

文章编号: 1001-0920(2004)08-0954-03

多通道 ATM 网络鲁棒拥塞控制

关新平, 高 妍, 龙承念

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 拥塞控制对 ATM 网络有效、稳定运行具有重要的作用。在单瓶颈多通道的网络模型下, 基于 Smith 预估原理, 提出一种新颖的鲁棒拥塞控制器设计方案。这种基于速率的拥塞控制可以保证 ABR 的服务质量(QoS)。理论分析和仿真结果表明, 所提出方案收敛速度快, 对网络的不确定因素具有较强的鲁棒性。

关键词: ATM 网络; 拥塞控制; 多通道; 鲁棒性

中图分类号: TN 913

文献标识码: A

Robust congestion control in multi-virtual-circuit ATM networks

GUAN Xin-ping, GAO Yan, LONG Cheng-nian

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China. Correspondent: GUAN Xin-ping, E-mail: xpguan@ysu.edu.cn)

Abstract: A novel robust controller design algorithm, based on Smith principle, is presented for ATM congestion control in which multiple virtual circuits are throttled at a single intermediate node. This rate-based congestion control algorithm can improve the QoS of ABR flow, which can maintain queue length of a bottleneck node at a desired level and the robustness of stable operation networks. Theoretical and experimental results show that the mechanism has the advantages of fast convergence and intensive robustness for networks uncertainties.

Key words: ATM networks; congestion control; multi-virtual-circuit; robustness

1 引 言

近年来, 拥塞问题已成为制约高速网络发展的关键问题。为确保网络的畅通和网络的服务质量(QoS), 必须对网络数据流量采取恰当的拥塞控制策略。

许多学者将控制理论方法引入拥塞控制算法的设计和性能分析, 取得了一些初步成果^[1~4]。文献[1]在分散化处理 ATM 网络虚通道(VP)资源分配控制模型的前提下, 运用动态规划方法求出控制律, 通过 VP 虚网络重新组织资源, 实现了资源动态分配。文献[2]根据 Smith 原理, 在单瓶颈结点多通道的网络模型下, 对信元的传播时延进行预估补偿, 仿

真结果表明流量控制达到了预期效果。但是, 文献[2]是在精确估计每个虚通道的传输时延情况下提出的控制器设计方案, 参数设计具有一定的保守性, 在实际的网络算法实现中很难达到对时延的准确估计。因此, 本文针对时延不匹配的情况, 提出一种鲁棒拥塞控制器设计方法。当实际的往返时延在估计值一定范围内上下波动时, 所设计的控制器仍然可以保证系统的稳定性和良好的动态性能。本文的拥塞控制方法对网络参数变化的适应性较强, 不需在线调整参数, 具有较好的鲁棒性。

2 基于反馈控制的网络模型

ATM 网络由大量分布在不同地区的结点组

收稿日期: 2003-09-01; 修回日期: 2004-02-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60174010)。

作者简介: 关新平(1963—), 男(满族), 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士生导师, 从事时滞系统鲁棒控制、混沌控制等研究; 高妍(1978—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士生, 从事 ATM 网络拥塞控制、鲁棒控制的研究。

成, 其通信采用面向虚连接的分组交换方式。1994 年, A TM 论坛选定基于速率 (Rate-based) 的拥塞控制机制为 ABR 业务的流量控制机制, 其基本工作原理如下: 信元沿着预先建立的虚路径, 通过一系列中继节点不断地存储转发到其目的端。源端通过反馈信元 (RM) 提供的网络反馈控制信息 (包括所经节点的拥塞情况), 动态调整其发送率, 以提高 ABR 可用带宽的利用率, 达到公平分配带宽并及时消除网络拥塞的目的^[5,6]。由此可见, 结点只有在 RM 信元往返时间后才能调节信元发送速率。而在这一时延期间, 大量的信元仍以原先较快的速率进入缓冲队列, 这将导致缓冲队列溢出, 信元丢失。因此, 必须克服时延给流量控制带来的不利影响。

3 基于队列长度的控制器设计方案

3.1 显示速率控制器设计

本文在单瓶颈多通道的假想模型下, 首次将鲁棒 Smith 预估器应用于多通道 A TM 网络的拥塞控制, 提出图 1 所示的控制框图, 其中

$$C(s) = k(1 + \frac{1}{T_a s}); R(s) = r^0/s;$$

$$G_0(s) = \frac{1}{s} - \tau_m, \tau_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_{m_i};$$

$$P_n(s) = \frac{1}{s} \prod_{i=1}^n e^{-\tau_{m_i} s}.$$

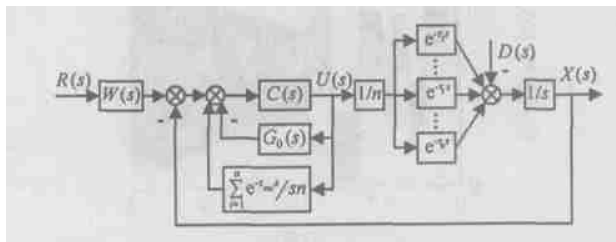


图 1 基于队列的多通道鲁棒拥塞控制器设计方案

假设在显示速率控制器设计过程中, 可以准确估计每个通道的往返传输时延, 即在模型匹配情况下 ($\tau_i = \tau_{m_i}, i = 1, \dots, n$) 设计控制器, 并在频域范围内解决系统的稳定性问题, 设计参数 k 和 T_a 。

设 $X(s)$ 到 $R(s)$ 以及 $X(s)$ 到 $D(s)$ 的传递函数分别为 $H_r(s)$ 和 $H_d(s)$ 。由图 1 可以得出

$$H_r(s) = \frac{X_r(s)}{R(s)} = \frac{W(s)C(s)}{1 + C(s)G_0(s)} P_n(s), \quad (1)$$

$$H_d(s) = \frac{X_d(s)}{D(s)} = \frac{1}{s} \left[\frac{1}{1 + C(s)G_0(s)} + \frac{C(s)}{1 + C(s)G_0(s)} (G_0(s) - P_n(s)) \right] \quad (2)$$

系统的特征方程为 $1 + C(s)G_0(s) = 0$, 代入 $C(s)$ 和 $G_0(s)$, 可得

$$T_a(1 - \tau_m k)s^2 + (T_a - \tau_m)s + 1 = 0 \quad (3)$$

为了获得稳定的标称系统和系统输出的快速响应, 令特征方程在 $-1/T_0$ 处有双重极点, 即 $s_1 = s_2 = -1/T_0$ 。通过简单运算, PI 控制器 $C(s)$ 的两个参数 k 和 T_a 必须满足

$$k = \frac{2T_0 + \tau_m}{(T_0 + \tau_m)^2}, T_a = 2T_0 + \tau_m. \quad (4)$$

其中参数 T_0 只与系统以下两个性能有关: 1) 瓶颈交换器队列长度 $X(s)$ 对网络不确定干扰 $D(s)$ 的响应 $X_d(s)$; 2) A TM 网络系统的鲁棒稳定性。

下面设计滤波器 $W(s)$, 目的是使系统在无干扰情况下输出无超调, 即缓冲器无溢出。令输出响应 $X_r(s)$ 到 $R(s)$ 的期望传递函数 $H_{r0}(s)$ 为

$$H_{r0}(s) = \frac{1}{1 + T_1 s} \prod_{i=1}^n e^{-\tau_i}, \quad (5)$$

令 $H_r(s) = H_{r0}(s)$, 代入式 (5) 可得

$$W(s) = \frac{(1 + sT_0)^2}{(1 + sT_a)(1 + sT_1)}$$

于是得

$$H_r(s) = \frac{1}{1 + T_1 s} \prod_{i=1}^n e^{-\tau_i},$$

$$H_d(s) =$$

$$\frac{1}{s} \left[1 - \frac{1}{n} \prod_{i=1}^n e^{-\tau_i} \frac{(1 + s(\tau_m + 2T_0))}{(1 + T_0 s)^2} \right]$$

代入 $R(s)$, 可得 $X_r(s) = \frac{r^0}{s(1 + T_1 s)} \prod_{i=1}^n e^{-\tau_i}$ 。输出 $X_r(s)$ 的稳态值为

$$X_r = \lim_{s \rightarrow 0} sX_r(s) = \lim_{s \rightarrow 0} H_r(s), R(s) = r^0.$$

在假设理想状态下, 系统只有 ABR 业务时, 队列长度稳态值可以跟踪给定, 并且这个给定值与所设计的参数不存在制约关系, 理论上可以任意指定。

3.2 鲁棒稳定性

在实际的网络环境中不可能精确估计出网络的往返时延, 估计值总或多或少地存在误差。因此, 分析时延不匹配 (即 $\tau_{m_i} \neq \tau_i, i = 1, \dots, n$) 时系统的鲁棒稳定性问题显得尤为重要。本文从系统的特征方程入手, 运用现代控制论中的小增益定理, 当模型不匹配时, 系统的特征方程为

$$1 + C(s)(G_0(s) + \delta P(s)) = 0,$$

其中 $\delta P(s) = P(s) - P_n(s)$ 。由此可将系统归结为

图 2 所示结构, 其中 $M(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_0(s)}$ 。

由小增益定理可知, 若满足 $\|\delta P(s)\| < \gamma, \forall$

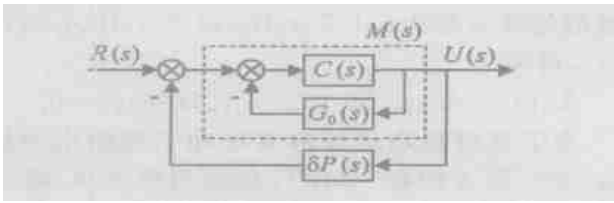


图 2 小增益定理原理

> 0 , 则闭环控制系统稳定的充要条件是 $M(s)$ 稳定, 且 $M(s) \neq 0$. 由 3.1 节的控制器闭环传递函数极点的设计可知 $M(s)$ 是稳定的. 令 $s = j\omega$, 则 $|M(j\omega)| = |C(j\omega)| / |1 + G_0(j\omega)C(j\omega)|$. 这里令 $\gamma = |1 + G_0(j\omega)C(j\omega)| / |C(j\omega)|$ 为不确定性 $\delta P(s)$ 的范数界. 代入 $C(j\omega)$ 和 $G_0(j\omega)$ 得

$$\gamma = \frac{|(1 + j\omega T_0)^2|}{|j\omega(1 + j\omega(2T_0 + \tau_m))|}, \omega > 0 \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 不确定性的范数界 γ 是变量 ω 的函数. 通过分析可知, 不确定性的范数界是 ω 的单调递减函数, 因此有 $\eta = \gamma_{\min} = |T_0^2 / (2T_0 + \tau_m)|$. 于是得

$$T_0 = \eta \left[1 + (1 + \sqrt{\tau_m / \eta}) \right] \quad (7)$$

下面分析 $\delta P(s)$, 有

$$\delta P(s) = P(s) - P_n(s) = \frac{1}{sn} \sum_{i=1}^n (e^{-\tau_i s} - e^{-\tau_m s}).$$

因为 $\delta\tau$ 比较小, 这里用一阶 Padé 近似来处理时延问题, 即 $e^{-\delta\tau s} = 1 - \delta\tau s$. 设 $\delta P_i(s) = e^{-\tau_m s} (e^{\delta\tau_i s} - 1/s)$, 其中 $\delta\tau_i = \tau_i - \tau_m$. 则 $\delta P_i(s) = -\delta\tau_i e^{-\tau_m s} = (\tau_i - \tau_m) e^{-\tau_m s}$, 可得 $|\delta P(s)| = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta P_i(s) \right| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\tau_i - \tau_m|$. 令

$$\eta = |\delta P(s)| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\tau_i - \tau_m| \quad (8)$$

如此选择便保证了小增益定理的条件, 即保证了闭环控制系统的鲁棒稳定性. 由于 η 是不确定范数界 γ 的最小值, 大大降低了保守性, 使得系统在最差估计情况下仍能保证稳定. 通过上述分析可知, η 即为系统的最大估计误差.

4 仿真实验

下面通过一个仿真实例来说明本文控制方案的有效性. 假设某一广域网的链路长度为 10 km, 链路带宽为 100 Mb/s, 带宽延迟积为 120 个信元. 考虑该链路上存在时变的 VBR 和 CBR 信元流, 假设

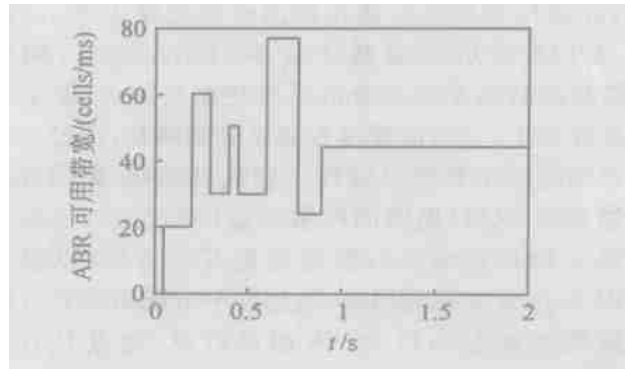
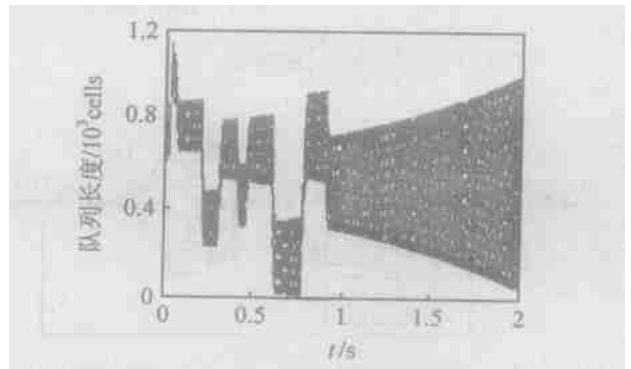


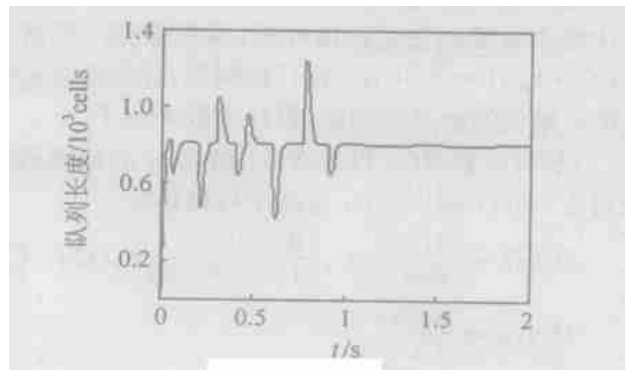
图 3 ABR 可用带宽

ABR 的可用带宽如图 3 所示.

假设网络往返时延的最大估计误差为 25%, 通过某一交换机的瓶颈结点有 4 条虚路径, 其估计的往返时延分别为 $\tau_1 = 1 \text{ ms}$, $\tau_2 = 19 \text{ ms}$, $\tau_3 = 7 \text{ ms}$, $\tau_4 = 13 \text{ ms}$. 时延平均估计值为 10 ms , 即 $\tau_m = 10 \text{ ms}$, 设计期望的队列长度 $r^0 = 800 \text{ cells}$. 仿真结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 采用文献[2]的单纯 Smith 预估器, 交换机中的队列会发生严重的抖动现象, 而且最终发散, 使信元丢失率增大. 而采用本文方法, 队列长度快速收敛到期望值, 保证了网络服务质量 QoS.



(a) 文献[2]方法



(b) 本文方法

图 4 队列长度动态特性

(下转第 960 页)

- [3] Altman E I, Haldeman R G, Narayanan P. Zeta analysis[J]. *J of Banking and Finance*, 1997, 6: 29-51.
- [4] Ahn, B S, Cho S S, Kim C Y. The integrated methodology of rough set theory and artificial neural network for business failure prediction[J]. *Expert Systems with Application*, 2000, 18: 65-74
- [5] Kun Chang Lee, Jin Sung Kim, Nam Ho Chung, et al. Fuzzy cognitive map approach to web mining inference amplification [J]. *Expert Systems with Applications*, 2002, 22: 197-211.
- [6] Lynn Ling X Li. Knowledge-based problem solving: An approach to health assessment[J]. *Expert Systems with Application*, 1999, 16: 33-42
- [7] Hong T -P, Wang T -T, Wang S -L, et al. Learning a coverage set of maximally general fuzzy rules by rough sets[J]. *Expert Systems with Application*, 2000, 19: 97-103
- [8] Krone A, Kiendl H. An evolutionary concept for generating relevant fuzzy rules from data [J]. *Int J of Knowledge Based Intelligent Engineering Systems*, 1997, 1(4): 207-213
- [9] Wang Ching-hung, Hong Tzung-pei, Chang Ming-bao, et al. A coverage-based genetic knowledge-integration strategy [J]. *Expert Systems with Applications*, 2000, 19: 9-17.
- [10] 黄天民. 格序引论及其应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998. 36-48
- [11] 李天瑞. 数据库中的关联规则及挖掘算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2001. 33-41.
- [12] Nicolas Pasquier, Yves Bastide, Rafik Taouil, et al. Efficient mining of association rules using closed item set lattices[J]. *Information Systems*, 1999, 24(1): 25-46
- [13] Davey B A, Priestley H A. *Introduction to Lattices and Order*[M]. 4th Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1994
- [14] Wille R. Concept lattices and conceptual knowledge systems [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 1992, 23: 493-515
- [15] Agrawal R, Srikant R. Fast algorithms for mining association rules[A]. *Proc of the 20th Int Conf on Very Large Data Bases* [C]. Santuago, 1994. 9: 487-499.

(上接第 956 页)

5 结 论

本文针对拥塞控制方案实现中网络时延不能准确预估的具体特点, 结合 Smith 预估原理, 在单瓶颈多通道的网络模型下, 提出一种鲁棒拥塞控制器设计方案. 通过将网络时延误差视为不确定因素, 运用小增益定理来解决鲁棒稳定性问题, 利用网络传输时延最大误差调整参数, 使得在估计误差最差情况下, 保证网络的稳定运行. 同时队列长度能够快速逼近期望值, 从而改善了网络的 QoS.

参考文献(References):

- [1] 韩兵, 曲润涛, 席裕庚. ATM 网络虚通道资源动态分配的分散控制[J]. *控制与决策*, 2000, 15(4): 415-418
(Han B, Qu R T, Xi Y G. Decentralized control of dynamic resource allocation problem of virtual path in ATM networks[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(4): 415-418)
- [2] Mascolo S. Smith's principle for congestion control in high-speed data networks[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(2): 358-364.
- [3] Gomez S F, Fornes J M, Rubio F R. Dead-time compensation for ABR traffic control over ATM networks[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(5): 481-491.
- [4] 汪小帆, 孙金生, 王执铨. 控制理论在 Internet 拥塞控制中的应用[J]. *控制与决策*, 2002, 17(2): 129-134
(Wang X F, Sun J S, Wang Z Q. Application of control theory to internet congestion control [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(2): 129-134)
- [5] Natalie Giroux. The ATM forum technical committee: Traffic management specification version 4.1[EB/OL]. <http://www.atmforum.com/standards/approved.htm>, 1999-03-19
- [6] Raj Jain. Congestion control and traffic management in ATM networks: Recent advances and a survey [J]. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1996, 28(13): 1723-1738