

# 联合拥塞控制与 H. 264 容错编码的视频传输

马佳 支琤 宋利

(上海交通大学图像通信与信息处理研究所, 上海 200240)

**摘要** 视频压缩码流在传输过程中经常会遇到因各种原因引起的误码丢包等网络传输错误。由于目前常用的编码器普遍采用“预测-残差”方式进行编码,因此一旦传输发生错误,不仅会影响当前帧的重建,更会造成空间及时间上的误差蔓延。在传输系统中,较为实际的做法是由系统各个部分共同分担这种抗网络传输错误的“责任”,通过前后部分之间不断的呼应协作,合理地满足用户对于视觉质量、实时性等各个不同方面的 QoS 要求。为了对抗网络传输错误对视频重建质量的影响,在结合了 H. 264 容错编码、信道保护、打包策略、拥塞控制、差错掩盖等算法的基础上,提出了一个集成拥塞控制的端到端视频传输系统框架,并对其中关键算法进行了分析与设计,实验证明,该视频传输系统框架在不同网络情况下,均可收到较好的效果。

**关键词** 端到端视频传输 拥塞控制 FEC 保护

**中图分类号:** TN943 TN941 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2006)11-1506-05

## An Integrated Congestion Control and H. 264 Error Resilience Framework for Video Transmission

MA Jia, ZHI Cheng, SONG Li

(Institute of Image Communication and Information Processing, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract** When transmitting over the error-prone channels, the compressed video bit-streams are always vulnerable to all kinds of transmission errors. The corrupted parts of the bit-streams may not only affect the reconstruction effect of the current frames, but also cause the error propagation problems both spatially and temporally. So it is really practical to take into account the error-resilience effects in each step of the transmission system. In this paper, we describe a framework for video transmission over the packet-loss channel which features the coordinated operation of the H. 264 error resilience encoding, error concealment algorithms, transport-layer packetization and congestion control mechanisms. We analyze and design the key algorithms of the framework and the experimental results show that our approach works well in different channel conditions.

**Keywords** end-to-end video transmission, congestion control, FEC protection

## 1 引言

众所周知,由于数字压缩视频在网络中进行传输时,不可避免的会受到信道传输差错的影响,因此如何在有限的资源下完成视频流的鲁棒传输,也就成为各种提高视频传输质量的相关技术的研究目的。例如,各种视频容错压缩技术<sup>[1]</sup>,就是通过加

入有效的容错信息来加强码流的鲁棒性;而各类网路层面上的保护策略(如信道码的加入,拥塞控制机制的运用等)<sup>[2]</sup>,则试图针对不同网络的错误特性,在代价及效果之间找到平衡点;解码端的错误掩盖技术<sup>[1]</sup>,则是在各种严格的条件限制下(如:有限的冗余信息,有限的复杂度等),尽可能恢复原始信息。另一方面,随着各项保证视频传输质量的技术得到不断的发展应用,人们也逐渐发现,在实际传输

基金项目:国家发改委 CNGI 项目(CNGI-04-15-2A)

收稿日期:2006-06-06;改回日期:2006-08-03

第一作者简介:马佳(1982~),女,2004年于上海交通大学获学士学位,现为该校硕士研究生。主要研究领域为视频流可靠传输、抗差错编码、错误掩盖等。E-mail: majia@sjtu.edu.cn

中,若过分注重单一步骤的抗差错效果,而忽略了各步骤之间的相互影响,反而达不到预期效果。例如某些效果较好,但算法复杂的强保护码,如 LDPC (low density parity check) Turbo 码,就是因其计算量较大而降低了传输的实时性;同时保护粒度较粗也限制了其在非均匀保护场合中的发挥。因此,在实际应用中,只有充分考虑各部分之间的协同合作,才能达到在有限资源下保证或提升用户的 QoS (quality of service) 的目的。基于以上分析,本文在结合了容错编码、信道保护、打包策略、拥塞控制、差错掩盖等模块的基础上,提出了一个集成拥塞控制的端对端视频传输框架,经实验证明,该框架在不同的网络状况下,均能收到较好的效果。

## 2 端对端传输架构

由于目前常用的编码器普遍采用“预测残差”的方式来排除空间时间冗余性,因此一旦传输错误发生,不仅为当前帧的重建带来影响,更会造成误差蔓延,从而严重降低重建质量。事实上,在实际传输系统中,若将一个端对端传输系统作为整体来考察,则不难发现更为可行的做法是由各部分分担合作抗网络传输差错的责任,并通过前后部分之间的呼应协作来减低单步的复杂性,以合理地满足用户对于视觉质量、实时性等各个不同方面的 QoS 要求。因此,本文在结合了容错编码、信道保护、打包策略、拥塞控制、差错掩盖等算法的基础上,提出了如图 1 所示的集成拥塞控制的端对端视频传输框架结构,其中涉及的主要算法有如下几个方面:

### 2.1 容错编码算法及误码掩盖算法

由于 H.264 协议充分考虑了 IP 网络的特性,并在视频编码层和网络提取层中提供了多种容错工

具,以适应 IP 网络尽力而为的特点,因此可减轻诸如带宽波动、延时、丢包所带来的不良影响<sup>[3]</sup>。

其中, Slice 工具将一帧图像分割成更为局部的独立编码单元,因此可抑制空间错误蔓延。同时,任意宏块顺序的引入可以使解码端以更高概率得到丢失区域周围的正确信息,这将有助于解码端的错误掩盖算法的应用,因此可将一部分抗传输差错的任务分至编、解码端,而无需加以各类增加时延的强保护信道码算法。

为此,可在编码结构中引入依据网络状态而定的 Intra 宏块刷新算法。该算法首先在编码器中建立起  $K$  个相对独立的随机信道模型拷贝,并以  $C_n(k)$  标记,则考虑了损失信道影响的期望采样失真为

$$E_n |s_{n,m,i} - \hat{s}_{n,m,i}(C_n)|^2 = 1/K \cdot \sum_{k=1}^K |s_{n,m,i} - \hat{s}_{n,m,i}(C_n(k))|^2 \quad (1)$$

式中,  $s$  与  $\hat{s}$  分别为原始采样值及经过随机信道模型后的受损值。由于编码器中信道与解码器拷贝的运行是相互独立的,所以当  $K$  足够大时,解码器中预期的失真能在编码器中被准确地估计到。然后,将此失真估计与最大失真门限相比较,来确定当前 Slice 中帧内编码宏块的刷新位置,以抑制由信道损失带来的空间时间误差蔓延现象。

而在解码端,则在原有的错误掩盖方法后,通过引入最大后验概率模型来增强图像重建质量<sup>[4]</sup>。其主要原理是先利用 MRF (Markov random field) 模型,根据相邻块的预测误差来估算当前块的预测误差,再经过不断的迭代直至收敛,即可完成对初始值的修正。由于初始错误掩盖预测误差值主要由高频部分组成(如:边缘错位、边缘模糊等),因而这种模型可用于改善错误掩盖效果。

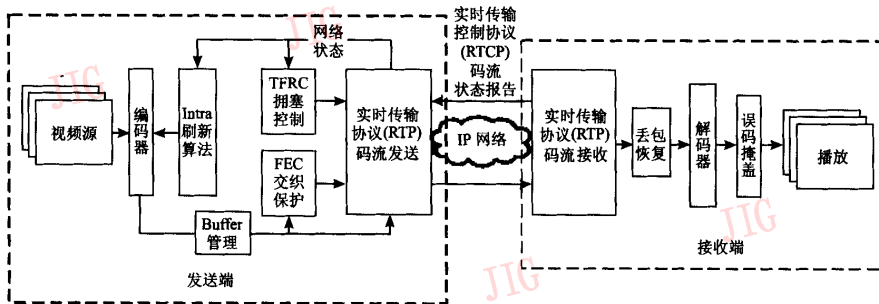


图 1 集成拥塞控制的端对端视频传输系统

Fig. 1 Integrated congestion control P2P transmission framework

2.2 网络层前处理算法

在当前 IP 网络中的包交换机制下,路由器通常是依靠循环冗余校验码直接丢弃那些已经出现比特错误的数据包;而在网络拥塞情况下,则是根据预先制定的规则(如:优先级别、先后顺序)进行丢包。因此,可以认为,目前的 IP 网络中所存在的信道传输错误主要是指丢包错误。

在实际视频传输过程中,数据包大小除受到最大传输尺寸限制外,还须考虑以下两点:分包过小易造成网络堵塞(数据包个数增大),同时也加大了包头部在码流中所占比重而降低传输效率;分包过大则在丢包率情况较大时,易造成解码端可解帧数的减少。因此,针对不同网络状况制定不同的数据包尺寸,对于视频流的鲁棒传输有较大的影响。

在本文所述传输系统中,根据不同网络状况分别使用了如图 2 所示的两种打包策略<sup>[5]</sup>。现以随机信道为例进行说明,当单个数据包的原始丢包率为  $p$  时,两种策略对于单个数据包的残余丢包率  $P_i$  分别为

$$P_1 = \sum_{i=N-M+1}^N i/N \cdot C_{ND}^i (1-p)^{N-i} \quad (2)$$

$$P_2 = \sum_{i=N-v_k+1}^N C_{ND}^i (1-p)^{N-i} \quad (3)$$

式(2)中的  $M$  为原始数据包个数,式(3)中的  $v_k$  是指对第  $k$  个数据包施加的  $RS(N, v_k)$  保护码。易知,策略 1 有较低的残余丢包率,但由于保护码长固定,因此其灵活性不足。

另外,通过实验发现,在网络状况较好的情况下,若将策略 2 的交织包长适当缩小,则在减少或去除校验码的情况下,可通过错误掩盖得到较好的视频重建质量,这样做的好处是降低了整个保护过程的复杂度和延时性。而在网络情况较差时,若试图通过 RS 码(reed-solomon code)保护来获得较小的

残余丢包率,则所加保护码字在码流中的比率或过程复杂性将大幅提高,所以在本系统中,考虑以针对包结构的 FEC(forward error correction)算法替代 RS 码,以增强实时性。

由于编码器提供了准确的解码端预期失真估计,因此,可根据不同失真所带来的错误扩散影响大小来决定所加的 FEC 保护强度。

2.3 拥塞控制算法

RFC3448 中所给出的 TFRC(TCP friendly rate control)拥塞控制策略是特别针对视频流 UDP 传输所设计的。由于它考虑了对 TCP(transmission control protocol)码流传输有重大影响的各项参数,因此它在资源使用时能做到与 TCP 码流公平分享。同时它的传输速率变动也更平缓,更适宜于视频传输。TFRC 算法假设接收端在每个往返传输时间内至少一次向发送端反馈收包的信息,其中包括以丢包间隔形式表示的丢包率  $p_N$ (下角  $N$  代表 network)、往返传输时间值  $R$  以及重传超时值  $t_{RTO}$ 。发送端再根据所得反馈信息依式(4)即可得出修正的发送码率。其中,  $\bar{S}$  为发送包平均大小。

$$X = \bar{S} / (R \cdot \sqrt{2b \cdot p_N / 3} + (t_{RTO} \cdot 3 \sqrt{3b \cdot p_N / 8} \cdot p_N \cdot (1 + 32p_N^2))) \quad (4)$$

为了避免突发的丢包对发送速率的影响,可对发送速率变化进行平滑,TFRC 通过考虑多个历史纪录对丢失间隔进行了平滑处理。平滑后的丢包间隔  $I_s$ (下角  $S$  代表 smooth)的计算公式为

$$I_s = \sum_{i=1}^H W_{i-1} I_i / \sum_{i=1}^H W_{i-1} \quad (5)$$

其中,  $I_i$  是历次丢包间隔,  $W_i$  表示各个丢包间隔的权重。由于式(5)对网络状态转好的反应不灵敏,因此可通过引入式(6)来考虑当前没有结束的丢包事件(当前连续成功收包数)对丢包率的影响,以保证在网络状态转好的情况下,发送速率较快上升。

$$I_s = \sum_{i=0}^{H-1} W_i I_i / \sum_{i=0}^{H-1} W_i \quad (6)$$

另外,由于 TFRC 对网络丢失率增大反应灵敏,所以当网络出现短暂拥塞时,容易因人为造成的发送速率的快速下降,而导致接收端缓存下溢。一般可通过增加对短暂拥塞或持续拥塞的判断来解决这个问题。具体方法如下:

(1)当发送端接收到第 1 个反馈数据包后,即采取每隔 RTT(round trip time)发送速率增加  $S_m$  的方法来逐步探测可用带宽,直到出现丢包事件为止。这样

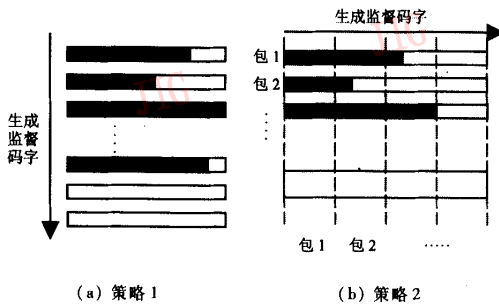


图 2 两种不同的打包策略<sup>[5]</sup>  
Fig. 2 Packetization schemes

就可以避免慢启动过程导致的发送速率的大幅波动。

(2) 当  $p_a > 0$ , 即发生丢包事件时, 利用式 (4) 可得出理论发送速率  $X_{calc}$ , 再根据式 (7) 得出带有阈值的发送速率, 其中  $\alpha$  为控制增长速率的乘性因子。

$$X = \begin{cases} \min(\alpha \times X_{cur}, X_{calc}) & X_{calc} > X_{cur} \\ X_{calc} & X_{min} < X_{calc} < X_{cur} \\ X_{min} & X_{calc} < X_{min} \end{cases} \quad (7)$$

即当发送速率低于预先设定的  $X_{min}$  时, 则启动最低速率计时器, 同时以  $X_{min}$  速率发送。若网络状态在最低速率计时器超时之前有所好转, 则重复式 (7) 得出新的发送速率; 若最低速率计时器超时, 则说明网络已进入持续拥塞状态, 需进一步降低发送码率, 甚至考虑暂时中断发送服务。

拥塞控制对于因网络状态变化而造成的丢包情况有很好的改善效果。尽管它对实时性稍有影响, 但却增加了解码端可解帧数, 从而既提高视频序列重建质量, 也减轻了对压缩码流保护力度的要求。

### 3 实验结果及分析

在采用不同方法进行视频信道传输实验中, 分别模拟了随机丢包信道以及伴有突发连续丢包的高斯信道, 信道丢包率分别为  $10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}$  级别。实验使用 3GPP-SA4 组提供的 H.264 编解码参考软件, 测试序列为 Foreman/QCIF300 帧, 1 帧间隔 50 帧。本文实验方案 (方案 1) 为: 在丢包率较低情况下对数据包采取交织策略; 在丢包率较高情况下, 则加入不均等 FEC 保护, 并以 2.2 节图 2 所示策略 1 打包。在对比方案 (方案 2) 中, 当丢包率较低时只使用 Slice 工具; 当丢包率较高时, 则以策略 2 方式打包, 若采用 LDPC 码对码流进行保护, 则其生成的监督码字与 FEC 所加码字能基本保证相等。

图 3 给出在两种信道中不同丢包率情况下两种方案的峰值信噪比值。通过比较可以发现, 本系统对视频重建的客观质量在各种信道条件下均有所改善; 而与加入 LDPC 码强保护的情况相比, 在主要表现为丢包错误的网络环境下也有着稍好的表现。这是因为当网络丢包率较高时, 大片连续错误的发生使得 LDPC 译码迭代过程无法收敛, 故错误译码率增大, 甚至因其特性, 而引入更多的错误, 最终造成峰值信噪比 (peak signal noise ratio, PSNR) 值的下降。另外, LDPC 编译码的附加计算量也造成了一定的延时。

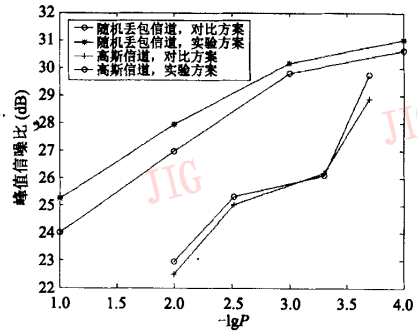


图 3 两种信道下两种方案的峰值信噪比较

Fig. 3 Comparison of PSNR

另外, 随机对称信道的情况又明显优于伴有突发连续丢包的高斯信道。这是由于连续丢包将造成大片相邻信息的丢失, 也加大了错误掩盖的难度, 因此其误差蔓延也更为严重。由于实际网络丢包现象通常表现为连续丢包, 因此这种环境下的研究也更具意义, 是今后研究的方向。

图 4 为在伴有连续丢包的高斯信道中, 加入及不加入拥塞控制算法时, 解码端可解帧数的比较。很明显, 通过引入拥塞控制, 解码端可解帧数有较大的提高。尤其是在网络情况较差时, 由于拥塞控制算法在网络变差时能迅速降低发送速率, 因此不仅减少了大量连续丢包情况的发生, 而且在保证用户端播放基本连续的基础上, 改善了在高丢包率环境下的视频重建质量。

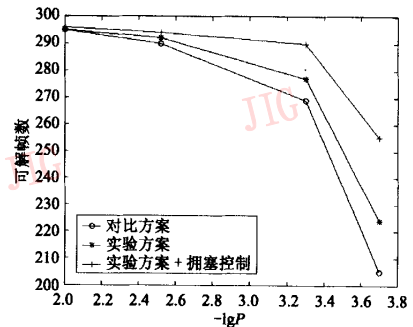


图 4 可解帧数比较

Fig. 4 Comparison of number of playable frames

### 4 结论

鉴于视频传输需求的日益增大以及带宽资源捉

襟见肘的现状,使得视频压缩流在丢包网络中的传输问题成为了当前的研究热点。各项技术的不断发展,也使人们有了更多应付各种状况的方法。本文通过整个端对端系统中,包括编码器、传输预处理、拥塞控制以及解码器错误掩盖等各个机制的协同合作,将抗差错传输的任务分至每一个步骤,并综合考虑各项资源的合理分配,以全面满足用户的各项 QoS 需求。

#### 参考文献 (References)

- 1 Wang Yao, Wenger S, Wang Sao, *et al.* Error resilient video coding techniques[J]. IEEE Transaction on Signal Processing Magazine, 2000, 17(4):61 ~ 82.
- 2 Lee Kang Won, Puri Rohit, Kim Tae Eun, *et al.* An integrated source coding and congestion control framework for video streaming in the internet[A]. In: IEEE Infocom[C], Tel Aviv, Israel 2000.
- 3 Wenger S. H. 264/AVC Over IP[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2000, 13(7): 645 ~ 656.
- 4 Shirani S, Kossentini F, Ward R. A concealment method for video communications in an error-prone environment[J]. Selected Areas in Communications IEEE Journal, 2000, 18(6): 1122 ~ 1128.
- 5 Zhai F, Eisenberg Y, Luna C E, *et al.* Packetization schemes for FEC in internet video streaming [A]. In: Proceedings of 41st Allerton Conference on Communication, Control and Computing[C], Monticello, Virginia, USA, 2003.