

文章编号: 1001-0920(2008)01-0091-04

多时滞 ATM 网络中 ABR 流量的积分滑模控制

任 涛, 井元伟

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 针对含有多个时滞的异步传输模式(ATM)网络的拥塞问题,设计了积分滑模控制器,对可用比特率(ABR)业务流量进行控制,并引入预估器来补偿输入时滞.所设计的控制算法不但能够克服变化的 ABR 带宽给闭环系统带来的不利影响,而且还能保证含有多输入时滞闭环系统的稳定性,同时还可实现带宽按权重分配和缓冲队列长度的跟踪.

关键词: 拥塞控制; ABR 流量; 积分滑模; 多时滞

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Integral sliding mode controller for ABR traffic control in ATM networks with multiple time-delays

REN Tao, JING Yuan-wei

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: REN Tao, E-mail: chinarentao@163.com)

Abstract: For the congestion of the asynchronous transfer mode (ATM) networks with multiple time-delays, an integral sliding mode control strategy is designed for available bit-rate (ABR) flow control problem, which includes a predictor to compensate for time-delay. The proposed algorithm can not only overcome the bad effect caused by changing ABR bandwidth, but guarantee the stability of the closed-loop system with multiple input delays. And it also satisfies a weighted fairness condition and ensures the convergence of queue length to the desired steady value.

Key words: Congestion control; ABR flow; Integral sliding mode; Multiple time-delays

1 引 言

高速计算机网络(如 ATM 网络)的拥塞问题是导致网络服务质量下降的主要原因.近年来,对 ATM 网络拥塞控制的研究越来越引起人们的重视. ATM 论坛最终选择了基于速率的拥塞控制机制作为 ABR 流量控制的标准^[1],该机制又可分为二进制反馈机制和显示速率反馈机制.

目前的研究热点主要集中在显示速率反馈机制上.文献[2]利用解析的方法设计 PD 控制器,但由于该方法的参数求解比较复杂,实现起来十分困难.文献[3]设计了双 PD 控制器,虽然降低了计算复杂度,但当网络环境变化较大时,效果仍不理想.文献[4]在假设 ABR 带宽不变的前提下,对控制器参数进行了求解,这给实际应用带来了很大的局限.文献[5]采用 Smith 预估补偿器来处理网络中存在的时

滞问题,但在有时延预估误差时鲁棒性较差.文献[6]设计了 H 控制器来解决多时延问题,通过分析得到控制器的增益,取得了较好的效果.文献[7]设计了模糊免疫 PID 控制器,并通过仿真结果表明该方法对于变化的 ABR 带宽有很强的自适应能力和鲁棒性.

综上所述,ATM 网络中存在的多个输入时滞及变化的 ABR 带宽是设计控制器的难点.因为滑模控制方法可有效抑制系统的外部扰动,所以适于解决 ATM 网络的拥塞控制问题.文献[8]提出积分滑模控制(ISMC)方法,其主要特点是消除了传统滑模面的到达时间,在控制器的设计中有更大的自由度^[8-10].为此,本文采用 ISMC 的思想,通过引入预估器对系统作状态变换,在此基础上为含有多输入时滞的标称系统设计标称控制器,最后设计了非线性

收稿日期: 2007-02-02; 修回日期: 2007-06-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62074009); 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室开放课题项目.

作者简介: 任涛(1980—),男,沈阳人,博士生,从事高速计算机网络的控制算法研究;井元伟(1956—),男,辽宁西丰人,教授,博士生导师,从事鲁棒控制、网络控制算法等研究.

性控制器来抑制变化的 ABR 带宽给系统带来的不利影响。

2 网络模型

考虑图 1 所示的单瓶颈链路 ATM 网络模型。

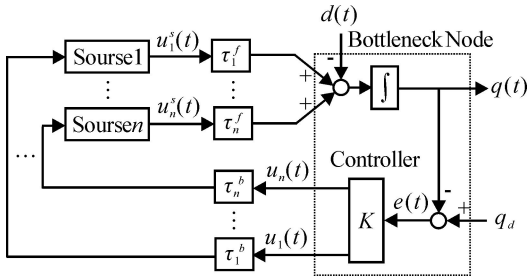


图 1 ATM 通信系统框图

瓶颈节点为每条输出链路提供一个缓冲队列和显示速率控制器。控制器根据当前的网络状况为第 i 个 ABR 用户计算发送速率 $u_i(t)$ ，并将其保存在资源管理信元 (RM) 中。经过 b_i 时延后，用户 i 接收到 RM 信元，并依据 $u_i(t)$ 及时调整自己的发送速率 $u_i^s(t) = u_i(t - b_i)$ 。该速率经 f_i 时延后再作用于该瓶颈节点，这样就构成了一个反馈回路。ATM 网络中，ABR 的优先级较低，所以它只能使用高优先级业务类型 (可变比特率 (VBR) 业务) 的剩余带宽，这样就会导致 ABR 带宽的不断变化。

设 $d(t)$ 为 ABR 用户的带宽， D 为网络的总带宽， $q(t)$ 为高优先级用户使用的带宽，则有 $d(t) = D - q(t)$ ，这里假设 $|q(t)| < D$ 。由图 1 可以得到 ATM 网络的数学模型

$$\dot{q}(t) = \sum_{i=1}^n u_i(t - i) - d(t) \quad (1)$$

其中： $q(t)$ 为瓶颈节点的缓冲队列长度； n 为 ABR 用户的数量； $i = b_i + f_i$ 为第 i 个 ABR 用户的往返传播时延，且 $0 < i < h$ 。由于 $e(t) = q_d - q(t)$ ，缓冲队列方程 (1) 可写为

$$\dot{e}(t) = - \sum_{i=1}^n u_i(t - i) + d(t) \quad (2)$$

3 控制器的设计

积分滑模控制器 (ISMC) 由两部分组成：标称控制器和非连续控制器。前者主要负责标称系统 (无外部扰动) 的稳定性，而非连续控制器主要用来抑制 ABR 带宽的变化。ISMC 的形式可表示为

$$u_i(t) = u_0(t) + u_{n1}(t) \quad (3)$$

其中： $u_0(t)$ 为标称控制器， $u_{n1}(t)$ 为非连续控制器。将式 (3) 代入 (2) 可得

$$\dot{e}(t) = - \sum_{i=1}^n u_0(t - i) - \sum_{i=1}^n u_{n1}(t - i) + d(t) \quad (4)$$

由于输入时滞的存在是积分滑模面设计的一个难点^[11]，下面将引入预估器来补偿非连续控制器 $u_{n1}(t)$ 的输入时滞，其形式为

$$\bar{e}(t) = e(t) - \sum_{i=1}^n u_{n1}(t - i) \quad (5)$$

对上式求导，并将式 (4) 代入，则闭环系统可变换为

$$\dot{\bar{e}}(t) = - \sum_{i=1}^n u_0(t - i) - \sum_{i=1}^n u_{n1}(t) + d(t) \quad (6)$$

3.1 标称控制器的设计

首先设计 $u_0(t)$ 使如下标称系统稳定：

$$\dot{\bar{e}}(t) = - \sum_{i=1}^n u_0(t - i) \quad (7)$$

$u_0(t)$ 设计为状态反馈控制器

$$u_0(t) = k\bar{e}(t) \quad (8)$$

其中 k 为控制器的增益。

引理 1 对于任何向量 $z, y \in R^n$ 和任何正定矩阵 $X \in R^{n \times n}$ ，下面不等式成立：

$$-2z^T y \leq z^T X^{-1} z + y^T X y \quad (9)$$

引理 2 若 $a(t) < b(t)$ ，则下面不等式成立：

$$\left\| \int_{a(t)}^{b(t)} f(s) ds \right\|^2 \leq (b(t) - a(t)) \int_{a(t)}^{b(t)} f(s)^2 ds \quad (10)$$

定理 1 给定 $\epsilon > 0$ ，若存在 k 满足下式：

$$-(2kn - k^2 n^2 - k^2 \sum_{i=1}^n i^2) < -\epsilon \quad (11)$$

则标称系统 (7) 是指数稳定的。

证明 将式 (8) 代入 (7) 并采用如下关系：

$$\bar{e}(t - i) = \bar{e}(t) - \int_{t-i}^t \dot{\bar{e}}(s) ds$$

可得

$$\dot{\bar{e}}(t) = -k n \bar{e}(t) - k^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \int_{t-i}^t \bar{e}(s - j) ds \quad (12)$$

取 $v_0(t) = 0.5 \bar{e}^2(t)$ ，对其求导并将式 (12) 代入可得

$$\dot{v}_0 = -k n \bar{e}^2 - k^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \int_{t-i}^t \bar{e}(s - j) ds \quad (13)$$

利用引理 1 和引理 2，式 (13) 可转化为

$$\begin{aligned} \dot{v}_0 &\leq -k n \bar{e}^2 + \frac{1}{2} k^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\bar{e}^2 + \left(\int_{t-i}^t \bar{e}(s - j) ds \right)^2 \right) \\ &\leq -k n \bar{e}^2 + \frac{1}{2} k^2 n^2 \bar{e}^2 + \frac{1}{2} k^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \int_{t-i}^t \int_{t-i}^t \bar{e}^2(s) ds \end{aligned} \quad (14)$$

取 $v_1(t) = \frac{1}{2} k^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \int_{t-i}^t \int_{t-i}^t \bar{e}^2(s) ds$ ，对其求导可得

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{2} k^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 \bar{e}^2}{\partial s^2} - \frac{1}{2} k^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 \bar{e}^2}{\partial s^2} (s) ds. \quad (15)$$

选取 Lyapunov-Krasorskii 泛函 $V(t) = v_0(t) + v_1(t)$, 利用式(14)和(15)有

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \bar{e}^2 (2nk - k^2 n^2 - k^2 n \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial s^2}). \quad (16)$$

在条件(11)下, 可得 $\dot{V} = 0.5 \bar{e}^2$, 因此对于任意 $\bar{e}(t) = 0$, 一定存在 $\gamma > 0$ 满足 $\dot{V}/V < -\gamma$. 于是有 $V < c \cdot \exp(-\gamma t)$, 即

$$|\bar{e}(t)| < \sqrt{2c \cdot \exp(-\gamma t)},$$

其中 c 为常数. 由此可见, 标称系统(7)是指数稳定的. 进一步, 由条件(11)可求得使系统(7)稳定的控制器增益.

3.2 非连续控制器的设计

设计积分滑模面为

$$s(t) = s_0(\bar{e}(t)) + z(t), \quad (17)$$

其中 $s_0(\bar{e}(t))$ 和 $z(t)$ 是辅助变量. 这里选取 $s_0(\bar{e}(t)) = \bar{e}(t)$ (\bar{e} 为正常数). 对式(17)求导可得

$$\dot{s}(t) = \dot{z}(t) + \left(- \sum_{i=1}^n u_{i0}(t - t_i) - \sum_{i=1}^n u_{i1}(t) + d(t) \right). \quad (18)$$

选取 $\dot{z}(t) = \sum_{i=1}^n u_{i0}(t - t_i)$, 且 $z(t) = -s_0(\bar{e}(t))$, $\forall t \in [-h, 0]$. 所以式(18)变为

$$\dot{s}(t) = \left(- \sum_{i=1}^n u_{i1}(t) + d(t) \right). \quad (19)$$

最后, 根据式(19)设计非连续控制器

$$u_{i1}(t) = i(D + \text{sign}(s(t))), \quad (20)$$

其中 $i (i > 0)$ 为第 i 个 ABR 用户的带宽权重, 并满足 $\sum_{i=1}^n i = 1$. 将式(8), (20)代入(3), 得到 ABR 流量控制器的表达式为

$$u_i(t) = k\bar{e}(t) + i(D + \text{sign}(s(t))). \quad (21)$$

定理 2 系统(6)在控制器(21)的作用下, 在有限时间内到达滑模面 $s(t)$, 并可一直保持在滑模面上.

证明 将式(21)及 $\dot{z}(t) = \sum_{i=1}^n u_{i0}(t - t_i)$ 代入(18)有

$$\dot{s}(t) = \left(- \sum_{i=1}^n \text{sign}(s(t)) - \sum_{i=1}^n i \right) s(t). \quad (22)$$

选取 Lyapunov 函数 $V(s(t)) = 0.5 s^2(t)$, 对其求导有

$$\dot{V} = s \left(- \sum_{i=1}^n \text{sign}(s(t)) - \sum_{i=1}^n i \right) s(t). \quad (23)$$

因为 $|s(t)| < \delta$, 所以可得 $\dot{V} < 0$.

定理 3 在滑模面上, 控制器(21)完全补偿变化的 ABR 带宽, 且滑模面上的闭环方程为

$$\dot{\bar{e}}_{\text{eq}}(t) = - \sum_{i=1}^n u_{i1\text{eq}}(t - t_i). \quad (24)$$

证明 在滑模面上有 $\dot{s}(t) = 0$ 和 $\bar{e}(t) = \bar{e}_{\text{eq}}(t)$, 于是由式(19)有 $\sum_{i=1}^n u_{i1\text{eq}}(t) = d(t)$. 将其代入式(6), 可得到(24). 所以在滑模面上, 闭环系统是指数稳定的.

4 系统仿真

下面将通过与文献[7]中模糊免疫 PID 控制器(FIPID)的仿真效果相比较, 验证本文算法的有效性与优越性. 这里采用图 2 所示的网络拓扑结构. 其中, 网络包含 2 个交换机, 5 个 ABR 用户, 4 个 VBR 用户. 队列参考长度 $q_d = 50$ cells.

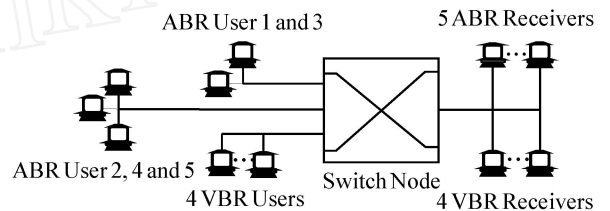


图 2 单瓶颈 ATM 网络仿真模型

初始值选取为 $q(t) = 0, z(t) = -5, \forall t \in [-0.1, 0]$. 这里, 对控制器(21)作如下改进以便更好地消除抖振^[11]:

$$u_i(t) = \begin{cases} k\bar{e}(t) + i(D + \text{sign}(s(t))), & |s(t)| > \delta; \\ k\bar{e}(t) + i(D + \frac{s(t)}{\delta}), & |s(t)| < \delta. \end{cases} \quad (25)$$

其中: $\delta = 0.1, \delta = 250$.

4.1 广域网仿真

这里只考虑 2 组 ABR 信源存在的情况, 往返传播时延和带宽的分配权重如表 1 所示. 由定理 1 的条件(11)可求得 $k = 0.46$.

表 1 广域网仿真参数

i	i/ms	f/ms	δ_i
1	50	10	0.2
2	100	20	0.1
3	50	10	0.4
4	100	20	0.2
5	100	30	0.1

由图 3 可以看到, 所有 ABR 用户的发送速率都能很快达到稳定值, 并且满足表 1 所示带宽分配的权重. 由图 4 可以看到, 本文所设计的 ISM 控制器调节下的缓冲队列长度(实线)与模糊免疫 PID 控

制器(虚线)相比,具有相同的上升时间,但能较快地稳定在给定值上,且无任何超调。

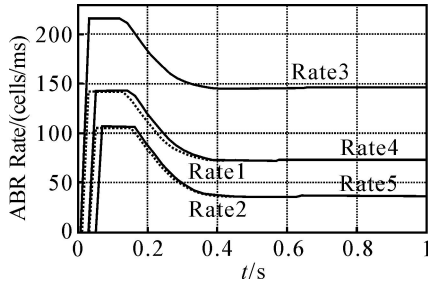


图3 ABR用户的发送速率

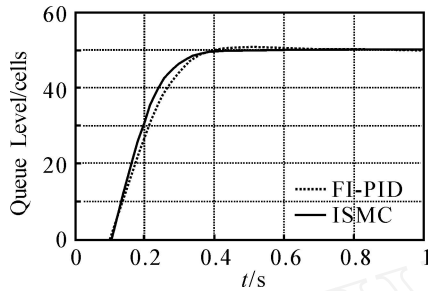


图4 缓冲队列的长度

由此可见, ISMC很好地克服了系统中存在的多个传播时延给控制带来的不利影响,并且可以实现对不同的用户按权重分配 ABR 带宽,比 FI-PID 算法具有更好的稳定性及较快的响应速度。

4.2 广域网中包含 VBR 业务的仿真

假设 ABR 用户是“贪婪”的(有持续大量数据发送),其他条件与 4.1 节相同。由图 5 可以看到, VBR 用户的平均发送速率为 73 cells/ms,且存在高频振动,所以 ABR 的带宽在不断变化。

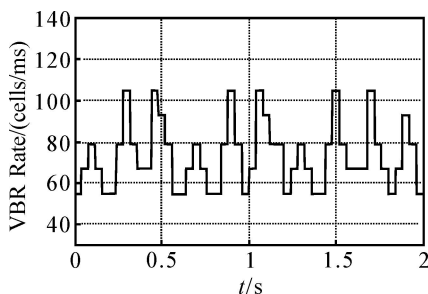


图5 VBR用户的发送速率

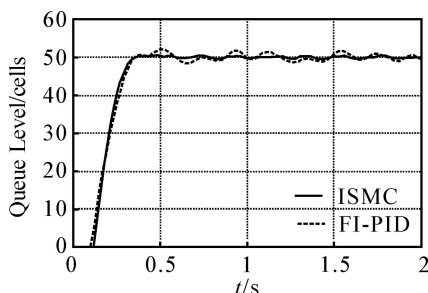


图6 VBR存在时缓冲队列的长度

如图 6 所示,当 ABR 带宽大幅变化时,本文所

设计的 ISMC 能较好地抑制带宽的变化,缓冲队列长度在给定值附近小幅波动;而 FI-PID 却出现较大幅度的振动。由此可见, ISMC 控制算法可降低系统对 VBR 变化的敏感程度,有较好的鲁棒性。

5 结论

本文针对含有多个时滞的 ATM 网络,通过引入预估器对系统作状态变换以补偿输入时滞的负面影响,并设计 ISMC 来抑制变化的 ABR 带宽,从而实现了缓冲队列长度的指数跟踪及带宽的公平分配。仿真结果验证了本文方法的有效性与合理性。

参考文献(References)

- [1] ATM forum technical committee TMWG. ATM forum traffic management specification version 4.0 [S]. 1996, af-trn-0056.000.
- [2] Benmohamed L, Meerkov S M. Feedback control of congestion in packet switching networks: The case of a single congested node [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1993, 1(6): 693-708.
- [3] Kolarov A, Ramamurthy G. A control-theoretic approach to the design of an explicit rate controller for ABR service [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1999, 7(5): 741-753.
- [4] Chong S, Lee S, Kang S. A simple, scalable, and stable explicit rate allocation algorithm for MAX-MIN flow control with minimum rate guarantee [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2001, 9(3): 322-335.
- [5] Mascolo S. Smith's principle for congestion control in high-speed data networks [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(2): 358-364.
- [6] Quet P F, Ataslar B, Iftar A, et al. Rate-based flow controllers for communication networks in presence of uncertain time-varying multiple time-delays [J]. Automatica, 2002, 38(6): 917-928.
- [7] Ren T, Dimirovski G M, Jing Y W. ABR traffic control over ATM network using fuzzy immune-PID controller [C]. Proc of the IEEE ACC. Minneapolis, 2006: 4876-4881.
- [8] Utkin V, Shi J X. Integral sliding mode in systems operating under uncertainty conditions [C]. Proc of the IEEE CDC. Kobe, 1996: 4591-4596.
- [9] Poznyak A, Fridman L, Bejarano F J. Mini-max integral sliding-mode control for multimodel linear uncertain systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(1): 97-102.
- [10] Castanos F, Fridman L. Analysis and design of integral sliding manifolds for systems with unmatched perturbations [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(5): 853-858.
- [11] Roh Y H, Oh J H. Robust stabilization of uncertain input-delay systems by sliding mode control with delay compensation [J]. Automatica, 1999, 35(11): 1861-1865.