

一种新的信源、信道编码和差错隐藏的联合优化方法

苏英俊, 陆建华, 王 京

(清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 本文提出了一种基于广义的率失真函数的信源编码, 信道编码和差错隐藏联合优化的方法. 这种广义的率失真函数综合反映了视频信源经信源编码, 信道编码, 差错隐藏后的率失真特性, 因此可以用来进行视频通信系统收发端的联合优化. 仿真结果表明, 和传统的信源信道联合编码算法相比, 这种基于广义的率失真特性的联合优化可以取得更好的结果.

关键词: 广义率失真函数; 信源信道联合编码; 码率分配

中图分类号: TN919 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1803-04

A Novel Algorithm on Joint Optimization of Source Coding, Channel Coding and Error Concealment for Video Transmission

SU Ying-jun, LU Jia-hua, WANG Jing

(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084, China)

Abstract: This paper proposes a new methodology of joint optimization among source coding, channel coding and error concealment for wireless video transmission. Specifically, a generalized rate distortion function, which reflects the distortion rate due to source coding, channel coding, and error concealment, is established for optimal bits allocation, resulting an effective transmission of video data. Simulations confirm that the proposed scheme outperforms the conventional joint source channel coding schemes.

Key words: generalized distortion rate function; joint source channel coding; rate allocation

1 引言

随着各种无线多媒体通信系统的发展, 无线视频传输技术得到了越来越多的重视. 对于无线信道来说, 由于衰落、干扰和高斯白噪声等原因, 传输错误是不可避免的, 而这些传输错误将大大降低多媒体业务, 特别是视频业务的服务质量. 为此, 容错恢复编码技术近年来成为无线视频传输研究中的热点.

容错恢复视频编码技术的研究大致可以分为两类: 前向差错控制和差错隐藏技术. 前向差错控制的方法包括: 鲁棒信源编码(如插入再同步头、可逆变长编码等)、前向纠错编码、以及信源信道联合编码. 通过这些方法, 视频传输码流的抗差错能力将得到大大增强. 差错隐藏是通过空域和/或时域的平滑、插值以及滤波等技术, 使得丢失的图像信息可以在一定程度上得到恢复. 这两种方法对于可靠的视频传输都是很重要的^[2].

在已有的前向差错控制的方法中, 信源信道联合编码(以下简称 JSCC) 已经被认为是一种可以兼顾视频传输的效率和质量的有效编码方式^[1]. JSCC 中的关键问题是优化分配信源和信道编码的码率, 使得在传输带宽受限时, 传输解码后的失真

真最小. 传统的方法^[3,4]往往假设视频信源是统计平稳的, 然后对整个视频序列建立经验的或理论的率失真模型来进行码率分配优化; 并且只考虑信源编码和信道编码本身的性能, 而没有考虑差错隐藏技术的影响. 实际上, 差错隐藏技术对于提高无线信道中接收图像的质量是非常重要的. 另外, 现实中的视频信源并不能认为是平稳信源. 例如, 一帧图像的不同区域可能具有不同的复杂度、亮度对比和细节. 在进行码率分配时, 图像不同区域的特性应当予以充分考虑. 因此, 在充分考虑信源特性和差错隐藏的基础上进行图像信源不同区域的信源编码、信道编码将是很有必要的.

基于以上思想, 本文提出了一种针对图像局部区域的信源信道编码以及差错隐藏特性的广义的率失真函数. 利用该函数, 可以将视频编码中的最小编码单元自适应的合并为不同的区域, 使得属于同一区域的编码单元具有相近的广义率失真特性, 而码率的优化分配则可以在这些不同的区域上进行. 相对于以整个图像序列作为优化对象的传统的信源信道联合编码算法, 这种基于局部广义率失真特性的信源编码, 信道编码和差错隐藏的联合优化(以下简称 JSCE) 有可能取得更好的视频传输效果.

2 广义的率失真函数

信息论中的率失真函数 $D(R)$ 定义了熵压缩信源编码中失真和编码速率这两种不同的度量之间的关系. 现有的熵压缩视频编码标准, 如 H. 263 或 MPEG-4, 都是利用帧间的运动补偿和变换编码来压缩视频码流中的冗余度, 从而降低传输所需要的信道带宽. 在这样的视频编码器中, 进行运动补偿和决定量化电平的最小编码单元(MDU) 为宏块, 而其失真主要来自运动补偿的误差和变换系数的量化误差. 由于一般后者的影响要远大于前者^[2], 所以在本文中, 我们着重讨论量化误差的影响.

另一方面, 在无线视频传输中, 除量化失真之外, 无线信道的传输差错对图像质量的影响也是不可忽略的. 实际上, 和量化相比, 信道误码对重建图像质量的影响更为显著. 由于采用了帧间运动补偿, 前帧图像由于误码带来的失真会传播到下一帧图像; 同时, 在变长编码的解码时, 误码往往会导致解码器失步, 从而引起大量编码信息的丢失.

为了降低传输差错的影响, 可以根据图像信源内在的相关性在解码端引入差错隐藏. 一方面, 根据图像序列在时间上的相关性, 可以用前一帧运动补偿后的结果来替代本帧内丢失的图像宏块; 另一方面, 利用图像内部相邻宏块的相关性, 可以通过周围宏块的信息, 经过平滑、插值等技术, 来恢复丢失宏块的信息. 一般来说, 对于预测帧, 即 P 帧图像, 可以通过运动预测来进行差错隐藏; 对于非预测帧, 即 I 帧, 则采用空间平滑. 必须指出的是, 差错隐藏的能力直接影响整个视频通信系统性能的优劣.

基于以上讨论, 在进行无线视频传输的码率优化分配时, 我们将信源编解码, 信道编解码和差错隐藏联合起来进行考虑. 失真因素包括信源的量化误差, 信道传输错误而引起的失真, 以及差错隐藏的增益. 优化的目的, 是在一定的码流速率和信道条件下, 获得最小的端对端失真.

实现这种联合优化, 需要获得每一最小编码单元在一定的码率分配方案和信道条件下的端对端的失真期望值, 我们将之定义为广义的率失真函数, 用 $D(r_s, r_c | c)$ 表示, 其中 r_s 为信源编码的码率, 单位是比特/像素(bpp), r_c 为信道编码的效率, c 为信道的状态矩阵, 它和所选的信道模型有关. 例如, 对于加性高斯白噪声(AWGN)信道, 可以用一个的参数, 即信噪比 E_b/N_0 来表征信道状态.

本文中采用均方误差(MSE) 来作为图像失真的度量, 其表达式为:

$$d = \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (p_{n,m} - \hat{p}_{n,m})^2 \quad (1)$$

其中 M, N 为二维图像的大小, $p_{n,m}$ 和 $\hat{p}_{n,m}$ 为发送和接收图像像素的灰度值. 广义率失真函数 $D(r_s, r_c | c)$, 可由图像宏块丢失后经差错隐藏后的失真 d_L 和量化误差引起的失真 d_Q 加权得到, 如下式:

$$D(r_s, r_c | c) = P_e(r_s, r_c | c) d_L + (1 - P_e(r_s, r_c | c)) d_Q(r_s) \quad (2)$$

其中, $P_e(r_s, r_c | c)$ 为宏块的丢失概率, 它和信源信道的码率

分配 r_s, r_c , 以及信道编码的性能有关. 式(2)表明, 在相同的信道和信道编码条件下, 决定广义率失真特性的参数为 $d_Q(r_s)$ 和 d_L . 由于量化电平是离散的, 所以 $d_Q(r_s)$ 是一组离散点; 同时我们可以认为 d_L 是信源编码的码率为 0, 但经过差错隐藏之后的失真. 进一步, 我们构造由归一化后的不同量化电平下的失真和码率组成的特征矢量:

$$\mathbf{V}_{dr} = \mathbf{L}(\hat{d}_0, \hat{r}_{s0}), (\hat{d}_1, \hat{r}_{s1}), \dots, (\hat{d}_N, \hat{r}_{sN})^T \quad (3)$$

其中: $\hat{d}_i = d_i / d_{\max}$, $\hat{r}_{sN} = r_{sN} / r_{s\max}$, $i = 0, 1, \dots, N$ (4)

d_{\max} 和 $r_{s\max}$ 为所允许的最大失真和最大的信源编码速率. 同时定义 \mathbf{V}_{dr} 的范数为:

$$\|\mathbf{V}_{dr}\| = \left[\sum_{i=0}^N (d_i^2 + \hat{r}_{si}^2) \right]^{1/2} \quad (5)$$

则两矢量之间的度量可定义为:

$$\begin{aligned} d_{r-d}(\mathbf{V}_{dr}, \hat{\mathbf{V}}_{dr}) &= \|\mathbf{V}_{dr} - \hat{\mathbf{V}}_{dr}\| \\ &= \left[\sum_{i=0}^N ((\hat{d}_i - d'_i)^2 + (\hat{r}_{si} - r'_{si})^2) \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (6)$$

根据式(2)~(6)所定义的广义率失真函数和其特征矢量, 就可以获得对最小视频编码单元的信源编码、信道编码和差错隐藏率失真特性的有效描述, 从而可以利用它来进行码率分配优化, 以获得最小的端对端失真.

3 信源编码, 信道编码和差错隐藏的联合优化算法

基于上节所定义的广义的率失真函数及其特征矢量, 信源信道的码率优化分配可以在图像的宏块级上来进行. 但是, 这种组合优化运算的复杂度随优化单元的数目的增加而急剧增加, 从而使该问题成为典型的难解问题. 为降低运算复杂度, 可以在优化前将具有相同广义率失真特性的图像宏块合并, 从而使得优化单元的数目控制在可接受的范围之内. 假设合并后的区域控制在 N_0 以内, 则合并算法如下:

(1) 设定 d_{r-d} 门限值 T 的初始值为 T_0 .

(2) 选取一尚未合并的宏块 b_i , 并将之合并到新的区域 R_l . 如果所有宏块均已合并, 转入(4).

(3) 对于尚未合并的宏块 b_j , 其率失真矢量为 $\hat{\mathbf{V}}_{dr}$, 如果对区域 R_l 中的任何一个宏块 b_i , 都满足:

$$d_{r-d}(\mathbf{V}_{dr}, \hat{\mathbf{V}}_{dr}) < T \quad (7)$$

则将宏块 b_j 归为区域 R_l . 其中 \mathbf{V}_{dr} 为 b_i 的率失真矢量. 否则, 转入(2).

(4) 如果合并后的区域数目 $N > N_0$, 则将 T 增加 ΔT , 转入式(2)重新开始.

采用以上算法, 每帧图像被分割为若干区域, 而属于同一区域的图像宏块具有相近的广义率失真特性, 从而可以采用相同的码率分配.

针对整个图像序列的码率优化分配可以分解为两步. 首先是对所有的区域, 在给定的总码率下, 获得其最佳的码率分配方案:

$$\begin{aligned} D_l^*(r_{s+c}, l) &= \min_{r_s, l, r_c, l} K_l [(1 - P_e(r_{c,l}, r_{s,l} | c)) d_{Q,l}(r_{s,l}) \\ &\quad + P_e(r_{c,l}, r_{s,l} | c) d_{L,l}] \end{aligned} \quad (8)$$

其中 K_l 为该区域中 MDU 的数目, $r_{s,l}, r_{c,l}$ 满足:

$$r_{s_i} \neq r_{c_i}, i = r_{s+c}, l \quad (9)$$

r_{s+c}, l 是分配给该区域每一 MDU 的总码率。

然后将总码率在图像的各区域上进行优化分配,

$$D_{s+c}(r_{s+c}) = \min_{r_{s+c}, i} \sum_l D_l^*(r_{s+c}, l) \quad (10)$$

总码率满足:

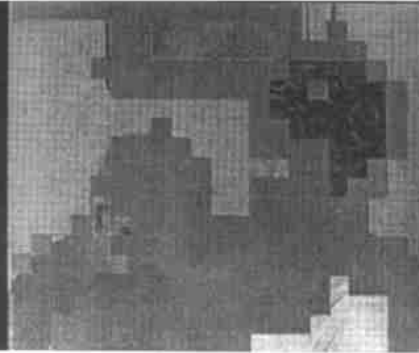
$$\frac{1}{K} \sum_{l=1}^K K_l \cdot r_{s+c}, l \leq r_{s+c} \quad (11)$$

其中 r_{s+c} 为信道可以传输的总码率, K 为总的最小编码单元

图 1(a)、(b) 给出了 I 帧编码时按广义率失真特性进行图像区域合并的结果。该图像被分为两种区域, 其中 (a) 为平滑区域, (b) 为边缘和细节区域。从图 1 可以看出, 图像中具有相近的广义率失真特性的宏块被归为一类, 从而为针对局部图像特性的联合码率分配提供了可能。

根据图 1 的合并结果, 我们采用帧内编码模式, 总码率限制为 0.79bpp, 根据式(8)~(11)对这些区域进行码率分配的优化, 优化的结果为平滑区域的量化电平为 11, $r_c = 1$, 即不采用信道编码保护; 细节和边缘量化电平为 7, $r_c = 1/3$ 。经过信道传输, 信道信源解码和差错隐藏, 其结果为图 2(a)。作为对比, 图 2(b) 给出了 JSCC 的结果, 它是以整幅图像为单位, 按照式(8)进行信源信道的联合码率分配, 其结果为量化电平为 8, $r_c = 1/2$ 。可以看出, JSCE 的 PSNR 值要比 JSCC 的 PSNR 值高 9.2dB。

图 3 给出了对图像序列进行仿真的结果。其信源编码方式是每 10 帧插入一个帧内编码的帧, 其余的都采用



(a)平滑区域



(b)细节和边缘区域

图 1 基于广义率失真函数的图像区域合并结果



(a)JSCE 的仿真结果, PSNR=33.5dB



(b)JSCC 的仿真结果

图 2 JSCE 和 JSCC 的传输结果对比

帧间预测编码, 码率限制是 0.11 比特每像素。图中的 JSCC 曲线是对整个图像序列进行信源编码和信道编码的进行码率优化分配的结果, 而 JSCE 曲线则是综合考虑信源编码、信道编码和差错隐藏后先进行区域合并, 然后在对这些区域进行码率的优化分配的结果。

从图 2 和图 3 可以看出, 由于一幅图像内的不同区域可能具有不同的复杂度和细节, 其信源编码引起的失真对量化电平的敏感程度是不同的; 同样, 不同区域的信息丢失后差错隐藏的效果也差别很大。经过这种全局的码率优化分配, 量化电平和信道编码的保护程度可以根据每部分的广义率失真特性进行调整, 从而可以获得比传统的信源信道联合优化更好的结果。

5 总结

针对无线视频序列的有效和可靠传输, 本文提出了一种基于广义率失真函数的信源编码, 信道编码和差错隐藏的联

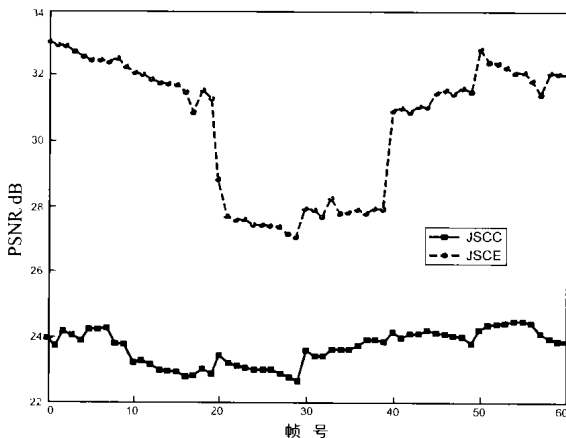


图 3 对 mother daughter 图像序列进行仿真的结果, $r_{s+c} = 0.11$ bpp. JSCC: 量化电平为 8, $r_c = 2/3$; JSCE: 3 种量化电平 (7, 8, 11), $r_c = 1/3, 2/3, 1$

合优化算法. 仿真结果表明, 由于这种广义率失真函数综合反映了图像每一区域对量化电平和信道误码的失真敏感程度, 因此它可以比传统的以整幅图像或以整个图像序列来进行码率联合优化的方法取得更好的效果.

参考文献:

- [1] J Lu, et al. Mobile image transmission using combined source and channel coding with low complexity concealment [J]. Signal Processing: Image Communication, 1998, 12(2): 87- 104.
- [2] Y Wang, et al. Error control and concealment for video transmission: a review [J]. Proc. IEEE, 1998, 86(5): 974- 997.
- [3] M Bystrom, et al. Combined source channel coding schemes for video transmission over an additive white Gaussian noise channel [J]. IEEE J. Select. Areas Commun. , 1998, 18(6): 332- 337.
- [4] G Goldsmith, et al. Joint design of fixed rate source codes and multiresolution channel codes [J]. IEEE Trans. Commun. , 1998, 46(10): 1301- 1312.
- [5] ISO/ IEC. MPEG 4 Video Verification Model Version 14. 0 [S], 1999.
- [6] J Hagenauer. Rate compatible punctured convolutional codes (RCPC) and their applications [J]. IEEE Trans. Commun. , 1988, 36(4): 389 - 400.
- [7] C Li, et al. Error resilient video transmission with adaptive stream shuffling and bit directional error concealment [A]. IEEE Workshop on Signal Processing Systems, SiPS: Design and Implementation [C], 2000: 33- 42.

作者简介:



苏英俊 男. 1975 年 11 月出生于山东, 1998 年毕业于清华大学电子工程系, 获学士学位. 现在清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室攻读博士学位. 主要研究方向为无线多媒体通信中的信源信道联合编码技术.



陆建华 男. 1963 年 7 月出生于江苏, 分别于 1986 年和 1989 年获得清华大学电子工程系工学学士和硕士学位. 并于 1998 年获得香港科技大学电子与电气工程系博士学位. 现任清华大学电子工程系教授. 研究方向包括无线通信系统、无线多媒体通信、图像通信以及无线网络等.



王 京 男. 清华大学电子工程系教授, 微波与数字通信国家重点实验室副主任. 主要研究方向为第三代和第四代移动通信技术, 现为中国第三代移动通信研究开发项目总体组成员, 国家“十五” 863 计划通信技术主题专家, 中国电子学会和 IEEE 通信学会的高级会员.