

基于星上处理的卫星 ATM 中 ABR 业务拥塞控制算法研究

王勇前,马正新,曹志刚

(清华大学电子工程系,北京 100084)

摘 要: 卫星 ATM 是近年来通信领域的研究热点,拥塞控制是其中很关键的一个问题.本文主要研究基于星上处理的卫星 ATM 网的 ABR 流量控制,它通过对流量的长时预测来达到控制目的.由于卫星信道的大延时,无法实现精确的长时预测,因而将预测结果直接用于 ABR 的拥塞控制效果不甚理想.将长时预测同动态利用因子控制的方法结合之后,在链路效率、信元丢失率、不同连接数目和暂态响应等方面都取得很好的结果.

关键词: 卫星 ATM; 星上处理; 流量控制; 流量预测

中图分类号: TN927+.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 10-0001-05

The Research on the ABR Congestion Control Algorithm in Satellite ATM Based on Onboard Processing

WANG Yong-qian, MA Zheng-xin, CAO Zhi-gang

(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Satellite ATM (Asynchronous transfer mode) is a hot research area of satellite communication in recent years and congestion control is one of the key issues. This paper focuses on the ABR (Available bit rate) congestion control algorithm in the satellite ATM network based on onboard processing, which is implemented by using the traffic prediction. Owing to the long propagation delay of satellite channel, the accuracy of prediction decreases and it degrades the performance of ABR congestion control. In order to overcome the impact of inaccuracy, a new method 'Long-time prediction plus dynamic control bandwidth utilization factor' is suggested. Simulation results show that this method has advantages on the cell loss probability, link usage, fairness, adaptation to different number of TCP (Transport Control Protocol) sources and transient response.

Key words: satellite ATM; onboard processing; congestion control; traffic prediction

1 引言

由于用户对高清晰度电视、会议电视、高速数据传输、可视电话、图像点播和远程教育等各种业务的需求不断增加, ATM 作为能够在同一网络中满足各种需求的传输手段而得到广泛的研究. 卫星以其特有的覆盖面积广、通信费用与距离无关、不受地面自然灾害的影响、卫星地面站安装简单、快捷等特点成为国家信息基础设施中一个重要的传输手段. 在卫星中采用 ATM 作为主要传输手段是当前通信领域一个研究热点.

由于早期的卫星 ATM 的研究主要集中在宽带岛互连^[1], 卫星信道作为一个高速中继链路, 拥塞控制还不是主要矛盾. 随着卫星 ATM 网络面向用户需求的出现, 拥塞控制问题逐渐引起人们的重视. 目前研究很重要的一个方向是将地面网中比较成熟的拥塞控制算法应用到卫星环境中, 检验大延时对其性能的影响, 并提出各种相应的改进. 未来卫星将具

有星上处理功能, 而不再是透明弯管式转发器, 基于这两种有效载荷的卫星 ATM 系统均引起人们的关注^[2,3].

本文研究的重点是基于星上处理的卫星 ATM 网络的 ABR 流量控制, 通过对 VBR 流量的长时预测来达到控制目的, 文中采用了两种预测方法: 自适应最小均方误差线性预测和时延神经网络预测. 由于卫星信道的大延时, 长时预测结果直接用于 ABR 的拥塞控制效果不甚理想, 在同动态利用因子控制的方法结合之后可以取得很好的结果.

第二部分主要介绍视频 VBR 的长时预测, 第三部分对视频 VBR 背景下基于长时预测的 ABR 拥塞控制方法进行阐述, 第四部分给出仿真结果, 最后给出结论.

2 视频 VBR 业务的长时预测

视频 VBR 业务是 ATM 网络中最常见的一种业务. 近年来对视频 VBR 的大量统计表明其时间序列本质上表现出自相

收稿日期: 1999-06-05; 修回日期: 1999-11-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69772022)

似 (Self-Similar) 特性, 即在不同的时间尺度上表现出结构的相似性. 自相似业务可用分形布朗运动和分形高斯噪声以及分形 ARIMA 过程等模型来近似, 这些模型在不同程度上可以仿真自相似业务^[4,5]. 但是这些模型并不能完全精确反映真实流量的统计特性, 因此在本文中采用大量的真实的视频 MPEG-1 序列来研究对网络性能的影响.

若能够实现视频 VBR 业务比较准确的预测, 并且预测误差的相关特性不再是长相关或者误差近似为白噪声, 那么将大大降低自相似业务长相关所带来的影响. 通常的预测方法可分为线性和非线性方法, 非线性预测可以采用神经网络以及利用混沌理论、遗传算法和神经网络相结合的各种方法. 下面, 对自适应最小均方误差线性预测和时延神经网络预测进行研究.

2.1 自适应最小均方误差线性预测

通常一个 K 步线性预测器, 是通过序列 $x(n)$ 的当前和过去的情况进行线性加权, 来获得对将来第 K 步的序列估计. 具体可由式 (1) 来表示:

$$\hat{x}(n+k) = \sum_{l=0}^{p-1} w(l)x(n-l) \quad (1)$$

其中: $W = [w(0), w(1), \dots, w(p-1)]^T$ 为加权系数; $X(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-p+1)]^T$ 为输入序列; $\hat{x}(n+k)$ 为第 K 步估计值.

进行预测时首先根据估计设置系数的初值 $w(0)$, 然后按照式 (2) 对系数 w 更新, 并把更新后的系数用于下一个预测.

$$W(n+1) = W(n) + \frac{e(n-k)X(n-k)}{X(n-k)^T X(n-k)} \quad (2)$$

其中: $X(n-k)^T X(n-k) = X(n-k)^T X(n-k)$; 预测误差 $e(n) = x(n+k) - \hat{x}(n+k) = x(n+k) - W^T X(n)$; α 为步长调整系数, 通常 $0 < \alpha < 2$, α 越大, 预测收敛越快, 对信号变化的响应越迅速, 但是收敛后的波动也就越大; 反之, α 越小, 收敛越慢, 收敛后的波动也就越小.

2.2 时延神经网络预测

时延神经网络 (TDNN, Time Delay Neural Network) 是一种序列处理神经网络 (SPN, Sequence Processing Network), 它通过对输入的时域序列的加权连接运算处理以获得分类、识别、变换以及预测功能. 神经网络的最大特点是能够对非平稳的序列有自适应的能力. 一旦训练完毕, 神经网络使用简单有效, 计算并不复杂.

图 1 为时延神经网络的一种结构, 它由 N 个输入单元、 L 个隐含单元和一个输出单元组成. 隐含层的每个单元对输入层单元线性加权求和, 输出层对这 L 个和求积, 然后经过函数变换 $f(\cdot)$ 便可得到预测估计值. 这里选择的 $f(\cdot)$ 函数是 Sigmoid 函数. 阈值固定为 1.

2.3 预测精度比较

表 1 所示为序列归一化的预测误差的方差, $e^2(n)/x^2(n)$ 越小, 则预测准确性越高. 其中 I 帧进行 1 步预测, P 帧 3 步预测, B 帧 5 步预测. 从这里可以看出, 随着预测步长的增加, 预测误差随之增大, 而神经网络比线性预测器的预测误

差相应小很多, 特别是 I 帧的一步预测它可取得比线性预测高得多的精度, 但是当预测步长增加后, 预测精度明显下降, 预测误差仍然具有一定的长相关特性.

表 1 归一化的预测误差的方差

帧	$e^2(n)/x^2(n)$ 线性预测	$e^2(n)/x^2(n)$ 神经网络预测
I	0.032	$4.37e-4$
P	0.048	0.017
B	0.059	0.030

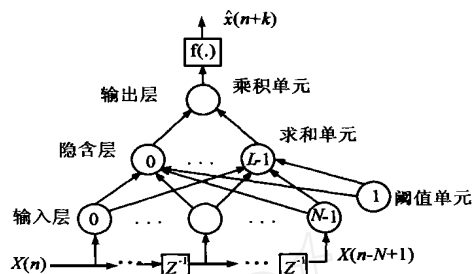


图 1 时延神经网络结构

3 视频 VBR 背景下的 ABR 流量控制

ABR 业务是针对数据流量而设计的, 网络根据资源的使用情况对 ABR 源的发送进行控制, 希望在不同的负荷情况下都能够保证传输业务的质量.

从 1993 年到 1996 年经过长达三年的讨论, ATM 论坛确定了基于速率控制的流量控制方法: 信源端每隔一定的数据信元会发送一个资源管理信元 RM, 中间交换机根据拥塞状态计算出信源应发送的明确速率 ER 并写入 RM 信元, 当 RM 信元到达目的端, 目的端将其反馈给信源端, 信源端则根据 RM 信元中的信息来决定其发送速率.

ATM 网中是多种业务综合传输, 这里主要讨论在视频 VBR 背景下 ABR 传输的流量控制. VBR 业务对延时和丢失率都有较高的要求, 因此它具有比 ABR 业务更高的传送优先权. 在目前卫星 ATM 所研究的拥塞控制算法中对 VBR 流量的预测大都采用估计的方法, 即近似认为将来到达的流量情况同目前统计得到的 VBR 流量一致, 因此在计算 ER 的时候认为 ABR 业务的总容量等于链路容量减去目前统计得到的 VBR 流量总和, 这对具有自相似特性的视频业务的性能很差.

我们提出采用长时预测加上利用因子动态可变的 ER 反馈控制方法, 可以达到很好的结果. 其主要流程如下:

1. 统计 ABR 和 VBR 业务流量情况, 估计处于传输活跃 VC 数量和 VBR 流量到达情况;
2. 对 VBR 流量进行长时预测, 估计出 GEO 卫星信道传输延时后的流量到达情况;
3. ABR 可利用总容量等于 VBR 所剩容量乘上利用因子, 根据最大最小公平性原则, 每个 ABR 源得到的允许发送速率等于可利用总容量除以当前传输处于活跃状态的 VC 总数;
4. 将计算得到的 ER 值同经过的每个 RM 信元的 ER 值进行比较, 如果计算值较小则替代 RM 信元的 ER 值.

预测算法的准确性和利用因子的选择对算法的性能有着

重要的影响. 预测的准确性越高, 利用因子接近于 1 则可获得最大的利用效率和最小的丢失率. 但是由于预测存在误差, 必须降低利用因子, 避免丢失增多、性能下降. 利用因子可以是静态不变的, 也可以是动态变化的. 动态变化的根据是网络的拥塞状态, 可以根据缓冲器的长度或缓冲器的变化速率来判别. 鉴于这两种方式, 提出以下两种动态控制算法.

算法 1: 利用缓冲器长度控制利用因子
利用因子的变化如式 (3) 所示

$$= \begin{cases} F_a - \frac{F_a - F_b}{Q_0} Q, & 0 \leq Q < Q_0 \\ F_b - \frac{F_b - F_c}{Q_1 - Q_0} (Q_1 - Q_0), & Q_0 \leq Q < Q_1 \\ F_c, & Q_1 \leq Q \end{cases} \quad (3)$$

当缓冲器长度小于门限 Q_0 , 系统没有拥塞, 利用因子随着缓冲器的增加而缓慢线性下降; 当长度超过 Q_0 而小于 Q_1 , 系统有拥塞的前兆, 利用因子随着缓冲器增加较快线性下降; 当长度超过 Q_1 , 则已经处于严重的拥塞状态, 利用因子这时已经很低, 为了不降低整个的传输效率, 利用因子则不再减少.

算法 2: 利用缓冲器增长速率控制 ABR 可利用总容量

该算法是在算法 1 之上的一个增强算法. 因为采用缓冲器长度作为拥塞检测的标准在某些场合是不合适的, 例如队列中有 1000 个信元排队并不一定意味着比只有 10 个信元排队的情形更加拥塞, 如果前面的情形以 1000 个信元每秒的速度减少, 而后者以很快的速度增加. 同时采用缓冲器长度判别会带来不公平性, 那些发送较晚的源信息会比先发送的源信息更容易被丢失, 吞吐率也就更低. 采用缓冲器的增长速率来作为拥塞状态的监测参数, 相比之下更能反应网络状态的变化趋势. 因此增强的算法不仅用算法 1 动态控制利用因子, 还考虑缓冲器的增长速率. 假设算法 1 所得到的 ABR 可利用总容量为 $A1$, 则算法 2 所给出的 ABR 可利用总容量 $A2$ 等于 $A1$ 减去队列增长速率 V . 如果 $V > 0$, 拥塞有恶化倾向, 减少 ABR 的总流量有利于缓解拥塞; 如果 $V < 0$, 拥塞正在解除, 增加 ABR 的总流量有利于提高链路利用效率.

4 仿真结果

仿真的模型如图 2 所示, 地面站由 N 个 ABR 源和一个

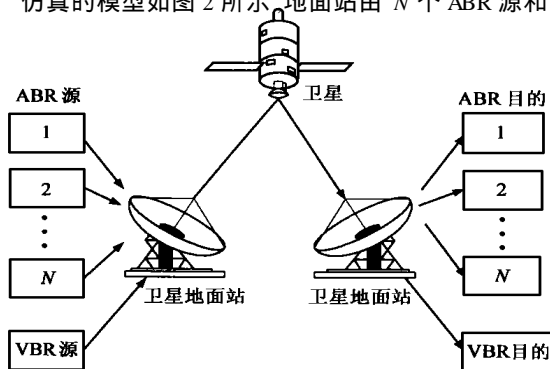


图 2 系统仿真结构示意图

VBR 源以及相应的接收端组成, 卫星为 GEO 轨道, 具有星上处理能力, 它将对 VBR 信源的变化进行长时预测, 并对 ABR 业务进行明确速率控制, 同时利用它的广播能力将 RM 信元尽早反馈给源端. 链路速率为 20000cells/s, VBR 背景为足球比赛的 MPEG1 序列, 其平均信元速率为 2329cells/s, 峰值速率 PCR 为 10190cells/s, ABR 源的初始速率 $ICR = 0.05 * \text{链路速率}$, $PCR = 0.9 * \text{链路速率}$, 最小速率 $MCR = 0.05 * \text{链路速率}$, 速率增加因子 $RIF = 1/16$; 速率减小因子 $RDF = 1/16$; 其余的同 ATM 论坛规定的缺省值.

4.1 利用因子的影响研究

图 3 (a)、(b) 给出了两个 ABR 源基于线性预测和时延神经网络预测的拥塞控制算法的信元丢失率随缓冲器长度的变化曲线. 曲线 1 给出的是利用因子固定为 0.95 的情形, 曲线 2 采用动态算法 1, 曲线 3 采用动态算法 2. 其中 $F_a = 1, F_b = 0.7, F_c = 0.3, Q_0$ 等于缓冲器长度的 0.1 倍, Q_1 等于缓冲器长度的 0.3 倍. 由图示可见, 对于固定利用因子, 丢失率随缓冲器长度增长下降缓慢, 这是因为由于预测的不准确性, 预测误差依然具有长相关性, 当某时刻预测误差较大时, 其相邻的预测误差较大的概率也很大, 这就就会恶化丢失率情况, 增加缓冲器并不能使之有明显的改善. 采用动态算法 1 后, 丢失率曲线有了很大的改进, 但随着缓冲器的增加下降速率并不是很大, 采用动态算法 2, 性能又有所提高, 当缓冲器较大时, 丢失率曲线迅速下降. 同时由图 3 (a)、(b) 相比可见, 采用时延神经网络的性能优于线性预测结果. 在以下的讨论中, 都采用动态

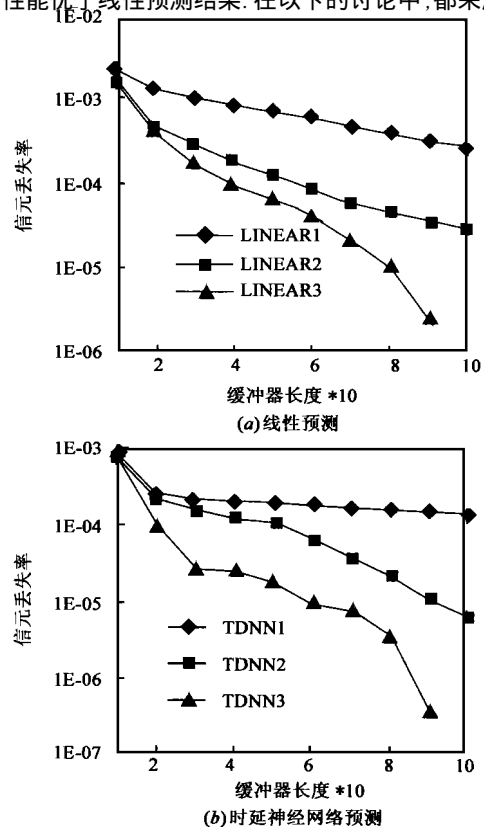


图 3 信元丢失率随缓冲器长度变化曲线

算法 2 的性能作为对比。

4.2 几种拥塞控制算法比较

图 4 所示为线性预测和神经网络预测加上动态利用因子控制、EFCI 和 ERICA + 算法^[6] (目前广泛研究的明确速率指示的拥塞避免方法) 的丢失率和效率。EFCI 方法只采用一比特控制信息, 很难适应 VBR 背景的迅速变化, 因此丢失率很高, 并且链路利用效率也是最低, 这说明在卫星大延时环境, EFCI 的方法是不适合的。

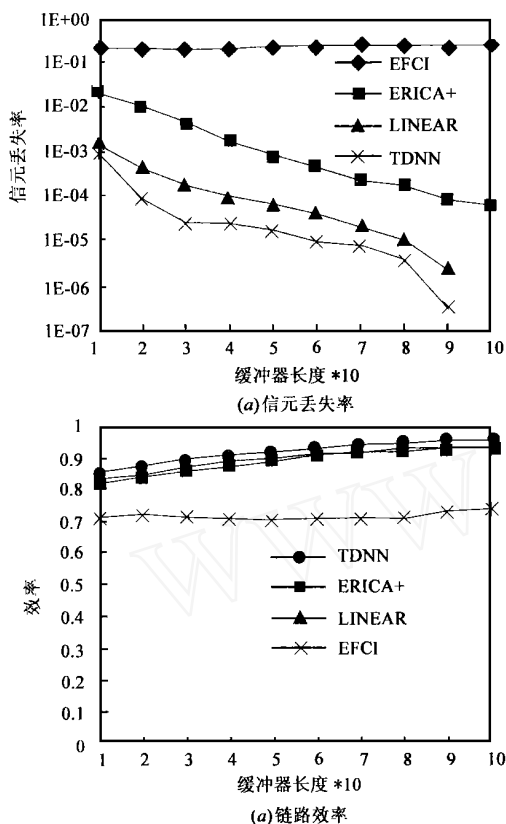


图 4 几种拥塞算法的性能比较

从信元丢失率的角度, 基于神经网络预测的方法优于基于线性预测的方法, 同时两者都优于 ERICA + 算法; 从链路利用率角度, 这三种算法都可以取得较高的利用率, 其中 ERICA + 算法同线性预测方法的效率差不多, 神经网络的方法略比它们高一点。可见预测的方法比简单的统计估计性能好, 而且预测精度越高, 效果越好。

4.3 对不同 ABR 连接数量的适应研究

图 5 给出的是在不同的 ABR 源数目条件下信元的丢失率情况。对于图 5(a) 所示的神经网络预测加动态控制, 随着源连接数目的增加, 信元丢失率略有增加, 但是变化并不很大; (b) 所示线性预测加上动态控制, 当源数目从 2 个增加到 5 个时, 信元的丢失率增长较大, 而源数目继续增加, 信元丢失率曲线基本保持不变。这说明当预测精度很高时, ABR 源流量总和的波动性并不随着连接数目的增加而增大, 因此连接数目的增多并不会给网络性能造成很大影响。

4.4 控制算法的暂态响应

图 6 所示为拥塞控制算法的暂态响应的比较。背景 VBR 传输为足球比赛序列, 从零时刻开始接入一个 ABR 源, 在 20 秒开始接入第二个 ABR 源。(a)、(b) 给出两个 ABR 源的允许发送速率随时间的变化情况, 采样时间间隔为 5 毫秒。(a) 是采用 ERICA + 算法从 19.5 秒到 22 秒的速率变化, 第二个源从时隙号 100 开始接入, 直到时隙 290 两个源的速率达到一致, 这也就是说, 在 ERICA + 算法下需要大约 0.95 秒才能达到稳态。(b) 给出的是神经网络加动态控制利用因子算法从 19.5 到 21.5 秒的速率变化, 第二个源从时隙号 100 接入, 到时隙号 166 速率和源 1 的速率一致, 暂态响应的时间为 330 毫秒。这表明采用预测方法可以很快从暂态中过渡到稳态, 实现 ABR 业务源之间的公平共享链路容量。另外从图中还可看到, 达到稳态以后的两个 ABR 源的波动性相对于 ERICA + 算法的波动性小很多。

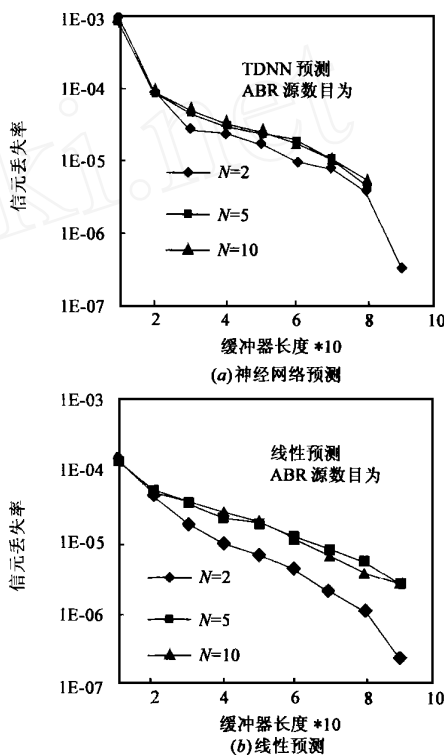


图 5 不同 ABR 源数量下的信元丢失率曲线

从以上的仿真分析当中可以看到, 长时预测加上动态利用因子拥塞控制在卫星环境是一种有效的拥塞控制算法, 它具有以下几个特点:

- ① 可以在较少的缓冲器条件下实现 ABR 信元的低丢失率
- ② 保持很高的链路利用率
- ③ 增加 ABR 连接的数目不会对网络性能造成很大影响
- ④ 暂态响应时间短, 可较快实现网络资源的公平分配

5 小结

本文主要研究基于星上处理的卫星 ATM 网络的 ABR 流量控制, 采用两种预测方式: 自适应最小均方误差线性预测和

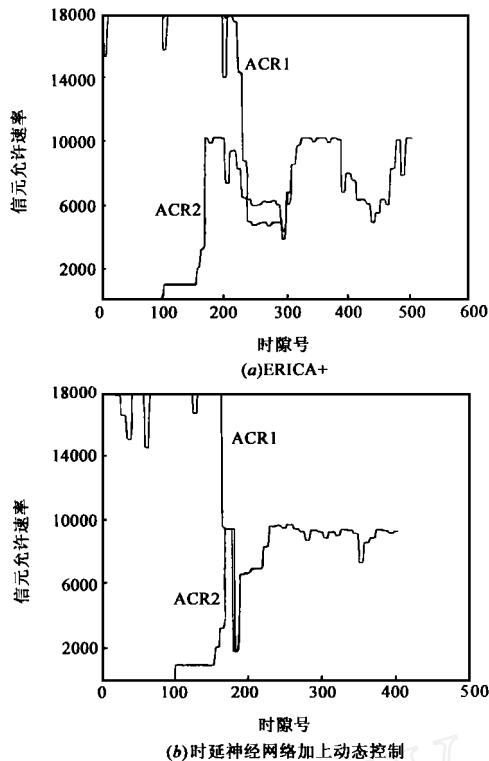


图 6 拥塞控制算法的暂态响应比较

时延神经网络预测. 由于卫星信道的大延时, 无法实现精确的长时预测, 因而将预测结果直接用于 ABR 的拥塞控制效果不甚理想. 将长时预测同动态利用因子控制的方法结合之后, 在链路效率、信元丢失率、不同连接数目及暂态响应等方面都取得很好的结果.

参考文献:

- [1] Michael H. Hadjithedosiou. The role of satellites in the ATM era: A study of two possible networks architectures [C]. Proc. Of Gobecom '95, New York, USA, IEEE, 1995: 1619 - 1623.

- [2] B. A. Pontano, D. Chitre, L. White, et al. Processing and nonprocessing satellite architectures for support of ATM traffic [C]. Proc. Of MIL-COM '93, New York, USA, IEEE, 1993: 242 - 246.
- [3] Pong P. Chu, William D. Ivancic, Heechul Kim, On-board closed-loop congestion control for satellite-based packet-switching networks [J]. International Journal of Satellite Communications, 1994, 12 (6): 555 - 568.
- [4] Boris Tsybkov, Nicolas D. Georganas, On self-similar traffic in ATM queues: definitions, overflow probability bound, and cell delay distribution [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5 (3): 397 - 409.
- [5] Jan Beran, Robert Sherman, Murad S. Taquq, et al. Long-range dependence in variable-bit-rate video traffic [J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43 (2/3/4): 1565 - 1579.
- [6] Raj Jain, Kalyanaraman S., Goyal R., et al. ERICA switch algorithm: A complete description af-tr-96-1172, August, 1996.

作者简介:



王勇前 1994年毕业于清华大学电子工程系获学士学位, 同年进入该系直接攻读博士, 并于1999年3月获得博士学位. 现为清华大学电子工程系讲师, 主要研究领域为卫星通信, 星上处理, ATM, TCP/IP.

马正新 1990年毕业于东南大学无线电工程系获学士学位, 1993年毕业于清华大学电子工程系获硕士学位, 随即留校工作. 主要研究领域: 卫星通信, 星上处理, 全数字调制/解调.

曹志刚 1962年毕业于清华大学无线电电子学系. 1984至1986年美国斯坦福大学访问学者、副研究员. 现任清华大学电子工程系教授、博士生导师、微波与数字通信国家重点实验室副主任. 主要研究领域: 卫星通信、移动通信、语音增强、全数字解调、信道编码等.