

基于 Smith 原则的 ATM 网络拥塞控制^{*}

关新平 刘志新 龙承念

(燕山大学电气工程学院 河北秦皇岛066004)

The Congestion Control of ATM Networks Based on the Smith Principle

GUAN Xin-Ping LIU Zhi-Xin LONG Cheng-Nian

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066004)

Abstract In this paper, the prediction of available bandwidth and Smith principle are applied into the congestion control based on the ATM model of single bottleneck node. The method can realize that the queue length in the switch traces the given desired value without error. And it also restrains the effect under the existence of wave of available bandwidth. In the simulation, we can see that the queue length keeps in a certain bound. The phenomenon of congestion is avoided and guarantees the quality of service at the same time. It verifies the effectivity and feasibility of the scheme.

Keywords Single bottleneck node, Prediction of available bandwidth, Smith principle, Quality of service

1 引言

作为综合业务数字网(ISDN)的一项基本技术,ATM 能够提供灵活的管理方式来最大程度地利用带宽,支持不同业务类型,保证多种业务的不同服务质量(QoS)要求。ABR 是 ATM 中定义的一类业务,其目的是通过调整信源的传输速率来充分利用网络中的剩余资源(带宽和缓冲空间),同时在允许一定时延存在的情况下降低信元丢失率。

ATM 论坛已经定义了一种基于速率的闭环流量控制机制^[1],用来实现 ABR 的反馈机制,它利用网络中反馈回来的显式速率信息来调整信源的发送率。这种控制方案需要各个业务源周期地发送被称为资源管理信元(RM Cell)的特殊信元来实现信息反馈。其中含有一个 ER 域来指示当前网络所能支持的速率。每个输出链路通过缓冲区与交换机相连,信元被传送到交换机,先临时保存在缓冲区内,等待交换服务,遵循 FIFO 的排队机制。与各个缓冲区相联系的是一个 ER 控制器,它根据当地信息(当前缓存占用率过去时刻的 ER 值,缓冲区地剩余空间当前可用带宽)周期地计算 ER 值。由于缓冲空间并非无穷大,这就限制了信元传输速率,一旦在交换机处信元到达的速率大于服务速率,等待服务的信元队列就会增长,若不及时调整输入速率,则队列长度将大于缓存空间,造成信元的溢出而丢失,信息阻塞。而源端又将重发丢失信息,加重网络负荷,即产生拥塞现象。在这种显式速率机制中,只有当控制器计算得到的 ER 值小于 RM 信元中 ER 域内存储的值时,才将原有的 ER 值更新,这样 RM 信元带回的信息是在源端与终端形成的链路中所有交换节点允许传输的最小值,即“瓶颈节点”的允许速率。

单瓶颈节点模型在 ATM 网络传输中,具有一定的代表性^[2~4],针对这样的模型,许多学者开始用控制的思想解决拥塞问题^[4~7],在网络传输中回路时延不可避免,同时也是恶化网络性能的主要因素之一。Smith 预估方法可以将时滞提取

至闭环传递函数之外,保证系统闭环稳定而不受时滞因素的影响^[3,6],文[3]提出用 Smith 原则解决高速通讯网络中的拥塞,将可用带宽视为一种扰动,并假设扰动形式为 $d_{ij}(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t-\tau_i)(|a_i| \leq 1)$,设计结果可以一阶系统的特性跟踪给定,但对扰动不能抑制,而是滞后跟踪。由于文[3]对 a_i 的假设限制,使得输出形式上可以接受,而实际带宽变化幅度较大,队列的输出若跟踪带宽变化,造成队列长度的大幅振荡。为保证传输质量必然要求缓冲空间较大,否则将导致信元的丢失或带宽资源的浪费。

本文针对上述问题提出基于可用带宽预测和 Smith 原则相结合的方法实现队列长度无静差跟踪给定,同时抑制带宽波动到输出的影响。

2 单瓶颈节点网络模型描述

针对上述 ATM 传输机制,可建立如图1所示的单瓶颈节点的传输示意图。图中, n 为位于该节点的虚连接个数, τ_i 为第 i 条瓶颈于该节点的虚连接的回路时延(RTT),即包括前向传输时延和后向传输时延, B 为缓冲区大小, Q_r 为队列长度期望值, C 为服务速率(即留给 ABR 的可用带宽), ER 为显式速率值, r 为控制器输出公平速率。则在交换节点处的对列模型可以描述为

$$\begin{aligned} \dot{q}(t) &= \sum_{i=1}^n r(n-\tau_i) - C(t) \\ q(t) &= Sat_B(q(t)) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{其中 } Sat_B\{x\} = \begin{cases} B & x > B \\ x & 0 < x \leq B \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

文[2]已经证明在网络平衡点附近研究系统的渐进稳定性时,忽略 $Sat_B\{x\}$ 非线性对网络的作用,对稳定性分析和控制参数的确定影响很小;所以本文在设计速率调节器时未考虑 $Sat_B\{x\}$ 的影响。设 n 条虚连接中,最大传输延迟 $\tau_{\max} = \tau$ 。由于传输时延和带宽波动是影响网络性能的主要因素,考

^{*} 基金资助项目:国家自然科学基金(No. 60174010)。关新平 教授,博士生导师,研究领域:通讯网络拥塞控制,时滞系统鲁棒控制,混沌控制及保密通讯。

虑在 n 条虚连接都处于最劣环境下, 即 $\tau_i = \tau_{\max} (i=1, 2, \dots, n)$, 设计控制器, 若系统仍能稳定, 则可保证系统具有较强的

鲁棒性。现对系统作如下假设:

1) 在该瓶颈节点处有 n 个虚连接瓶颈于此;

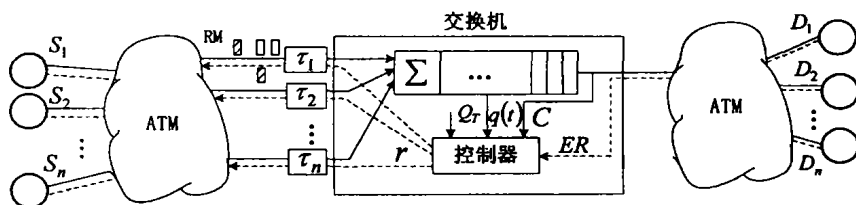


图1 单瓶颈节点网络模型

2) 在逻辑连接建立的过程中, 源端始终具有足够的信息等待发送;

3) 缓冲区空间大于带宽时延积;

4) 在采样控制周期内可用带宽不发生波动。

3 控制器设计

为消除时滞因素对系统闭环稳定性的影响, 采用 Smith 控制器 $G_c(s)$; 为了抑制带宽波动对输出队列的影响, 根据设计的 Smith 控制器 $G_c(s)$ 通过设置前馈控制器 $F(s)$ 的方法来抑制干扰; 由于 $F(s)$ 中含有时超, 表现在时域内需要带宽的预测值, 因此采用神经网络预测的方法根据带宽的历史值, 预测可用带宽的变化。在忽略非线性影响的情况下, 根据上面分析, 可将交换节点视为积分环节 $G_o(s) = 1/s$ 。采用的控制器总体结构如图2所示。

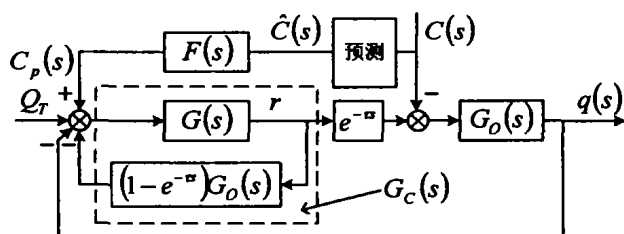


图2 控制结构图

3.1 Smith 控制器设计

在控制系统中, 对于二阶系统的动态性能和稳态性能已有很多了解。我们对于控制器的设计目标是: 期望的系统闭环响应为图3所示的二阶系统的响应。进而可以根据对暂态响应的要求来选择参数。

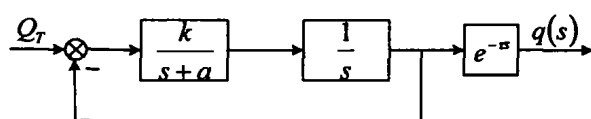


图3 期望系统结构图

由图2易知对于给定 Q_r 到输出的传递函数为 $\frac{G_c(s)e^{-\tau}}{s+G_c(s)e^{-\tau}}$, 其中, 由图3可知 Q_r 到输出的传递函数为 $\frac{ke^{-\tau}}{s^2+as+k}$ 。令

$$\frac{ke^{-\tau}}{s^2+as+k} = \frac{G_c(s)e^{-\tau}}{s+G_c(s)e^{-\tau}} \quad (2)$$

$$\text{可得 } G_c(s) = \frac{s \frac{k}{s+a}}{s + \frac{k}{s+a}(1-e^{-\tau})}$$

$$\text{所以 } G(s) = \frac{k}{s+a}$$

则控制率和队列给定的响应分别为

$$r = \frac{sk}{s^2+as+k(1-e^{-\tau})} (Q_r + C_p - q)$$

$$q = \frac{k}{s^2+as+k} e^{-\tau} Q_r \quad (3)$$

3.2 前馈控制器设计

由图2可得扰动 $C(s)$ 到输出的响应为

$$q_c(s) = \{-C(s) - [q_c(s) - F(s)C(s)]G_c(s)e^{-\tau}\}G_c(s)$$

$$q_c(s) = -\frac{[1-F(s)G_c(s)e^{-\tau}]G_c(s)}{1+G_c(s)G_c(s)e^{-\tau}} C(s) \quad (4)$$

若 $F(s)G_c(s)e^{-\tau} = 1$ 则可以实现对扰动的完全抑制。此时只要选择

$$F(s) = \frac{C_p(s)}{C(s)} = \frac{1}{G_c(s)} e^{\tau} \quad (5)$$

由于分子将出现 e^{τ} , 即时超现象, 表现在时域上需要对 C 进行 d 部预测值 ($d = \tau/T$)。根据 $G_c(s)$ 的具体形式, 将前馈环节写成时域内差分方程的形式得

$$C_p(n) = \frac{1}{kT} [C(n+d) + (a+k)TC(n+d) - C(n+d-1) - kTC(n)] \quad (6)$$

显然需要对可用带宽进行 d 部预测, 才能得到前馈量。下面我们采用单隐层结构神经网络实现可用带宽的预测。

3.3 可用带宽预测

对于网络流量的预测已有一定的研究^[3], 大多是基于智能的方法。神经网络具有自适应、自调整的功能, 能够根据输入输出样本的变化自动调整网络连接权值, 实现存在的复杂未知输入输出之间的映射关系。这里我们用单隐层神经网络进行流量预测, 网络结构如图4所示。

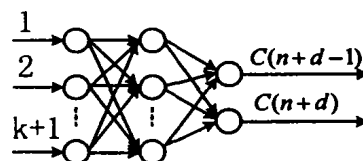


图4 预测网络结构

在 n 时刻, 系统以 $C(t)$ 的前 $k+1$ 个历史数据作为系统的输入输出样本。即输入向量为 $X = [C(n-d), C(n-d-1), \dots, C(n-d-k)]^T$, 输出样本为 $Y = [C(n-1), C(n)]$, 得到训练之后的网络结构。在此网络结构的基础上, 以新的样本 $\tilde{X} = [C(n), C(n-1), \dots, C(n-k)]^T$ 作为输入, 此时的输出作为带宽的预测值 $C(n+d-1), C(n+d)$ 。在这里, 神经网络的类型选择常用的 BP 网络, 节点转换函数选为 sigmoid 型函数 $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$, 目标函数 $J(t) = \sum E_p(t) < \epsilon$, 其中 ϵ 为给定的小正数, 以误差反传的方法优化网络权值。采用时窗滑动的方

式,在线预测可用带宽的变化。

4 公平算法实现

在逻辑连接建立的过程中约定源端信元发送率应当介于 MCR(minimal cell rate)和 PCR(peak cell rate)之间,因此信元发送率 $r_i(n)$ 存在如下的非线性饱和特性

$$r_i(n) = \text{Sat}_{MCR,PCR}\{r(n)\}$$

$$\text{其中}, \text{Sat}_{MCR,PCR}\{x\} = \begin{cases} MCR & x < MCR \\ PCR & x > PCR \\ x & \text{其它} \end{cases}$$

为实现可用带宽的公平分配和提高链路带宽的利用率,对于每一条处于连接状态的虚通路而言,可以按如下方式计算出公平带宽分配速率 $r_{fair}(n)$

$$r_{fair}(n) = \frac{r_i(n) - \sum r_{limited}(n)}{n_{sum} - n_{limited}} \quad (7)$$

其中, $\sum r_{limited}(n)$ 表示在 n 时刻瓶颈于其它交换节点的连接占用的带宽; n_{sum} 表示在 n 时刻与该交换节点的建立的虚连接数目; $n_{limited}$ 表示在 n 时刻瓶颈于其它交换节点的连接数目。

为了避免拥塞发生,任意一条 VC 反馈给信源的信元发送率不能高于该虚连接通路瓶颈节点处的带宽分配值。当 RM 信元经过交换节点时,显示速率域内的值,按照如下规则更新

$$ER = \min\{ER, r_{fair}(n)\} \quad (8)$$

这样,既避免了拥塞的发生,同时提高了带宽利用率,通过选择适当的控制器参数,能使系统具有较好的鲁棒性(降低可用带宽的波动对于队列长度的影响),从而减小信元丢失率,最终达到保证服务质量(QoS)的目的。

5 仿真结果

在仿真过程中,期望的动态特性可根据对系统的具体要求选定,在这里选择期望的系统为 $G_d = \frac{140}{s^2 + 50s + 140}$, 选取最大回路时延为 0.4s, 设定期望队列长度为 $Q_T = 1000$ cell, 假设可用带宽在 $C = 125000$ cell/s 附近波动, 波动最大幅度为 60000, 带宽变化情况如图5所示。此时队列的动态性能如图6所示, 平均队列长度基本保持在给定的队列。根据网络通讯中业务流的特点和实际链路的传输能力,适当地选择期望的队列长度,可以在避免拥塞的同时,保证业务传输质量,提高网络资源利用率。

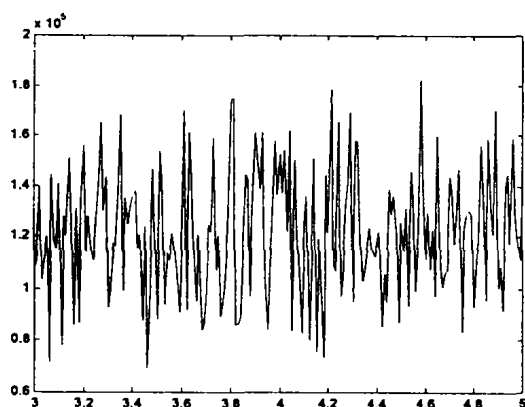


图5 带宽波动情况

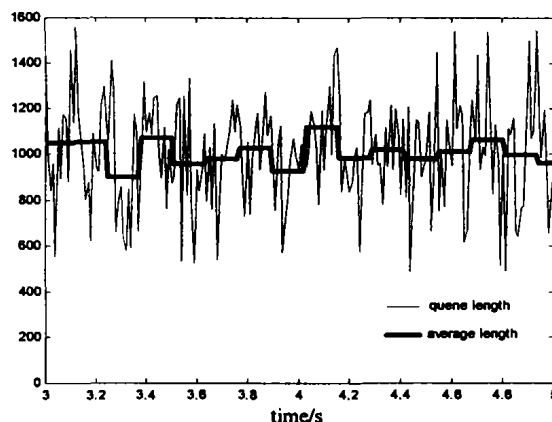


图6 动态队列长度

结论 本文针对单瓶颈节点 ATM 网络传输模型,采用 Smith 预估结构,通过设置预测环节和前馈环节,实现了交换机内信元排队机制中,队列长度可以无静差跟踪给定值,使闭环系统特性分析可以等价于典型二阶系统。该算法结构简单,易于实现。从仿真结果中可以看出,在网络可用带宽大幅波动的情况下,队列长度仍能保持在给定的范围之内,表现出较好的动态特性。

参考文献

- 1 ATM forum (1996) ATM traffic management specification, Version 4.0 af-tm-0056.000
- 2 Benmohamed L, Meekov S M. Feedback control of congestion in Packet Switching Networks; the case of a single congested node IEEE ACM Trans. On Networking, 1993,1: 693~707
- 3 Saverio Masxolo Congestion control in high-speed communication networks using the Smith principle. Automatica, 1999,35:1921~1935
- 4 Zhang Xiaolin, Wu Jieyi. A Novel Explicit Rate Flow Control Mechanism in ATM Networks. IEEE International Conference on Communications, 2001,5:1576~1580
- 5 Schwiebert L, Wang L Y. Robust control and rate coordination for efficiency and fairness in ABR traffic with explicit rate marking. Computer Communications, 2001,24:1329~1340
- 6 Gómez-Stern F, Fornés J M, Rubio F R. Dead-time compensation for ABR traffic control over ATM networks. Control Engineering Practice, 2002,10:481~491
- 7 Kolarov A, Rammamurthy G. A control-theoretic approach to the design of an explicit rate controller for ABR service. IEEE/ACM Transactions on networking, 1999,7(5):741~753
- 8 Fei Xiang, He Xiaoyan, Luo junzhou. Fuzzy neural network based traffic prediction and congestion control in high speed networks. Journal of Computer Science and Technology, 2000,15(2):144~149