

基于 MPEG-4 的视频联合信源信道编码

李平^① 肖嵩^② 吴成柯^② 唐昆^① 崔慧娟^①

^①(清华大学电子工程系通信与微波研究所 北京 100084)

^②(西安电子科技大学ISN国家重点实验室 西安 710071)

摘要 该文提出了一种用于提高 MPEG-4 码流在噪声信道下的抗误码性能的联合信源信道编码方法。该方法将 MPEG-4 基本层按重要性进行码流重排后进行交织打包,并根据率失真函数将基本层纹理信息进一步划分为多个子层。编码器根据反映信道状态的反馈信息动态地调整传输的子层数目和每个子层的纠错强度(信道编码速率),使得系统失真最小。仿真结果表明,该方法明显优于未保护的 MPEG-4 方法,在相同信道带宽及丢包率条件下比等纠错保护的 MPEG-4 编码方法获得更加稳定的性能。同时由于该方法根据反馈的出错分组数进行传输子层数和纠错强度的联合优化,与 Puri 等人提出的按照确定信道条件设计目标函数进行优化的 MDFEC 方法相比,更能够适应信道条件的变化,从而获得更高的性能。

关键词 MPEG-4, 联合信源信道编码, Reed-Solomon(RS), 率失真

中图分类号: TN911.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-1049-05

Joint Source Channel Coding of MPEG-4 Video

Li Ping^① Xiao Song^② Wu Cheng-ke^② Tang Kun^① Cui Hui-juan^①

^①(Communication and Microwave Lab., Dept. Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(ISN National Key Lab., Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract A new robust joint source channel coding method for MPEG-4 video over noisy channel is proposed. In the method, the base layer bit streams are reordered according to their relative importance and then interlaced packetized. Multiple sub-layers of texture information are generated based on their rate distortion function, the number of which is adjusted dynamically by the encoder according to the feedback information to minimize the overall distortion. Simulation results show that the method has the performance obviously higher than that of un-protected MPEG-4, and can be more stable than MPEG-4 equal error protection method under the same conditions of bandwidth and packet loss rate. Since the method makes joint optimization to the the number of transmission sublayers and the protection level according to the feedback parameter, it can be more adaptive to the channel situation and can obtain higher performance compared with MDFEC method proposed by Puri, which design the object functions and performs optimization according to the fixed channel situation.

Key words MPEG-4, Joint source channel coding, Reed-Solomon(RS), Rate distortion

1 引言

在无线信道中,能够提供对多媒体(包括语音、图像和数据等)业务的支持已成为 21 世纪通信系统发展的必然趋势。然而它的实现势必要解决两大问题,其一是对信源进行高效的压缩以充分利用有限的信道带宽——即信源编码问题;其二是对压缩后的信息进行纠错保护以抗击信道或网络所带来的误码或数据丢失——即信道编码问题。由于信源编码压缩率的提高将导致码流抗误码能力的降低,同时提高码流的抗误码性能又要以牺牲编码效率为代价,因此信源编码和信道编码所要解决的问题在此意义上是相互矛盾的。

联合信源信道编码已被证明是一种行之有效的解决上述问题的编码技术。该技术将信源与信道编码结合在一起考虑,比将最优的信源编码方案与最优的信道编码方案相级联

的传统方法更加有效。

联合信源信道编码方面的研究在国外已经得到广泛的重视,许多文献利用联合信源信道编码对无线信道中的多媒体(图像、视频)传输做了研究^[1-8]。这些研究方法中,可将信道部分所采用的误码保护方法分为等纠错保护(Equal Error Protection, EEP)和不等纠错保护(Unequal Error Protection, UEP)两类。等纠错保护是指对信源的所有部分都采用相同码率(相同纠错能力)的信道编码,而不等纠错保护指的是根据信源码流各部分的重要性不同而采用不同码率的信道编码进行保护。由于不等纠错保护在设计中合理地考虑了信源码流的特性,能够进一步提高码流的抗误码性能,人们更多研究的是这种纠错保护方法。例如, Sherwood 和 Zeger 提出了一种噪声信道下图像传输的不等纠错保护方法^[1], Lu 和 Nosratinia 等人对于突发错误信道中图像传输的联合信源信道编码方法做了研究^[2], Chande 和 Farvardin 研究了内嵌编码图像渐进传输的联合信源信道编码方法^[3], Aydin 等人提出

了一种用于传输SPIHT编码图像的不等纠错保护方法^[4]。Bystrom 和 Modestino 提出了一种慢衰落莱斯(Rice)信道中传输视频的联合信道编码方法^[5], Lan 和Tewfik 研究了无线信道中传输H.263 编码视频的基于功率最优化的模式选择方法^[6], Zheng和Liu提出了一种无线信道下传输图像和视频的子带调制方法^[7], Boyce提出了用于对MPEG-2 编码视频进行不等纠错保护的高优先分割(High Priority Partitioning, HiPP)方法^[8]。而在国内, 对于联合信源信道编码这方面的研究还处于起步阶段, 许多问题有待进一步深入的研究。

Puri等人提出了一种基于率失真优化的不等纠错保护方法(MDFEC)^[9], 将信源码流分成不同的分辨率层并加以不等纠错保护, 根据已知的信道条件和信源率失真曲线, 确立目标函数, 采用Lagrange 算法取得最优化解。这种方法的缺点在于设计信道编码时, 为保证一定的传输质量, 总是为最差的情况设计保护策略, 当信道条件好时, 将过量的比特用于做保护, 而过少的比特用于信源编码, 将导致编码的效率降低。

本文提出了一种用于提高MPEG-4 码流在噪声信道下的抗误码性能的联合信源信道编码方法。该方法将MPEG-4 基本层按重要性进行码流重排后进行交织打包, 根据率失真函数将基本层纹理信息进一步划分为多个子层, 并对不同子层进行不等纠错保护。由于本文提出的对基本层中的信息以帧为单位按重要性重新排序后再进行不等纠错保护的方法, 使得基本层也具有渐进特性, 即使其没有被全部正确接收, 也能够恢复一定质量的基本层, 不影响增强层的解码。进一步加强了编码码流的抗误码性能。同时又由于本文方法根据反馈的出错分组数进行传输子层数和纠错强度的联合优化, 与Puri 等人提出的按照确定信道条件设计目标函数进行优化的MDFEC 方法相比, 更能够适应信道条件的变化, 从而获得更高的性能。

2 联合信源信道编码设计

2.1 系统结构

图1显示了基于MPEG-4 的联合信源信道编、解码方案的系统框图。

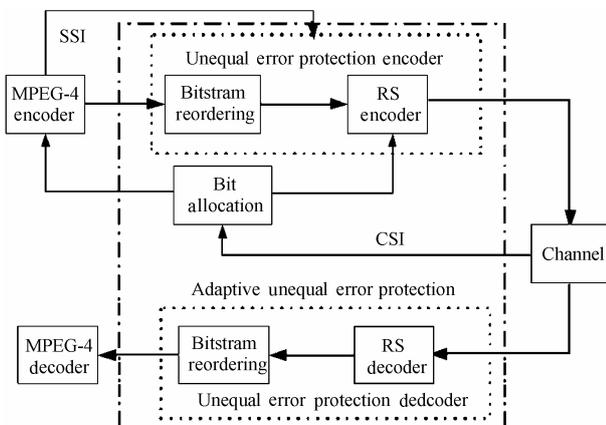


图1 基于MPEG-4 的联合信源信道编、译码方案系统框图
Fig.1 System architecture of joint source channel coding based on MPEG-4

经过MPEG-4 编码器产生的码流根据重要性不同进行码流重排后, 通过RS 编码器进行不等纠错保护。最终形成的码流经过信道后, 首先到达RS 译码器, 之后通过码流重排恢复成MPEG-4 的标准码流格式, 最后通过MPEG-4 解码器重建出原始的视频流。在整个联合信源信道编解码系统中, 有两种信息需要传递。第1种是描述MPEG-4 码流对误码敏感程度的信源重要性信息, 即SSI 信息。它由信源编码器传递给信道编码器来进行不等纠错保护。第2种是信道传递给速率分配模块的信道状态信息, 即CSI 信息, 使速率分配模块可以根据信道当前的状态实时地调整信源和信道编码器的速率, 从而更加有效地提高系统的性能。此外, 由于系统的速率控制模块能够根据信道当前状态动态地改变信源编码和信道编码的速率, 因此信道编码部分称为“自适应不等纠错保护”编码。同时, 更改后的速率应作为附加信息传递给解码端。

2.2 基于不等纠错保护的码流重排及打包

MPEG-4 视频码流具有基于对象的层次结构, 包括视频对象序列(VS), 视频对象(VO), 视频对象层(VOL), 视频对象平面组(GOV)以及视频对象平面(VOP)。不同层次结构中的码流具有不同的重要性。VS, VO, VOL, GOV, VOP, VP 以及MB 的头信息是最重要的。对于每个VOP 中的MB 纹理数据编码, 经过DCT 变换后主要能量集中在低频部分。从人眼的生理视觉角度来说, DCT 低频系数对图像质量的影响要大于高频系数, 亦即低频系数的重要性要大于高频系数, 从而可以认为ZIGZAG 或交替扫描后码流中系数的重要性沿扫描顺序依次递减。因此, 我们将MPEG-4 视频码流根据重要性不同分成两类。一类是VO, VOL, GOV, VOP, VP, MB 头(包括cbpc, cbpy, 宏块类型(mb_type)、差分运动矢量(dmvx, dmvy))信息; 另一类是纹理信息, 即所有宏块的DCT 系数VLC 编码。第1类信息的重要性要高于第2类信息。第2类信息中, 每个DCT 系数的重要性随着位置的不同而不同。我们将MPEG-4 视频码流中的这两类信息按一定顺序重新排序并且打包, 再加上信道编码以进行不等纠错保护。具体方法如图2所示。

图2所显示的是一个 $N \times (p_h + L + 1)$ 的矩阵。列方向表示的是将MPEG-4 编码的码流分成 N 个数据包。每个数据包包含 $p_h \cdot q$ 比特的包头信息, 以及 $(L + 1) \cdot q$ 比特的编码码流信息。行方向表示的是将编码码流信息分成 $L + 1$ 层, 由VO, VOL, GOV, VP, MB 头信息(k_h), L 层纹理信息(k_{il} , $l = 1, 2, \dots, L$)以及对这些信息进行不等纠错保护而添加的冗余符号组成。对于每一层, 包含 k_{il} 个信息符号以及 $(N - k_{il})$ 个冗余符号。由于第1类信息的重要性高于第2类信息, 因此将第1类信息排在最前面, 并对它们进行最强的纠错保护。第2类信息按照重要性先后(图中由颜色的深浅表示重要性程度, 颜色越深, 重要性越强)依次放在头信息之后, 并进行强度逐渐降低的纠错保护。

图 3 中显示了经过不等纠错保护方法的码流经过信道后, 虽然某些数据包有错误或丢失(例如图中左起第 3 和第 5 个包丢失), 但由于行方向上使用了纠错编码, 仍有很多信息能够恢复出来(图中第 1 到第 5 层都能正确恢复出来)。这里采用 $GF(2^q)$ 域上的 RS 码来进行不等纠错保护, 且取 $q=8$ 。

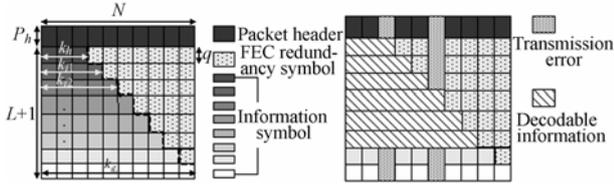


图 2 基于不等纠错保护的码流重排及打包
Fig.2 Bitstream reordering and packetization based on UEP

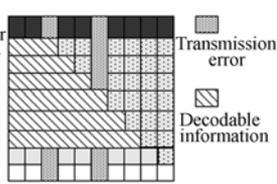


图 3 经信道传输后译码端可恢复信息
Fig.3 The decodable information at the receiver after transmission over channel

其余纹理信息 $k_{il} (l=1,2,\dots,L)$ 要依据 DCT 系数的率失真函数划分。我们以 VOP 为单位, 将一个 VOP 中所有宏块的 DCT 系数进行重要性排序。排序结果如图 4 所示:

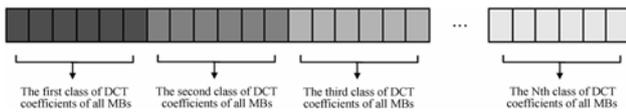


图 4 DCT 系数重排

Fig.4 DCT coefficients reordering

2.3 基于率失真的信道自适应不等纠错保护

图 5 中的率失真曲线显示了对基本层编码时, 每个宏块经过扫描后的 DCT 系数对重建图像的贡献(以 Foreman 序列的 Y 分量为例)。横坐标为重建时所用的 DCT 系数的数目。纵坐标为重建图像的归一化均方误差。定义为

$$MSE_{normalized} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \tilde{x}_{i,j})^2$$

$$D(1)$$

式中 x 为原始图像像素值, \tilde{x} 为重构图像像素值, 图像大小为 $M \times N$; $D(1)$ 为每个宏块仅用第 1 个 DCT 系数重建时的误差。从图中可以看出, 前 30 个 DCT 系数对率失真曲线的贡献占 95% 左右, 而后 34 个系数仅占 5% 左右。

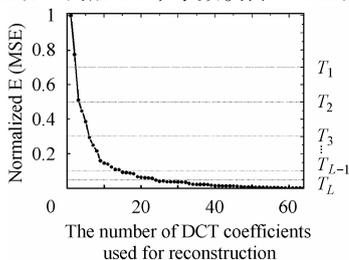


图 5 DCT 系数对重建图像的贡献

Fig.5 The contribution of DCT coefficients to the reconstructed image

根据图 5 中的率失真曲线, 我们对基本层取 l 个门限 (T_1, T_2, \dots, T_l) , 将重建图像的归一化均方误差划分为 L 个等级。通过求取满足式 $D(n) = T_i (i=1,2,\dots,l)$ 中的 n , 可以获得不同率失真等级下需要进行重建的 DCT 系数的数目。因而

我们将宏块的 DCT 系数划分为 L 类, 分别为

$$K_{il} = \begin{cases} K_{i1}, & 1 \leq i < D^{-1}(T_1) \\ K_{ij}, & D^{-1}(T_j) \leq i < D^{-1}(T_{j+1}), 2 \leq j \leq l-1 \\ K_{iL}, & D^{-1}(T_l) \leq i \leq 64 \end{cases}$$

并将对应的编码信息 $k_{il} (l=1,2,\dots,L)$ 定义为 L 个子基本层。可见, 子基本层的重要性随着 l 的增大呈递减趋势。

将一帧内丢失或发生不可纠正的错误的分组数 s 作为信道 CSI 信息反馈给编码端, 编码端根据 CSI 信息来动态地选择所传输的层次数目。在信道条件好的情况下, 传输全部的子基本层和增强层。当信道条件差的情况下, 仅传输重要的子基本层, 而将原本用来传输非重要的子基本层和增强层的带宽, 传输对重要的子基本层进行的纠错保护编码。传输的子基本层的个数, 每个子基本层的纠错保护速率以及子基本层 L 的划分和分组数目 N 的选择均由编码器根据 CSI 信息确定。但应保证传输带宽保持不变。

假设第 l 个子基本层的失真为 $D(k_l)$, $P_r(C_l)$ 为对应于第 l 个子基本层, 信道编码速率为 C_l 时的错误概率, 且 $C_l = k_l / N$, 则整个系统的失真函数可以由下式表示:

$$D = \sum_{l=1}^L D(k_l) \cdot P_r(C_l) \quad (1)$$

由于信道编码采用 RS 编码, 根据 RS 码的特性可得

$$P_r(C_l) = \begin{cases} 1, & s > N - k_l \\ 0, & s \leq N - k_l \end{cases}$$

编码器根据反馈的 s , 在传输带宽保持不变的前提下, 求解最小的系统率失真, 并以此来确定传输的子基本层数和每个子基本层的信道编码速率, 即求解

$$\min D(N \cdot (L+1) \cdot q = \text{constant}) \quad (2)$$

2.4 基于迭代改进的局部搜索法

我们采用迭代改进的局部搜索法(Iteratively Improved Based Local Search Algorithm, IIBLSA)来找到最优解。即根据率失真曲线, 计算出使接收到的信源符号数最大的解作为候选解, 然后以此解为起始点, 在其邻域内进行迭代改进搜索。

设 RS 码冗余符号数为 $f_i = N - k_{il}$, 如果 N 个包中有 f_i 个包丢失, 则最多含有 k_{il} 个信源符号的码段可以被正确恢复。由于码流按重要性进行了重排, 并且越重要的码段分配越强的保护, 因此 RS 码冗余符号有如下约束条件:

$$f_1 \geq f_2 \geq \dots \geq f_L \quad (3)$$

由图 6 可以看出率失真函数为一个单调递减的凸函数。假设使接收到的信源符号数最大的解为 f_r 为 $N - k_{iL}$ 。我们选取等保护 $F_r = (f_r, \dots, f_r) \in \kappa$ (κ 为由 L 元组元素 (f_1, f_2, \dots, f_L) 组成的集合, F_r 表示码率分配方案)作为搜索的起始点, 然后按照式(3)的约束条件, 对子基本层号在 $1 \sim L$ 的剩余信源符号部分向提供更强保护的方向进行前向迭代改进搜索。其中, 邻域定义如下:

若 $F = (f_1, f_2, \dots, f_L) \in \kappa$, F 的前向搜索邻域 $N(F)$ 由 κ 中的 L 个元素 $(f_1+1, f_2, \dots, f_{L-1}, f_L)$, $(f_1+1, f_2+1, \dots, f_{L-1}, f_L-1)$, \dots , $(f_1+1, f_2+1, \dots, f_{L-1}+1, f_L+1)$ 组成。

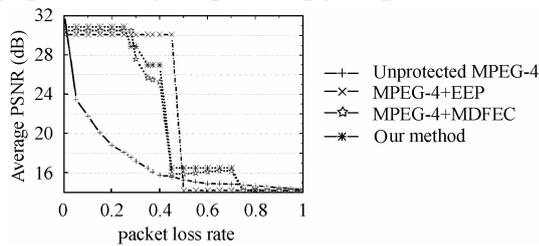


图 6 PSNR 均值随丢包率变化曲线

Fig.6 The curve of average PSNR vs. packet loss rate

2.5 时延与算法复杂度

将码流进行重排打包,并根据 IIBLSA 确定的满足最小率失真的 MPEG-4 编码码流的传输子基本层数及 RS 码的编码速率之后,就可以得到最后的打包结果。这种排列方法使得系统按列传输每个包,其实质是对最终的编码结果在传输前进行了交织,把可能发生的长突发错误分散到每行中,降低了信道错误的相关性,提高整个系统的抗误码能力。虽然交织本身会带来 N 倍的时延(系统在收到 N 个包之后才能进行译码),但由于本方法以帧为单位进行重排打包以及联合率失真优化,解码端必须在接收到 N 个包,并经过信道译码后,才能进行码流重排恢复,之后才能进行 MPEG-4 解码,所以交织并没有给系统带来额外的时延。而系统的整体解码时延是一帧。

从算法复杂度方面分析,对于标准的 MPEG-4 加入相同信道编码速率的等纠错保护方法,只要用枚举法就可确定信道编码速率(冗余度可选解从 0 到 $N-1$),因此其复杂度为 $O(N)$ 。对于本文采用的快速局部搜索法,最坏情况下,前向搜索从起始点 $(0, \dots, 0)$ 开始,结束于 $(N-1, f_2, \dots, f_L)$,总共搜索 N 次,共需计算 $(N-1)L+1$ 次率失真函数 D 的值,并进行 $(N-1)L$ 次比较,因此搜索算法在最坏情况下的计算复杂度为 $O(NL)$ 。

3 仿真结果

通过软件仿真,我们将本文提出的基于率失真的信道自适应不等纠错保护编码方案与标准 MPEG-4 编码方法,基本层不分子层并加入相同编码速率(RS编码)的标准 MPEG-4 编码方法(MPEG-4+EEP)以及标准的 MPEG-4 加入 Puri 等人提出的 MDFEC 方法(MPEG-4+MDFEC)做了比较(采用本文方法提供的信源率失真曲线)。测试序列采用 QCIF 格式的 Foreman 的 Y 分量,帧编码速率为 10Hz,序列第一帧作强制 I-VOP 编码,其余均为 P-VOP 编码。信道模型采用 GE 模型^[10]。

图 6 中显示了未保护 MPEG-4 方法, MPEG-4+EEP 方法, MPEG-4+MDFEC 方法和本文方法随丢包率变化时的性能曲线。横坐标丢包率定义为传输过程中丢失的分组数与编码端发送的分组数的比值。纵坐标平均 PSNR 值指的是编码 160

帧 Foreman 序列所得到的 PSNR 的平均值。由图中可以看出,未保护 MPEG-4 编码方法的性能随着丢包率的增大下降很快。等纠错保护方法在丢包率小于 45% 时性能稳定,而当丢包率大于 45% 时,性能迅速下降。这是由于丢失的分组已经超过了等纠错保护预先设计的纠错范围。本文方法在丢包率低于 28% 左右时,性能优于 MPEG-4+EEP 方法。这是由于本文方法采用基于率失真的信道自适应不等纠错保护,在丢包率低的情况下自适应地提高了信源和信道编码速率,因此用于重建的信源信息要高于同等情况下的 EEP 方法。而随着丢包率的增加,在 28% 到 50% 之间,本文方法性能低于 EEP 方法。这是由于随着信道条件的变差,本文方法自适应地增加了用于纠错保护的强度(信道编码速率),而减少了传送的信源比特数,因此平均性能低于 EEP。但这只有 22% 的出现概率,而在其余 78% 的情况下,本文方法优于 EEP。并且本文方法能够提供更加平缓的阶梯状下降的性能。对于 MPEG-4+MDFEC 方法,其设计思想也是采用基于率失真优化的不等纠错保护,所以随丢包率变化规律同本文方法相似。但由于它必须根据已知信道条件确定目标函数,要按照事先确定的最差信道条件进行设计,所以在丢包率小的情况下,加入了过多的冗余,性能劣于本文方法。而随着丢包率的增加,越来越接近其最初设计的目标,与本文方法的性能差距也逐渐减小。

图 7 显示了未保护 MPEG-4 方法, MPEG-4+EEP 方法, MPEG-4+MDFEC 方法和本文方法在丢包率为 5% 时 PSNR 随帧号变化的性能曲线。由图可以看出,本文方法在整个编码过程中可以提供最平稳的性能,而未保护 MPEG-4 方法受丢包影响最为明显。MPEG-4+MDFEC 的性能劣于本文方法,但优于未保护 MPEG-4 和 MPEG-4+EEP 方法。

仿真过程中采用 C 语言实现了本文提出的新算法以及 Puri 等人提出的 MDFEC 算法,在 Windows XP 操作系统,配置为 3.0GHz Pentium 4 CPU,内存为 512MByte 的同一台 PC 机上分别对标准 MPEG-4, MPEG-4+EEP, MPEG-4+MDFEC 以及本文方法进行仿真实验。编码器编码 Foreman 序列 10 帧所用的平均时间如表 1 所示。MPEG-4+EEP 算法由于要选取最优的信道编码速率,因此比 MPEG-4 算法多耗时 34.45%。而 MPEG-4+MDFEC 算法采用本文提出的信源率失真曲线(即采用本文提出的基本层分子层方法),并对每一帧基本层求出分子层数和每层对应的信道编码速率,因此又比 MPEG-4+EEP 算法多耗时 56.53%。而本文方法采用出错分组数 s 作为参数建立传输子层数和纠错强度的联合优化的目标函数(与 MDFEC 目标函数参数不同),并且采用迭代改进的局部搜索法取得最优化解(MDFEC 采用 Lagrangian 算法),因此虽然分别是 MPEG-4、MPEG-4+EEP 耗时的 2.08 倍和 1.55 倍,但是比 MPEG-4+MDFEC 算法少耗时 1.08%。

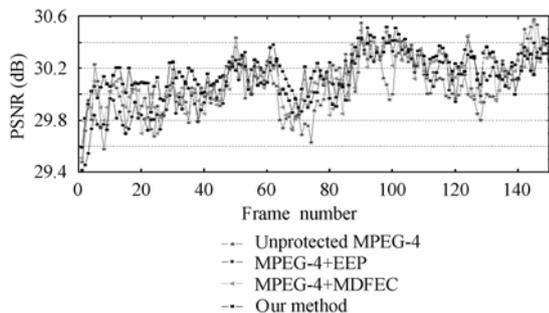


图 7 PSNR 随帧号变化曲线
Fig.7 The curve of PSNR vs. frame number

表 1 算法耗时比较

方法	MPEG-4	MPEG-4+EEP	MPEG-4+MDFEC	本文方法
耗时(ms)	6356.7	8546.9	13378.6	13234.5

4 结束语

本文提出了一种用于提高 MPEG-4 码流在噪声信道下的抗误码性能的联合信源信道编码方法。该方法将 MPEG-4 基本层按重要性进行码流重排后进行交织打包, 并根据率失真函数将基本层纹理信息进一步划分为多个子层。编码器根据反映信道状态的反馈信息动态地调整传输的子层数目, 使得系统失真最小。仿真结果表明, 本文方法明显优于未保护的 MPEG-4 方法, 在相同信道带宽及丢包率条件下比等纠错保护的 MPEG-4 编码方法获得更加稳定的性能。同时由于本文方法根据反馈的出错分组数进行传输子层数和纠错强度的联合优化, 与必须按照确定信道条件设计目标函数才能进行优化的 MDFEC 方法相比, 更能够适应信道条件的变化, 从而获得更高的性能。

参 考 文 献

[1] Sherwood P G, Zeger K. Progressive image coding for noisy channel. *IEEE Signal Processing Letters*, 1997, 4 (7): 189-191.
 [2] Lu J, Nostratinia A, Aazhang B. Progressive source channel coding for images over bursty error channels. *Proceedings of International Conference on Image Processing*, Chicago,

Oct.1998: 127-131.
 [3] Chande V, Farvardin N. Joint source-channel coding for progressive transmission of embedded source coder. *Proceedings of Data Compression Conference*, Utah, Mar.1999: 52-61.
 [4] Alatan A Aydin, Zhao M, Akansu Ali N. Unequal error protection of SPIHT encoded image bit streams. *IEEE J.on Select. Areas Commun.*, 2000, 18 (6): 814-818.
 [5] Brystrom M, Modestino J W. Combined source channel coding for transmission of video over a slow-fading Rician channel. *Proceedings of International Conference on Image Processing*, Chicago, Oct.1998, 2: 147-151.
 [6] Tse-Hua Lan, Tewfik A H. Power optimized mode selection for H.263 video coding and wireless communications. *Proceedings of International Conference on Image Processing*, Chicago, Oct.1998, 2: 113-117.
 [7] Zheng H, Liu K J R. Image and video transmission over wireless channel: A subband modulation approach. *Proceedings of International Conference on Image Processing*, Chicago, Oct.1998, 2: 132-136.
 [8] Boyce Jill M. Packet loss resilient transmission of MPEG video over the Internet. *Signal Processing: Image Communication*, 1999, 15(1-2): 7-24.
 [9] Rohit Puri, Kang-Won Lee, Vaduvur Bharghavan, An integrated source transcoding and congestion control paradigm for video streaming in the Internet. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2001, 3(1): 18-32.
 [10] Gilbert E N. Capacity of a burst-noise channel. *Bell Syst. Tech. J.*, 1960, 39(5): 1253-1265.

李平: 女, 1963年生, 博士生, 从事联合信源信道编码方面的研究工作。
 肖嵩: 女, 1977年生, 博士, 副教授, 主要从事图像压缩编码、联合信源信道编码等方面的研究工作。
 吴成柯: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理、图像通信、计算机视觉等方面的研究工作。