

基于优惠券机制的 TCP 友好不等保护传输

宋光农, 赵永祥, 陈常嘉

(北京交通大学电信学院通信系, 北京 100044)

摘 要: MPEG 编码流中不同的结构成分在图像恢复时具有不同的重要性, 针对此特征, 本文将优惠券机制与媒体流的网络传输相结合, 提出了基于优惠券机制的 TCP 友好不等保护传输方案(CIFUPS). 仿真结果表明, 该方案能够保护码流中对图像恢复质量起关键作用的结构描述字段, 减少图像帧的丢失, 有效改善图像传输质量.

关键词: 不等保护; TCP 友好; 优惠券机制; MPEG

中图分类号: TN393 **文献标识码:** A **文章编号:** 03722112 (2004) 10164405

CouponBased TCP Friendly Unequal Protection Scheme for Delivering Streaming Applications over Internet

SONG Guangnong, ZHAO Yongxiang, CHEN Changjia

(Dept of Electronics & Communication, Beijing Jiaotong Univ., Beijing 100044, China)

Abstract: As different coding structures of MPEG video influence the video reconstruction quality differently, this paper introduces a new scheme to deliver streaming applications over Internet, which is named as Couponbased TCP Friendly Unequal Protection Scheme (CIFUPS). This new approach provides different level of protection denoted by coupon value to the different structures. The simulation results exemplify that our approach can decrease the frame loss ratio and improve the video reconstruction quality efficiently.

Key words: unequal protection; TCP friend; coupon; MPEG

1 引言

多媒体网络应用的快速发展和媒体流的特有性质给网络传输带来了巨大挑战, 这使媒体流的网络传输成为学术界和工业界的关注焦点之一. 为了使媒体流既不破坏目前网络的资源占用格局, 又能得到一定程度的 QoS 保证, TCP 友好协议^[10-18]提出探测平滑的网络可用带宽, 使媒体流能够适应网络资源的变化. 但是, 单单探测平滑的可用带宽并不能满足媒体流本质上不同于数据流在带宽、分组丢失率、时延等方面的特殊要求. CTFRC^[19]采用优惠券机制让媒体流在发送速率和传输质量之间进行折衷, 使实际需求速率小于 TCP 公平带宽的流(如语声和低质量视像)得到较好的传输质量. 本文在 CTFRC 的基础上寻找对网络和媒体流双友好的传输协议.

媒体流不仅有发送信息的特点, 其编码数据中还存在着稳定的结构特征, 这些不同的编码结构信息在媒体流的恢复中的重要性是截然不同的. 基于纠错编码的传输方案^[1-3]和基于 FEC 不等保护的传输方案^[4-9]都是在这个特征上建立的, 这些方案的优点是不需改造目前的网络, 但涉及的计算复杂、需要深度交织, 既增加了编码时延和计算开销, 又无法作到无颗粒度的保护和动态保护.

针对媒体流中存在的编码结构特征, 本文将优惠券机制与媒体流的网络传输相结合, 提出了基于优惠券机制的 TCP 友好不等保护传输方案(CIFUPS), 即根据媒体流中不同的编码结构信息在图像恢复中具有不同重要性的特点, 按照分组优惠值给定的保护程度来传输媒体流中不同的编码结构信息. 从理论上讲, 这种保护可以是针对带宽、时延或分组丢失率等多方面的. 本文讨论在保证 MPEG 流具有 TCP 友好特性的前提下, 通过减少重要结构信息的丢失率来提高媒体流在接收端的图像恢复质量. 通过大量的仿真实验, 本文确定了保护程度和图像传输质量之间的定量关系, 证实了 CIFUPS 能有效减少 MPEG 码流图像帧的丢失, 是一种有效改善图像传输质量的传输方案.

本文第二节简单介绍 MPEG 编码流结构特征的重要作用, 第三节介绍基于优惠券机制的 TCP 友好不等保护传输机制及其两种实现模式, 第四节介绍仿真结果, 最后是本文总结.

2 MPEG 流的编码结构的重要作用

MPEG 编码流中存在两类稳定的结构特征: 结构类信息和数据类信息. 结构类信息包括规定图像回放格式的序列头

SH(sequence header)、图像宏块字头 GH(group header)和表示一帧图像开始及其帧类型的图像头 PH(picture header); 数据类信息主要包括 I、P、B 帧。如图 1 所示, 一个完整的视频文件包含多个序列(sequence), 每个序列包含一个 SH 和多个 GOP(Group Of Pictures), 每个 GOP 包含一个 GH 和多个图

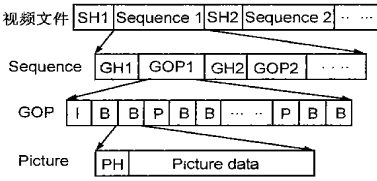


图 1 MPEG 编码流的结构

像帧(frame 或 picture)。其中, 可独立译码的 I 帧是视频流的基础, 利用帧间预测、内插和运动补偿压缩后的 P、B 帧则需根据前、后的相关帧进行译码。编码数据之间的这种相关性导致不同结构信息在媒体流恢复中的不等重要性, 即: 结构类信息的丢失将使其描述的整块结构在码流恢复无法识别, 出现严重的丢帧; 而数据类信息的丢失只降低图像局部恢复的质量。例如: 丢失序列头 1(SH1) 则整个序列 1 的所有图像都无法识别; 丢失 I 帧的图像头, 则无法识别 I 帧及其随后的非独立帧(P 和 B 帧); 而图像帧内的数据丢失只会导致一幅图像局部出现模糊。

3 基于优惠券机制的 TCP 友好不等保护传输方案

本文将一个特定的 MPEG 文件称为码流, 一个码流中同类型帧的集合称为子码流, 即 MPEG 码流中包含 I、P、B 三类子码流, r_I 、 r_P 和 r_B 分别表示各子码流的平均速率。基于优惠券机制的 TCP 友好不等保护传输方案在分组头部增加一个优惠券字段, 该字段携带的优惠值(coupon)由分组所在子码流的重要性决定; 优惠值越小表明分组所在子码流在 MPEG 图像恢复时的重要性越大。网络按 CRED^[19] 处理每个到达分组, 即: 当分组 p 到达网络节点时, 网络节点提取到达分组 p 的优惠券值 c, 计算该分组丢失率 $q_v = \alpha_{red} c$ 并以概率 q_v 确定是否丢弃该分组, 其中 q_{red} 是按照 RED 机制计算得到的分组丢弃概率。通过分组优惠券, 网络获知编码流中各子码流具有的重要性, 从而减小重要子码流的分组丢失率。

3.1 优惠券的分配与公平性的保证

本文主要探讨 MPEG 码流在不同保护程度下的图像恢复质量。为了能构造出可重复多次的相同环境, 以对不同的实验对象进行公正的比较, 本文采用了相对静态的 Matlab 仿真环境。在这个环境下, MPEG 码流的 TCP 公平性通过使码流的总分组丢失率等于网络的总分组丢失率体现出来。通过将重要子码流的丢弃概率转移到次要子码流, 增大低等级子码流丢失率的方法来补偿高等级子码流在丢失率方面得到的增益, 来保证总体的 TCP 公平, 具体要求为:

$$q_{red} = q_{rI} + q_{rP} + q_{rB} \quad (1)$$

即 MPEG 码流的总体分组丢失率与相同速率的 TCP 码流所经历的分组的丢失率相同。要作到这一点, 则优惠值的选取应满足:

$$q_{rI} + q_{rP} + q_{rB} = r \quad (2)$$

选取对 I 和 P 帧的保护程度 q_I 和 q_P , 根据式(2)就可以确定对 B 帧保护(实际是劣化)程度 c_B 。

3.1.2 绝对保护模式与相对保护模式

我们称码流中结构类信息所在的分组为结构性分组, 凡是分组头与结构类信息开始字节的距离不超过保护长度 g 的分组也被视为结构性分组。依据对结构性分组是否进行特殊保护, 可以将基于优惠券机制的 TCP 友好不等保护传输方案分为绝对保护和相对保护两种模式。

绝对保护模式不允许网络丢弃结构性分组, 因此要给予所有结构性分组最高的保护等级。我们称结构性分组的个数与总分组个数的比为保护开销率, 并用保护开销率来反映保护结构性字段所付出的代价。一幅图像的结构类信息丢失后导致的图像丢失现象被称为结构失真。从保证接收图像完整的角度出发, 我们希望所有的结构类信息在传输过程都不会被网络丢弃。但要求网络长期不丢弃分组是不合理和不实际的, 这会导致网络资源的不公平分配。实验表明并不是所有的 MPEG 码流都适合采用绝对保护; 在给定的分组长度和保护长度下, 仅当 MPEG 码流的帧长分布不致引起过大的保护开销时, 采用绝对保护模式才是可行的。

当网络开销过大、无法采用绝对保护模式时可采用相对保护模式。相对保护模式将结构性分组的优惠券值设置为与结构类信息相邻帧的保护等级, 相对保护模式虽不能完全杜绝图像丢失, 但可以明显减少图像丢失, 特别是减少那些对后续图像恢复至关重要的帧的丢失。

4 仿真

仿真的目的是研究码流在不同编码质量下、采用不同保护方案时得到的恢复质量, 确定优惠值导出的不等保护和恢复图像的质量之间的关系。

表 1 Matlab 仿真实验参数

网络平均分组丢失率 q	0.05, 0.11, 0.2
I 帧优惠值 c_I	0.015, 1
P 帧优惠值 c_P	0.0125, 0.15, 0.175, 1
分组长度(字节)	1000, 500, 200, 100
保护长度(字节)	50, 20, 10, 1
MPEG 文件长度(分组)	1946
绝对保护模式下结构类信息、I、P、B 帧的分组数(比例)	187, 355, 721, 683 (0.096, 0.182, 0.371, 0.351)
相对保护模式下 I、P、B 帧的分组数(比例)	385, 813, 746 (0.198, 0.418, 0.384)

4.1 仿真环境及参数设置

测试样本是从 Adobe Premiere 6.0 提供的 Boys.avi 经 VideoMach221 51^[8] 转换而成的三种质量的 MPEG 码流(Boy、Sboy 和 Lboy), 码流大小分别为 972788、486014、122852 字节, 总图像帧数都是 178 帧。仿真参数设置见表 1, 我们对头三个参数的 45 种组合各做 10 次重复实验, 再用 VideoMach221 51 和 MPEG2DEC.EXE^[9] 两种解码器对生成的 450 个 MPEG 文件进行解码, 并采用峰值信噪比 PSNR(q, α, c_P) 和图像帧丢失率 $L_r(q, c_I, c_P)$ 来衡量 MPEG 流的传输质量。本文所采用的峰值信噪比是指经过传输后存在分组丢失的解码图像序列与无分组丢失的解码图像序列的平均平方误差的对数表示。

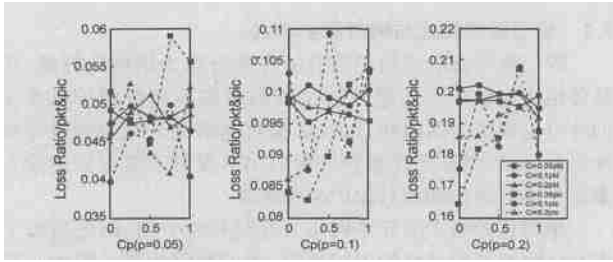


图 2 解码后的分组丢失率与图像丢失率

4I.2 相对保护模式下分组丢失率与图像丢失率的关系

当包含图像结构信息的分组在网络传输过程中被丢弃后,接收端解码时就无法识别该结构信息对应的图像,即接收端丢失了一帧图像.而丢失一个包含头信息的分组甚至可能导致多幅图像无法识别.MPEG 图像帧的丢失情况会由于优惠券机制的引入而得到改善.优惠券机制的头保护作用体现在 c_1 和 c_p 值的选取上, c_1 和 c_p 值越小,网络丢弃 MPEG 码流中的结构性分组、I 帧和 P 帧分组的概率就越小,因此这类图像的丢失率会改善.B 帧图像的丢失有可能增加,但考虑到相当多的 B 帧字头与相邻的 P 帧或 I 帧共在一个分组,也得到一定程度的保护.图 2 显示采用优惠券机制后,图像丢失率大部分都小于网络的分组丢失率,得到了不同程度的改善.

4I.3 相对保护模式下峰值信噪比 PSNR

相对保护模式下,恢复码流会出现相当程度的图像丢失,这给评估图像恢复质量带来了较大困难.如果顺序比较发送的和接收到的第一张图片、第二张图片……,直到接收到的

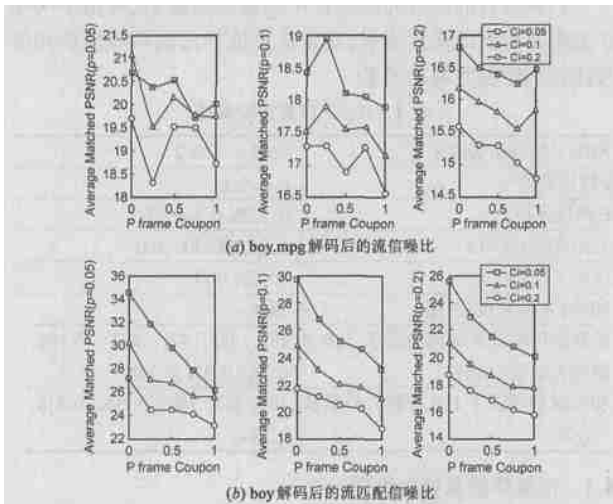


图 3 boy 解码后的两种信噪比

最后一张图片,我们可以得到一个平均峰值信噪比,称为流信噪比图 3(a),这种流信噪比的比较并不完全合理,因为一张图片的丢失,可能导致所有后续图像错位,而得到非常差的结果.我们可以按匹配信噪比来进行质量评估,即计算每一张接收端解码出的图片与原发送图片的信噪比.匹配信噪比要明显优于流信噪比图 3(b),但这样评估又似过高地评价了恢复图像的质量,因为观看者毕竟看到的是丢失了大量图片的映像.目前并没有对包含图像丢失的恢复视像进行评估的客观标准,并且对经过传输后的视像质量问题也尚无很好的评价

方法^[7],所以本文将实验得到的图像丢失率(图 2)、流信噪比和匹配信噪比(图 3)一并列出,供读者参考.

4I.4 绝对保护模式下的保护开销率和图像恢复效果

绝对保护模式是克服图像丢失的有效手段,但不是所有情况都适合于实施绝对保护.只有当需要绝对保护的分组较少,而且需要连续保护的分组也较少时,绝对保护模式才是实际可行的选择.

图 4 和图 5 分别给出了在不同的分组长度和保护长度下,三种质量的码流所需要的保护开销率(即需要绝对保护的分组数在总分组数中占的比例)和需要连续保护的

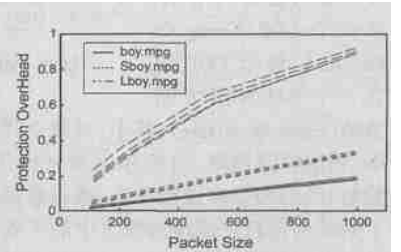


图 4 不同保护长度下的保护开销率

平均分组个数.可以看出,影响保护开销和连续保护长度的主要是分组长度的选择,而分组长度的选择,实际上是受到码流帧长的影响.如 Lboy 中的 B 帧平均长度为 533 字节、分组长度为 500 字节时,约有 60% 的分组是结构性分组;当分组长度增加到 1000 字节时,几乎 90% 的分组需要保护.Sboy 的 B 帧平均长度为 1342 字节,采用 500 字节的分组长度大约要求 20% 的结构性保护开销,采用 200 字节分组长度时的结构性保护开销小于 10%. Boy 的 B 帧平均长度为 112K 字节,它所需的保护性开销率较小.因此,针对当今较为有效的网络传输分组长度而言,低质量的 MPEG 码流不适于采用绝对保护模式,而对高质量的 MPEG 码流则可以考虑使用绝对保护模式来减小图像恢复中的丢失率.

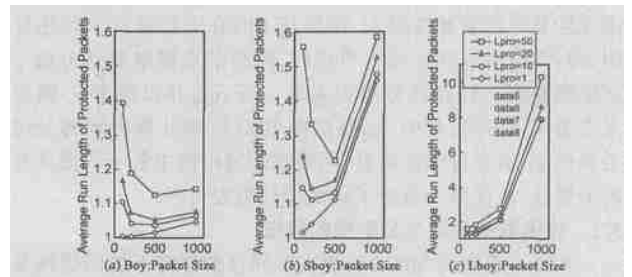


图 5 不同分组长度和保护长度下的连续要求保护的分组个数

图 5 所示的是连续要求保护的分组个数.对于高质量和中等质量的码流,连续长度的平均值在 2 个分组以下,这说明大多数情况结构性保护分组是独立出现的.而这时保护长度对平均连续长度的影响较对保护开销率的影响明显,特别是当分组长度较短,且保护长度较为接近分组长度时,一个给定结构性字段的起始位置距离某个分组尾部的字节数小于保护长度的概率会随着分组长度减小和保护长度的增加而加大,这是主导高质量码流、以及在小分组长度时的中等质量码流的主要现象,但这个现象引起的连续分组个数一般在 2 个以内.对于低质量码流、以及大分组长度时的中等质量码流,导致连续长度增加的是一个传输分组会容纳多个图像帧,这

个现象会引起连续长度的恶性增大. 在研究中我们还发现, 对于 Boy 和 Sboy, 连续要求保护的分组个数不超过 4, 但对于 Lboy, 最大的连续要求保护的长度多达 29 个分组. 因此低质量的 MPEG 编码流不适合采用绝对保护模式来减小图像恢复中的丢帧率. 综上所述, 我们认为只有当传输分组长度远小于编码图像帧的长度时才适合对结构性分组实施绝对保护.

41.5 两种保护模式下 MPEG 流的传输质量的对比

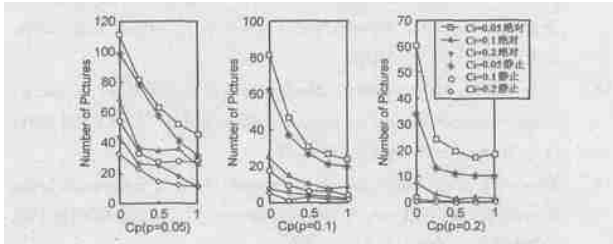


图 6 绝对与相对保护模式下收到无失真图像帧数目

图 6 给出了两种保护模式下收到的完全无失真的图像帧数目. 当采用表 1 设置的网络分组丢失率、分组优惠值时, 在绝对保护模式下接收到的完全无失真的图像帧总是多于相对保护模式下接收到的完全无失真的图像帧数. 这与预想的一样, 绝对保护模式下 MPEG 流的结构信息因为得到了最大的优惠值, 因此比在相对保护模式下的收到的图像质量要高. 同时, 在两种保护模式下接收到的完全无失真的图像帧数均随着 I 帧和 P 帧优惠值的减小(优惠增大)而增大. 这再次说明优惠券机制能够在 MPEG 流的网络传输中改善 MPEG 流传输质量.

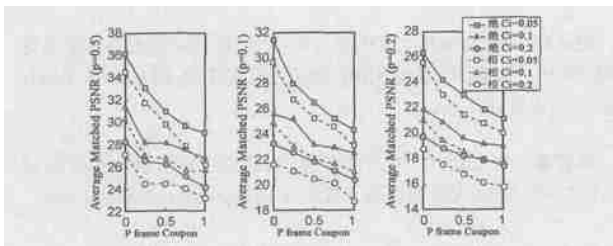


图 7 MPEG 编码流解码后的峰值信噪比

图 7 是在两种保护模式下码流解码后的匹配峰值信噪比. 总的来说, 绝对保护模式下的峰值信噪比高出相对保护模式下的峰值信噪比至少一个分贝, 但前面已经说明, 单纯比较匹配信噪比, 会过高估计相对保护模式下的接收图像质量. 实际上绝对保护模式得到的质量改善比图 7 所显示的要大.

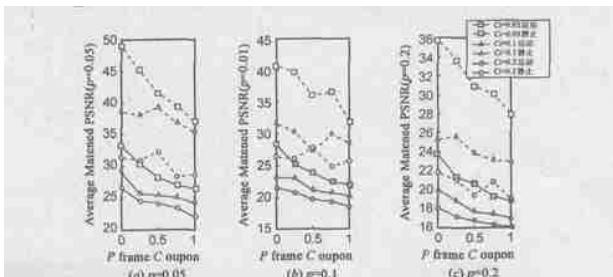


图 8 绝对保护模式下解码后运动和静止部分的 PSNR

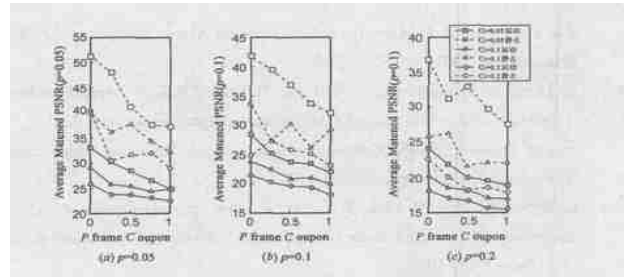


图 9 相对保护模式下解码后运动和静止部分的 PSNR

止部分 PSNR 的. 在相同参数下, 运动图像的信噪比远小于静止图像信噪比, 二者最大相差 18dB, 最小相差 3dB. 这说明数据类信息不等保护的效果与视像的运动水平有关, 对运动不剧烈视像的保护效果比对剧烈运动视像的保护效果要好. 此外, 在网络的分组丢失率较小($p=0.05$)时, 相对保护模式下运动和静止部分 PSNR 值要好于绝对保护模式下的 PSNR 值, 但当网络的分组丢失率较大($p=0.2$)时, 相对保护模式下运动和静止部分 PSNR 值要劣于绝对保护模式下的 PSNR 值.

我们还发现对数据类信息(I、P、B 帧)采用不等保护后, 恢复图像的峰值信噪比(PSNR)一般随 I 帧和 P 帧的优惠值的增大而增加; 但在相同条件下重复仿真所得到的 PSNR 具有非常大的方差, 这说明在 MPEG 码流中存在除 I/P/B 帧以外的其它结构, 它们的丢失与否对图像的恢复质量有显著的影响. 我们将在下一步工作继续研究 MPEG 编码流的其它结构与优惠券值的映射关系.

5 总结

通过对 MPEG 码流编码结构的分析, 我们认为码流的结构描述字段对图像恢复的质量至关重要. 针对 MPEG 码流的这种编码特征, 本文将优惠券机制与媒体流的网络传输相结合, 提出了基于优惠券机制的 TCP 友好不等保护传输方案(CIFUPS). 该方案在不改变现有网络结构、保持 TCP 友好的前提下, 根据 MPEG 码流中子码流在图像恢复时的重要性大小, 对子码流赋予不同的优惠券值, 并以此调整网络拥塞时丢弃分组的概率, 以达到提高图像传输质量的目的.

依据对 MPEG 码流中结构描述字段的保护方式, CIFUPS 提出了绝对和相对两种保护模式, 并指出高质量的编码流适合采用绝对保护模式, 而低质量的编码流适合采用相对保护模式. 仿真试验的结果表明, 通过保护 MPEG 码流中对图像恢复质量起关键作用的结构描述字段和子码流, 能有效减少图像帧的丢失, 提高图像恢复的质量.

参考文献:

[1] Riley M J Richardson. Adopting MPEG video traffic to avoid network congestion[A]. I. E. G. Telecommunications, Fifth IEE Conference on [C]. Brighton, 1995(3): 105- 109.
 [2] Zahir S, Nasiopoulos P Leung. A high quality VBR MPEG system for Internet and broadcasting applications[J]. V. C. M. Consumer Electronics, IEEE Transactions, 1997(8): 531- 536.
 [3] Wa2Tian Tan, Zakhor A. Video multicast using layered FEC and sca2

- able compression[J]. *Circuits and Systems for Video Technology*, IEEE Transactions, 2001(3): 373- 386.
- [4] U Horn, K W Stuhlm ller, M Link, B Girod Robust internet video transmission based on scalable coding and unequal error protection[J]. *Signal Process: Image Communication. Special Issue on Realtime Video over the Internet*, 1999(9): 77- 94.
- [5] K W Stuhlm ller, M Link, B Girod, U Horn. Scalable internet video streaming with unequal error protection[A]. *Packet Video Workshop [C]*. New York, 1999.
- [6] Alexander E Mohr, Eve A Riskin, Richard ELadner. Unequal loss protection: Graceful degradation over packet erasure channels through forward error correction[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2000(6): 819- 828.
- [7] W Ashmawi, R Guerin, S Wolf, M Pinson. On the impact of policing and rate guarantees in diffserv networks: A video streaming application perspective[A]. *SIGCOMM 2001[C]*. San Diego, CA, USA, 2001. 7.
- [8] 免费软件 VideoMach 2.5. 1[CP]. URL: <http://www.yes2.net/soft/readsoft.asp?id=21674>
- [9] 免费软件, URL: <ftp.netcom.com:/pub/cfog/mpeg2/mpeg2codec.v1.1.tar.gz> [CP]. Copyright (C) DJ Delorie, 24 Kirsten Ave, Rochester NH 0386722954.
- [10] J Golestani. A class of endtoend congestion control algorithms for the internet[A]. *Proceedings of the international conference networks protocols[C]*. Austin, TX., USA, 1998. 0137.
- [11] Injong Rhee, Volkan Ozdemir, Yung Yi. TEAR: TCP emulation at receiver flow control for multimedia streaming[R]. *Technical Report*, Department of Computer Science, NCSU, 2000.
- [12] D Sisalem, H Schulzrinne. The lossdelay adjustment algorithm: A TCPfriendly adaptation scheme[A]. *The 8th International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV. 98)[C]*, Cambridge, England, 1998(7). 33.
- [13] R Rejaie, M Handley, D Estrin, RAP: An endtoend ratebased congestion control mechanism for realtime streams in the internet[A]. In *Proc. INFOCOM 99[C]*. NY, USA, 1999. 9E23.
- [14] J Padhye, V Firoiu, D Towsley, J Kurose. Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation[A]. *Proceeding of ACM Sigcomm[C]*. Vancouver, Canada, 1998. 25.
- [15] B Whetten, J Conlan. A rate based congestion control scheme for reliable multicast[Z]. *Technical White Paper*, November 1998.
- [16] L Vicisano, L Rizzo, J Crowcroft. TCPlike congestion control for layered multicast data transfer[A]. *IEEE INFOCOM 98[C]*. 1998. 8c21.
- [17] W Tan, A Zakhor. Realtime internet video using error resilient scalable compression and TCPfriendly transport protocol[J]. *IEEE Trans Multmedia*, 1999(6): 172- 186.
- [18] Sally Floyd, Mark Handley, Jitendra Padhye, Jrg Widmer. Equation2 based congestion control for unicast applications[A]. *SIGCOMM 2000 [C]*. Stockholm, Sweden, 2000. 2- 1.
- [19] Yongxiang Zhao, Changjia Chen. Coupon TFRC: a mechanism being friendly to both TCP and continuous stream[J]. *Journal COMPUTER NETWORKS*, 2001(11): 467- 479.

作者简介:



宋光农 女, 1973年11月生于四川冕宁, 北京交通大学电信学院通信系在读博士生, 主要研究方向: 网络服务质量, IP网中多媒体流的拥塞控制. Email: zhangsonggn@sina.com

赵永祥 男, 1970年7月生于云南昆明, 北京交通大学电信学院讲师, 博士, 主要研究方向: 网络的调度和缓存管理, 拥塞控制. Email: yongxiang_zh@sina.com

陈常嘉 男, 1949年10月生于澳门, 北京交通大学电信学院教授, 主要研究领域: 宽带通信网络技术. Email: changjiachen@sina.com