

一种改进的联合信源信道编码算法

周 坤, 李建华, 李志欣

(大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 分析了信源信道率失真模型及端到端的总失真模型。在此基础上, 提出了一种改进的联合信源信道失真估计模型。

关键词: 联合信源信道编码 率失真模型 宏块帧内刷新率

随着计算机、通信、网络以及多媒体等高新技术的飞速发展, 视频图像在无线信道的传输作为多媒体通信中的一个重要组成部分日益受到人们的关注, 成为当今高科技研究领域的一大热点。其中的传输信道受带宽限制, 且存在各种干扰噪声, 这就要求视频图像传输系统既要采用有效的数据压缩方法来降低传输码率, 尽量节省传输信道带宽; 同时要引入差错控制方案抵制信道噪声的干扰。早期的研究一般基于 1948 年 Shannon 提出的“分离理论”, 即采用当前最佳的信源编码器对视频数据实现最大程度的压缩, 然后再采用最佳的信道编码技术对信源输出码流进行误码保护。然而, 事实证明这种将最优的信源编码方案与最优的信道编码方案简单级联的方法并不一定能使整体性能达到最优。因此很多学者开始致力于联合信源信道编码 JSCC (Joint Source Channel Coding) 在无线信道中图像传输领域应用的研究。

联合信源信道编码将信源编码特性与信道条件结合, 采用不同的联合策略及优化方法使端到端图像质量达到最佳。本文先简要分析了文献[2]提出的信源信道率失真预测模型以及端到端的总失真模型, 在此基础上做出了相应的改进。(1) 本文采用数学求极值的方法在一定的信道条件下得到帧内宏块的最佳分配参数。与文献中的枚举方法相比, 本方法降低了运算量, 减少了运算时间; (2) 在帧内宏块位置的选择上, 考虑图像相邻帧的运动特性, 引入了宏块运动复杂度的概念, 作为帧内宏块位置的选择依据。实验证明, 改进的选择策略能够根据自身运动的剧烈程度选择适当位置的宏块进行帧内编码。总之, 改进后的联合信源信道失真估计模型的性能大大提高。

1 基于宏块帧内刷新率(β)的信源信道失真分析

宏块帧内刷新是一种非常有效的增强系统容错性的方法。因为帧内宏块的解码不需要前一帧的信息, 因而, 当前一帧宏块的信息位被信道误码“污染”后, 采用帧内编码模式将阻止误码的继续传播, 而由于帧间编码需要依靠前一帧的信息重建图像, 所以帧间编码的宏块

将把误码继续传播到下一帧中。如此累积将导致解码端重建图像的严重失真。由于帧内编码是对原图像数据进行编码, 而帧间编码只对运动补偿后的差图像进行编码, 所以帧内编码的宏块要比帧间编码的宏块产生更多的位, 从某种意义上说避免误码传播与编码效率之间是相互矛盾的。为了解决以上问题, 必须折衷考虑帧内/帧间编码宏块的个数, 保证在目标位下, 重建图像质量达到最佳。记 β 为帧内宏块占一帧总宏块数的百分比, 称为宏块帧内刷新率。一旦 β 确定后, 帧内宏块数 M_{intra} 就可由 $M_{\text{intra}} = M \cdot \beta$ 得到, 其中 M 为一帧宏块总数。

1.1 信源编码的 R-D 模型

文献[2]提出了 ρ 域码率控制算法, 其中 ρ 为 DCT 系数量化后为零的系数所占的百分比。信源比特率 R_s 和失真度 D_s 可以近似为 ρ 的函数:

$$R_s(\rho) = \theta \cdot (1 - \rho) \quad (1)$$

$$D_s(\rho) = \sigma^2 e^{-\alpha(1-\rho)} \quad (2)$$

其中: θ 为常量, σ^2 为原始图像数据的方差。

在基于宏块帧内刷新率的编码中, 还要考虑 β 对信源 R-D 模型的影响。实验证明, 在给定目标码率 R_s 的情况下, 信源的失真度 D_s 与 β 也呈递增关系。其模型可近似表示为:

$$D_s(R_s, \beta) = D_s(R_s, 0) + \beta(1 - \lambda + \lambda\beta)\Delta D_s \quad (3)$$

其中: $\Delta D_s = D_s(R_s, 1) - D_s(R_s, 0) > 0$

$D_s(R_s, 1)$ 和 $D_s(R_s, 0)$ 分别为一帧全部为 Intra 宏块 ($\beta=1$) 和全部为 Inter 宏块 ($\beta=0$) 情况下的信源失真度, λ 为常量, 本文实验中取 1.25。图 1 给出了信源码率为 150kbps、 $\beta=0.2$ 和 0.6 的测试条件下, Clair 序列的实验结果。由图 1 可以看出, 模型(3)能够非常准确地预测信源编码的失真度。

1.2 信道编码的失真模型^[2]

在误码率为 p_e 的信道中传输视频码流时, 合理选择 β 是抗击误码传播、获得较好的重建图像质量的关键。因而, 信道失真度不仅与 p_e 有关还与 β 密切相关。然而, 信道编码不可能纠正所有误码, 因此在解码端通常

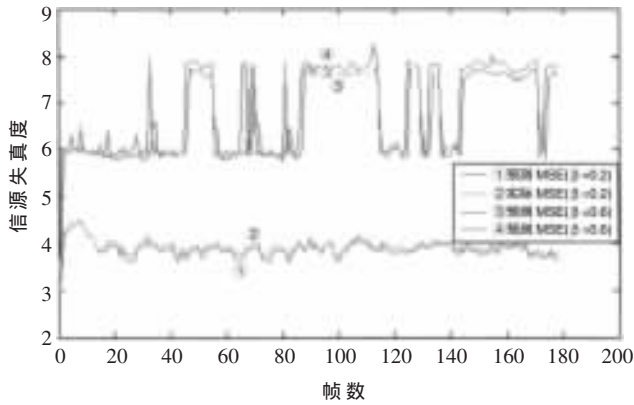


图1 信源编码的实际MSE与模型(3)预测的MSE

采取误码隐藏技术来对误码作进一步的纠正。采用简单易实现的误码隐藏方法,即当解码器检测出当前宏块信息发生错误时,复制前一帧对应宏块的信息进行掩盖,这样得到信道失真模型为:

$$D_c^I(n) = \alpha p_e \cdot MSE_{img}(n, n-1) + p_e \cdot D_c(n-1) \quad (4)$$

$$D_c^P(n) = \alpha p_e \cdot MSE_{img}(n, n-1) + [(1-p_e)b + p_e] \cdot D_c(n-1) \quad (5)$$

其中: $MSE_{img}(n, n-1)$ 为当前帧与前一帧原始图像的MSE(Mean Square Error), a, b 为常量。结合刷新率 β , 信道总失真度的递归模型为:

$$D_c(n) = \beta D_c^I(n) + (1-\beta) D_c^P(n) = [(1-\beta)(1-p_e)b + p_e] \cdot D_c(n-1) + \alpha p_e \cdot MSE_{img}(n, n-1) \quad (6)$$

1.3 端到端的失真模型及 β 的选取

实验证明,端到端的总失真度 D 与信源的量化失真和信道失真之和 $D_s + D_c$ 有近似关系,即 $D \approx D_s + D_c$ 。图2是序列 Forman 在 $p_e=0.02$ 、信道码率取 500kbps 下的实际测试结果。其中:

$$e_D = \frac{(D_s + D_c) - D}{D}, \text{反映 } D \text{ 与 } D_s + D_c \text{ 的近似程度。}$$

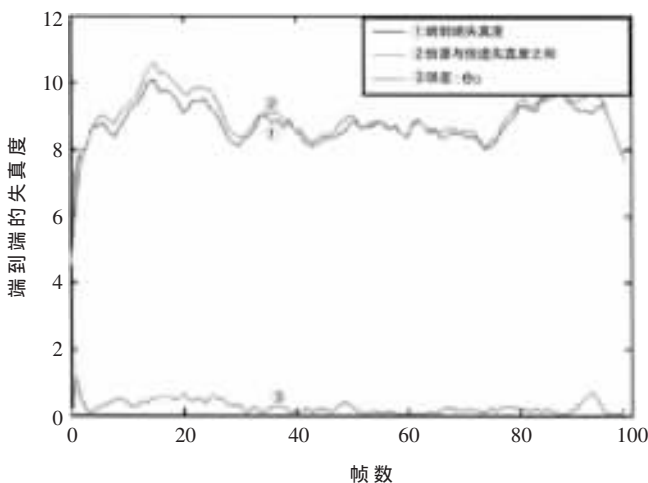


图2 端到端的失真度

由图2可知这种假设是合理的。根据上两节已经得到的 D_s, D_c 预测模型,总体失真度模型为:

$$D = D_s + D_c = D_s(R_s, 0) + \beta(1-\lambda + \lambda\beta) \cdot \Delta D_s + [(1-\beta)(1-p_e)b + p_e] \cdot D_c(n-1) + \alpha p_e \cdot MSE_{img}(n, n-1) \quad (7)$$

$$\Delta D_s = D_s(R_s, 1) - D_s(R_s, 0)$$

式中: $D_s(R_s, 0)$ 和 $D_s(R_s, 1)$ 均可以在编码前由式(2)估计出。

文献[2]中采用一定范围内穷举 β 的方法来确定最佳的 β 值,然而此方法增加了运算量,针对这一点本文做出了如下改进。对式(7)整理得:

$$D = \lambda\beta^2 \cdot \Delta D_s + (1-\lambda)\beta \cdot \Delta D_s + [(1-\beta)(1-p_e)b + p_e] \cdot D_c(n-1) + D_s(R_s, 0) + \alpha p_e \cdot MSE_{img}(n, n-1) \quad (8)$$

由式(8)可以看出,在一定的信道条件下,总失真度 D 为 β 的二次函数,利用数学求极值的方法对 D 求导,即可以得到极限情况下最佳 β 的取值。

$$\frac{dD(n)}{d\beta} = 2\lambda\beta\Delta D_s + (1-\lambda)\Delta D_s - b(1-p_e) \cdot D_c(n-1) = 0 \quad (9)$$

由式(9)解得:

$$\beta = \frac{b(1-p_e) \cdot D_c(n-1) - (1-\lambda)\Delta D_s}{2\lambda\Delta D_s} \quad (10)$$

$$\Delta D_s = D_s(R_s, 1) - D_s(R_s, 0)$$

对式(9)再求一次导得:

$$\frac{d^2D(n)}{d\beta^2} = 2\lambda\Delta D_s \quad (11)$$

$\lambda, \Delta D_s$ 均大于0,则 $\frac{d^2D(n)}{d\beta^2} > 0$,说明由式(10)确定的 β 值能够保证端到端的失真度 D 最低。

2 帧内宏块的选择策略

得到宏块帧内刷新率 β 后,在对视频图像编码前还必须解决的一个问题就是帧内宏块位置的选择问题。本文提出了一种新的选择方案,即引入宏块运动复杂度 MAD_{mi} 的概念。以 MAD_{mi} 的大小来衡量宏块内像素的变化情况,从而确定帧内/帧间编码模式。 MAD_{mi} 定义为相邻两帧图像的绝对差,如式(12)所示。它在一定程度上反映了相邻图像帧之间内容和运动性变换的剧烈程度。

$$MAD_{mi}(k, l) = \frac{\sum_{i=1}^{M \times N} |f_i(k, l) - f_i(k-1, l)|}{M \times N} \quad (12)$$

$f_i(k, l)$ 和 $f_i(k-1, l)$ 分别为当前帧和上一帧图像中第 l 个宏块,第 i 个像素的像素值。 $M \times N$ 为宏块的大小。当序列中某个宏块的运动比较剧烈时,它对应的 $MAD_{mi}(k, l)$ 值就比较大;反之,比较小。

在给出宏块运动复杂度的概念之后,本文的帧内宏块选择策略可以分为以下三个步骤:

- (1)由式(12)计算出每个宏块的运动复杂度 MAD_{mi} ;
- (2)将 MAD_{mi} 按照由大到小的顺序排列,同时记录排序后宏块的原始位置;
- (3)从排序后的宏块中选取 $M_{min} = M \cdot \beta$ 个进行帧内编码。

(下转第96页)

(上接第 70 页)

3 仿真实验结果

为了验证改进算法的效果,本文分别对文献[2]提出的随机选取算法、文献[3]介绍的顺序刷新算法、不采用帧内宏块刷新的原始方法以及本文算法进行仿真实验。分别对 Clair、Carphone、Forman 三个运动剧烈程度不同的 80 帧图像进行测试。帧率为 25 F/s, I 帧量化参数为 15, 信道速率为 272kbps, 信道编码码率为 223/255(≈ 0.87), 信道误码率 p_e 为 0.15。表 1 为不同方法下信噪比 PSNR 的对比情况。

表 1 不同方法下的 PSNR 的对比情况

序列	MADmd	Random	Order3	Original
clair	38.84	38.13	36.94	35.76
carphone	31.59	31.25	27.99	27.89
forman	29.45	28.49	24.41	24.80

由表 1 可以看出,改进的算法要比随机选取算法高出约 0.6dB, 而比顺序刷新和原始方法更要高出约几个 dB。新算法使信噪比 PSNR 有了明显的提高。

本文在分析联合信源信道编码率失真模型的基础上,采用数学求极值的方法在编码之前求出最小信噪比情况下的最优帧内宏块刷新率 β 。而在帧内宏块位置的选择上,本文提出了一种新的选择算法,即根据宏块的运动复杂度大小对宏块重新排序,再由已得到的 β 选出最佳宏块位置。实验结果证明,新算法无论在信噪比上还是在图像的重建质量上都优于其他算法。

参考文献

- [1] HE Z, KIM Y K, MITRA S K. Low-delay rate control for DCT video coding via ρ -domain source modeling. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol, 2001, 11(8): 928-940.
- [2] HE Z, CAI J, CHEN C W. Joint source channel rate-distortion analysis for adaptive mode selection and rate control in wireless video coding. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol, 2002, 12(6): 511-523.
- [3] LIAO J Y, VILLASENOR J. Adaptive intra block update for robust transmission of H.263. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol, 2000, 10(2): 30-35.

(收稿日期:2006-09-01)