋势、各路径丢包信息和连接数期望值等局部信息自适应选择协议参数 α 的方法,使得各路径活跃的 FAST 连接数分布在期望的范围;第 4 节给出了仿真结果;最后为结论。

到稿日期:2009-09-23 返修日期:2009-11-29 本文受国家广东省联合基金(U0735003),国家自然科学基金基金项目(60604006),茂名学院自然科学基金资助。

陈晓龙(1971-),男,博士生,副教授,CCF 会员,主要研究方向为网络拥塞控制、非线性控制, E-mail: xlycxl@126.com;章云(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能控制与信息处理技术、控制网络与集成、机器人技术与自动化装备。

1 FAST 随机网络模型

1.1 多链路多路径网络模型基本概念

如图 1 所示,做如下假设:

假设 A 假设网络包含 $|L|$ 条链路和 $|I|$ 条路径,定义链路集合 $L = \{1, 2, \dots, |L|\}$ 和路径集合 $I = \{1, 2, \dots, |I|\}$, 假设路由矩阵 R 为行满秩矩阵,其值为:

$$R_{l,i} = \begin{cases} 1, & i \text{ 包含 } l \\ 0, & \text{未包含} \end{cases}, \forall i \in I \text{ 和 } l \in L \quad (1)$$

假设 B 假设各路径源端都采用 FAST 协议,假设各路径 FAST 连接数不固定,但已统计到各路径 FAST 连接到达服从参数 v 的泊松过程,其传送文件尺寸服从参数 u 指数分布的随机变量。假设各路径活跃的 FAST 连接公平地分配路径上的传输流量。

假设 C 假设存在处于重流量服务强度(见式(5))的链路。各链路缓冲空间有限,采用先来先服务(FCFS)、队尾丢弃(Drop tail)的队列管理方式。

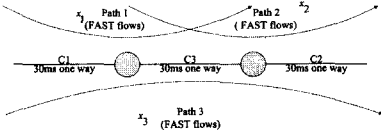


图 1 多路径多链路网络模型

对于任给的路径 $i \in I$,有

$$N(t) = (N_i(t); i \in I)$$

式中, $N_i(t)$ 是随机变量,表示在 t 时刻 FAST 协议数据流在路径 i 上的 FAST 连接数(connects)(当不指明下标时表示其相应向量,文后不再指出)。

$n_i(\cdot) = \bar{N}_i(\cdot, \omega)$: 表示路径 i FAST 连接数大比例时间尺度取极限的平均期望个数(connects)(见式(8))。

$w_i(t)$: 路径 i 的 FAST 连接的发送窗口(packets);

d_i : 路径 i 的传播延时(s);

$q_i(t)$: 路径 i 包含的瓶颈链路累积排队延时(s);

$$q_i = \sum_l R_{li} p_l \quad (2)$$

式中, p_l 含义见式(4);

$D_i(t)$: 路径 i 的往返时延, $D_i = d_i + q_i$ (s);

$x_i(t)$: 路径 i 获得的传输流量 (packets/s);

α_i : 路径 i 的每个 FAST 连接的协议参数 (packets);

v_i : 路径 i FAST 连接建立服从参数 v_i 泊松到达过程(connects/s);

u_i : FAST 连接传送文件尺寸服从 u_i 负指数分布;

$1/u_i$: FAST 连接传送文件的平均尺寸(packets);

n_i/u_i : 为路径 i 活跃的 FAST 连接数和路径 i 上平均文件尺寸的乘积,表示等待发送的平均工作量大小(packets);

$\rho_i = v_i/u_i$: 路径 i 上流量服务强度^[9] (packets/s);

$I_0(n) \equiv \{i \in I | n_i = 0\}$, 活跃 FAST 连接数为 0 的路径的集合。当 $i \in I_0(n)$, 该路径 $x_i = 0$;

$I_+(n) \equiv \{i \in I | n_i > 0\}$, FAST 连接数大于 0 的路径的集合。当 $i \in I_+(n)$, 该路径 $x_i > 0, I = I_0 + I_+$ 。

对于任给的链路 $l \in L$, 有:

c_l : 链路 l 的带宽(packets/s);

$y_l(t)$: 经过链路 l 的各路径累计到达流量(packets/s), 其中

$$y_l = \sum_i R_{li} x_i \quad (3)$$

$b_l(t)$: 链路 l 累计队列长度(packets);

$p_l(t)$: 链路 l 的排队延时, 其中

$$p_l = b_l/c_l(s) \quad (4)$$

定义重流量服务强度链路集合为:

$$L^* = \{l \in L; \sum_i R_{li} \rho_i = c_l\} \quad (5)$$

定义重流量服务强度链路 l 待发送的工作量(packets)为:

$$h_l(n(t)) = \sum_i R_{li} n_i(t)/u_i \quad (6)$$

式中, $l \in L^*$ 。

注意: 概念说明中带有时间变量 t 的是随时间的变量, 否则为常量。后面为了书写方便, 若省去时间变量 t , 仍表示变量。

1.2 FAST 连接数的排队模型、流模型

由假设 C 知, 可把各路径 FAST 连接到达、发送、离开的过程看成是一个可变服务速率的 $M/M/1/C$ 排队模型。路径 i 上的 FAST 连接数可表示为:

$$N_i(t) = N_i(0) + E_i(t) - S_i(T_i(t)) \quad (7)$$

式中, $N_i(0) \geq 0$ 表示路径 i 初始时刻的活跃 FAST 连接数。 $E_i(t)$ 表示 0 到 t 时刻路径 i 新建的 FAST 连接数, 是一个各路径相互无关的服从到达率为 v_i 的 Poisson 过程。 $T_i(t)$ 表示 0 到 t 时刻路径 i 传输完成的累积量(packets)。 $T_i(t) = \int_0^t x_i(t) dt$ 是 I 维、连续非递减函数。 $S_i(t)$ 表示 0 到 t 时刻路径 i 离开的 FAST 连接数, 也是一个各路径相互无关的服从速率为 $\mu_i x_i$ 的 Poisson 过程。由文献[6,7]知 $N_i(t)$ 具有观后无效性, 是一个马尔可夫过程。

文献[6]对随机过程 $N_i(t), E_i(t), S_i(t), T_i(t)$, 选取以 r 为上标做时间和状态的变换, 构造一系列具有相同网络拓扑结构的过程:

$$\bar{N}_i^r(t) = N_i^r(rt)/r$$

$$\bar{E}_i^r(t) = E_i^r(rt)/r$$

$$\bar{S}_i^r(t) = S_i^r(rt)/r$$

$$\bar{T}_i^r(t) = T_i^r(rt)/r$$

当 $r \rightarrow \infty$ 时, 取流极限 $n_i(\cdot) = \bar{N}_i(\cdot, \omega)$, 将离散的随机模型转化为确定的流体模型^[6,7]。

对每个 i 存在, 在其正则点 t , 有流模型方程:

$$\frac{d}{dt} n_i(t) = \begin{cases} v_i - u_i x_i^*(t), & n_i(t) > 0 \\ 0, & n_i(t) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, 对每个 $l \in L$, 有:

$$\sum_{i \in I_+} R_{li} x_i^* + \sum_{i \in I_0} R_{li} \rho_i \leq c_l \quad (10)$$

式中, x_i^* 是流极限(平稳态)下各路径的统计意义的平均流量。

由文献[6-8]知, 只要证明逼近其流体模型是稳定的, 则式(7)是遍历的, FAST 连接数存在平稳分布。

1.3 FAST 随机网络模型

假设各路径 FAST 连接数固定, 当各源端发送持续的数据流时, 网络拥塞控制模型^[1-5]可表示为:

$$w_i(t+1) = (1-\gamma)w_i(t) + \gamma(d_i w_i(t)/(d_i + q_i) + \alpha_i) \quad (11)$$

$$\gamma \in (0, 1]$$

$$y_l \leq c_l \quad (12)$$

$$p_l(y_l - c_l) = 0 \quad (13)$$

$$x_i(t) = n_i w_i(t) / (d_i + q_i) \quad (14)$$

$$x_i \geq 0, p_l \geq 0 \quad (15)$$

由于各路径活跃的 FAST 连接数不再固定,而是按照式(9)、式(10)描述动态关系的变化,FAST 随机网络模型应由式(9)一式(15)描述。

定义 1(各路径效用函数)

$$U_i(x_i) = n_i \alpha_i \log x_i \quad (16)$$

$$U(x) = (U_1(x_1), U_2(x_2), \dots)$$

从文献[1,3]知,式(16)是凹函数,其梯度函数为:

$$\nabla U_i(x_i) = \frac{n_i \alpha_i}{x_i} \quad (17)$$

其 Hessian 矩阵 $\nabla^2 U$ 为负定矩阵。

由文献[1-5]知,FAST 协议的平衡点是下述非线性规划优化模型的最优解。

$$\begin{cases} \max \sum_{i \in I_+} U_i(x_i) \\ \sum_{i \in I_+} R_{\bar{l}} x_i \leq c_l, l \in L \end{cases} \quad (18)$$

其平衡点(最优传输流量)满足:

$$x_i = n_i \alpha_i / (\sum_{l \in L} R_{\bar{l}} p_l), i \in I_+ \quad (19)$$

$$p_l (\sum_{i \in I_+} R_{\bar{l}} x_i - c_l) = 0, l \in L \quad (20)$$

2 不变流形

2.1 不变流形的定义及特征

定义 2 如果存在时间 T ,使得所有的 $t > T$,存在流体模型..,沿方向场式(9)一式(15)的李导数为 0,则称路径 FAST 连接数状态向量 n_{t_0} 处于不变流形^[8]。

若 M 表示所有不变流形的集合,由式(9)和定义 2 可知, M 具有特如下特征:

$$M = \{n_i \geq 0; x_i^*(t) = \rho_i, i \in I_+(n)\} \quad (21)$$

由式(19)一式(21)知,当处于不变流形时,有:

$$n_i = \rho_i (\sum_{l \in L} R_{\bar{l}} p_l) / \alpha_i, i \in I_+(n) \quad (22)$$

$$p_l (\sum_{i \in I_+} R_{\bar{l}} \rho_i - c_l) = 0, l \in L \quad (23)$$

注意到,对于不处于重流量服务强度下的链路有:

$$\sum_i R_{\bar{l}} x_i = \sum_i R_{\bar{l}} \rho_i < c_l$$

由式(20)知,对 $l \in L \setminus L^*$ 有 $p_l = 0$,所以式(22)可写为:

$$n_i = \rho_i (\sum_{l \in L^*} R_{\bar{l}} p_l) / \alpha_i, i \in I_+(n) \quad (24)$$

注意到当 $i \in I_0$ 时有 $n_i = 0, x_i^* = 0$,则该路径包含的所有重流量服务强度链路 $l \in L^*$,都有:

$$\sum_i R_{\bar{l}} x_i^* < \sum_i R_{\bar{l}} \rho_i = c_l$$

由式(20)知,其经过的所有 $l \in L^*$,都有 $p_l = 0$ 。所以当 $i \in I_0$ 时式(24)仍成立,所以式(24)可写为:

$$n_i = \rho_i (\sum_{l \in L^*} R_{\bar{l}} p_l) / \alpha_i, i \in I(n) \quad (25)$$

下面进一步证明当系统处于不变流形时各路径活跃的 FAST 连接在排队过程中逗留时间最短。

定义 3(定义 Lyapunov 函数)

$$F(n) = \frac{1}{2} \sum_{i \in I} v_i \alpha_i (n_i / v_i)^2 \quad (26)$$

由 Little's law^[7]知 (n_i / v_i) 表示路径 i 中 FAST 连接数的逗留时间。所以式(26)可解释为所有 FAST 连接数的逗留时间的加权,其和为正数,是严格凸函数,并且有:

$$\|n\| \rightarrow \infty \Leftrightarrow F(n) \rightarrow \infty$$

定理 1 当处于不变流形时,式(25)的 FAST 连接数值 n_i 是下列模型(平均最小逗留时间)的唯一最优解。

$$\min_{n \geq 0} F(n) \quad (27)$$

$$\sum_{i \in I} R_{\bar{l}} n_i / v_i \geq h_l, l \in L^* \quad (28)$$

证明:由定义 3 知优化模型的目标函数式(27)和约束函数式(28)是严格的凸函数,所以有唯一的最优解。由文献[1-3]知,其最优解满足以下 Karush-Kuhn-Tucker 条件:

$$\frac{dF(n)}{dn_i} = \sum_{l \in L^*} p_l \frac{R_{\bar{l}}}{v_i}, i \in I(n) \quad (29)$$

$$p_l (\sum_{i \in I} R_{\bar{l}} \frac{n_i}{v_i} - h_l) = 0, l \in L^* \quad (30)$$

将式(26)对 n_i 求导,得:

$$\frac{dF(n)}{dn_i} = \frac{n_i \alpha_i}{v_i}$$

因为是不变流形,所以式(25)成立。将式(25)代入上式,得:

$$\text{式(29)左边} = \frac{v_i / \alpha_i (\sum_{l \in L^*} R_{\bar{l}} p_l) \alpha_i}{\alpha_i v_i} = \frac{\sum_{l \in L^*} R_{\bar{l}} p_l}{v_i}$$

故式(29)成立,由式(6)知式(30)成立。所以式(25)是满足模型式(27)、式(28)优化解的 K-K-T 条件,即唯一最优解。

2.2 不变流形可达性

下面证明在有限时间范围内,FAST 协议本身运行机制可到达上节定义的不变流形。

定义 4^[7] 取工作量向量 $h \in R^{L^*}$,定义 $F(h)$ 为模型式(27)、式(28)取得的最优值。定义函数 $H(n) = F(n) - F(h)$ (注:由定义 3 和定理 1 可知 $F(n)$ 是连续函数,故函数 $H: R_+^L \rightarrow R$ 是连续函数,当 n 处于不变流形时,取零值,当 $n \in R_+^L \setminus M$ 时,为严格正)。定义 $d(M, n(t)) = \inf\{\|z - n\| : z \in M\}$ 为 $n(t)$ 到不变流形的距离。

定理 2 固定 $R \in (0, \infty)$ 和任意的 $\epsilon > 0$,存在时间常数 $T_{R,\epsilon} > 0$,使得对满足 $\|n(0)\| \leq R$ 的流模型解 $n(\cdot)$,当 $t > T_{R,\epsilon}$ 时,有 $d(M, n(t)) < \epsilon$ 。

证明:证明分 5 步,前 4 步证明在重流量服务强度下 $F(n(t))$, $H(n)$ 是非增函数, $F(h)$, $h(n)$ 是非减函数。第 5 步证明定理的结论。

$$1) \text{证明 } \frac{d}{dt} F(n) \leq 0.$$

假设瓶颈链路 l 处于重流量服务强度下,由式(5)有:

$$\sum_i R_{\bar{l}} \rho_i = c_l \quad (31)$$

定义模型式(18)下平衡点最优解^[1-3]为 (w^*, p^*, x^*) ,有:

$$\sum_i R_{\bar{l}} x_i^* = c_l \quad (32)$$

由式(31)、式(32)、式(18)的约束条件知 ρ_i, x_i^* 都是优化模型式(18)的可行解,但 x_i^* 是这种协议参数 α 下的最优解,所以有:

$$\sum_i U_i(\rho_i) \leq \sum_i U_i(x_i^*) \quad (33)$$

将式(26)对时间求导,得:

$$\frac{d}{dt} F(n) = \sum_{i \in I} \alpha_i \left(\frac{n_i}{v_i} \right) \frac{d}{dt} n_i(t)$$

将式(9)代入上式,得:

$$\frac{d}{dt} F(n) = \sum_{i \in I_+} \alpha_i \left(\frac{n_i}{v_i} \right) (v_i - u_i x_i^*(t))$$

将括号内 u_i 提出来,得:

$$\frac{d}{dt}F(n) = \sum_{i \in I_+} \alpha_i \left(\frac{n_i}{v_i/u_i} \right) (v_i/u_i - x_i^*(t))$$

因为 $\rho_i = v_i/u_i$, 所以有:

$$\frac{d}{dt}F(n) = \sum_{i \in I_+} \alpha_i \left(\frac{n_i}{\rho_i} \right) (\rho_i - x_i^*(t))$$

由式(17)得到:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}F(n) &= \sum_{i \in I_+} \frac{n_i \alpha_i}{\rho_i} (\rho_i - x_i^*) = \sum_{i \in I_+} \nabla U_i(\rho_i) (\rho_i - x_i^*) \\ &= \nabla U(\rho) (\rho - x^*) \end{aligned} \quad (34)$$

取 $\nabla x = x^* - \rho$, 将 $U(x^*)$ 在点 ρ 泰勒展开, 有:

$$\begin{aligned} U(x^*) &= U(\rho) + \nabla U(\rho) (x^* - \rho) + \frac{1}{2} (x^* - \rho) \nabla^2 U \\ &\quad (\rho) (x^* - \rho) + o(\nabla^3 x) \end{aligned} \quad (35)$$

由式(34)、式(35)得:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}F(n) &= U(\rho) - U(x^*) + \frac{1}{2} (x^* - \rho) \nabla^2 U(\rho) (x^* - \rho) + \\ &\quad o^3(\nabla x) \end{aligned}$$

由定义 2 知, 其效用函数是严格凹函数, Hessian 为负定阵, 有:

$$\frac{1}{2} (x^* - \rho) \nabla^2 U(\rho) (x^* - \rho) \leq 0 \quad (36)$$

由式(33)、式(36)知:

$$\frac{d}{dt}F(n) \leq 0 \quad (37)$$

由式(37)知, $F(n)$ 非增且有界, 所以在重服务强度下, 由定义 3 知其各路径活跃的 FAST 连接数和 FAST 连接平均逗留时间有界。

$$2) \text{ 证明 } \frac{d}{dt}h(n(t)) \geq 0^{[7]}.$$

由式(6)得:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}h_l(n(t)) &= \sum_{i \in I_+} R_{li} \frac{1}{u_i} \frac{dn_i}{dt} = \sum_{i \in I_+} R_{li} \frac{1}{u_i} (v_i - u_i x_i(t)) \\ &= \sum_{i \in I_+} R_{li} (\rho_i - x_i(t)) \end{aligned}$$

因为是重流量强度, 所以 $\sum_{i \in I} R_{li} \rho_i = c_l, l \in L^*$, 代入式(10), 得:

$$\sum_{i \in I_+} R_{li} x_i(t) \leq \sum_{i \in I_+} R_{li} \rho_i$$

因此 $\frac{d}{dt}h(n(t)) \geq 0$ 。

3) $\underline{F}(h)$ 是关于 h 的非减函数。

由优化模型式(27)、式(28)可知, 假设存在两个工作量向量 h_1, h_2 , 如果 $h_1 > h_2$, 则取 $\underline{F}(h_1)$ 的最优解一定是相对于 h_2 的可行解, 所以有 $\underline{F}(h_1) \geq \underline{F}(h_2)$ 。由证明 2) 可知 $\frac{d}{dt}h(n(t)) \geq 0$, 所以可得到 $\underline{F}(h)$ 也是关于时间 t 的非减函数。

4) $H(n)$ 是非增函数。

由定义 4 知 $H(n) = F(n) - \underline{F}(h(n))$ 。由上述证明 1)、2)、3) 知, $H(n)$ 是关于时间 t 的非增函数。

5) 固定初值和任意的 $\epsilon > 0$, 设 $\hat{F}(R) = \sup\{F(z); z \in R^L, \|z\| \leq R\}$ 。由式(37)知 $F(n)$ 为有界连续函数, 表明存在一个与初值 R 有关的闭球 B , 当 $z \in B^c$ 时, 有 $F(z) > \hat{F}(R)$ 。因为 $\frac{d}{dt}F(n) \leq 0$, 所以对 $t \in [0, \infty)$ 有 $n(t) \in B$ 。

定义

$$D = \{z \in B; d(M, z) \geq \epsilon\} \quad (38)$$

由定义 4 知函数 H 在紧集 D 上是连续和严格正的。

定义

$$\delta = \inf\{H(z); z \in D\} \quad (39)$$

由式(38)得 $\delta > 0$ 。

定义集合

$$\tilde{D} = \{z \in B; H(z) \geq \delta\} \quad (40)$$

由式(38)、式(39)知 \tilde{D} 包含 D 。由定义 4 知只有在不变流形 M 下, 函数 H 为 0, 所以集合 \tilde{D} 中不包含不变流形 M 。

假设 $T(n) = \inf\{t > 0, n(t) \notin \tilde{D}\}$, 由定义 4 知:

$$\begin{aligned} H(n(t)) - H(n(0)) &= F(n) - \underline{F}(h(n)) - (F(n(0)) - \underline{F}(h(n(0)))) \\ &= F(n) - F(n(0)) + \underline{F}(h(n(0))) - \underline{F}(h(n)) \end{aligned}$$

由本定理证明 2) 和 3) 知:

$$H(n(t)) - H(n(0)) \leq F(n) - F(n(0)) = \int_0^t \frac{d}{ds} F(s) ds \quad (41)$$

由式(34)知存在 $K_{R,\epsilon} > 0$, 使得 $\|\frac{d}{dt}F(n)\| \leq K_{R,\epsilon}$ 有界。

那么, 若取 $\bar{H} = \sup\{H(z); \|z\| \leq R\}$, 当 $T_{R,\epsilon} = \bar{H}/K_{R,\epsilon} < \infty$ 时, 有 $n(t) \notin \tilde{D}$, 应为都在闭球 B 中, 所以有 $n(t) \in D$ 。

又因为 $H(n)$ 是非增函数, 所以当 $t > T_{R,\epsilon}$ 时, 有 $n(t) \notin D$, 表明当 $t > T_{R,\epsilon}$ 时, 有 $d(M, n(t)) < \epsilon$ 。证毕。

3 FAST 协议参数选择算法

3.1 算法分析

由定理 1、定理 2 分析可知, 在重流量服务强度下, 本文所建 FAST 随机网络模型存在不变流形, 且在有限的时间内将到达该不变流形。当处于不变流形时, 各路径获得的传输流量等于其流量服务强度, 网络模型已降阶为式(25)的二维不变流形。由式(25)可知各路径活跃的连接数和协议参数 α 成反比关系, 但该不变流形并没有限制活跃的连接数。而在实际网络运行中, 一般都要求活跃连接数在一定范围内变化, 活跃的连接太多或太少都会影响网络的各项性能指标。如果有一条路径, 其活跃连接数很大, 根据不变流形式(25)中各路径活跃的连接数和协议参数 α 的关系, 可适当调大协议参数 α , 增加该路径各活跃 FAST 连接竞争传输流量的能力。由于调大了协议参数, 系统原来的平衡被打破, 该路径将获得更大的传输流量, 系统将到达新的不变流形(注意新的不变流形的各路径获得的传输流量仍等于其流量服务强度, 但由式(9)知活跃的连接数将变小)。同理, 当发现某路径的活跃连接数较少时, 说明该路径获得的流量较充分, 可适当调小协议参数。本算法的主要思想是根据不变流形式(25)的特征, 每隔一段较长的时间(远大于窗口更新周期)采用文献[9, 10]推荐的基于测量的技术得到各路径平均活跃连接数 \bar{n}_i 。若发现平均活跃连接数不在期望的范围内, 通过路径的局部信息 (α_i, \bar{n}_i) 、期望的 n_i^* 和各路径的丢包情况再适当调节协议参数, 使得各路径活跃的连接数平稳分布在实际期望的范围内。若发现有丢包现象发生, 则说明期望在瓶颈链路缓冲区的冗余包数太多, 要适当减少各路径协议参数, 以避免缓冲溢出。

3.2 算法描述

1) 对路径 i 上所有 FAST 连接的协议参数, 赋初值:

$$\alpha_i = \frac{\rho_i}{G} \quad (G \text{ 是规模参数}) \quad (42)$$

2) 对各路径采用文献[9, 10]推荐的基于测量的技术(小时间尺度)定期采样, 得到各路径平均活跃连接数 \bar{n}_i 。

3) 计算连接数变化趋势 $\Delta \bar{n}_i$ 。

4) 假设 $\alpha_{i, \max}, \alpha_{i, \min}, n_{i, \max}, n_{i, \min}$ 分别表示各路径最大、最小协议参数和活跃连接数。如果发现路径有丢包,

$$\alpha_i(t+1) = (1-\delta)\alpha_i(t)$$

否则执行以下步骤更新协议参数:

如果 $\bar{n}_i > n_{i, \max}$ 且 $\Delta \bar{n}_i > 0$, 则

$$\alpha_i(t+1) = \min\{(1+\eta(\bar{n}_i - n_{i, \max}))\alpha_i(t), \alpha_{i, \max}\}$$

如果 $\bar{n}_i > n_{i, \max}$ 且 $\Delta \bar{n}_i < 0$, 则

$$\alpha_i(t+1) = \min\{(1+\delta(\bar{n}_i - n_{i, \max}))\alpha_i(t), \alpha_{i, \max}\}$$

如果 $\bar{n}_i < n_{i, \min}$ 且 $\Delta \bar{n}_i > 0$, 则

$$\alpha_i(t+1) = \max\{(1-\delta(n_{i, \min} - \bar{n}_i))\alpha_i(t), \alpha_{i, \min}\}$$

如果 $\bar{n}_i < n_{i, \min}$ 且 $\Delta \bar{n}_i < 0$, 则

$$\alpha_i(t+1) = \max\{(1-\eta(n_{i, \min} - \bar{n}_i))\alpha_i(t), \alpha_{i, \min}\}$$

5) 每隔窗口更新周期(一个 RTT), 根据式(11)更新窗口大小。

4 仿真

通过 NS2.31 仿真来验证算法的有效性。仿真采用的网络拓扑如图 1 所示。网络由 3 条链路和 3 条路径组成, 链路传播延时为 30ms, 仿真时间为 2000s, 平均包长为 1000bytes。

实验 1 如图 1 所示, 链路容量 $c_1 = c_2 = 80\text{Mbps}$, $c_3 = 120\text{Mbps}$ 。路径 1、路径 2 的 FAST 连接到达率 $\nu_1 = \nu_2 = 0.1\text{connects/s}$, 路径 3 的 FAST 连接到达率 $\nu_3 = 0.4\text{connects/s}$ 。每个新建立的连接其文件平均大小为 $1/u_1 = 1/u_2 = 1/u_3 = 160\text{Mb}$, 路径 1、路径 2 的流量服务强度为 $\rho_1 = \rho_2 = 16\text{Mbps}$, 路径 3 的流量服务强度为 $\rho_3 = 64\text{Mbps}$ 。由式(5)知链路 1、链路 3 处于重流量服务强度。取期望连接数控制范围为: $n_{i, \max} = 25, n_{i, \min} = 5$ 。用静态映射选择协议参数和采用本文动态选择协议参数两种方法分别进行仿真, 得到两组结果, 如图 2、图 3 和表 1 所示。与图 2 相比, 图 3 中各路径活跃的 FAST 连接数能够控制在期望范围内。由表 1 知, 在规定的仿真时间内 FAST 连接平均逗留时间减小 32%。

实验 2 如图 1 所示, 将实验 1 的链路容量修改为 $c_1 = c_2 = 160\text{Mbps}$, $c_3 = 96\text{Mbps}$ 。路径 1、路径 2 的 FAST 连接到达率 $\nu_1 = \nu_2 = 0.1\text{connects/s}$, 路径 3 的 FAST 连接到达率 $\nu_3 = 0.4\text{connects/s}$ 。新建立的每个连接其文件平均大小为 $1/u_1 = 1/u_2 = 1/u_3 = 160\text{Mb}$, 路径 1、路径 2 的流量服务强度为 $\rho_1 = \rho_2 = 16\text{Mbps}$, 路径 3 的流量服务强度为 $\rho_3 = 64\text{Mbps}$ 。由式(5)知链路 2 处于重流量服务强度。取期望连接数控制范围为 $n_{i, \max} = 25, n_{i, \min} = 5$ 。用静态映射选择协议参数和采用本文动态选择协议参数两种方法分别进行仿真得到两组结果, 如图 4、图 5 和表 2 所示。与图 4 相比, 图 5 中各路径活跃的 FAST 连接数能够控制在期望范围内。由表 2 知, 在规定的仿真时间内 FAST 连接平均逗留时间减小 41%。

表 1 FAST 连接平均逗留时间对比(实验 1)(单位: 秒)

	FAST1	FAST2	FAST3	总平均
采用系统默认参数	143.4	101.0	67.24	86.43
动态调节协议参数	108.2	83.24	41.02	58.60

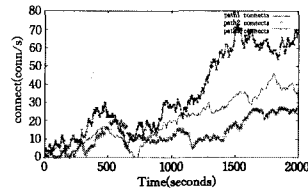


图 2 α 为默认参数各路径活跃 FAST 连接数

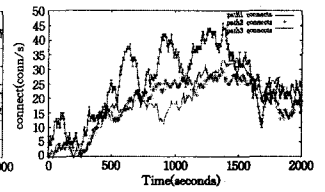


图 3 动态修改 α 各路径活跃的 FAST 连接数

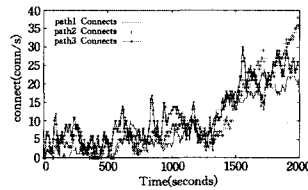


图 4 α 为默认参数各路径活跃 FAST 连接数

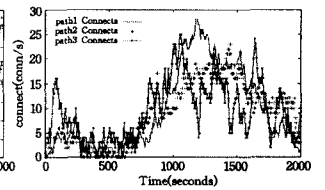


图 5 动态修改 α 各路径活跃的 FAST 连接数

表 2 FAST 连接平均逗留时间对比(实验 2)(单位: 秒)

	FAST1	FAST2	FAST3	总平均
采用系统默认参数	155.7	159.9	50.36	82.80
动态调节协议参数	97.65	103.6	24.66	48.91

结束语 本文证明了在瓶颈链路处于重服务强度下时链路的工作量函数是非递减函数, 包含逗留时间的 Lyapunov 函数是非递增函数, 从而证明了其在 FAST 本身的运行机制下可到达一个降阶的不变流形。从而根据不变流形中各路径活跃的 FAST 连接数和协议参数成反比的关系, 提出了一种选择合适参数的方法。仿真结果表明, 该方法可以保证各路径活跃的 FAST 连接数能够平稳分布在期望的范围, 降低 FAST 连接瓶颈逗留的时间, 满足实际网络的需要。

参考文献

- [1] Wei D X, Jin Cheng, Low S H. FAST TCP: Motivation, Architecture, Algorithms, Performance[J]. IEEE Trans on Networking, 2006, 14(6): 1246-1259
- [2] Koo Kyungmo, Choi Joon-Young, Lee J S. Parameter Conditions for Global Stability of FAST TCP[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(2): 155-157
- [3] Wang Jiantao, Wei D X, Low S H. Modeling and Stability of FAST TCP[C]// Proc. IEEE INFOCOM, Miami, FL, USA, 2005: 938-948
- [4] Tang Ao, Low S H. An Accurate Link Model and Its Application to Stability Analysis of FAST TCP[C]// Proc. IEEE INFOCOM, Anchorage, Alaska, USA, 2007: 161-169
- [5] Jacobsson K. Dynamic modeling of internet congestion control [D]. Royal Institute of Technology (KT H), Sweden, 2008
- [6] Kelly F P, Williams R J. State Space Collapse and Diffusion Approximation for a Network Operating Under a Fair Bandwidth Sharing Policy[J]. The Annals of Applied Probability, 2007, 11(3): 1055-1083
- [7] Bonald T, Massoulié L. Impact of fairness on Internet performance[C]// Proc. Acm Sigmetrics, Cambridge, Massachusetts, USA, 2001: 82-91
- [8] 郭克敏, 李清都. 一种改进的不变流形算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2008, 20(2): 0221-0225
- [9] 宋丽华, 陈鸣, 张睿. 一种基于测量的 FAST 改进方案[J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(4): 27-32
- [10] 宋丽华, 王海涛, 陈鸣. 基于网络测量和模糊控制技术的拥塞控制机制[J]. 华南理工大学学报, 2006, 34(6): 89-95