

一种改进的基于 Smith 原则的计算机高速通信网络的拥塞控制方案^{*})

谭连生 赵甫哲 刘 芹

(华中师范大学计算机科学系 武汉430079)

An Improved Congestion Control Scheme for High-Speed Computer Communication Networks by Using Smith's Principle

TAN Lian-Sheng ZHAO Fu-Zhe LIU Qin

(Department of Computer Science, Central China Normal University, Wuhan 430079, PR China)

Abstract In this paper, classical control theory and Smith's principle are applied in designing a class of effective and simple congestion control schemes for high-speed computer communication networks. Mathematical analyses and simulations verify the efficiency of the congestion control schemes. The proposed congestion control laws guarantee full utilization of network links and stability of network queues so that the network has no data loss in a general network topology and traffic scenario. The approach has some advantage over the usual Smith's principle based congestion control scheme; it can be applied to those networks that may have smaller bottleneck capacity. Theoretical analyses and simulation results show good performance of networks if implemented by the congestion controllers, which are designed on the basis of the improved Smith principle.

Keywords Congestion control, Smith principle, ATM, Buffer queue, Input rate

1. 引言

ATM 网络是一类虚拟的电路交换网络,它融入了电路交换技术和包交换技术。在这两个系统融入以前它们是独立的,若要互相通信必须获得彼此的通信参数才能建立虚拟连接。而 ATM 网络通过存储技术和统计复用来共享网络资源,网络资源的共享使得通信费用大大减少。ATM 是以定长的信元(cell)作为高速通信信息的载体,它具有高速、低比特错误率、动态分配带宽和高复合能力的优点,这些使得它非常适宜于需要保证服务质量(Quality of Service, QoS)的多媒体数据流。由于多媒体业务流的特性,常引起网络拥塞并降低服务的质量。因此必须采取一定的流量管理控制机制来避免网络的拥塞。

在 ATM 网络中,ATM 论坛业务管理规范4.1^[1]定义了五类服务:常比特速率类(CBR)、可变比特速率类(VBR)、不确定的比特速率类(UBR)、受保证帧速率(GFR)和可用的比特速率类(ABR)。其中 ABR 类为唯一具有反馈特性的服务类。人们常采用反馈控制机制^[1-7]来控制 ABR 流的发送速率,以避免拥塞、减少数据包的丢失和重传,从而提高网络性能。文[2]中提出了一个拥塞控制方案,在该方案中输入速率用过去的速率和目前的缓冲队列状况来计算获得。但是该算法的不足之处是当改变业务流时需要重新调整控制参数,没有解决复杂闭环系统的动态稳定性问题,缓冲队列只能通过仿真分析,不便于实现。文[3]中提出两个线性反馈算法,但算法中也只用常比特速率而未分析可变比特速率。这类拥塞控制方案的理论和方法在文[4~7]中得到了改进。近年来,TCP/IP 传输控制协议广泛应用于网络传输,随着业务量的增加网络出现严重的拥塞崩溃的问题。文[8]提出并讨论了 TCP/IP 拥塞控制的问题,文[9,10]在文[8]的基础上提出了

新的网络拥塞控制方案。目前,TCP/IP 拥塞控制是仅有的在包交换网络中成功实现的算法。文[11]提出使用 Smith 原理设计拥塞控制方案的思想,指出了用状态转移函数设计拥塞控制器使网络链路中保持先进先出队列的稳定,该算法在瓶颈节点处执行并根据缓冲队列占有量的反馈来计算信源节点的输入速率。该算法的优点是瓶颈节点保持先进先出队列且仅需测量队列长度而不需测量可获带宽;但是该方法只适用于瓶颈节点容量较大的网络,且其受控输入速率的响应时间较慢可能导致数据包丢失。由于文[11]仅从控制理论的角度阐述了其拥塞控制理论的思想并没有给出运用于实际网络的具体方法,又由于实际网络中的瓶颈节点容量可能很小,因此有必要对文[11]中的理论和方法加以改进。

在本文中,我们用传统的控制理论来分析包交换网络中的拥塞控制问题,即使用传递函数来描述系统和设计控制器,并通过具体的参数来研究网络在不同控制方案下的性能。在控制模型中我们用前向传输延迟和反馈传输延迟来描述网络队列的瞬态特性,因为传输延迟在计算机高速通信网络中占有非常关键的地位。我们选择 Smith 原则来设计拥塞控制器并有效地利用任何带宽延迟乘积来实现网络传输的稳定性,从而提高网络的传输效率。文中的主要贡献在于:从控制理论的角度改进了文[11]中的 Smith 拥塞控制理论,从网络应用的角度提出了新的基于 Smith 原则的拥塞控制方案,这些方案更适用于具有较小瓶颈节点容量的网络,而且分析了可以通过选择适当的控制参数提高被控制网络的性能。

2. 网络数据模型

以下研究一个网络模型^[9],分析存储转发包交换服务即能控交通流从源节点进入网络然后经过网络链路中间节点到达目的节点的激发机制。

^{*} 本课题得到国家自然科学基金(批准号:60174043)和国家留学基金回国科研资助的资助。谭连生 博士,教授,主要研究方向:计算机通讯网络。赵甫哲 硕士研究生,主要研究方向:计算机网络。刘 芹 硕士研究生,主要研究方向:计算机网络。

2.1 存储转发模型

如图1所示为一个存储转发包交换网络模型,该模型有如下特性:

(1)网络中有 N 个交换节点,它们在网络路径上存储和转发包。其中任一个节点由输入数据包存储的队列和输出包存储的队列两部分组成。它必须满足每个节点的处理容量大于传输到链路的容量,否则可能会引起拥塞发生。

(2)网络中有 L 条网络链路。它连接每个交换节点,每条链路由传输速率和传输延迟描述。

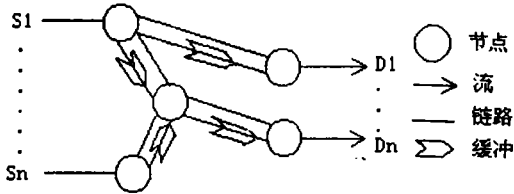


图1 存储转发包交换网络模型

网络由信源端和目的端通信连接而成,因而网络中由多组源端和目的端构成。对每组源端和目的端的连接,源节点通过链路发送数据包到达目的端。网络输入流由连续变量 $u(t)$ (包/秒)决定。

Per-flow 缓冲(如图2所示)在控制拥塞和流的服务质量上仍具有很重要的作用。它的优点是:源节点实现拥塞控制算法,它把拥塞问题和公平性问题分开,可以在一个节点上实现最大最小公平性^[12]。但它存在着的不足是:除了缓冲队列层反馈到网络链路外,其余链路队列层均被设置为零,这使得网络控制问题是单输入单输出的,输入是网络链路层,输出是瓶颈队列层,因此限制了该方法的适应性及扩展性。

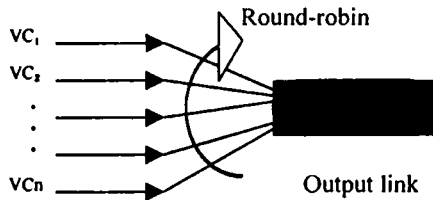


图2 Round-robin 机制的 Per-flow 缓冲

此外,如果许多流聚集在同一个队列,则控制器设计需要更多的计算^[11]。另一个不足之处是网络节点上算法执行时一个链路很难知道链路的瓶颈位于何处,因此很难保证网络链

路的最大最小公平性。基于这些原因,目前许多研究正试图实现 Per-VC 队列,其研究热点正致力于找到一个更简单的类似于 Per-flow 的方法^[13]。

2.2 瓶颈队列的动态模型

假设每个交换节点输出链路保持 Per-VC 队列,其动态模型可按如下方式建立^[14]。设 $x_{ij}(t)$ 是与网络连接缓冲占有量, $u_i(t)$ 是在第 i 个 VC 链路中传输的速率, $d_{ij}(\tau)$ 表示第 j 个队列的输出速率。当 $t=0$ 时, $x_{ij}(0)=0$ 即队列缓冲为空。其中 T_{ij} 为由源 i 节点到 j 队列的传输延迟,根据流守恒方程,第 i 个节点到第 j 条链路的缓冲占有量可描述^[14]为:

$$x_{ij}(t) = \int_0^t [u_i(\tau - T_{ij}) - d_{ij}(\tau)] d\tau$$

以上方程可以解释为链路中的速率为发送端延迟 T_{ij} 后的速率 $u_i(\tau - T_{ij})$ 与输出速率 $d_{ij}(\tau)$ 的差值,对该值取从 0 到 t 的积分即为 t 时刻的缓冲占有量。

3. 改进的 Smith 拥塞控制理论

基于状态转换函数的网络数据队列的动态控制的主要思想是:输入端将数据包从源端发送到目的端,目的端将控制包反馈到源端。在 ATM 网络中,控制包是资源管理单元(RM),它包含于数据包中,确认包然后将 RM 包一同反馈到网络链路中。发送端根据反馈确认包由链路计算输入速率,网络模型如图3所示。该模型是在文[15]中的网络模型的基础上作了一些改进,在原有模型的基础上增加了控制参数 a ,设计了一类新的控制方案。如图3中建立虚拟链路连接用 Per-VC 路径,沿着 VC 路径的链路是瓶颈。队列反馈到链路的流是瓶颈队列。因而网络的控制目标是尽量利用瓶颈队列而避免溢出。这里假设与瓶颈队列的动态特性对应的输入速率是单输入单输出动态的。

变量说明: $\frac{1}{s}$: 阶跃函数的 Laplace 变换; $x_{ij}(t)$: 连接 i 节点和 j 节点的瓶颈缓冲队列长度; $e^{-sT_{fw-ij}}$: 从源节点到链路 j 的瓶颈队列的前向延迟的转换函数; $e^{-sT_{fb-ij}}$: 从瓶颈队列到源端 i 的反馈延迟的转换函数; $G_c(s)$: Smith 控制器转换函数; $u_i(t)$: 源输入速率; $r_i(t)$: 瓶颈队列长度的门限值; r^0 : 最大缓冲队列容量。

其中: $r_i(t) = r^0 \cdot l(t - T_{fb})$, $l(t) = \begin{cases} 1, t \geq 0 \\ 0, t < 0 \end{cases}$ 为阶跃函数
 $d_{ij} = a_1 \cdot l(t - T_1)$, ($T_1 > RTT$, a_1 为带宽常数)

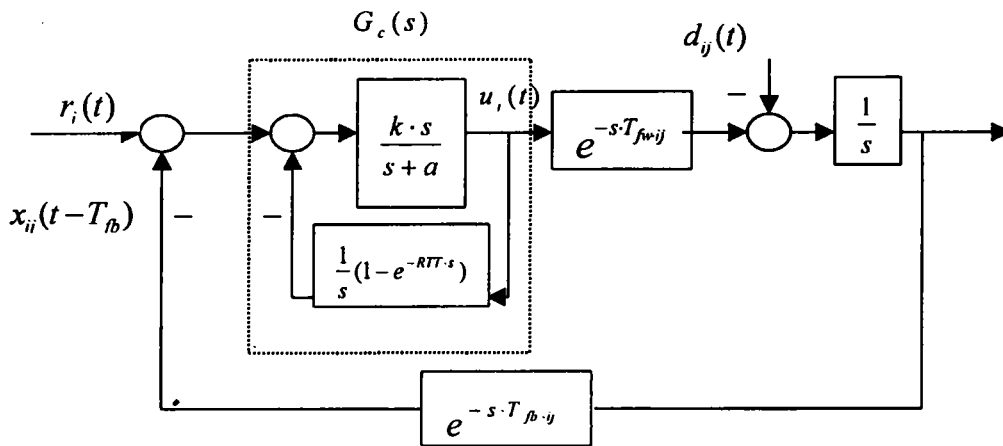


图3 Smith 拥塞控制

如图3的反馈控制方案有两个输入信号:参考信号 $r_i(t)$ 和干扰信号 d_{ij} 。将参考信号 $r_i(t)$ 和带延迟的瓶颈队列速率 $x_{ij}(t-T_{f_{w,ij}})$ 的差值传输到控制器 $G_c(s)$, 控制器计算传输速率 $u_i(t)$, 传输速率 $u_i(t)$ 在前向延迟 $e^{-sT_{f_{w,ij}}}$ 后到达目的端, 而瓶颈队列状况通过反馈延迟 $e^{-sT_{f_{w,ij}}}$ 后到达源端。记一个游程延迟 $RTT=T_{fb}+T_{fw}$, T_{fw} 为前向传输延迟, T_{fb} 为反馈传输延迟。由于回路中可能出现较大的传输延迟, 队列可能会出现振荡, 甚至不稳定状态。因此, 必须认真设计控制器以达到系统的稳定性。Smith 原则^[11]提出用一个较大的传输延迟时间作为有效的死时间补偿使系统稳定。这个方法的好处是在回路中不考虑时间延迟。但是考虑到控制器中有积分器

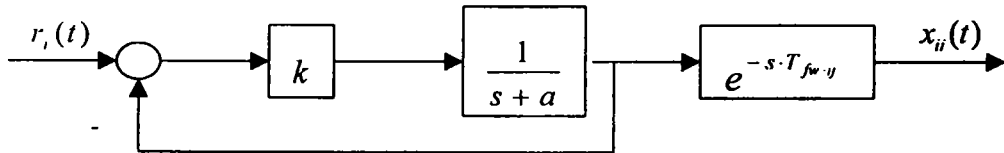


图4 理想的输入输出模型

4. 拥塞控制方案的数学分析及计算

以下对第三部分中基于 Smith 原则的网络控制方案进行了具体的算法实现, 并对算法的性能进行分析。在高速通信网中瞬态特性是非常重要的, 因为这些系统由于不断地连接或断开而很少达到稳定状态。设 $x_r(t)$ 为当干扰信号 $d(t)$ 为零时的缓冲队列占有量, $x_d(t)$ 为当输入信号 $r(t)$ 为零时的缓冲队列占有量。由转移函数的可叠加性, 我们分别用 $r(t)$ 和 $d(t)$ 来计算输出缓冲队列占有量 $x_r(t)$ 和 $x_d(t)$ 。

根据 Smith 原则的要求, 图3中的转换函数 $x_r(s)/r(s)$ 等于图4中的转换函数 $x_r(s)/r(s)$, 即:

$$\frac{G_c(s)/s \cdot e^{-T_{fw,ij}}}{1+(G_c(s)/s) \cdot e^{-RTT}} = \frac{k/(s+a)}{1+k/(s+a)} e^{-T_{fw}} \quad (1)$$

解方程(1)得:

$$G_c(s) = \frac{k \cdot s}{s+a+k \cdot (1-e^{-RTT})} \quad (2)$$

分两种情况考虑:

(I) 在图3中令 $d(t)=0$, 则有:

$$\frac{x_r(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)e^{-T_{fw}} \cdot 1/s}{1+(G_c(s)/s)e^{-T_{fw}} \cdot e^{-RTT}} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)经整理后得:

$$\frac{x_r(s)}{r(s)} = \frac{k \cdot e^{-T_{fw}}}{s+a+k} \quad (4)$$

对参考信号 $r(t)=r^0 \cdot l(t-T_{fb})$ 作拉普拉斯变换得到

$$r(s) = r^0 \cdot e^{-sT_{fb}} \cdot \frac{1}{s} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得

$$x_r(s) = r^0 \cdot \frac{1}{s} \cdot e^{-sT_{fb}} \cdot \frac{k}{s+a+k} \cdot e^{-sT_{fw}}$$

对上式进行反拉普拉斯变换后得:

$$x_r(t) = \frac{k}{k+a} \cdot r^0 \cdot l(t-RTT) - \frac{r^0}{k+a} \cdot k \cdot e^{-(k+a)(t-RTT)} \cdot l(t-RTT) \quad (6)$$

(II) 令图3中 $r(t)=0$, 则有

$$\frac{x_d(s)}{d(s)} = -\frac{1}{s} + \frac{k}{s(s+k+a)} \cdot e^{-sRTT} \quad (7)$$

对于干扰信号 $d(t)=a_1 \cdot l(t-T_1)$ 作拉普拉斯变换得:

$$d(s) = a_1 \cdot \frac{1}{s} \cdot e^{-sT_1} \quad (8)$$

时, 则干扰项会导致状态不稳定。文[16]提出的 Smith 原则: 从干扰响应中分离定点响应, 排除干扰项。Smith 原则^[11]还提出设计闭环系统的控制器, 该控制器包含延迟, 这样的控制器等于将延迟设计在控制循环之外。鉴于以上特性, 本文中我们设计了一类新的控制方案。设计的理想的输入输出动态特性如图4所示。我们设计控制器(下文中, 略去 $x_{ij}(t)$, $d_{ij}(t)$, $u_i(t)$, $G_c(s)$ 的下标) $G_c(s)$ 使得图3中得到的控制系统的输入输出动态特性等于图4的输入输出动态特性。图4中的理想输入输出模型较文[11]中的模型增加了参数 a , 得到一类新的控制方案。

将式(8)代入式(7)得:

$$x_d(s) = -a_1 \cdot \frac{1}{s^2} \cdot e^{-sT_1} + k \cdot a_1 \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{s(s+k+a)} \cdot e^{-s(RTT+T_1)} \quad (9)$$

将上式进行反拉普拉斯变换得:

$$x_d(t) = -a_1(t-T_1)l(t-T_1) + \frac{ka_1}{k+a}(t-RTT-T_1)l(t-RTT-T_1) - \frac{ka_1}{(k+a)^2}l(t-RTT-T_1)(1-e^{-(k+a)(t-RTT-T_1)}) \quad (10)$$

综合以上两种情况, 目的端 t 时刻的缓冲队列总的占有量是 $x(t)=x_r(t)+x_d(t)$, 即为

$$x(t) = \frac{k}{k+a} \cdot r^0 \cdot l(t-RTT) - \frac{r^0}{k+a} \cdot k \cdot e^{-(k+a)(t-RTT)} \cdot l(t-RTT-T_1) - a_1(t-T_1)l(t-T_1) + \frac{ka_1}{k+a}(t-RTT-T_1)l(t-RTT-T_1) - \frac{ka_1}{(k+a)^2}l(t-RTT-T_1)(1-e^{-(k+a)(t-RTT-T_1)}) \quad (11)$$

从图3及方程式(2)不难得出信源端的受控速率 $u(t)$ 为:

$$u(t) = k \cdot \{ [r_i(t) - x(t-T_{fb})] - \int_{-RTT}^t u(\tau) d\tau + (a/k) \cdot \int_{-RTT}^t u(\tau) d\tau \} \quad (12)$$

以上方程反映了发送端速率 t 时刻的动态特性, $r(t) - x(t-T_{fb})$ 为瓶颈缓冲队列的剩余空间。其中积分项 $\int_{-RTT}^t u(\tau) d\tau + (a/k) \cdot \int_{-RTT}^t u(\tau) d\tau$ 为信源端发送但还未经目的端确认的数据包个数。

方程式(4)和(7)的转移函数决定控制系统的稳定性。根据传统控制理论, 当 $\text{Re}(-(k+a)) < 0$, 即 $\text{Re}(k+a) > 0$ 时, 转移函数的极点位于复平面左半平面, 网络系统处于稳定状态, 此时缓冲队列占有量没有剧烈振荡, 网络丢包率达到最小。

由于网络的队列缓冲占有量 $x(t)$ 是关于时间参数 t 的函数, 设 $\tau=1/k$, 瞬态动态性考虑在 T_{fb} 后, 设 $T_{fb}=RTT+T_1+\tau$, 因此 k 的选取对 T_{fb} 至关重要。此外, 网络的缓冲占有量 $0 < x(t) < r^0$ 。

另设 r^1 为本文中的最大缓冲占有量, r^0 为文[11]中的最大缓冲占有量, 则由(11)式有:

$$x_1(t) = \frac{k}{k+a} \cdot r^1 \cdot l(t-RTT) - \frac{r^1}{k+a} \cdot k \cdot e^{-(k+a)(t-RTT)} \cdot l(t-RTT) - a_1(t-T_1)l(t-T_1) + \frac{ka_1}{k+a}(t-RTT-T_1)l(t-RTT-T_1) - \frac{ka_1}{(k+a)^2}l(t-RTT-T_1)(1 - e^{-(k+a)(t-RTT-T_1)})$$

又有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-(k+a)(t-RTT)} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-(k+a)(t-RTT-T_1)} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} l(t-RTT) = 1, \lim_{t \rightarrow \infty} l(t-RTT-T_1) = 1$$

代入上式得:

$$x_1(t) = \frac{k}{k+a} \cdot r^1 - a_1(t-T_1) + \frac{ka_1}{k+a}(t-RTT-T_1) - \frac{ka_1}{(k+a)^2} \geq 0$$

解上式得:

$$r^1 \geq \frac{k+a}{k} [a_1 t - a_1 T_1 - \frac{ka_1}{k+a} t + \frac{ka_1}{k+a} RTT + \frac{ka_1}{k+a} T_1 + \frac{ka_1}{(k+a)^2}]$$

上式中取 r^1 的最小值为

$$r^1 = \frac{k+a}{k} [a_1 t - a_1 T_1 - \frac{ka_1}{k+a} t + \frac{ka_1}{k+a} RTT + \frac{ka_1}{k+a} T_1 + \frac{ka_1}{(k+a)^2}] \quad (13)$$

又在式(11)中当 $a=0$ 时即为文[11]中的缓冲队列方程

$$x(t) = r^0 - a_1 RTT - \frac{a_1}{k} \geq 0$$

将上式化简得:

$$r^0 \geq a_1 RTT + \frac{a_1}{k}$$

上式中取 r^0 的值为

$$r^0 = a_1 RTT + \frac{a_1}{k} \quad (14)$$

联立方程(13)、(14)可知:当 $0 < a < k + \frac{1}{t-T_1}$ 时,有 $r^1 < r^0$ 。

注记1:本文相对文[11]增加了参数 a ,得到一类新的基于 Smith 原则的高速通信网络的拥塞控制方案,文[11]中采用 $a=0$ 时的情况为本文的特例,因此本文推广了文[11]中的

结果。

注记2:由以上分析和以下仿真结果可知,当 a 选择适当的参数时,相比较文[11]中的控制方案,本文改进的控制方案使得网络缓冲队列最大占有量减少;即网络中瓶颈节点容量可减小,因此改进的控制方案可适用于瓶颈节点较小的网络,从而扩大了适用范围。改进的控制方案如果运用于较小瓶颈节点容量的网络不但可减少数据包的丢失,防止缓冲队列的外溢;还有利于减少硬件的开销,合理地利用现有的资源。

5. 仿真及性能评价

如图3中的 Smith 拥塞控制器是根据反馈来动态地调节信源节点的传输速率。在初始时刻,网络链路及目的端队列缓冲中均无数据包,网络以最大速率发送数据包,目的端缓冲队列迅速上升达到一定值;经过一个前向延迟时间后,网络链路中逐渐有悬浮的数据包,但并未有反馈数据包到信源端,信源端仍以最大发送速率传输数据包;经过一个反向延迟后,网络链路中积聚较多的数据包,反馈的数据包(RM 数据包)传输到信源端,信源端经 Smith 拥塞控制方案调节后以受控速率向网络中动态地发送数据包,目的端逐渐有数据包积压,即队列缓冲占有量逐渐增加;一个游程延迟时间以后,Smith 拥塞控制器对参考信号和反馈信息进行调节使得信源端以受控速率进行传送,此时网络逐渐趋于稳定,受控速率减小,目的端缓冲队列占有量随之减小,直至网络以恒定速率传送,缓冲队列达到稳定状态。因此仿真中我们主要考虑网络传输的动态稳定性。其中输出缓冲队列的动态响应和稳定性是用来评价网络传输动态特性的主要性能指标。

根据改进的 Smith 拥塞控制原则,采用文[4]中的仿真模型(如图5所示)进行仿真分析。选择了一条链路、两个交换节点 Switch1, Switch2。链路的容量为 150 Mb/s。网络由四组 ABR 流即 A、B、C、D,一组 VBR 流组成。每组 ABR 流由 10 个虚拟链路组成。且根据文[17]设所有 ABR 的最小链路速率 MCR 为 0Mbps。

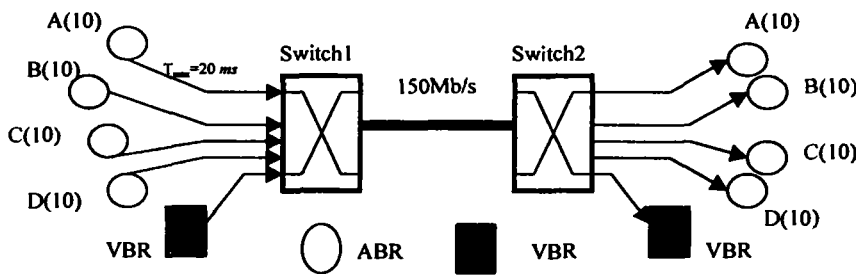


图5 单链路数据流图^[4]

由方程式(11)可知系统的稳定性条件为 $k+a > 0$,由于本文相对文[11]增加了参数 a ,文[11]为本文的特例,文[11]中只考虑了 $a=0$ 时的情况。以下我们选取一些参数值进行仿真。假定当 $k=0.2, a=0.01$ 时网络输入的数据流为 A 流, $k=1, a=0.02$ 时网络输入的数据流为 B 流, $k=0.2, a=0$ 时网络输入的数据流为 C 流, $k=1, a=0$ 时的数据流为 D 流。 $k=0.2, a=0.01, k=1, a=0.02$ 时为本文中采用的控制方案;当 $k=0.2, a=0, k=1, a=0$ 时为文[11]中所用的控制方案。设置如下参数:最大游程时间 $RTT=20ms$,网络链路上的最大瓶颈容量为 $r^0=5000$ cells,带宽控制参数 $a_1=0.9$ (指 ABR 流的

带宽利用率保持在 90%,VBR 流利用可获带宽的 10%),带宽函数中时间点 $T_1=24ms$ (指在 T_1 时刻带宽可获)。网络中每个 ABR 流的初始速率(ICR)均为 130Mbps。为了便于比较,我们在仿真时每次只考虑本文中或文[11]中的控制方案。图6显示了当 $r^0=5000$ cells 时的缓冲队列占有量及受控输入速率仿真结果,其中(a)当网络中 A、B 流被激活时交换节点1的缓冲队列随时间的动态响应;(b)当网络中 C、D 流被激活时交换节点1的缓冲队列随时间的动态响应;(c)当网络中 A、B 流被激活时交换节点1的受控输入速率随时间的动态响应;(d)当网络中 C、D 流被激活时交换节点1的受控输入速率随

时间的动态响应。

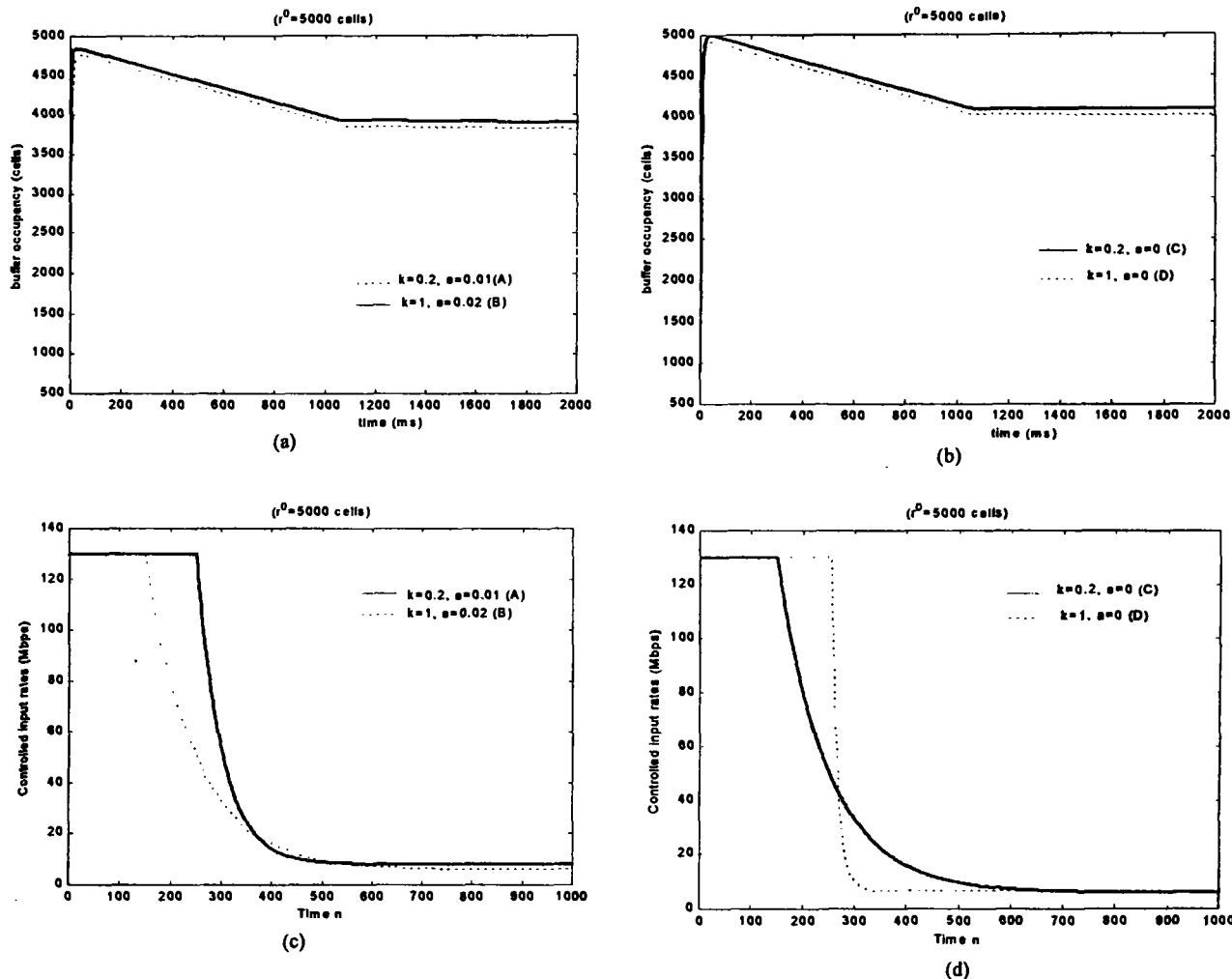


图6 当 $r^0=5000$ cells 时的缓冲队列占有量及受控输入速率仿真结果

由图6可看出,当 $r^0=5000$ cells 时,图6(a)中所采用的是本文中控制参数 $a \neq 0$ 的控制方案,(b)图是文[11]中控制参数 $a=0$ 的控制方案。比较(a)和(b)可知,(a)图的稳定缓冲队列占有量比(b)图的稳定缓冲队列占有量较小。观察(c)和(d)可知,(c)图中网络达到稳定的输入速率略高于(d)中的稳定的输入速率。因为网络缓冲队列占有量越小,则网络吞吐率增加,网络丢包率减小,从而提高了拥塞控制的能力。在这种情况下,本文的控制方案优于文[11]中的控制方案。

由第四部分的分析知道当 $0 < a < k+1/(t-T_1)$ 时,本文中的缓冲队列门限值 r^1 小于文[11]中的缓冲队列门限值 r^0 。本文选取了当门限值 $r^1=3000$ cells 对网络交换节点1的缓冲队列占有量及受控输入速率进行了仿真,结果如图7所示:

由图7可以看出,当我们减少缓冲队列门限值时,网络缓冲队列经过一段延迟后达到稳定状态且交换节点的受控输入速率经过一段时间后亦达到稳定的传输状态。

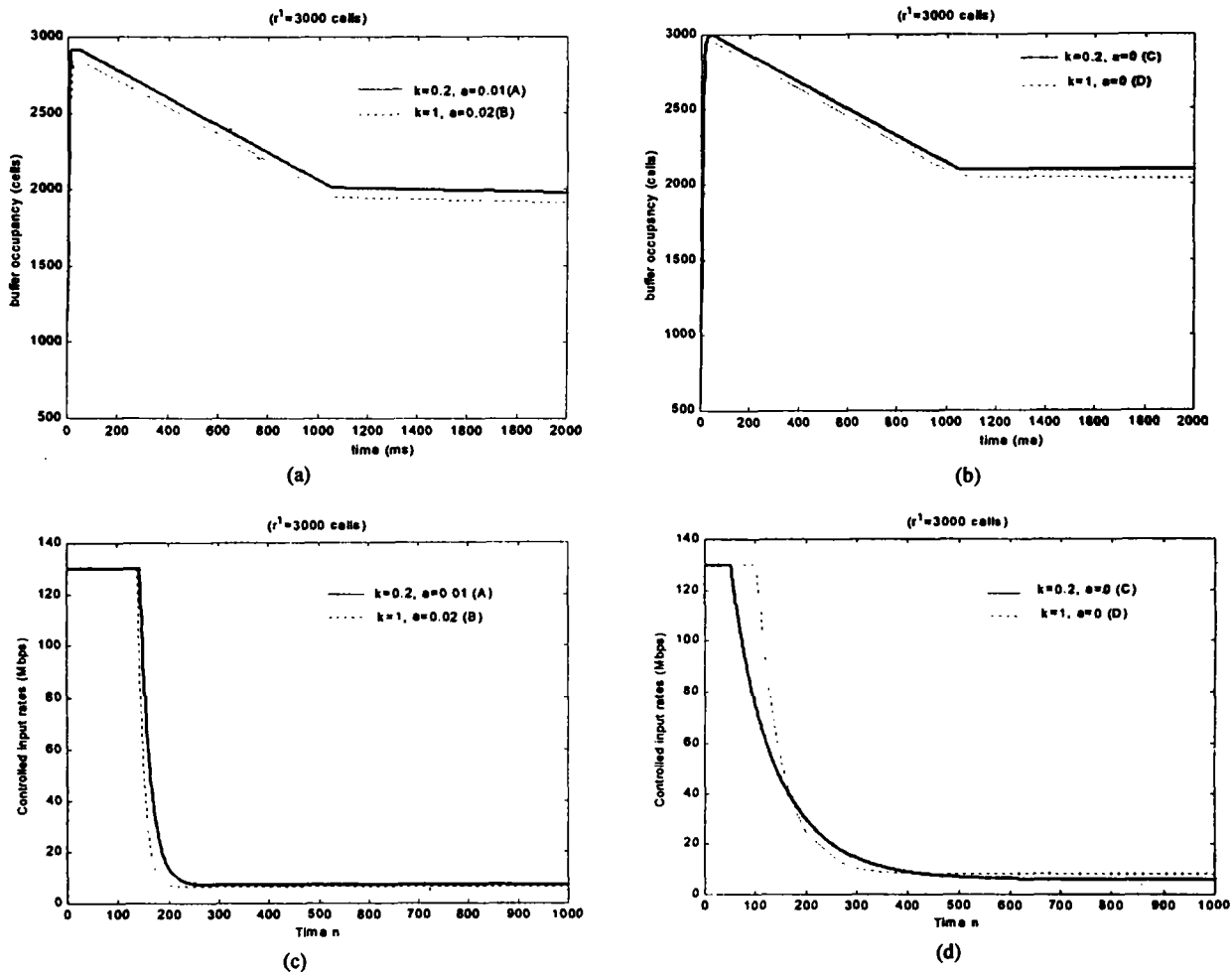
图6、图7的分析我们不难推论出当缓冲队列门限值减少时网络中交换节点的输入速率达到稳定状态的时间减少,从而加快网络的传输,有利于提高网络的 QoS。图8中显示了缓冲队列门限值不同的缓冲队列占有量及受控输入速率的仿真结果。表1对图6~8的仿真结果进行了列表显示,以便更加清晰地显示出本文中的控制方案和文[11]中的控制方案的优势之处。

从图8(a)可以看出,当门限值为 $r^1=3000$ cells 时的缓冲

队列占有量较门限值为 $r^0=5000$ cells 时缓冲队列占有量的值减少,经过一段时间延迟后,网络达到稳定状态。另从图8中(b)看出,当缓冲队列门限值减少时,网络交换节点受控端的输入速率达到稳定的时间减少。如表1所示,当采用本文中的方案时,网络输入速率达到稳定时间约为250ms;当采用文[11]中的方案时,网络输入速率达到稳定时间约480ms,因而缩短了速率达到稳定的时间,可以提高控制方案的效率,防止数据包丢失。

注记3:表1中的各项值均为达到稳定状态时的值。例如当缓冲队列门限值为3000cells,网络输入 A 数据流时,随着网络的动态响应,缓冲队列由初始值为0直至缓冲队列达到稳定值1850cells;

注记4:从表1可以明显看出:当 $r^1=3000$ cells 时本文中的控制方案使得缓冲队列占有量减少,而且 ABR 流达到稳定的响应时间减少。例如: $r^0=5000$ cells 网络输入 A 数据流时,缓冲队列达到稳定值3950cells,而当输入 C 数据流时,缓冲队列达到稳定值4050cells。另外当采用门限值为3000cells,输入 A 数据流时,网络输入速率达到稳定时间为250ms,而采用门限值为5000cells,同样输入 A 数据流时,网络输入速率达到稳定时间为480ms。因此降低缓冲队列门限值使得输入速率达到稳定时间减少,从而使网络尽快达到稳定,防止瞬态时由于速率的急剧变化导致数据包的丢失,提高控制的效率和网络的性能。



(a)当网络中 A, B 流被激活时交换节点1的缓冲队列随时间的动态响应;(b)当网络中 C, D 流被激活时交换节点1的缓冲队列随时间的动态响应;(c)当网络中 A, B 流被激活时交换节点1的受控输入速率随时间的动态响应;(d)当网络中 C, D 流被激活时交换节点1的受控输入速率随时间的动态响应。

图7 当 $r^1=3000$ cells 时的缓冲队列占有量及受控输入速率仿真结果

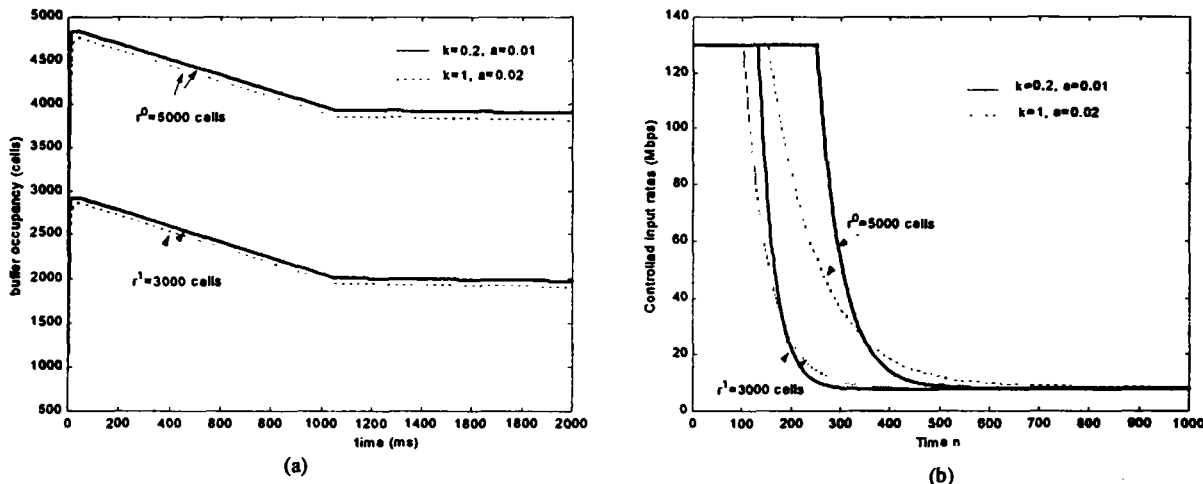


图8 当缓冲队列门限值不同时缓冲队列占有量及受控 ABR 流的输入速率仿真图

结论 本文围绕传统控制理论对高速通讯网络的动态特性建模,提出了一种改进的基于 Smith 原则的计算机高速通信网络的拥塞控制方案,并设计了 Smith 拥塞控制模型。文中对该网络模型通过数学分析刻画了网络瞬态特性的稳定性,

得出本文中的控制方案下的缓冲队列门限值小于文[11]中的缓冲队列门限值。本文通过选择适当的参数 α 时,比较文[11]中的控制方案,本文改进的控制方案使得网络缓冲队列最大占有量减少;即网络中瓶颈节点容量可减小,因此改进的控制

方案可适用于瓶颈节点容量较小的网络,从而扩大了适用范围。此外从第五部分仿真结果可以得出本文中的控制方案使得网络传输速率达到稳定的响应时间减少,ABR 流达到稳定

的振动次数减少,则网络中丢包率减少,从而提高了网络的性能。

表1 本文中的控制方案和文[11]中的控制方案的性能参数比较

流组 (ABR)	ICR Mbps	MCR Mbps	$r^0=5000\text{cells}$			$r^1=3000\text{cells}$		
			缓冲队列的稳 态值 cells	输入速率的稳 态值 Mbps	速率达到稳定 的时间 ms	缓冲队列的稳 态值 cells	输入速率的稳 态值 Mbps	速率达到稳定 的时间 ms
A($k=0.2, a=0.01$)	130	0	3950	9	480	1850	7	250
B($k=1, a=0.02$)	130	0	4010	10	600	2065	7.52	200
C($k=0.2, a=0$)	130	0	4050	8	350	2100	6	400
D($k=1, a=0$)	130	0	4053	7	500	2103	6.7	300

参考文献

- ATM Forum Traffic Management Specification Version 4.0. ATM Forum Committee TMWG[Online]. Available at: <http://www.atmforum.com>
- Benmohamed L, Meerkov S M. Feedback control of congestion in packet switching networks; The case of a single congested node. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(6): 693~708
- Izmailov R. Adaptive feedback control algorithms for large data transfer in high-speed networks. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(8): 1469~1471
- Ghani N, Mark J W. Enhanced distributed explicit rate allocation for ABR services in ATM networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(1): 71~86
- Zhang X, Shin K G, Saha D, Kandlur D D. Scalable flow control for multicast ABR services in ATM networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(1): 67~85
- Chong S, Lee S, Kang S. A simple, scalable and stable explicit rate allocation algorithm for max-min flow control with minimum rate guarantee. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(3): 322~335
- Kolarov A, Ramamurthy 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
- Jacobson V. Congestion avoidance and control. Proceedings of Sigcomm88 in ACM Computer Communication Review, 1998, 18(4): 314~329
- Peterson L, Davie B S. Computer Networks. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1996
- Kalampoukas L, Varma A. Explicit window adaptations: A method to enhance TCP performance. IEEE Proceedings of Infocom98, 1998, 1: 242~251
- Mascolo S. Congestion control in high-speed communication network using the Smith principle. Automatic, 1999, 35: 1921~1935
- Jaffe J. Bottleneck flow control. IEEE Transaction on Communications, 1981, 29(7): 954~962
- Benmohamed L, Wang Y T. A control-theoretic ABR explicit rate algorithm for ATM switches with per-VC queuing. Proceedings of the IEEE infocom'98, S. Francisco, CA, USA, 1998, 1: 183~191
- Mascolo S. Smith's principle for congestion control in high speed data networks. Proc. of IEEE Conf. On Dec. & Control'97, S. Diego, CA, 1997, 9: 4595~4600
- Mascolo S. Smith's principle for congestion control in high-speed data networks. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(2): 358~364
- Åstrom K J, Hang C C, Lim B C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 39(2), 343~345
- Jain R, Kalyanaraman S, Fahmy S, Goyal R. Source behavior for ATM ABR traffic management: an explanation. IEEE Communications Magazine, 1996, 12: 50~57
- Tan Liansheng, Yang S H, Yin Min, Zhao Fuzhe. Analysis of rate-based congestion control in ATM switching networks. In Fourth International ICSC Symposium Soft Computing and Intelligent Systems for Industry, Paisley, Scotland UK, 2001, 7: 26~29. CD-Rom, ISBN 3-906454-27-4
- Tan Liansheng, Pugh A C. A novel method to determine the finite and infinite frequency structure of a rational matrix. IMA Journal of Mathematical Control and Information. 2001, 18: 129~151
- Pugh A C, Tan Liansheng. A generalized chain-scattering representation and its algebraic system properties. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(5): 1002~1007
- Tan Liansheng, Pugh A C. A note on the solution of regular PMDs. International Journal of Control, 1999, 72(14): 1235~1248
- Tan Liansheng. Structural and behavioral analyses to linear multivariable control systems: [PhD Thesis]. Loughborough University, UK, 1999