

文章编号:1000-582X(2003)03-0024-05

# 宽带网络闭环式拥塞控制方法综述\*

罗燕<sup>1,2</sup>,汪纪锋<sup>1</sup>,曹长修<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电学院,重庆 400065; 2. 重庆大学自动化学院,重庆 400044)

**摘要:**拥塞控制在宽带网络中是一个重要的话题。其主要目的是提高网络资源的利用率和提供给信源公平的资源分配份额。笔者讨论了宽带网络中基于反馈机制的各种拥塞控制策略和实现方法,指出了网络流量的高突发性和强相关性,以及不可预测的网络时延,应是控制算法设计中的难点,而提高网络利用率这一控制目的,又往往与性能分析中的公平性是冲突的,这就使得要得到一个最优的控制方法是困难的。最后,指出了对网络业务量特性的精确描述,以及在此基础之上设计控制算法,都要依赖于必要的数学工具。

**关键词:**拥塞控制; 反馈控制; 异步传输模式

**中图分类号:** TB114.2

**文献标识码:** A

资源共享充分利用了网络的资源,但同时也引发了网络的拥塞问题。当网络发生拥塞时,各项性能急剧下降,严重时会使网络崩溃。在当今网络的速度和规模不断扩大的情况下,对拥塞的控制已变得越来越重要,并且面临着新的挑战。

在宽带网络中,业务类型多种多样,包括多媒体、实时业务、数字化音频、编码视频和数据,它们具有不同的 Q·S。为成功地完成这些业务量的交换和传输,国际电联已选择了 ATM 作为宽带网络的传输模式。

ATM 即异步传输模式是一种交换、复用技术,其业务量管理规范 4.0 (TM4.0)<sup>[1]</sup> 将 ATM 网中的服务分为 5 等: CBR、实时 VBR、非实时 VBR、ABR 和 UBR。其中, CBR 和实时 VBR 对实时性要求很高,但对丢失不敏感。 ABR 对时延要求不高,但对丢失敏感。 CBR、VBR 享有高的优先权, ABR 和 UBR 利用 CBR 和 VBR 剩下的网络资源来完成服务。相应于这些业务类别, ATM 网采用的基于速率的拥塞控制方案分为两大类: 开环控制和闭环控制。前者适于 CBR 和 VBR 业务,而后者则适于 ABR 业务。这种反馈式的拥塞控制利用从网络中反馈回来的信息来调整信源的速率,它使得 ABR 服务可以充分利用网络资源,又能及时地反应网络负载的动态变化情况。所以它一经提出,便成为流量控制研究中的热点。

## 1 反馈式拥塞控制的基本原理及其实现

### 1.1 基本原理

TM4.0(1996)<sup>[1]</sup> 定义了一套端到端的基于速率的拥塞控制框架。其中,闭环式控制的基本机制为:信源定期向网络发出 RM 信元,它途经的交换机根据监测到的拥塞状态填写该信元中的相应域。该信元到达信宿后经反向连接回到信源,而此时信源就根据 RM 信元提出的网络拥塞信息来调整自己的发送速率,由此构成一个反馈式的控制回路。在这种策略中, RM 信元的各域的设置,拥塞状态的表示,交换机进行的操作等是随设计者的不同而变化的,由此也得到各种不同的控制算法。后来的 TM4.1(1999) 版本在这些研究的基础上作了不少的改进。

在这些控制算法中,基本的控制参量的选取如下:

- ①平均队列长度(或队列变化率);
- ②平均时延;
- ③信元丢失率;
- ④超时重传的信元数目;
- ⑤时延的标准差等。这些指标用于监视网络的拥塞。

对算法的性能分析有如下的标准:

- 1) 稳定状态性能: 首先控制算法应是收敛的(稳

\* 收稿日期: 2002-11-01

基金项目: 重庆市科技攻关项目(99-745); 重庆邮电学院青年教师研究基金

作者简介: 罗燕(1966-), 女, 重庆巫山人, 重庆邮电学院讲师, 重庆大学博士研究生。主要研究方向为网络业务量建模及流量控制。

定性),其次受控参数的稳定值应限制在一定的范围内。

2)鲁棒性(参数敏感性):指的是控制算法的稳定性不敏感于网络参数(如活动VCs数,可使用带宽,往返时延等)的变化以及网络中的噪声影响。

3)公平性:指资源分配(包括带宽、缓冲池容量等),对每个活动的或正在申请的ABR连接都是按一定的公平性原则进行的。

4)简单性:控制算法应是简单的,易于实现的。

5)瞬态响应性能:即要求算法瞬时响应时间短(反应快)。

## 2 控制方案

从技术发展看,一般地,反馈式的控制方案分为两大类:二进制机制和显式速率(ER)机制<sup>[2]</sup>。下面通过对一些实例的评述来说明这两类机制的运行。

### 2.1 EFCI(显式前向拥塞指示)

这是第1代的ABR服务采用的一种使用二进制反馈机制的典型代表。最初的设计是每个被传送的数据信元在其ATM信元头中的PTI域设置一个EFCI位(后来改进为信源定期发出RM信元)。信元在到达目的站的路径上如无拥塞发生,则EFCI位清空(置0)。如果遭遇了一个拥塞的交换节点,例如队列长度超过了某个门限值等,则此交换机在信元头设置EFCI位(置1),且保留此值。而在信宿节点,检测系统监视着每条虚电路连接上的拥塞状态。当从收到的数据信元中检验出一个拥塞位时,便发送一个RM信元给信源。收到RM信元的信源就根据RM信元中的消息来降低当前的ABR的发送速率。如果在一个特定的时段内(一般是事先设计好的)没有收到RM信元,则信源将提升其发送速率直至PCR。这种提升或降低由比例因子RIF或RDF来决定,一般采用线性增长指数下降的方式,即增加的量为 $RIF \times PCR$ ,而减少的量为 $RDF \times CCR$ 。

此方案的最主要优点在于其简单性:用一个单独的比特位来显示拥塞,并用RM信元中一个单独的比特位来通知信源。它存在着一些问题,如ABR连接所获得的ACR的大小与交换机中ABR的队列长度都是急剧变化的,这种振荡性导致了对缓冲池的需求增大,由此减少了系统的利用率。又如发生拥塞的交换机将所有活动的ABR连接都打上标记,这导致了不公平性。此外,还存在着所谓的“beat down”问题,即经由较多交换机的ABR连接将获得较少的公平带宽份额。

此方案有一些改进,如BECN<sup>[3]</sup>(Backward Explicit Congestion Notification):交换机通过监视队列长度来

估计业务负载,当队长超过一个门限值时,交换机直接发送RM给每个连接的信源。这样做的好处是系统的反应时间缩短了,但同时也在交换机中增加了硬件的花费,并且公平性也没有得到改进。

另外一个方案是EFCN与LLB(Link-by-Link Back-Pressure)的混合方案<sup>[3]</sup>:此方案设计了两个门限值TH1与TH2。在中等负载下,当业务量超过了TH1,交换机标记上信元并向前传送至目的地,目的站使用EFCN方案。一旦业务量过载,超过了TH2,则交换机就使用LLB机制,发送一个标记信元直接给上游交换机,此交换机再一次把它发送给上游交换机。如此进行下去,直至源节点。这种方案避免了前两种方案的不公平性,但却增加了网络开销。

### 2.2 ER反馈标记方案

这种相对复杂的控制方法构成了第2代的ABR服务。已在许多交换机上广泛运用。

首先,信源每发送 $N_{rm} - 1$ 个数据信元就发送一个前向RM信元FRM(FRM这里 $N_{rm}$ 是一个预置参数,通常等于32)。当目的站收到FRM信元时,就将其作为一个反向RM信元(BRM),以相反的方向传送到信源。FRM给路途上的交换机提供必要的信息,交换机则随时注意每条连接上的当前值以及新的连接请求,根据Max-Min公平份额原则对每条连接计算一个显式速率ER,填入RM信元中的ER位(域)。如果出现拥塞兆头,则将RM中的CI位置1。

当目的节点收到FRM信元时,将带有网络最终信息的FRM反馈给源站,此时的FRM变为BRM。源端基于BRM信元中的几个主要域中的反馈信息,按下述规则调节其ACR:

若 $CI = 1$

则将ACR减小一个 $RDF \times ACR$ ,但不小于MCR。

否则

若 $NI = 0$ ,则将ACR增加一个 $RIF \times PCR$ ,但不大于PCR。

若 $ACR > ER$ ,则将ACR置为 $\max[ER, MCR]$

在上述基本的方案中,由于不同的ACR的调节方法及ER的不同算法和不同的交换机操作,实际上采用的算法实例有EPRCA(增加的均衡速率控制算法),ERICA(显式速率指示拥塞避免),CAPC(使用均衡速率的拥塞避免)。

#### 1) EPRCA

EPRCA的版本已有许多,这里只择一而论。

工作流程如下:一个VC的信源,收到了来自目的站的BRM信元后,可以在下一个FRM信元中表明它

所期望的发送速率(不会超过 ACR), FRM 经由 VC 上的所有链接, 到达目的站。途中某个拥塞的交换机将用它估计的信元速率(通过某些计算得到, 与 ACR 比较后取较小值)作为此 VC 连接的一个新的合适值, 即显示速率 ER, 填入 RM 信元中。并选择性(智能地)标记某条 VC 上的 RM 信元中的 CI 位(这样, 此 RM 将回到某个选择的信源), 比如只要某条 VC 上的  $CCR > Fairshare$ , 则交换机就对此 VC 上信元置位。这里 Fairshare 为资源分配的公平份额, 一般由 Max-min 公平性原则可以得到。还有另外一些选择法, 如: 交换机维持 MACR(平均容许信元速率)值, 它定义为:

$$MACR(n) = (1 - \alpha) \cdot MACR(n-1) + \alpha \cdot CCR(n)$$

此拥塞的交换机就选择性地降低那些 ACR 比 MACR 大的所有连接的速率。

当 RM 信元达到目的站后, 目的站将反向传送 RM。RM 信元中的 ER 值会被中间的交换机更新为新的值。收到 RM 信元的信源将根据此 RM 的域值来调节其发送速率。调节方法仍是前面已论述过的“线性增长, 指数下降”, 以期达到慢启动和快速降低的目的。

除上述基本的 EPRCA 算法外, 还有许多的改进版, 如 EPRCA + 以及 EPRCA + + 等, 而 EPRCA + + 被公认为是 ERICA。

实验表明, 对小型网络, 特别是业务量平稳的网络, EPRCA 算法运行得很好。但在 WAN 上运行却不理想。

## 2) ERICA 方法

前面的 EPRCA 算法是一种对拥塞状况的感应式算法, 而下面的方法是拥塞避免式。它也采用 ER 标记方法。在规定了避免拥塞所需的一大类安全措施后, 事先决定出一个目标利用率  $\eta$  (如取  $\eta = 90\%$ ), 并由此得出目标速率 TCR [Target Cell Rate]。每个交换机隔一个时间段计算其负载因子:

$$OF = \frac{IR}{TCR} = \frac{\text{输入速率(平均)}}{\text{目标速率}}$$

当  $OF \geq 1$  时就出现了拥塞的威胁, 许多 VC 要降低速率。

当  $OF < 1$  时, 没有拥塞, 因而没有必要减小速率。

对一个活动的 VC 来讲, 其 ER 值由下步骤得到:

$$\text{首先, 它可获得 } ER1 = \frac{CCR}{OF};$$

其次, 从公平性讲, 它应该获得一个公平份额

$$Fairshare = \frac{\text{目标速率}}{\text{连接数目}}, \text{ 交换机就计算出 } ER2 = \max$$

{Fairshare, ER1}。

最后, 获得  $ER3 = \min \{ RM \text{ 信元中的 } ER \text{ 值, } ER2 \}$ 。

此算法的公平性履行得很好, 但资源的利用率被  $\eta$  限制了。

3) CAPC 也是一种利用负载因子 OF 的拥塞避免式的控制算法, 只是在更新 Fairshare 和 ER 值的策略上有所不同。

总的说来, 上面的这些基本的算法都具有形式直观且计算简单的特点, 不少算法已在实际的网络中运行, 直到现在, 人们都还在研究改进它们。它们共同的缺陷是算法的性能分析不理想, 特别是稳定性和公平性方面。有如下几方面原因:

①没有充分考虑 VBR 业务流对 ABR 造成的直接影响。由于 ABR 是利用 CBR、VBR 占用后剩余的資源, 而 VBR 流是具有突发度高、相关性强的随机业务流, 则 ABR 的可用带宽实际上也是一个动态变化的量。所以, VBR 业务模型的精确定义对于 ABR 的闭环控制具有重大的指导意义。而这方面的工作亦不少<sup>[4]</sup>。

对 VBR 业务流的突发度 (burstiness) 还没有完整的定义<sup>[5-6]</sup>, 它与编码算法、视像质量及场景类型都有关系。它有一些粗糙的定义, 如  $\beta = \frac{p}{m} = \frac{\text{峰值速率}}{\text{平均速率}}$ , 或  $C(n)$ ——流量速率  $\lambda(n)$  的方差值, 以及自相关函数  $R(n)$ 。其中, 对自相关函数  $R(n)$  研究得比较多。

据最新研究表明, VBR 业务流具有长时相关性, 其典型的 3 类模型<sup>[7]</sup>的特性参数  $H$  (或  $d = H - \frac{1}{2}$  等) 表征了长时相关性的程度。如果能将这些特性参数与 ABR 的闭环控制参数 (如前所述的基本控制方式中) 联系起来, 这将提高拥塞控制的有效性。且由于有数学模型作基础, 控制算法的性能分析也能作得比较完美。目前有关于这方面的报道<sup>[8]</sup>, 但做得不够。

②网络延迟  $\tau$  是算法具有振荡性的一个主要原因。在大型网络中, 网络延迟不能被忽略, 不同的连结具有不同的值, 且在不同时刻也是变化的, 很难统一测定。从时延  $\tau$  的角度看, 这时的闭环控制系统就是一个带有时滞的反馈系统。文献<sup>[9]</sup>作了这方面研究工作的一个尝试。它用一个差分—微分方程来完成控制参数的设置和发送速率的调整。

$$\begin{cases} \frac{d\lambda(t)}{dt} = -\gamma A[x(t - \tau_2) - B] - \gamma D\lambda(t) \\ \frac{dx(t)}{dt} = \lambda(t - \tau_1) - \mu \end{cases}$$

式中  $\lambda_i$  是调整的信源速率,  $x(t)$  是交换机中某队列长度,  $A, D, B$  为可设置的参数,  $\tau_1, \tau_2$  分别是 RM 信元的前向、后向时延,  $\gamma$  是 RM 信元的发出速率。

由数学理论可以得出, 上述的方程存在一致渐近稳定解, 而且能求出不同情况下的稳态解, 且在此稳态解所含的状态中, 控制系统无振荡。进一步地, 文献<sup>[10]</sup>同时还考虑了 VBR 业务流的随机模型对控制的影响, 其数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{d\lambda(t)}{dt} = -\gamma A[x(t - \tau_2) - B] - \gamma D\lambda(t) \\ \frac{dx(t)}{dt} = \lambda(t - \tau_1) - \mu + \sigma \frac{dw(t)}{dt} \end{cases}$$

式中,  $w(t)$  是维纳过程,  $\sigma^2$  是方差。

③测量时段的选取也是一个难题。较短的时段可以较快地反映出交换机的当前状态, 但它将消耗掉过多的交换机资源(在时段末交换机须执行计算功能), 而且它将错误地估计活动 VC 数目, 从而得不到公平性。而较长的时段虽然减少了计算费用, 且较为准确地估计出 VCs, 但它不能对业务的变化作出快速反应, 因而在拥塞阶段将导致严重的性能下降。

④资源分配的公平性没有得到很好的解决。公平性是一个全局性的问题。然而在网络环境中, 关于公平性的信息是以分散的形式在各交换机处被维持, 对单个的交换机而言, 它得不到关于公平资源分配的全部信息。若要达到完美的公平性, 就需要在各交换机间设置专门的通信, 这就增加了网络的开销, 从而影响了网络的利用率。各种仿真实验也表明, 提高网络的利用率与增强公平性之间是冲突的, 而在不断变化的网络条件下达到一个较满意的折衷也必须是动态维持的<sup>[11]</sup>。

⑤从前边的叙述可以看出, 对于一个大型网络来讲, 拥塞控制是一件复杂的事情。就网络运行环境而言, 它涉及到网中所有主机、路由器(节点)以及路由器中信元存储转发的过程等。就软性环境而言, 它又涉及到各种业务量(如 VBR)的特性描述及其管理的模式, 缓冲池容量的分配, 以及在实际网络中存在着不能忽略的网络时延。此外, 就控制算法的性能分析而言, 资源分配的公平性也给控制带来很大的难题。所有这些都表明, 要想获得一个最优的控制方案是困难的, 它依赖于多方面的研究工作以及这些工作之间的协作<sup>[12-14]</sup>。

### 2.3 Phantom 法<sup>[15]</sup>

它是一种与众不同的拥塞避免的方法是, 其的基本思路是将剩余带宽  $\Delta = \text{链路容量} - \sum ABR$  的速率

看作一个虚幻的 VC(Phantom), 在这些 VCs 间可以使用某种公平性原则, 比如简单地将当前速率大于  $\Delta$  的 ABR 连接的速率减小, 而将低于  $\Delta$  的那些 VC 提升速率。它是一种“用空闲的资源来控制资源分配”的方法。这种速率的分配法达到的稳定状态为  $\Delta = \max\{\text{各连接 VCshare}\} = \text{每个 VCshare}$  (VC 公平份额), 这是一种完全公平的理想状态。

此种算法的鲁棒性很好, 且简单适用。

### 3 结束语

ATM 网中的 ABR 系统的反馈结构强烈地显示了反馈控制理论在分析系统行为和设计有效且鲁棒的网络控制算法方面的潜在应用。以此为目标的通信、控制、计算机方面的研究者已经做了相当可观的工作。例如, 线性控制理论已被用来分析 ATM 网络的业务管理问题。而多方面的工作表明, 现在绝大多数的研究都基于仿真这一实验工作, 缺乏恰当的理论分析方法。而对业务量建立精确的数学模型, 因此设计有效的控制算法, 并进而分析算法的性能是努力的方向。目前, 在网络资源的分配上使用优化技术和游戏理论<sup>[11]</sup>, 以及利用对策论中 Nash 平衡点的概念<sup>[16]</sup>, 通过对价格的控制来达到控制用户发送速率的目的等代表了各个方向的研究工作。

最后值得一提的是, 随着光电技术的发展, 交换机的电子式交换变成光交换, 网络转化为全光网, 则网络流量会有新的模式, 相应的管理和控制措施也会随之改变, 所以这是一个方兴未艾的事业。

### 参考文献

- [1] The ATM Forum. Traffic management specification version 4.0 [S]. April 1996.
- [2] WILLIAM S. 高速网络[M]. 齐望东, 薛卫娟译. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [3] KAMOLPHIWONG S, KARBOWIAK A E, MEHRPOUR H. Flow control in ATM networks: a survey. *Computer Communications*, 1998, 21: 951-968.
- [4] 孙海荣, 李乐民. ATM 网络中的 ABR 业务在不同 ON-OFF 业务背景下的性能分析[J]. *电子学报*, 1999, 27(1): 49-53.
- [5] MITSURU NOMURA, TETSUROU FUJII, NAOHISA OHTA. Basic characteristics of variable rate video coding in ATM environment[J]. *IEEE Journal on Selected in Communications*, 1989, 7(5): 752-760.
- [6] STAMOULIS G D, ANAGNOSTOU M E, GEORGANTAS A D. Traffic source models for ATM networks: a survey[J]. *Computer*

- Communications, 1993, 17(6): 428-438.
- [7] 张强, 许进. 自相似过程的几种模型[J]. 通信学报, 2001, 22(2): 106-112.
- [8] 王宇, 赵千川, 郑大钟. 基于自相似业务的网络 TCP 拥塞控制算法[J]. 通信学报, 2001, 22(5): 31-38.
- [9] 王晟, 李乐民. 一种新的连续值反馈闭环拥塞控制方案的设计及性能分析[J]. 电子学报, 1999, 27(3): 56-59.
- [10] 王晟, 李乐民. 一种线性闭环拥塞控制方案的渐近性能分析[J]. 电子科技大学学报, 2000, 29(4): 450-456.
- [11] SCHWIEBERT L, WANG L Y. Robust control and rate coordination for efficiency and fairness in ABR traffic with explicit rate marking[J]. Computer Communications, 2001, 24: 1329-1340.
- [12] MOHAMED ABDELAZIZ, IOANNIS STAVRAKAKIS. Adaptive rate control in high-speed networks: performance issues [J]. Computer Networks, 2001, (37): 363-382.
- [13] LIU CHUNLEI, JAIN RAJ. Improving explicit congestion notification with the mark-foont starategy [J]. Computer networks, 2000, 35: 185-201
- [14] BEN AHMED C, BOUDRIGA N, BAIDAT M S. On a congestion management scheme for high speed networks using aggregated large deviations principle [J]. Computer Communications, 2001, (24): 860-867.
- [15] YEHUDA AFEK, YISHAY MANSOUR, ZVI OSTFELD. Phantom: a simple and effective flow control scheme [J]. Computer Netwos, 2000, 32: 277-305
- [16] 井元伟, 杨开阳, 金福德, 等. 具有多优先级多服务网络的激励价格控制 [J]. 控制与决策, 2001, 16(4): 425-429.

## A. Surveg on Closed-loop Feedback Congestion Control Schemes in Broadband Network

*LUO Yan<sup>1,2</sup>, WANG Ji-feng<sup>1</sup>, CAO Chang-xiu<sup>2</sup>*

(1. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Congestion control is an import issue in the broadband network, which aims at improving network utilization and fairness. Rate-based closed-loop feedback congestion control schemes and their various implementations in broadband networks are discussed. The high burstiness and strong correlations inherent in the network traffic are pointed out to be the key to the design of algorithm on congestion control, so is the delay time of the network. In addition, the goal for maximizing network utility often conflicts with the goal of fairness. All these show it is difficult to get a optimal scheme. Therefore, we denote that both the accurate description of the characteristics of the network traffic and the scubsequent design of the congestion control algorithm rely on necessary mathematical tools.

**Key words:** congestion control, feedback control, ATM

(责任编辑 吕蓉英)