

文章编号: 100120920(2010)012006205

NOFC2VRTT: 一种基于变 RTT 的非线性 AQM 算法

杨歆豪, 王执铨

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘要: 针对网络拥塞设计一种基于变往返时间的主动队列管理算法. 给出了一种新的 TCP 窗口观测器, 证明当丢包率取值范围在 0~1 之间时, TCP 窗口观测值渐近收敛到 TCP 窗口真实值. 通过反步设计法设计了一种非线性输出反馈控制算法, 并给出了控制参数的取值范围. NS 仿真表明, NOFC2VRTT 算法具有较好的鲁棒性, 较高的链路利用率和较低的丢包率, 并且维持了各 TCP 源之间的公平性.

关键词: 网络拥塞控制; 主动队列管理算法; 输出反馈控制; 非线性控制

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

NOFC2VRTT: Nonlinear AQM algorithm based on variable RTT

YANG Xin2hao, WANG Zhi2quan

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: YANG Xin2hao, E2mail: yangxinhao@163.com)

Abstract: An active queue management algorithm is presented for network congestion, which is based on variable round trip time(RTT). A novel TCP window size observer is first proposed, which can prove that the observer state converges to the real sate asymptotically, when packet dropping or marking ratio falls between 0 and 1. A nonlinear output feedback controller is designed based on backstepping technique, and the value range of the parameters are also discussed. Ns simulation results show that the proposed NOFC2VRTT presents high robust stabilization, high link utilization and low packet loss ratio, which even provides high fairness for the TCP sources.

Key words: Network congestion control; Active queue management; Output feedback control; Nonlinear control

1 引言

随着网络规模的日益扩大以及对网络服务质量的要求越来越高, 网络拥塞避免与控制成为了目前重要的研究课题^[1]. 路由器中的主动队列管理机制(AQM)可以通过提前检测拥塞来提高网络的吞吐量, 同时有效地控制缓存队列的长度, 从而为要求时延保证的 Internet 业务提供一种良好的保障机制, 是作用在网络中间节点上一种有效的拥塞控制策略^[2].

就本质而言, 网络拥塞控制模型可以看作一个反馈控制系统^[3], 故从控制理论的角度来研究网络拥塞控制可以取得有效的结果. 基于控制理论的网络拥塞控制研究主要有两个方面: 一方面对现有经典的 AQM 算法的鲁棒稳定性、公平性等性能进行分析, 从而改进算法^[4,6]; 另一方面一些基于现代控制理论的新的 AQM 算法也被相继提出. SFC^[7]和

KSFC^[8]基于鲁棒控制理论, 利用 LMI 方法设计了 AQM 系统的状态反馈控制率, 但由于这类算法要获取 TCP 窗口值, 因此其实用性受到很大限制. 文献[9]根据变结构控制理论(VSC)设计了一类新的 AQM 算法, 用来稳定瓶颈路由器中的队列扰动. 然而这些新的 AQM 算法均基于简单的线性控制, 是在小信号线性化的基础上设计的, 所以存在着局部稳定性的问题. [10]设计了一种具有全局稳定性的非线性拥塞控制模型, 但其仅针对单链路和单 TCP 源, 具有一定的局限性; [11]设计了一种非线性输出反馈控制算法(NOFC), 可使瓶颈路由器的队列长度稳定在期望值, 但是其把往返时间(RTT)设为固定值, 这与实际的网络情况不相符.

在实际网络中, 路由器无法实时精确地得到 TCP 窗口值, 所以给出了 TCP 窗口值的观测器设计, 并证明了当丢包率的取值范围在 0~1 之间时,

收稿日期: 2009202217; **修回日期:** 2009205205.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974013, 60974129, 70931002); 江苏省自然科学基金项目(BK2008188); 江苏省六大人才高峰课题项目(07E2013).

作者简介: 杨歆豪(1983), 男, 江苏苏州人, 博士生, 从事网络拥塞控制的研究; 王执铨(1939), 男, 武汉人, 教授, 博士生导师, 从事动态大系统的容错控制、网络拥塞控制等研究.

TCP 窗口观测值收敛到实际值. 因为 RTT 可以表示为队列长度的函数, 本文根据这一条件设计了基于变化 RTT 的非线性网络模型, 利用反步设计法^[12]设计了系统的输出反馈控制率, 保证队列长度收敛到期望值. ns 仿真表明, 本文设计的基于变 RTT 的非线性输出反馈控制算法(NOF CVRTT)在变化的网络环境下具有较好的鲁棒稳定性, 在维持网络较高的吞吐量的前提下具有较低的丢包率, 并且维持了各 TCP 源之间的公平性.

2 网络模型及控制率设计

微分方程组

$$\begin{aligned} \dot{W}(t) &= \frac{1}{R(t)} - \frac{W^2(t)}{2R(t)} p(t), \\ \dot{q}(t) &= -C + \frac{N}{R(t)} W(t), \end{aligned} \quad (1)$$

是 Misra^[13] 于 2000 年基于流体理论提出的网络模型, 该模型描述了瓶颈路由器和 TCP 窗口的动态特性, 在忽略超时重传机制下, 可用非线性微分方程组 (1) 来描述. 其中状态变量 $W(t)$ 和 $q(t)$ 分别代表平均 TCP 窗口大小(包)和平均队列长度(包); 控制输入 $p(t)$ 代表数据包的标注概率; $R(t)$, C 和 N 分别是往返时间(s), 链路容量(包/s)和 TCP 连接数. 在实际网络环境下 N 应该是时间 t 的函数, 为了计算简便, 这里设为已知的常数.

设 T_p 是整个网络的传输延迟, 为一固定值, 则

$R(t)$ 可表示为 $R(t) = \frac{q(t)}{C} + T_p$, 并设

$$\begin{aligned} x_1(t) &= W(t), \quad u(t) = p(t), \\ x_2(t) &= q(t) = \frac{1}{q(t) + T_p C}. \end{aligned}$$

代入方程组(1), 可得到系统的状态方程

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= Cx_2 - \frac{C}{2} x_1^2 x_2 u(t), \\ \dot{\hat{x}}_2 &= -NCx_1 x_2^3 + Cx_2^2. \end{aligned} \quad (2)$$

2.1 控制率设计

下面通过反步设计法^[12]设计控制率 $u(t)$, 使得队列长度 q 收敛到一个期望的理想长度 q^* , 即 x_2 收敛于 $x_2^* = \frac{1}{q^* + T_p C}$. 基于此目标, 取 $z_2 = x_2 - x_2^*$.

考虑标量系统 $\dot{\hat{x}}_2 = -NCx_1 x_2^3 + Cx_2^2$, 把 x_1 看作输入, 设计反馈控制 $x_1 = \alpha(z_2)$, 以稳定原点 $z_2 = 0$. 取

$$x_1 = \alpha(z_2) = \frac{1 + k_1 z_2}{N x_2}, \quad k_1 > 0,$$

则函数 $V(z_2) = \frac{1}{2} z_2^2$ 满足

$$\begin{aligned} \dot{\hat{V}}(z_2) &= z_2 \dot{\hat{x}}_2 = \\ z_2(-NCx_1 x_2^3 + Cx_2^2) &= -Ck_1 x_1^2 z_2^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

为运用反步法, 应用变量代换

$$z_1 = x_1 - \alpha(z_2) = x_1 - \frac{1 + k_1 z_2}{N x_2},$$

取 $V_c(z) = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2$ 作为复合 Lyapunov 函数, 得

$$\begin{aligned} \dot{\hat{V}}_c &= z_1 \dot{\hat{x}}_1 + z_2 \dot{\hat{x}}_2 = \\ \frac{C}{N} (N x_1 x_2 - 1 - k_1 z_2) [1 - \frac{x_1^2}{2} u(t) + \\ \frac{(N x_1 x_2 - 1)(k_1 x_2^* - 1)}{N x_2}] - Ck_1 x_1^2 z_2^2. \end{aligned} \quad (4)$$

取

$$\begin{aligned} u(t) &= 2[Nx_2 + (Nx_1 x_2 - 1)(k_1 x_2^* - 1) + \\ k_2 x_2 (Nx_1 x_2 - 1 - k_1 z_2)] / Nx_1^2 x_2, \\ k_1 &> 0, k_2 > 0, \end{aligned}$$

代入式(4)得

$$\begin{aligned} \dot{\hat{V}}_c &= -\frac{Ck_2}{N^2} (Nx_1 x_2 - 1 - k_1 z_2)^2 - \\ Ck_1 x_1^2 z_2^2 &\leq 0. \end{aligned}$$

显然 $u(t)$ 就是 $p(t)$, 所以有

$$\begin{aligned} p(t) &= 2[Nq + (NWq - 1)(k_1 q^* - 1) + \\ k_2 q (NWq - 1 - k_1 z_2)] / NW^2 q. \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} k_1 &> 0, k_2 > 0, z_2 = q - q^*, \\ q &= \frac{1}{q + T_p C}, q^* = \frac{1}{q^* + T_p C}. \end{aligned}$$

2.2 算法公平性

当丢包率 $p(t)$ 如式(5)所示时, z_1 和 z_2 收敛于原点. 根据上文有 $z_1 = x_1 - \frac{1 + k_1 z_2}{N x_2}$, 所以 W 收敛于 $\frac{1}{Nq^*} = \frac{q^* + T_p C}{N}$, 又因往返时间 $r = \frac{q}{C} + T_p$, 所以 W 收敛于 $\frac{r^* C}{N}$, 其中 $r^* = \frac{q^*}{C} + T_p$, 即 TCP 端发送数据的速率与其往返时间 r 成正比.

文献[14]给出了一种拥塞算法公平性的判断依据.

定义 1 设有 n 个数据源发送端, 其数据发送量分别为 (x_1, x_2, \dots, x_n) , 定义公平系数为

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2},$$

并把 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 称之为 Jain 公平系数. Jain 公平系数的值在 $0 \sim 1$ 之间, 值越大, 代表整个数据流之间的公平性越好.

下面根据 Jain 公平系数的定义研究本文算法的公平性, 设有 n 个数据源发送端, 其往返时延分别为 $r_i, i = 1, 2, \dots, n$. 在时间 T 内发送的数据量分别为

(x_1, x_2, \dots, x_n) , 为了计算简便, 设 $T = m_1 r_1 = m_2 r_2 = \dots = m_n r_n$, m_i 为自然数. 显然有 $x_i = \frac{T}{r_i} W_i$, 又因 W 收敛于 $\frac{TC}{N}$, 对于足够大的时间 t 近似的有 $x_i = \frac{TC}{N}$, 所以

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\prod_{i=1}^n \left(\frac{TC}{N}\right)^2}{\prod_{i=1}^n \left(\frac{TC}{N}\right)^2} = 1.$$

显然本文算法具有较好的公平性.

3 观测器设计

设计开环观测器的动态方程如下:

$$\dot{W} = Cq - \frac{C}{2} W^2 q p(t). \quad (6)$$

其中: W 是 TCP 窗口大小观测值, 定义 $E = W - \hat{W}$ 是实际窗口值和观测值之间的估计误差.

假设 1 存在常量 $t_0 > 0$ 以及正常量 T_0 和 A , 使得 $\forall t \geq t_0$, 丢包率 $p(t)$ 满足

$$\frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t+T_0} p(s) ds \leq A \quad (7)$$

假设 2 $\limsup_{t \rightarrow \infty} p(t) < p$, $p \in (0, 1)$.

根据网络的物理特性, 对丢包率 $p(t)$ 作出了上述两个假设. 假设 1 意味着在一定长的时间间隔 T_0 里, 路由器缓存中标注或丢弃的数据包总数应达到一定的数量级. 这是因为在 TCP 网络中, 发送端以线性增加的方式发送数据包, 一定长时间内过多数据包的积累必然会造成网络拥塞. 同时在拥塞控制中, 并不希望由于过多的数据包丢弃造成链路利用率偏低. 假设 2 意味着当系统趋于稳定时, 丢包率 $p(t)$ 稳定在某一个小于 1 的值附近.

引理 1 假设丢包率 $p(t)$ 满足假设 2, 则 TCP 窗口大小观测值满足 $\liminf_{t \rightarrow \infty} W(t) > 0$.

证明 由假设 2 可以得到, 对于足够大的 t , 有 $\hat{W} \leq Cq - \frac{C}{2} W^2 q \bar{p}$. 考虑微分方程 $\dot{y}_1 = Cq - \frac{C}{2} y_1^2 \bar{p}$ 有一个稳定平衡点 $\sqrt{2/C\bar{p}} > 0$, 根据比较引理^[12], 有 $\liminf_{t \rightarrow \infty} W(t) > 0$.

定理 1 如果 $p(t) \in [0, 1]$ 满足假设 1 和假设 2, 则窗口大小估计误差 E 渐近收敛到 0.

证明 因为 $E = W - \hat{W}$, 所以

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{W} - \dot{\hat{W}} = \frac{C}{2} (W^2 - \hat{W}^2) q \# p(t) = \\ &= \frac{C}{2} (W + \hat{W}) q \# p \# E \end{aligned} \quad (8)$$

解微分方程(8)得

$$H(t) = H(t_0) e^{-\int_{t_0}^t (W(s) + \hat{W}(s)) \# q \# p(s) ds}, \quad (9)$$

其中 $t_0 > 0$ 为一个足够大的常量. 对任意 $t > t_0$, 有 $t = t_0 + kT_0 + T$, T_0 的定义与假设 1 相同, k 为自然数, $T_0 \setminus T \setminus 0$, 代入 $\int_{t_0}^t p(s) ds$ 得

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t p(s) ds &= \int_{t_0}^{t_0+T} p(s) ds + \int_{t_0+T}^{t_0+2T} p(s) ds + \dots + \\ &= \int_{t_0+(k-1)T_0}^{t_0+kT_0} p(s) ds + \int_{t_0+kT_0}^{t_0+kT_0+T} p(s) ds \setminus \\ &= kAT_0 + \int_{t_0+kT_0}^{t_0+kT_0+T} p(s) ds \setminus kAT_0. \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中第 1 个不等式由不等式(7)推导, 第 2 个不等式是由于 $p(t)$ 是非负的. $W(t)$ 是实际的 TCP 窗口值, 所以 $W(t) \setminus 0, \forall t \setminus 0$; 同理 $q(t) \setminus 0, \forall t \setminus 0$, 且拥塞控制的目标是使路由器中的队列长度维持在一个理想值附近, 所以 $\liminf_{t \rightarrow \infty} q(t) > 0$. 根据引理 1 得

$$\liminf_{t \rightarrow \infty} (W(t) + \hat{W}(t)) q(t) \setminus \liminf_{t \rightarrow \infty} W(t) \# q(t) \setminus \liminf_{t \rightarrow \infty} W(t) \# \liminf_{t \rightarrow \infty} q(t) > 0. \quad (11)$$

根据不等式(10)和(11), 有

$$\int_{t_0}^t (W(s) + \hat{W}(s)) \# q(s) \# p(s) ds \setminus BkAT_0 \setminus BA(t - t_0 - T_0), \quad (12)$$

其中 $B = \liminf_{t \rightarrow \infty} W(t) \# \liminf_{t \rightarrow \infty} q(t)$. 将不等式(12)代入式(9)得

$$H(t) \leq H(t_0) e^{-\frac{CB_0}{2} t} \# e^{-\frac{C}{2} B t - b}. \quad (13)$$

显然对于足够大的时间 t , 估计误差 E 趋近于 0.

取 W 和 \hat{W} 的初始值分别为 $W(0) = 10$ 和 $\hat{W}(0) = 0.1$, 系统的状态方程和观测器分别由式(2)和(6)得到. 设丢包率 $p(t) = 0.1 \sin t + 0.1$, 显然 $p(t)$ 满足假设 1 和假设 2. 通过 Simulink 仿真, 如图 1 所示, 窗口大小估计误差 E 渐近收敛到 0.

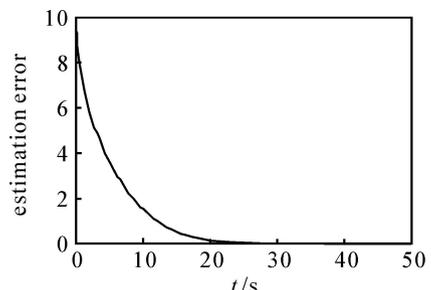


图 1 窗口大小估计误差

综上所述, 基于观测状态 W 的丢包率为

$$p(t) = 2[Nq + (NWq - 1)(k_1 q^* - 1) +$$

$$k_2 q (N W q - 1 - k_1 z_2) / N W^2 q. \quad (14)$$

其中

$$k_1 > 0, k_2 > 0, z_2 = q - q^*,$$

$$q = \frac{1}{q + T_p C}, q^* = \frac{1}{q^* + T_p C}.$$

4 参数 k_1, k_2 的取值范围

定理 2 状态方程(2)表示了基于变往返时间的 TCP 窗口大小和瓶颈链路路由器队列长度的动态特性. 路由器的丢包率由式(14)给出, 如果 k_1, k_2 满足不等式

$$1 [k_1 q^* + k_2 q [2, \quad (15)$$

$$0 [Nq + 1 - k_1 q^* - k_2 q - k_1 k_2 q z_2 [2Nq(2 - k_1 q^* - k_2 q). \quad (16)$$

则队列长度渐近收敛到期望值 q^* .

证明 根据定理 1, 如果对于任意的 $q \in [0, q_{\max}]$ 和 TCP 窗口观测值 W , 能够保证 $p(t) \in [0, 1]$, 则基于控制率(14)的网络系统(2)是稳定的. 下面首先证明 $p(t)$ 是非负的.

根据定理 1, 有 W 渐近收敛到 TCP 窗口真实值 W , 显然当 TCP 源活跃时, $W > 0$, 所以对于足够大的时间 t 有 $W > 0$, 并且 $q > 0$. 又因为

$$Nq + (N W q - 1)(k_1 q^* - 1) + k_2 q (N W q - 1 - k_1 z_2) =$$

$$\frac{N W q (k_1 q^* + k_2 q - 1) +}{\delta_1}$$

$$\frac{Nq + 1 - k_1 q^* - k_2 q - k_1 k_2 q z_2}{\delta_2}.$$

根据不等式(15)有 $\delta_1 \setminus 0$; 根据不等式(16)有 $\delta_2 \setminus 0$. 所以 $p(t) \setminus 0$.

下面证明 $p(t) [1$. 由于在 TCP 协议中采取了一种加增倍减的拥塞控制模式, 即在得到一个 ACK 响应后便将 TCP 窗口值加 1, 而快速恢复算法^[15]保证了当发生丢包时不必把 TCP 窗口值剧烈地减小到 1, 所以在此设定 $W \setminus 2$, 又因为 $k_1 q^* + k_2 q [2$, 由此得

$$\frac{Nq}{2} W^2 - Nq(k_1 q^* + k_2 q - 1) W =$$

$$\frac{Nq}{2} W(W - 2(k_1 q^* + k_2 q - 1)) \setminus$$

$$Nq(4 - 2k_1 q^* - 2k_2 q). \quad (17)$$

根据不等式(16)和(17), 可推得

$$Nq + 1 - k_1 q^* - k_2 q - k_1 k_2 q z_2 [$$

$$\frac{Nq}{2} W^2 - Nq(k_1 q^* + k_2 q - 1) W,$$

所以 $p(t) [1$. 综上所述, 定理 2 得证. t

根据定理 2, 可得到参数 k_1, k_2 的取值范围如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 [k_1 q^* + k_2 q_{\min}, \\ k_1 q^* + k_2 q_{\max} [2, \\ 0 [Nq_{\min} + 1 - k_1 q^* - k_2 q_{\min} - \\ k_1 k_2 q_{\min} (q_{\min} - q^*) [\\ 2Nq_{\min} (2 - k_1 q^* - k_2 q_{\min}), \\ 0 [Nq_{\max} + 1 - k_1 q^* - k_2 q_{\max} - \\ k_1 k_2 q_{\max} (q_{\max} - q^*) [\\ 2Nq_{\max} (2 - k_1 q^* - k_2 q_{\max}). \end{array} \right. \quad (18)$$

其中: $q_{\max} = \frac{1}{T_p C}$, $q_{\min} = \frac{1}{q_{\max} + T_p C}$, q_{\max} 是路由器缓存的最大容量.

5 算法仿真

网络试验采用网络仿真软件 ns2, 网络拓扑结构如图 2 所示. $s_i (i = 1 \sim N)$ 为 TCP 应用发送端, $N = 40$, 其分组长度为 500 byte. 结点 nn1 和 nn2 之间为瓶颈链路, 其带宽 $C = 2500$ packets/s, 即 10 mb/s. 任意两结点之间的传播延时都为 1.25 ms, 则 $T_p = 0.01$ s. 各个队列缓存均为 800 packets, 即 $q_{\max} = 800$ packets, 本文期望的队列长度 $q^* = 200$ packets. 仿真实验的采样频率为 160 Hz.

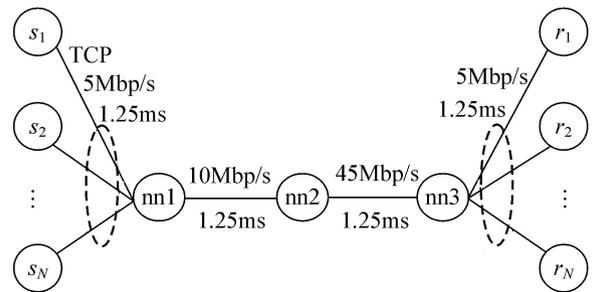
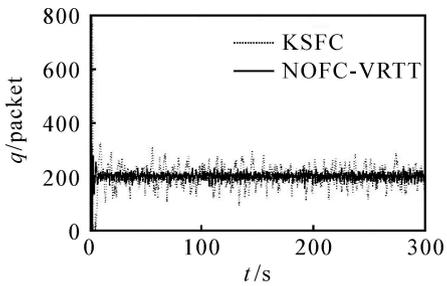


图 2 网络拓扑结构

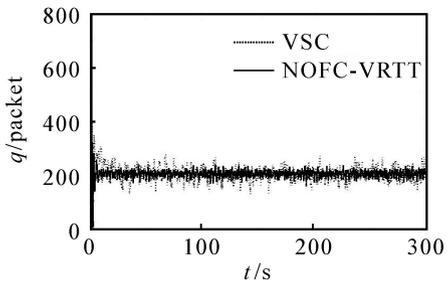
在瓶颈链路采用本文的 NOFC2VRTT 算法, 其他链路均采用 Drop Tail 算法. 根据不等式组(18)对参数 k_1 和 k_2 取值范围的限定, 取 $k_1 = 224, k_2 = 11/3$. 下面对本文的 NOFC2VRTT 算法以及 KSFC 算法、VSC 算法和 NOFC 算法的性能进行比较. 图 3 给出了在相同网络环境下, 4 种算法在瓶颈路由器中的队列曲线对比; 表 1 给出了当 $T_p = 0.1$ s 时 4 种算法的网络性能. 显然, 本文的 NOFC2VRTT 和 VSC 能够较好地抑制路由器中的队列扰动, 但是在牺牲了一定的链路利用率的前提下, 而本文的 NOFC2VRTT 算法保证了较好的网络性能.

表 1 算法性能比较 ($T_p = 0.1$ s)

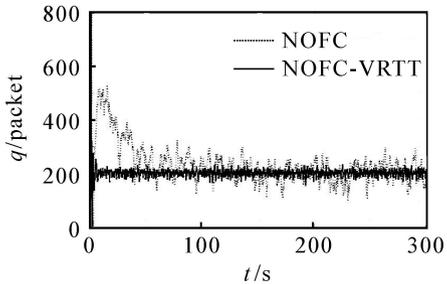
	公平性	链路利用率 / %	丢包率 / %
NOFC2VRTT	0.836	94.07	0.393
KSFC	0.764	89.69	1.556
VSC	0.741	85.74	0.931
NOFC	0.777	93.17	0.683



(a) NOFC-VRTT和KSFC的队列曲线对比



(b) NOFC-VRTT和VSC的队列曲线对比



(c) NOFC-VRTT和NOFC的队列曲线对比

图 3 瓶颈路由器中的队列长度

下面验证 NOFC \mathcal{V} VRTT 控制算法的鲁棒稳定性. 表 2 给出了在不同参数条件下本文 NOFC \mathcal{V} VRTT 算法的性能. 显然, 对于满足不等式组(18)的参数 k_1 和 k_2 , NOFC \mathcal{V} VRTT 算法都维持了一个较好的网络性能, 具有较高的鲁棒稳定性.

表 2 算法鲁棒性($T_p = 0.01s$)

k_1	k_2	公平性	链路利用率 / %	丢包率 / %
224	3.66	0.897	95.41	0.271
224.5	1.83	0.91	95.33	0.274
224.2	2.93	0.896	95.43	0.272
223.8	4.4	0.892	95.39	0.269

6 结 论

由于 RTT 可以表示为队列长度的函数, 本文根据这一条件设计了基于变化 RTT 的非线性网络模型. 通过反步设计法给出了系统的控制率, 从而保证队列长度收敛到期望值. 在实际网络中, 路由器无法实时精确地得到 TCP 窗口值. 为了使控制率仅仅依赖于队列长度, 本文设计了一种 TCP 窗口值的观测器设计, 并证明了当丢包率的取值范围在 0~1 之

间时, TCP 窗口观测误差收敛到 0. ns 仿真表明, 本文的 NOFC \mathcal{V} VRTT 算法在变化的网络环境下具有较好的鲁棒稳定性, 并且具有较高的链路利用率以及较低的丢包率, 同时在维持各 TCP 源的公平性上也有一定的优势. 在基于变 RTT 网络模型中, 为了计算简便, 假设连接数 N 是一个固定值. 但实际上因特网的业务特征具有自相似性和长相似性, 在基于变 RTT 网络模型中引入相关的业务模型, 会使模型更加精确, 这将是下一步的研究工作.

参考文献(References)

- [1] Kim J H, Yeom I. Reducing queue oscillation at a congested link [J]. Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(3): 3942407.
- [2] Long L, Aikat J, Jeffay K, et al. The effects of active queue management and explicit congestion notification on web performance [J]. IEEE/ ACM Trans on Networking, 2007, 15(6): 12121230.
- [3] Holot C V, Misra V, Towsley D, et al. Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows[J]. IEEE Trans on Automation Control, 2002, 47(6): 9452959.
- [4] Yan P, Gao Y, Ozbay H. Variable structure control in active queue management for TCP with ECN[C]. Proc of ISCC 2003. Turkey: IEEE, 2003: 100521011.
- [5] Wen J T, Arcak M. A unifying passivity framework for network flow control [C]. Proc of IEEE INFOCOM 2003. San Francisco: IEEE, 2003: 115621166.
- [6] Srikant R. The mathematics of internet congestion control[M]. Boston: Birkhauser, 2004.
- [7] Gao Y, Hou J C. A state feedback control approach to stabilizing queue for ECN-enabled TCP connections[C]. Proc of IEEE INFOCOM 2003. San Francisco: IEEE, 2003: 230122311.
- [8] Zhu R J, Yang B, Wang W. LM2based state feedback control for AQM router supporting TCP with ECN[C]. Proc of WCICA 2006. Dalian: IEEE, 2006: 11221126.
- [9] Yan M, Jing Y, Ya L A. Congestion control over internet with uncertainties and input delay based on variable structure control algorithm [C]. Proc of the 2007 IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation. Harbin: IEEE, 2007: 17821793.
- [10] Peet M, Lall S. Global stability analysis of a nonlinear model of internet congestion control with delay [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(3): 5532559.
- [11] Fan Y, Jiang Z P, Panwar S, et al. Nonlinear output feedback control of TCP/ AQM network [C]. ISCAS 2005. Kobe: IEEE, 2005: 20722075.

表1 用户对优化结果的满意程度比较

	本文算法	文献[3]	传统算法
非常不满意(-2)	5	5	7
不满意(-1)	11	14	18
满意(1)	76	75	70
非常满意(2)	8	6	5
总分	71	63	48

表2 优化结果与目标人眼图形的距离 f_d

	本文算法	文献[3]	传统算法
均值	1.07	1.21	1.50

优化结果与目标人眼图形更加接近,与目标人眼图形之所以有差别,是因为用户对细微图形的辨别能力有限。

6 结 论

本文目的是提高交互式遗传算法性能,采用的方法是利用用户认知不确定性设计定向变异算子。

本文基于主成分分析,识别了种群中用户认知不确定性较小的个体,根据这些个体得到了用户满意的、不满意的,以及未知的等位基因意义单元。此外,再结合进化个体的适应值,选择了待变异的进化个体、需要变异的基因意义单元,以及变异后的等位基因意义单元。

将本文方法应用于人眼进化,与传统交互式遗传算法的对比结果验证了所提方法的优越性。

采用合适的代理模型代替用户评价进化个体,是提高交互式遗传算法性能的另一个重要途径。如何基于用户认知的不确定性,选择合适的样本训练代理模型,是需要进一步研究的问题。

参考文献(References)

- [1] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. MIT Press, 1975.
- [2] Takagi H. Interactive evolutionary computation: Fusion of the capabilities of EC optimization and human

evolution [J]. Proc of the IEEE, 2001, 89(9): 12752-1296.

- [3] Szeto K Y, Zhao S Y. Adaptive spatial allocation of resource for parallel genetic algorithm [J]. Studies in Computational Intelligence, 2008, 129(5): 382-398.
- [4] Watanabe Y, Yoshikawa T, Furuhashi T. A study on application of fitness inference method to PCIGA [C]. Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Swisnote, 2007: 1450-1455.
- [5] Miki M, Yamamoto Y, Wake S, et al. Global asynchronous distributed interactive genetic algorithm [C]. Proc of IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. Taipei, 2006: 3481-3485.
- [6] 苏小红, 杨博, 王亚东. 基于进化稳定策略的遗传算法 [J]. 软件学报, 2003, 14(11): 1863-1868. (Su X H, Yang B, Wang Y D. A genetic algorithm based on evolutionarily stable strategy [J]. J of Software, 2003, 14(11): 1863-1868.)
- [7] Tinos R, Yang S. Evolutionary programming with q gaussian mutation for dynamic optimization problems [C]. Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Hong Kong, 2008: 1823-1830.
- [8] 薛文涛, 吴晓蓓, 徐志良. 基于双变异算子的免疫规划 [J]. 控制与决策, 2007, 22(12): 1412-1416. (Xue W T, Wu X B, Xu Z L. Immune programming based on double mutation operators [J]. Control and Design, 2007, 22(12): 1412-1416.)
- [9] 向东进. 实用多元统计分析[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2005. (Xiang D J. Practical multivariate statistical analysis [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2005.)
- [10] 巩敦卫, 郝国生, 周勇, 等. 交互式遗传算法原理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. (Gong D W, Hao G S, Zhou Y, et al. The principle and application of interactive genetic algorithm [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.)

(上接第73页)

- [12] Khalil H K. Nonlinear system [M]. Upper Saddle River NJ: Prentice Hall, 2002.
- [13] Misra V, Cong W B, Towsley D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED [C]. Proc of the ACM SIGCOMM 2000. Stockholm: ACM, 2000: 15-26.
- [14] Chiu D, Jain R. Analysis of the increase and decrease

algorithms for congestion avoidance in computer networks [J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1989, 17(1): 1214.

- [15] Steven W. TCP slow start, congestion avoidance, fast retransmit, and fast recovery algorithms [OE/BL]. [1992-2015]. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2001.html>.