

支持区分服务的自适应链路层 HARQ 控制策略

靳 勇^{1,2}, 白光伟²

(1 常熟理工学院 计算机科学与工程学院, 江苏 常熟 215500; 2 南京工业大学 计算机系, 江苏 南京 210009)

摘 要: 提出了一种用于无线实时流媒体传输的自适应链路层 HARQ 控制策略, 针对不同的信道状况或业务服务质量的要求动态选择混合 AQR 方案. 该策略采用跨层设计的方法, 基于增强型 GM(1,1) 预测当前的网络状态, 自适应地调整 ARQ 参数 $N_{\max}$; 另一方面, 在应用层采用自适应 FEC 策略, 在视频源数据和冗余数据之间动态分配网络带宽. 理论分析和仿真验证表明, 该策略能使接收方获得最大的可播放帧率, 有效地提高流媒体传输的可靠性和实时性.

关键词: 无线实时流媒体; 跨层设计; GM(1,1) 模型; 区分服务; 自适应链路层 HARQ

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)05-0143-05

Adaptive Link - Level Hybrid ARQ Mechanism Based on Differentiated Service for Wireless Media Streaming

JIN Yong^{1,2}, BAI Guang-wei²

(1 School of Computer Science & Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China;

2 Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: In this paper, an adaptive link - level Hybrid automatic repeat request (ARQ) mechanism was proposed for wireless media streaming, in the hope that the media could be played on receivers with high quality. It allocate the optimal HARQ schemes for different traffic streaming, according to channel condition or differentiated QoS requirements dynamically. The mechanism, based on cross - layer optimization design, predicts the packet loss rate using the enhanced GM (1,1) model, and adjusts the ARQ parameter $N_{\max}$. Besides, an adaptive FEC at the application layer was used to adjust the sending rate of MPEG video frame adaptively and to allocate the network bandwidth resource between the MPEG video source data and the redundant data dynamically. Both the analysis and simulation results demonstrate that the proposed mechanism can significantly improve quality of media streaming, in terms of playable frame rate, reliability and real - time performance on the receiving side.

Key words: wireless real - time media streaming; cross - layer design; GM(1,1); differentiated service; adaptive link - level Hybrid ARQ

1 引言

近年来,无线实时流媒体传输的 QoS 保证是学术界关注的问题之一. 文献[1]在分析视频帧类型和依赖关系的基础上,提出了一种帧解码依赖模型,建立了在视频源数据和 FEC 冗余数据之间分配网络

带宽资源的优化算法,但没有考虑数据链路层状态对视频数据传输质量的影响. 文献[2]提出一种基于 GM(1,1) 模型预测的自适应链路层 ARQ 控制策略. 采用跨层设计的方法,考虑 GOP 可解码帧数的特性自适应地调整 ARQ 参数 $N_{\max}$,但是该模型在丢包率动态变化剧烈时,预测误差较大. 文献[3]研

收稿日期: 2009-03-26; 修回日期: 2009-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(60673185); 教育部留学回国人员科研启动基金; 2006 年度江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人培养对象项目; 常熟理工学院青年教师科研启动基金项目(QZ0911)

究了各类混合 ARQ 技术的原理、性能以及它们在无线通信系统中的应用,但是没有考虑如何针对不同的信道状况或业务服务质量的要求动态选择混合 ARQ 方案.文献[4]针对集成服务模型和区分服务模型各自的优缺点,提出了对两者相结合的端到端 QoS.文献[5]根据应用的不同将多种应用在中间节点上采用两种不同等级的策略进行带宽和缓冲区分配,并且进行自适应性调节,使得节点的资源利用率最大化.

文中提出了一种用于无线实时流媒体传输的支持区分服务的自适应链路层混合 ARQ 控制策略,以提高接收方的视频播放质量.

2 增强型 GM(1,1)预测模型

传统的 GM(1,1)模型^[6]的预测结果总是呈现单调递减的趋势,若初始序列是呈现递增趋势,则预测结果会误差很大,因此需要处理初始序列.设:初始序列为 X ,取 M 略大于 $\max\{X\}$,得到新数据序列 $Y = M - X$,然后再用 GM(1,1)模型^[2]预测,得预测结果为序列 $\hat{X} = M - \hat{Y}$.

因为无线网络中丢包率的动态变化呈现凹凸不平,即时而递增时而递减,直接使用 GM(1,1)模型预测,误差会很大,因此分段采用 GM(1,1)模型预测,可以准确预测无线网络丢包率^[6],记为增强型 GM(1,1)即 EGM(1,1),算法描述如下:

```
EGM1_1 ( )
{
    Judge_trend(Monitor_plr[]); //判断初始序列的变化趋势
    Tem=0;
    for (i=1; i<=number_trend; i++)
    {
        len=length(Monitor_plr[i]);
        for (j=1; j<=len; j++)
        {
            P_pre[tem]=GM1_1(Monitor_plr[i][j]); //
            此处 GM1_1 采用文献[2]的 Tem++;
        }
        //P_pre[]中记录对 Monitor_plr[]预测结果
    }
    return(P_pre[]);
    //返回丢包率预测序列数组 P_pre[]
}
```

算法中函数说明如下:

Judge_trend(Monitor_plr[]):每隔 Δt 秒统计一次丢包率并记录在数组 Monitor_plr[]中,把 Monitor

_plr[]按变化趋势分为若干个单调变化的子数组 n1[], n2[], n3[], ..., 返回值为子数组的个数 number_trend 及每个子数组 n1[], n2[], n3[], ...

为了对 EGM(1,1)模型的预测性能进行分析和评价,设计了一系列的仿真实验.使用 C 语言实现 EGM(1,1)模型.仿真工具采用 NS,通信源为视频文件“StarWars IV”^[7]的一个片断.图 1 给出了 EGM(1,1)模型预测值与 NS 仿真结果值随时间的变化情况.

图 1 反映了 EGM(1,1)模型的预测值与仿真结果的对比情况.当仿真值变化较平缓时预测值比较理想,与仿真值的曲线比较接近,误差小.当仿真值变化较剧烈时,虽然丢包率变化趋势时而递增,时而递减,但是 EGM(1,1)模型可以准确地预测其变化趋势,并准确地预测出丢包率的值.

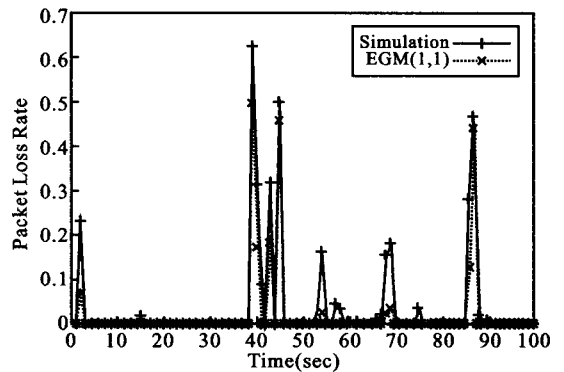


图 1 EGM(1,1)模型预测值与仿真实验值对比

上述结果表明,使用 EGM(1,1)模型预测实时流媒体传输过程中的网络状态是可行的.本节得到 EGM1_1()函数,利用当前丢包率 P_{cur} 预测未来丢包率 P_{pre} ,并作为返回值返回.此处的 P_{cur} 和 P_{pre} 可以是单个数,也可以是数组即预测到一系列丢包率.基于以上分析,文中采用增强型 GM(1,1)模型预测网络状态,并且进行速率平滑控制.

3 网络传输的差错控制技术

为了提高数据传输的可靠性,可采用自动重传请求^[8](ARQ)和前向纠错(FEC)两种差错控制技术,以减小数据丢失和差错造成的影响.根据反馈和重传策略的不同,ARQ 主要分为三种形式:停等协议 ARQ (SW-ARQ)、连续 ARQ (GBN-ARQ)和选择重传 ARQ (SR-ARQ),这三种协议所对应的接收方缓存空间大小也有所不同.前向纠错根据产生冗余数据的方法不同可以分为海明码、BCH 码和 RS 码等几种.文中采用 Reed-Solomon 编码.

FEC 通过增加冗余数据来提高数据传输的可靠性,并且不会增加往返时延.但是传输冗余数据占用了额外的带宽.ARQ 不占用额外带宽,但是重传数据会增加往返时延,降低实时流媒体传输性能.而且,通过重传数据包来纠正该数据包内几个字节甚至几个比特的错误,效率太低.

为了克服以上两种差错控制方案的缺点,将 FEC 和 ARQ 结合,充分利用两种方案的优点,这种方法称为混合 ARQ (HybridARQ).

3.1 五种 HARQ 差错控制方案性能分析

结合上述分析和文献[9]所述,得到五种 HARQ 差错控制方案在计算复杂度、附加码率、延迟、信道利用率、缓存区大小和传输可靠性等方面性能分析,如表 1 所示.

表 1 五种 HARQ 差错控制方案性能分析

方案	差错控制 技术	计算 复杂度	附加 码率	延迟	信道 利用率	缓存空间 (接收方)	传输 可靠性
A	FEC	0.1	0.3	0.3	<0.5	大	
B	GBN-ARQ	<0.1	<0.3	>0.3	<0.5	小	逐 渐 增 高
C	SR-ARQ	<0.1	<0.3	>0.3	约 0.5	大	
D	GBN-ARQ/FEC	0.1	0.5	0.4	<0.5	小	
E	SR-ARQ/FEC	0.1	0.5	0.4	约 0.5	大	

3.2 方案 D、E 工作原理

方案 D 的基本工作原理描述:发送方在应用层对视频源数据采用自适应 FEC 算法编码^[1],视频源数据帧被封装成大小为 S 的数据包.根据 RFC3580^[10],数据包的最大长度设为 1500 字节.因此一个 IP 数据包可以被封装为一个数据链路层数据帧.在这种情况下,丢包率 P 就等于丢帧率(数据链路层数据帧的丢失概率) P_f .在数据链路层,加入 CRC 冗余码,然后进行 RS 编码加入 FEC 冗余码.

在接收方先进行纠错码译码,并利用检错码检测译码是否成功.在译码出错的情况下,丢弃当前接收到的编码块,并请求发送端重传.在收到重传请求 NACK 的情况下,发送方会重传相同的编码块.以上重传过程会持续进行,直到编码块被接收端正确译码,从而该数据帧被成功接收为止,该方案采用 GBN-ARQ 技术的混合 ARQ 策略,在重传次数达到最大重传次数 $N_{\max}$ (可由文献[2]中的自适应 ARQ 算法求得)的条件下,重传过程也会停止.

方案 E 中,第一次仅发送信息比特或者信息比特与部分冗余比特,在接收方译码失败的情况下,发送方会继续发送附加的冗余比特,对于 SR-ARQ/FEC 来说,附加的冗余比特是不可自译码的,但是

与之前发送的编码比特合并后可以组成冗余度更高的低速率纠错码,从而可以提供更强的纠错能力.SR-ARQ/FEC 方案充分利用了每次重传携带的信息量,因此其综合性能明显优于方案 D.

3.3 有延时限制的重传机制

为了满足流媒体传输对时延的要求,文中采用图 2 所示的接收方控制的有延时限制重传策略^[8]:接收方在 T_c 时刻发现数据包 2 丢失,则判断如果重传的数据包 2 可以在其显示时间 T_d 之前到达,则向服务器发送重传数据包 2 的请求.即接收方发送重传请求的情况为: $T_c + RTT + D_s < T_d(N)$, 其中 T_c 为发现数据 N 丢失的时刻,RTT 为估计的网络来回数据传输时间, $T_d(N)$ 为数据 N 的播放时间, D_s 为一个松弛时间,可以隐藏 RTT 的估计偏差.文中所涉及到的 ARQ 机制均采用有时延限制的重传机制.

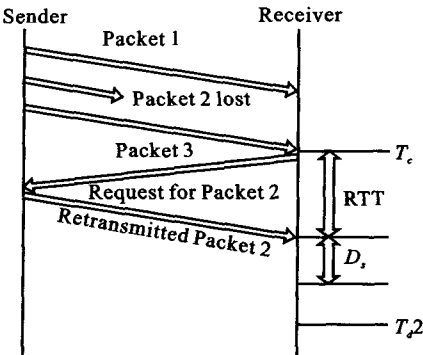


图 2 接收方控制的重传图

4 HARQ 控制策略模型

为了深入分析、探讨无线链路对实时流媒体传输的影响,简化问题的复杂性,文中假设反向信道是无差错传输,那么数据的应答信息会被正确收到,而前向信道的相关性采用一阶二状态的马尔可夫过程模型.

4.1 视频流 GOP 结构和无线多媒体网络状态定义

从多媒体通信网络 QoS 保障体系方面来讲, MPEG 算法定义的不同类型的视频帧(I 帧、 P 帧和 B 帧)具有不同的重要性;传输不同类型的视频帧在网络资源分配和通信调度方面具有不同的优先级.参照文献[1],视频流的 GOP 结构定义为 $\langle N_F, N_P, S_I, S_P, S_B \rangle$. 其中 N_F 和 N_P 分别表示 GOP 中帧的数量和 P 帧的个数, S_I 、 S_P 和 S_B 分别表示 I 帧、 P 帧和 B 帧的长度(单位:包).

针对文中的无线链路,第 3 节所介绍的五种差

错控制策略以及 MPEG 三类视频帧不同的重要性,无线多媒体网络状态用参数 $\langle P_{lr}, T_d(N), \text{Size_Buffer}, \text{Frame_type}, \text{Channel_rate} \rangle$ 来描述,其中 P_{lr} 表示丢包率, $T_d(N)$ 为数据 N 的播放时间(单位:秒), Size_Buffer 表示接收方可用缓存空间大小(单位:字节), Frame_type 表示视频帧类型, Channel_rate 表示信道利用率. 其中, P_{lr} 由 EGM(1,1) 模型预测得到; $T_d(N)$, Size_Buffer 可由接收方及时反馈给发送方; Frame_type 由采用跨层设计的方法,使应用层与链路层之间可以共享信息,把相关信息存入共享数据库中.

丢包率 P_{lr} 的变化,引起 $T_d(N)$ 和 Channel_rate 的值随之改变,导致 GOP 中的可解码帧数量的变化. 作为视频序列中可以相对独立解码的视频片段,根据不同的视频帧选用不同的 HARQ 差错控制策略,提高 GOP 中的可解码帧的数量,就可以提高接收端的可播放帧率,从而提高无线视频传输的质量.

4.2 HARQ 控制策略树

为了便于分析,把上述五种 HARQ 控制策略构成一颗以 $T_d(N)$ 为根的树,树中每个结点代表定义的无线多媒体网络状态参数之一,叶节点为表 1 所列五种 HARQ 控制策略之一.

图 3 给出了 HARQ 控制策略树. 流媒体应用对网络传输有较高的要求,特别是对传输时延(Delay)和时延抖动(Jitter)非常敏感,但可以容忍一定的传输差错. 因此 $T_d(N)$ 很重要,设为根节点,对于选择 HARQ 控制策略起着关键的作用. 由 $T_d(N)$ 将五种策略分为两大类,一类延迟低,包括方案 A、B 和 C; 一类延迟高,包括方案 D 和 E. 之后依据表 1 所列各策略的性能特点,遍历 HARQ 控制策略树,最终选出适合当前网络状态的 HARQ 控制策略.

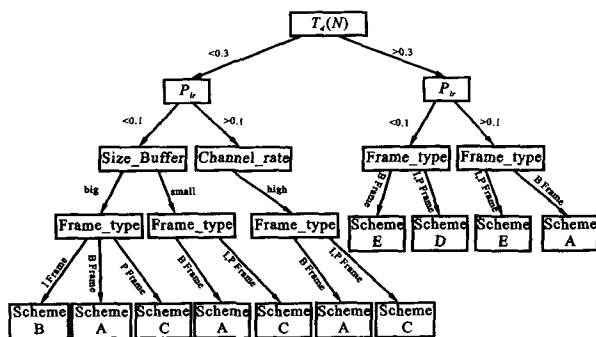


图 3 HARQ 控制策略树

4.3 HARQ 控制策略架构

依据文献[2],设定自适应 ARQ 函数即 HARQ

_adap() 函数. 该函数把 EGM(1,1) 模型预测得到的丢包率 P_{pre} 作为输入值, 求出与之对应的 ARQ 参数值 N_{max} 并作为返回值返回.

在分析 EGM(1,1) 模型预测网络状态、HARQ 控制策略树和自适应 HARQ 算法的基础上, 本节提出一种基于预测的支持区分服务的自适应链路层 HARQ 控制策略. 基于无线流媒体的通信过程, 该控制策略在发送方和接收方的具体流程如图 4 所示. 其工作流程描述如下:

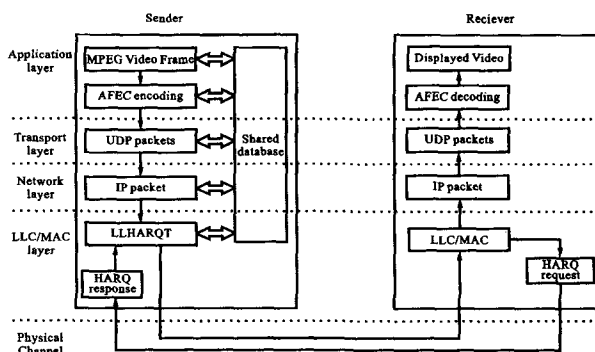


图 4 支持区分服务的自适应链路层 HARQ 控制策略

(1) 发送方

MPEG 视频帧首先由应用层的 AFEC encoding 采用自适应 FEC 算法编码, 经传输层、网络层到达数据链路层, 在数据链路层封装为链路层数据帧 (LL Frame). HARQ response 判断当前的 LL Frame 是否丢失过. 如果未丢失过, 则将该 LL Frame 发送出去; 如果丢失过即收到一个 NACK, 则启动文中提出的 HARQ 控制策略记为 LLHARQT.

(2) 接收方

接收方正确接收到数据后送至上层, 由应用层的 AFEC decoding 进行解码得到可播放的视频源数据帧. 同时, 反馈给发送方以下数据 $T_d(N)$, Size_Buffer .

以上各功能模块的算法描述为:

① AFEC encoding (MPEG Video frame)

{

Char Frame_type[];

//该数组用于记录 UDP 数据报, IP 数据包以及链路层数据帧所属视频帧类型并存放在共享数据库中

Encode the video frame by adaptive FEC mechanism;

//用自适应 FEC 算法对 MPEG 视频帧进行编码

//判断出该视频帧类型并把结果赋予 Frame_type;

② HARQ response (位于发送方 LLC 层)

{

Listen(NACK); //监听

```
If (NACK)
    H_ARQ_s=1; //启动 HARQ 控制策略
Else
    H_ARQ_s=0;
    Send(LL Frame); //发送该数据链路层数据帧 LL
    Frame
}
③ HARQ (位于发送方 LLC 层)
{
    Listen(H_ARQ_s); //监听
    If (H_ARQ_s)
        EGM1_1(P_cur); //预测得到下一刻丢包率 P_pre
        H_ARQ_adap(P_pre); //求得 N_max
        LLHARQT(); //依据 HARQ 控制策略树选出最佳
        HAR 控制策略
    }
```

5 算法性能分析和评价

通过 NS 仿真和数学分析的方法对文中提出的支持区分服务的自适应链路层 HARQ 控制策略进行性能分析. 采用的数据源为电影星球大战 (StarWarsIV) 的一个片断^[5], 视频编码格式为 MPEG-4 (GOP: IBBPBBPBBPBBPBB). 实验中每隔 Δt 统计一次丢包率, 其余各参数取值见表 2.

表 2 参数设置

参数	值
仿真时间	100s
拓扑大小	800m * 800m
移动节点个数	50
通信源	MPEG-4 video
数据包大小	1500 bytes
传输协议	UDP
路由协议	DSR
MAC 协议	IEEE802.11b
移动节点暂停时间	0s
移动模型	Random waypoint
会唔个数	1
最大移动速度	10m/s
N_F	15
N_P	4
S_I	20 bytes
S_P	12 bytes
S_B	3 bytes
Δt	1s

图 5 给出了基于预测的支持区分服务的自适应链路层 HARQ 控制策略与仿真实验结果最大可解码帧数的性能比较. 因为该控制策略是基于增强型

GM(1,1) 预测丢包率, 可以自适应调整 ARQ 参数 N_{max} , 改善流媒体传输质量使得丢包率明显降低, 该控制策略对于不同的网络状态选择不同差错控制策略能为无线流媒体传输提供更为可靠的服务. 从图 5 的对比结果可以看出, 文中的方法在相同的网络条件下可以显著提高 GOP 中的可解码帧数量满足无线流媒体传输的要求. 这说明该控制策略是有效的, 能根据当前的网络状态确定最优的数据发送模式.

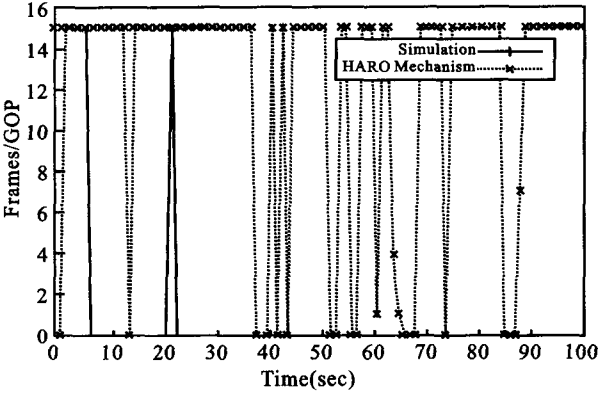


图 5 仿真实验与自适应链路层 HARQ 控制策略可解码帧数对比图

6 结束语

针对无线流媒体传输, 文中提出了一种基于预测的支持区分服务的自适应链路层 HARQ 控制策略. 该策略基于增强型 GM(1,1) 预测当前的网络状态, 考虑不同的 HARQ 控制策略的性能, MPEG 视频帧不同的重要性, 分析无线流媒体网络状态, 建立 HARQ 控制策略树; 针对不同的信道状况或业务服务质量的要求动态选择混合 ARQ 方案, 从而使接收方获得最大的可播放帧率; 同时, 在应用层采用自适应 FEC 策略, 动态地调整视频帧的发送类型和速率, 在视频源数据和冗余数据之间动态分配网络带宽. 数学分析与仿真实验证明, 该策略能够适应无线网络状态的变化, 有效提高流媒体传输的可靠性和实时性.

参考文献:

[1] Mei Z, LI J T. An adaptive forward error correction algorithm for streaming video[J]. Journal of Software, 2004, 15(9):1405-1412.
[2] 靳勇, 白光伟. 基于 GM(1,1) 模型的自适应链路层 ARQ 控制策略[J]. 计算机应用, 2008, 28(9): 2216-2219.

(下转第 152 页)

演算法用于推导数据经过多级交换机的时延,实现了对交换式以太网实时性的确定性分析与评价,使用本文所给出的方法求得的时延上界比直接使用网络演算法计算的结果更准确。

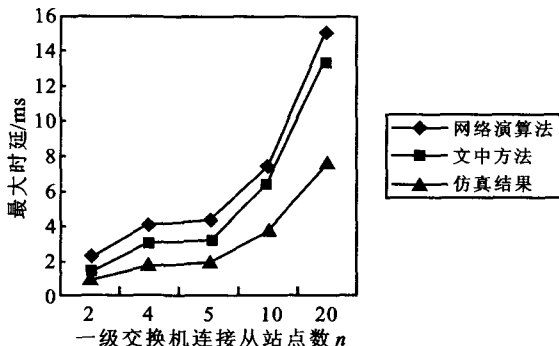


图5 最低优先级实时数据的最大时延

参考文献:

- [1] 张奇智,尹汝波.交换式工业以太网的现状和研究[J].传感器世界,2005,11(2):35-39.
- [2] Wang Zhi, Song Yeqiong, Chen Jiming, et al. Real-time characteristics of ethernet and its improvement [C]// Proc 4th World Congress on Intelligent Control and Automation. China, Shanghai, 2002:311-318.
- [3] Zhang Qizhi, Zhang Weidong. Priority scheduling in switched industrial ethernet [C]// proceedings of 2005 American Control Conference. Portland, 2005: 3366-3370.
- [4] 张奇智,曹春生,张卫东.EDF调度方法在交换式工业以太网中的实现[J].化工自动化及仪表,2004,31(6):41-43.
- [5] Jean-Philippe Georges, Thierry Divoux, Eric Rondeau. Strict priority versus weighted air queuing in switched Ethernet networks for time critical applications [C] //Proc 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05) 2 Papers. Los Angeles, 2005: 1530-2075.
- [6] Koubaa A Y Q Song. (σ, ρ) -calculus based analysis vs. worst-case response time analysis, which bound is better? [R]. [S. L]: Internal Report TRIO-LORIAINRIA, 2002.
- [7] 胡修林,李喜林,胡远斌.一种基于非抢占RM算法的可行性判决算法及应用[J].计算机与数字工程,2005,34(11):34-37.
- [8] Cruz R L. A calculus for network delay, Part I [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1): 114-131.

作者简介:

- 檀明男,(1974-),博士研究生,讲师.研究方向为工业控制网络、数据库与多媒体技术。
- 魏臻男,(1965-),博士,教授,博士生导师.研究方向为分布式控制、计算机控制等。
- 韩江洪男,(1954-),教授,博士生导师.研究方向为分布式控制、计算机控制、计算机网络等。
- 钟伯成男,(1964-),博士,教授.研究方向为计算机网络。

(上接第147页)

- [3] 李凡.无线通信中的混合ARQ技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2006.
- [4] 陈彦萍,李增智.基于Intserv和Diffserv的端到端QoS研究[J].微电子学与计算机,2003,20(11):24-26.
- [5] 万润泽,刘河.一种基于区分服务的适应性带宽控制策略[J].微电子学与计算机,2006,23(z1):231-233.
- [6] 武悦.关于灰色系统模型GM(1,1)适用范围的讨论[J].北京工业大学学报,1999,29(1):72-75.
- [7] StarWarsIV[EB/OL]. [2008-01-10]. <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/trace/ltvt.html>.
- [8] Aarmvith S, Lin C W, Roy S, et al. Wireless video transport using conditional retransmissions and low-delay interleaving[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems of Video Technology, Special issue on Wierless Video, 2002 (1):558-565.
- [9] 梅峥.视频流化自适应错误控制技术研究[D].北京:中国科学院计算技术研究所,2005.
- [10] RFC3580, IEEE 802.1X remote authentication dial in user service(RADIUS) usage guidelines[S]. 2003.

作者简介:

- 靳勇男,硕士,助教.研究方向为无线多媒体网络、差错控制等。
- 白光伟男,博士,教授.研究方向为无线ad hoc网络、无线多媒体网络、QoS、网络体系结构和协议、网络系统性能分析、评价等。