

流媒体传输的模糊自适应预测拥塞控制*

杨治平¹, 李明海¹, 刘 洋¹, 冯素梅²

(1. 重庆师范大学 影视传媒学院; 2. 重庆师范大学 图书馆信息咨询中心, 重庆 400047)

摘 要: 为保证网络流媒体传输质量, 在流媒体的传输中多采用有效的拥塞控制策略。本文给出了一种更有效的流媒体传输的拥塞控制算法。基于模糊算法给出了模拟的网络传输模型, 采用能克服较大传输延时的预测控制解决缓存器的排队预报问题, 采用自适应控制算法解决缓存器溢出问题。多种算法有机组合, 解决了通过网络的流媒体传输。

关键词: 流媒体, 信息传输, 传输延时, 拥塞, 模糊自适应预测控制

中图分类号: TP 273. 2

文献标识码: A

文章编号: 1672-6693(2006)04-0034-05

Fuzzy Adaptive Predictive Congestion Control of Multimedia Traffic

YANG Zhi-ping¹, LI Ming-hai¹, LIU Yang¹, FENG Su-mei²

(1. College of Film and Media; 2. Information Seek Advice From Center of Library, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract: In order to guarantee the quantity of flow medium traffic delivered in the network, congestion control strategy is more and more adopted in flow medium traffic. This paper gives a control scheme of flowing the obstruction that medium can be delivered more effectively, network traffic model is given based on fuzzy modeling procedure, propagation delay can be overcome by the proposed predictive control that it resolves predictive problem of queue in buffer, overflow of buffer is resolved by implementation of the adaptive control method. The combination of various algorithms resolves the problem when flow medium is delivered through a network.

Key words: flow medium, information delivered, traffic delay, congestion, fuzzy adaptive predictive control.

在现代网络通讯中, 视频或音频媒体被压缩成流式文件, 存放在流媒体服务器中, 通过 Internet 进行实时和交互性传输。越来越多的音、视频传输流媒体, 造成了网络传输的信息流的严重拥塞。媒体传输拥塞会引起过多的信元丢失和不可接受的端到端的信元传输延时, 从而引起信息传输质量的下降。解决流媒体拥塞所实施的拥塞控制的目的, 一是为了保护网络用户得到预定的服务质量, 二是优化网络资源的利用, 以取得更好的网络利用效率。

在采用网络拥塞控制策略上, 已有许多前人开展了有益的工作, 如文献[1]的 PD—模糊控制算法, 在网络的异步传输模式(ATM)上解决数据包排队延迟方面有所贡献; 文献[2, 3]对信息包的传输延时进行了分析, 对传输的控制有所贡献; 文献[4]则给出了对拥塞进行反馈控制的一般理论; 文献

[5]对缓冲器的有效占据阈值设置给出了研究结果; 文献[6]对拥塞控制的稳定性和收敛特性进行了有效的分析。这些都对流媒体的有效传输做出了不同的贡献, 对拥塞控制提供了有益的参考。本文进一步给出了基于模糊算法的 ATM 网络数据传输模型的构建方法, 在此基础上, 给出了信息包传输延迟的超前预报的预测控制算法, 给出了流媒体传输拥塞的缓冲器阈值设置的自适应控制算法。通过实验分析和仿真研究表明, 本文给出的算法在解决网络传输拥塞上性能是优越的, 适合于当前的一般流媒体有效传输的参考采用。

1 拥塞控制系统模型

1.1 流媒体网络传输的模糊模型

ATM 上的数据传输主要有如下几种业务。

* 收稿日期 2006-03-06 修回日期 2006-06-15

资助项目: 重庆市教委科研基金(No. 04-JK-46)

作者简介: 杨治平(1957-)男, 辽宁辽阳人, 教授, 研究方向为模糊控制、信息技术与网络通讯。

1) 恒定比特业务(Constant Bit Rate Service, 简称 CBRS)。它是以恒定比特速率传送信息的业务。这种业务主要是用于传送实时的话音活动图像及电路仿真的业务数据。

2) 可变比特业务(Variable Bit Rate Service, 简称 VBRS)。它以可变的比特速率传送信息业务。这种业务主要用于传送实时的、变速率的音频和视频信号。

3) 可用比特业务(Available Bit Rate Service, 简称 ABRS)。不预先给用户业务分配速率, 只要链路空闲, 就利用链路剩余的全部带宽, 也叫竭尽全力业务。这种业务申报时, 只申报峰值速率(PCR), 它对延时要求不高, 但对信元丢失率要求苛刻。由于网络通讯大部分都是 ABR 业务, 所以, 目前的控制绝大多数信息传输拥塞控制算法都是针对 ABR 业务类型的, 本文涉及的控制算法也是以 ABR 传输机制而设计的。

ATM 上的信息传输通过 ATM 交换机的作用机制是信号随机到达与随机离开, 网络带宽也是随机变化的, 在实时流媒体传输中, 既有信息打包的传输延时以及缓存器排队延时, 又有信元传输速率的变化, 这些都使得在网络 ATM 下的信息流传输过程呈现出不确定性和非线性。用传统的数学模型方法是很难描述数据流的传输系统模型。由于端对端的输入和输出线路传输特性是非线性的, 所以输出对输入的相应关系是模糊的, 这些系统特性都对系统的数学模型化, 带来极大的困难。应该看到, 在很小的时间段里, 数据传输是确定的, 这就可以采用分段线性化的方法构建整体的非线性模型。而由于数据流的传输是随机过程, 因此, 综合起来考虑, 可以把 Takagi 和 Sugeno 的分段模糊线性化的方法^[7], 应用于随机过程滑动平均模型(ARMAX)^[7], 形成模糊随机过程滑动平均模型(FARMAX), 在后面的实验过程表明, 这种模型可以较好地模拟 ATM 网络数据和传输模型, 其算法如下。

采用中央缓存器交换机的中央排队处理数据流, 所需的存储器最少, 而排队长度也最小^[8], 适合于信息流的集中控制。构建算法如下: 对第 i 组信号, 采用 IF—THEN 模糊规则, 有

IF $Z_1(k)$ is F_{i1} and $Z_2(k)$ is F_{i2} and ... and $Z_g(k)$ is F_{ig} (1)
THEN $A_i(q^{-1})Y_i(k) = q^{-d} B_i(q^{-1})U(k) + C_i(q^{-1})U(k)$

式中 $A_i(q^{-1})$, $B_i(q^{-1})$, $C_i(q^{-1})$ 是 $n, m, 1$ 阶多项式, 式中包含有待辨识的多项式系数^[7], 用 L 表示 IF—THEN 模糊规则数, 而 F_{ij} 表示模糊集合($1 \leq i \leq L, 1 \leq j \leq g$), $Z_1(k) \dots Z_g(k)$ 是与数据集合 $\{y(s)$,

$u(s)$ 有关的互质变量, 它能代表反映传输条件的指标, 如缓存器长度变化和缓存器长度变化率等。 $y(k)$ 是反映缓存器负荷条件的指标, 在这里模糊子集合被定义成 3 种情况: 轻负荷、中等负荷、和重负荷, 分别表示通过缓存器交换机的数据流的拥塞状况。 $u(k)$ 是用来调节缓存器负荷状况的可控的数据流。 $C_i(q^{-1})$ 是零点位于单位圆内的稳定多项式, $u(k)$ 是不可测的随机信号扰动量, 它满足下列特性 $E[u(k) | \xi_{k-1}] = 0$, 这里 E 是数学期望, 而 ξ_{k-1} 是采样数据集合。(1)式就是在 3 种缓存器负荷状况下的非线性系统的局部线性化, 整个非线性 FARMAX 系统就是(1)式的模糊子系统的线性拟合。

实际上(1)式是不适合代表实际的数据传输系统的, 因为没有考虑到一个重要的因素就是延时特性, 如图 1 所示, 在保证传输服务质量(QOS)的过程中, 有打包传输延时、缓存器交换机数据排队延时以及缓存器重负荷条件下的通过反馈回路通知到达信号缓缓缓存器的传输延时, 这几项延时构成了控制器的控制回路延时。在这里的控制模型中用 d 来表示整个回路延时。

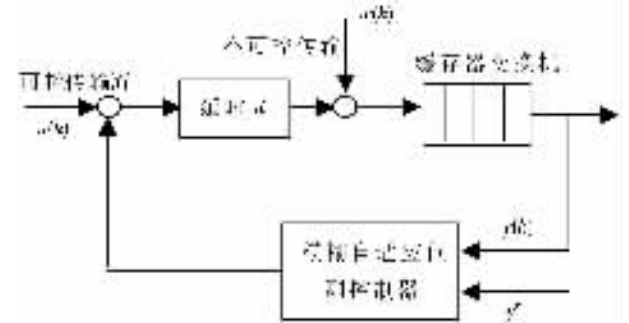


图 1 拥塞控制系统结构

为了减少整个回路延时对数据传输的影响, 达到 QOS 指标, 有必要采用预测类控制算法, 以更有效地解决拥塞控制问题, 因此在(1)式的基础上引进 d 步超前预测模糊模型来更好地模拟 ATM 数据传输模型。定义最优 d 步超前预测信号为 $y_i^0(k+d|k) = E\{y(k+d) | \mathcal{Q}_k\}$, $y_i^0(k+d|k)$ 属于下列递归方程

$$C_i(q^{-1})y_i^0(k+d|k) = r_i(q^{-1})C_i(q^{-1})y_i(k) + \delta_i(q^{-1})u(k) \quad (2)$$

式中 $r_i(q^{-1}) = G_i(q^{-1})\delta_i(q^{-1}) = F_i(q^{-1})B_i(q^{-1})$, 且 $G_i(q^{-1})$ 和 $F_i(q^{-1})$ 满足下列多项式

$$\begin{aligned} C_i(q^{-1}) &= F_i(q^{-1})A_i(q^{-1}) + q^{-d}G_i(q^{-1}) \\ F_i(q^{-1}) &= 1 + f_{i1}q^{-1} + \dots + f_{i,d-1}q^{-(d-1)} \\ G_i(q^{-1}) &= g_{i0} + g_{i1}q^{-1} + \dots + g_{i,n-1}q^{-(n-1)} \quad (3) \end{aligned}$$

对每一个模糊预测子系统, d 步超前预测信号 $y_i^0(k+d|k)$ 都满足

$$y_i^0(k+d|k) = y(k+d) - F_i(q^{-1})w_i(q^{-1}) \quad (4)$$

d 步预测信号 $y_i^0(k+d|k)$ 的模糊模型由下列规则给出

IF $Z_1(k)$ is F_{i1} and $Z_2(k)$ is F_{i2} and...

and $Z_g(k)$ is F_{ig} THEN

$$C_i(q^{-1})y_i^0(k+d|k) = \gamma_i(q^{-1})C_i(q^{-1})y(k) + \delta_i(q^{-1})u(k) \quad i=1, 2, \dots, L \quad (5)$$

整个模糊预测系统模型由下式给出

$$y^0(k+d|k) = \sum_{i=1}^L h_i(Z(k))y_i^0(k+d|k) = \sum_{i=1}^L h_i(Z(k)) \left\{ \frac{\gamma_i(q^{-1})}{C_i(q^{-1})} y(k) + \frac{\delta_i(q^{-1})}{C_i(q^{-1})} u(k) \right\} = \sum_{i=1}^L h_i(Z(k)) \{ \alpha_{i0}y(k) + \alpha_{i1}y(k-1) + \alpha_{i2}y(k-2) + \dots + \alpha_{ip}y(k-p) + \beta_{i0}u(k) + \beta_{i1}u(k-1) + \beta_{i2}u(k-2) + \beta_{iq}u(k-q) \} \quad (6)$$

式中 $y^0(k+d|k)$ 是 FARMAX 最优 d 步超前预测信号, 而 $\sum_{j=0}^p \alpha_{ij}q^{-j}$ 和 $\sum_{j=0}^q \beta_{ij}q^{-j}$ 是对 $\frac{\gamma_i(q^{-1})}{C_i(q^{-1})}$ 和

$\frac{\delta_i(q^{-1})}{C_i(q^{-1})}$ 的近似处理。

1.2 模糊自适应预测控制算法

在此, 进一步构建 FARMAX 预测控制的目标函数如下

$$J(k+d) = E \left\{ \frac{1}{2} [y^0(k+d|k) - y^r + \sum_{i=1}^L h_i(Z(k))F_i(q^{-1})u(k+d)]^2 + \frac{\lambda}{2} u^2(k) \right\} \quad (7)$$

进一步整理 (7) 式, 还可得到下式

$$J(k+d) = \frac{1}{2} [y^0(k+d|k) - y^r]^2 +$$

$$E \left\{ \sum_{i=1}^L h_i(Z(k))F_i(q^{-1})u(k+d) \right\}^2 + \frac{\lambda}{2} u^2(k) \quad (8)$$

式中 y^r 是给定的缓存器容量, λ 是加权因子, 是调整控制幅度的权系数。将 (8) 式对 $u(t)$ 微分, 为获得最优传输控制, 得到下式

$$[y^0(k+d|k) - y^r] \frac{\partial y^0(k+d|k)}{\partial u(k)} + \lambda u(k) = 0 \quad (9)$$

从 (6) 式也可以得到

$$\frac{\partial y^0(k+d|k)}{\partial u(k)} = \sum_{i=1}^L h_i(Z(k))\beta_{i0} \quad (10)$$

结合 (9) 和 (10) 式可得

$$y^0(k+d|k) - y^r \frac{\lambda}{\sum_{i=1}^L h_i(Z(k))\beta_{i0}} u(k) = 0 \quad (11)$$

把 (6) 式代入到 (11) 式中还可导出下式

$$\sum_{i=1}^L h_i(Z(k)) \left\{ \sum_{j=0}^p \alpha_{ij}y(k-j) + \beta_{i0}u(k) + \sum_{j=1}^q \beta_{ij}u(k-j) \right\} - y^r + \frac{\lambda}{\sum_{i=1}^L h_i(Z(k))\beta_{i0}} u(k) = 0 \quad (12)$$

(12) 式整理以后, 得到最优控制作用为

$$u(k) = \beta_{i0}(Z(k))y^r -$$

$$\frac{\left\{ \sum_{i=1}^L h_i(Z(k)) \left[\sum_{j=0}^p \alpha_{ij}y(k-j) + \sum_{j=1}^q \beta_{ij}u(k-j) \right] \right\}}{\left(\sum_{i=1}^L h_i(Z(k))\beta_{i0} \right)^2 + \lambda} \quad (13)$$

$$\text{式中 } \beta_{i0}(Z(k)) = \frac{\sum_{i=1}^L h_i(Z(k))\beta_{i0}}{\left(\sum_{i=1}^L h_i(Z(k))\beta_{i0} \right)^2 + \lambda} \quad (14)$$

(13) 式中的 $\alpha_{i0}, \alpha_{i1}, \dots$ 以及 $\beta_{i0}, \beta_{i1}, \dots$ 都是决定最优控制速率的模型参数, 应用自适应辨识算法可以估计出这些控制参数^[6], 这些参数传给控制器以决定控制作用。模型参数的估计可以写成向量的形式为

$$\hat{y}(k) = \hat{\alpha}(k)^T \phi(k-d) \quad (15)$$

式中 $\hat{\alpha}(k)^T$ 是系统的模型参数, 而 $\phi(k-d)$ 是由采样数据 $y(k), u(k)$ 组成的系统结构参数。由 $\phi(k-d)$ 参数, 应用最小二乘估计算法 (NLMS) 可估计出^[7] 模型参数 $\hat{\alpha}(k)^T$, 参数估计的递归公式为

$$\hat{\alpha}(k+1) = \hat{\alpha}(k) +$$

$$\frac{\bar{\mu}}{\mu + \|\phi(k-d)\|^2} \phi(k-d) \epsilon(k) \quad (16)$$

式中 μ 是任意小的正数 (避免除以零), $\bar{\mu}$ 是控制指标的阶跃幅度, 当 $0 < \bar{\mu} < 2$ 时, NLMS 算法收敛。 $\epsilon(k) = y^r(k) - \hat{y}(k)$ 是理想缓存容量与检测缓存容量的差值, 是系统控制的依据。最优控制的目的是在保证数据传输下, 使 $\epsilon(k)$ 的量值趋于最小。

2 实验分析与仿真研究

2.1 传输源的一般模型

在实际的网络传输数据中, 应用 ABR 服务可以传输许多数据, 诸如 E-mail, FTP 和 WWW 资源。在这里, 输入信号采用视频会议信号 (VDFS) 作为 ABR 源, 它可以很好地替代 ABR 服务。VDFS 模型的两个固有特征就是, 它的边缘分布遵循 gamma 函数规律, 而自相关函数是几何分布的。令 $Ga(\beta, \kappa)$ 是含有分形参数 β 和标量 κ 的 gamma 分布, 令 $Be(p, q)$ 是含有 p, q 参数的 beta 分布的随机变量。那么 VDFS 模型就是独立的不相关的 $Ga(\alpha, \kappa)$ 与 $Ga(\beta, \kappa)$ 之和 $Ga(\alpha + \beta, \kappa)$ 的随机变量, 与 $Be(\alpha, \beta - \alpha)$ 和 $Ga(\beta, \kappa)$ 的乘积构成的随机变量 $Ga(\alpha, \kappa)$ 联合组成的边缘分布模型。设 $X(k-1)$ 表示 $Ga(\beta, \kappa)$, $A(k)$ 表示 $Be(\alpha, \beta - \alpha)$, $B(k)$ 表示 $Ga(\beta - \alpha, \kappa)$, 这 3 个变量都是独立不相关的随机变

量,有

$$X(k) = A(k)X(k-1) + B(k) \quad (17)$$

这里定义一个具有 $Ga(\beta, \kappa)$ 边缘分布的 $\{X(k)\}$ 的随机过程,在仿真中可以替代 VDFS 模型^[9]。 $\{X(k)\}$ 的自相关函数 $r(k)$ 给出如下

$$r(k) = \rho^k = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^k, \text{ 参数 } \beta \text{ 和 } \kappa \text{ 都是从数据的均}$$

值 m 和方差 v 的估计而得到的。这里 $\kappa = \frac{v}{m}, \beta =$

$$\frac{m^2}{v}, \mu = \rho\beta。$$

给出的 3 个 ABR 源及其数据如表 1 所示。

表 1 VDFS 模型(ABR 源)基本数据

	α	β	κ	ρ	均值	max	min
VDFS1	22.5	23	0.3	0.87	8.55	18.4	2.67
VDFS2	21	22	0.2	0.85	6.66	12.4	1.98
VDFS3	6.7	7.12	0.98	0.82	7.33	20.2	0.87

2.2 扰动信号源的一般模型

扰动信号采用可变比特业务 VBR 作为随机变化信号源(视频源),它作为不可测的流媒体数据,作为控制系统的扰动信号,实验中根据这个信号源的不同随机值的加入,来检验可控的数据源 ABR 的调节作用。在实验中,扰动信号源设为一阶 Markov 模型。Markov 随机过程

$$\lambda_0(k) = a\lambda_0(k-1) + bw_0(k) \quad (18)$$

式中 $w_0(k)$ 是独立不相关的高斯随机变量, a, b 是常数。设 $w_0(k)$ 有均值 μ_{w0} 和单位方差,再设 $|a| < 1$,则在 k 相当大时,这个过程处于稳定状态。这个视频源的数据在表 2 中给出。

表 2 干扰源(VBR)基本数据

	a	b	μ_{w0}	Mean	max	min
video1	0.85	0.74	2.01	10.01	16.05	3.65
video2	0.82	0.90	2.98	15.01	21.94	7.94

2.3 实验过程

在实验过程中,缓存器长度 $y(k)$ 是作为检测变量,缓存器长度 $y(k)$ 也被看作是拥塞程度。对于 FARMAX 传输模型中 $y(k)$ 的隶属函数中由 3 个规则组成,这是由于缓存器的溢出(过负荷)和负溢出(缓存器为空)都是发生在缓存器的边缘状态的,这 3 个规则反映了缓存器在轻负荷、中等负荷、重负荷(拥塞)的 3 种状况。 $y(k)$ 的隶属函数变化规律见图 2 所示,根据缓存器的负荷状况,调整进入的信元数 B_{\max} 的规律为:边缘状况为反比调整关系,正常状况为中度调整对应关系。

在(6)式中选择 $p = 10, q = 10$ 。描述缓存器动态变化特性的 Lindley 方程^[10]为

$$y(k+1) = \min\{\max[y(k) + (u(k) - d) + u(k) - \eta \times T \times C] B_{\max}\} \quad (19)$$

在(19)式中选择 $T = 1\text{ms}, C$ 为 $10^6/8 \times 58, \eta$ 为 $1.55\text{Mb/s}, B_{\max}$ 设 100 信元数,自适应控制阶跃幅值 $\bar{\mu}$ 是 0.2。

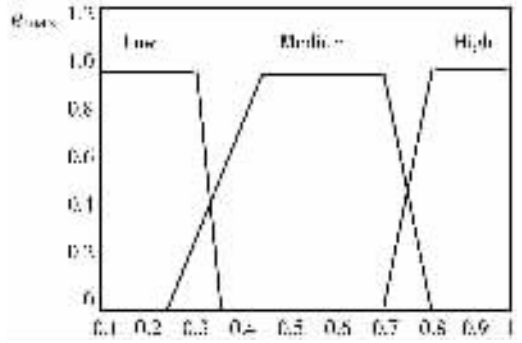


图 2 传输排队长度的隶属函数 $y(k)$

仿真中 y^r 理想设定值为 60 信元值 (B_{\max} 的 60%)。信元损失率 (CLR) 由下式给出

$$CLR(\%) = \frac{\text{丢失的信元数}}{\text{总传输信元数}} \times 100\%。$$

线路利用率被定义为

$$\text{线路利用率}(\%) = \frac{\text{总输入的传输量}}{\text{线路容量}} \times 100\%$$

表 3 不同加权因子 λ 和不同的延时 d 系统相应指标

$d(\lambda)$	CLR (%)	Utilization (%)	Buffer mean	Buffer SS
1($=0.01$)	0	99.332 2	9.368 7	11
4($=0.01$)	0.012 2	97.399 0	12.846 3	20
7($=0.01$)	0.050 4	92.530 6	11.273 2	20
7($=0.1$)	0.006 0	86.784 3	1.950 0	9

表 3 给出了不同的控制量加权因子 λ 和不同的延时 d 系统的试验结果。

从表 3 可以看出,在回路延时增大后,系统的缓存器均值对应于缓存器的缓存标准设置(SS),没有超出溢出的范围。但为了减少信元损失率,须加大控制项的加权因子,以增强控制功能。当最大限度的减小信元损失率后,其中为防止缓存器溢出而返回发送端重新发送的信元量也增加,使得网络线路的利用率降低,实际应用中应在这两项指标中选择合适的平衡点,以达到系统传输过程最优的效果。

2.4 仿真研究

对设计的系统进行仿真分析,仿真中将 3 个视频源分时传输到终端,图 3 给出了通过瓶颈线路 ($R_1 - R_2$) 传输的示意图。与此同时也将两个 VBR

干扰源加入到输入端参与传输。

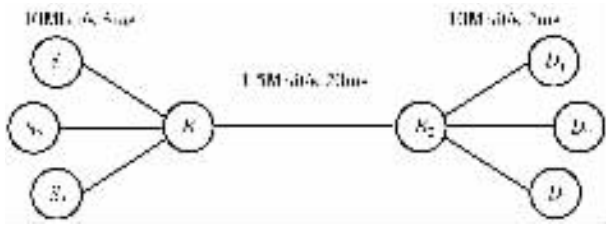


图3 3个视频源的端到端分时传输示意

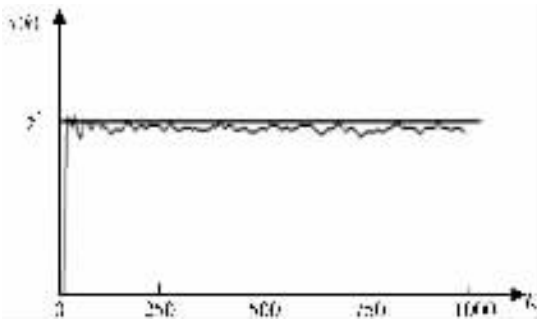


图4 交换机缓冲器定值控制曲线

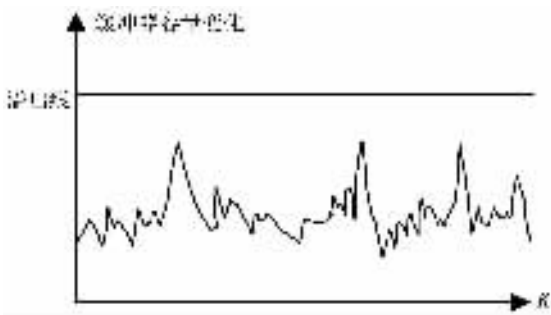


图5 交换机缓冲器容量变化示意图

在加入传输源和干扰源后,在缓冲器交换机的控制芯片上施以模糊自适应预测控制,以控制通过交换机缓存器的缓存容量,图中 R_1 、 R_2 节点为ATM交换机。图4所示,保持动态缓冲器容量 $y(k)$ 和理想缓冲器容量 y^* 的差值在理想的控制水平上(采样1000组仿真数据),可使缓冲器的信息存储量在一个允许的范围,在图5中则给出了缓冲器的控制结果。

图5表明了在所给控制器的控制下,尽管缓冲器的缓存容量有很大波动(也包括了干扰的作用),但始终没有超过规定的界限(没有溢出),这表明控制性能是优越的。从图4、图5可以看出,本文所给的控制器的成功。

3 结束语

综上所述,由所给的算法通过仿真过程所得到的系统控制结果可以看到,控制算法是优越的。从以上的控制系统的响应特性,可以看到通过调整缓

存器的接受存储量,保证了给定缓存器容量与动态缓存器容量的差值在最小的允许范围内,从而使其不产生溢出,数据包未产生丢失,媒体数据传输拥塞控制算法设计获得成功。由此可见,该算法适合于一般的端对端的多媒体数据传输。该算法在投入实际网络数据传输上取得了良好的效果。在实际的视频传输中接受端的动态图像得以失真度最小的传输,有关的编码和解码算法和程序设计,以及相关的实验系统结构,限于篇幅在这里不再赘述。

参考文献:

- [1] XU W, QURESHI A G, SARKIES K W. Novel TCP Congestion Control Scheme and Its Performance Evaluation[J]. IEEE Proc Commun 2002, 149(4): 217-222.
- [2] VERMA R, LYER A, KARRANDIKAR. Towards an Adaptive RED Algorithm for Achieving Delay-loss Performance[J]. IEEE Proc Commun 2003, 150(3): 163-168.
- [3] SCHORMANS J, LIU E, STEWART R, et al. Analytical Technique for Accelerating the Simulation of Packet Networks[J]. IEEE Proc Commun 2003, 150(5): 341-346.
- [4] MIHAIL L, SICHITIU, PETER H, et al. The Effect of Uncertain Time-variant Delays in ATM Networks with Explicit Rate Feedback: A Control Theoretic Approach[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking 2003, 11(4): 628-637.
- [5] PARK C G, HAN D H, LEE Y. Performance Analysis of Threshold Based Bandwidth Allocation Scheme for IP Traffic on ATM Networks[J]. IEEE Proc Commun, 2002, 149(1): 29-35.
- [6] LOGUINOV D M, RADHA H. End-to-end Rate-based Congestion Control: Convergence Properties and Scalability Analysis[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking 2003, 11(4): 564-577.
- [7] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
- [8] 敖发良, 陈明松, 何宁. 现代通讯网络中的交换技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
- [9] HEYMAN D P. The GBAR Source Model VBR Video Conferences[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(6): 564-577.
- [10] MAGLARIS B, ANASTASSIPOU D, SEN P, et al. Performance Models of Statistical Multiplexing in Packet Video Communications[J]. IEEE Trans Commun, 1998, 36(6): 834-844.

(责任编辑 游中胜)