

移动环境视频编码功率-码率-失真模型研究

韦 耿¹, 吴乐南², 朱 斌³

(1 河海大学 计算机与信息学院, 江苏 南京 210098; 2 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096;

3 重庆大学 通信工程学院, 重庆 430074)

摘 要: 在前期建立视频编码动态功耗模型的基础上, 将功率因子引入到经典率失真理论, 并对经典码率模型及失真模型进行修正, 进而建立视频编码功率-码率-失真模型. 实验结果表明, 该模型具有较高的精确性, 为实现功耗约束条件下视频质量、带宽、功耗达到动态平衡的最优提供理论指导.

关键词: 视频编码; 码率模型; 失真模型; 量化参数; 帧内刷新率

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)03-0013-04

Research on the Power-rate-distortion Model of the Video Coding in Mobile Environments

WEI Geng¹, WU Le-nan², ZHU Bin³

(1 School of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2 School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3 School of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In this paper, based on the preliminary power model, we introduce the power factor to the classical rate distortion model, and then amend the traditional rate model and the distortion model. After that we set up the dynamic power rate distortion model based on the quantization parameter and intra rate. The simulation results showed the accuracy and robustness of the three dimension model. The model will pave a way for the dynamic control and optimization of the power, video quality and bandwidth in the wireless video coding.

Key words: video coding; rate model; distortion model; quantization parameter; intra rate

1 引言

经典的率失真理论都是以码率为约束, 研究码率和失真之间的关系. 伴随着无线移动通信技术的快速发展和先进的音视频压缩技术的出现, 码率的约束越来越弱, 而无线移动终端在处理能力和功耗上所受的制约却越来越强. 在此情况下, 必须考虑终端功耗约束对视频质量的影响. 因此, 建立视频编码的联合功率广义率失真模型是一个迫切需要解决的问题.

目前针对视频编码率失真问题开展研究的相关

成果包括: 文献[1]提出了在功率约束条件下的信源编码功率率失真分析方法. 文献[2]提出用编码端的码率控制来去掉反馈. 文献[3]提出一种低质量参考 Hash, 即 WZ 帧用零运动矢量 H. 264 压缩的版本. Ding^[4]通过在编码端将数据分为两类进行不同的编码及在解码端利用软边信息的方法, 有效地改善编码性能, 但在如何有效利用视频序列统计特性设计高效的量化器方面却存在很多不足. 文献[5]在多跳网络中对信源编码和基于网络支持的分布式差错控制进行联合研究, 取得了良好的效果, 但所提出的方法对信道编码缺乏普适性, 且对不同的视频源序

收稿日期: 2010-06-02; **修回日期:** 2010-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(60572063); 重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2008BB2313); 江苏省博士后科研基金项目(0901027C)

列可伸缩性较低. 迄今为止, 尚未看到综合考虑功率约束条件下定量研究视频编码功率失真三维模型的研究成果.

本文在前期已建立的视频编码动态功耗模型^[6]的基础上, 将功率因子引入到经典率失真模型中, 并利用帧内刷新率及量化参数对经典码率模型及失真模型进行修正, 进而建立功率-码率-失真三维模型.

2 视频编码功耗模型

为表示完整, 重写已建立的功耗模型表达式^[6]:

$$P(\beta, q) = p_3\beta + p_2q^2 + p_1q + p_0 \quad (1)$$

式中, β, q 分别表示帧内刷新率和量化参数. p_3, p_2, p_1 和 p_0 为模型参数. 该模型表明帧内刷新率对编码功耗的影响是线性的, 而量化参数的影响是二次型的.

3 视频编码码率模型

在实际编码系统中, R-D 曲线难以用精确的数学方法进行建模^[7]. 因此, 一般采用实验和理论分析相结合的方法确定码率控制模型. 经典的基于量化参数的码率二次模型如下式:

$$R(q) = a \times q^2 + b \times q + c \quad (2)$$

式中, $R(q)$ 为编码输出码率, q 为量化参数, a, b, c 为模型参数, 该模型反映了码率随量化参数的变化关系.

视频编码标准通常采用帧内 / 帧间预测方法消除视频序列中的时空域冗余. 帧间编码方式由于采用了运动估计和补偿等方法消除了数据间的时域相关性, 将极大地降低编码的输出码率; 而为了消除误差的蔓延, 应该进行周期性的帧内编码, 这同时会增大编码的输出码率. 因此, 帧内刷新率 β 对编码输出码率有着重要的影响.

设以帧内方式对某帧编码时产生的码率为 R_{Intra} , 以帧间方式编码时产生的码率为 R_{Inter} . 共编码 N 帧, 其中帧内编码方式的有 N_{Intra} 帧, 帧间编码方式的有 N_{Inter} 帧, 由于 $\beta = N_{\text{Intra}}/N$, 且 $N = N_{\text{Intra}} + N_{\text{Inter}}$, 则平均每帧输出码率为

$$R = (R_{\text{Intra}} - R_{\text{Inter}})\beta + R_{\text{Inter}} \quad (3)$$

在实际的编码过程中, 由于视频场景及内容的变化等原因, R_{Intra} 和 R_{Inter} 并不是常量, 实际的输出码率和式(3)的结果会有所不同. 但是式(3)却揭示了这样一个事实: 编码输出码率和帧内刷新率呈线性关系. 更一般地, 式(3)可表示如下:

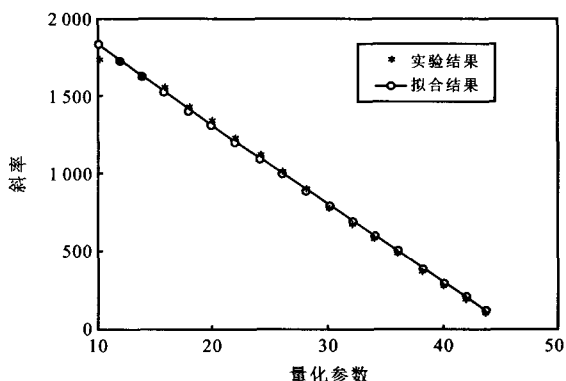
$$R(\beta) = d\beta + e \quad (4)$$

式中, d, e 是模型待定参数, 由于 $R_{\text{Intra}}, R_{\text{Inter}}$ 和量化参数 q , 由式(3)可知, d, e 也和 q 有关, 可表示成 q 的函数: $d = f(q), e = g(q)$.

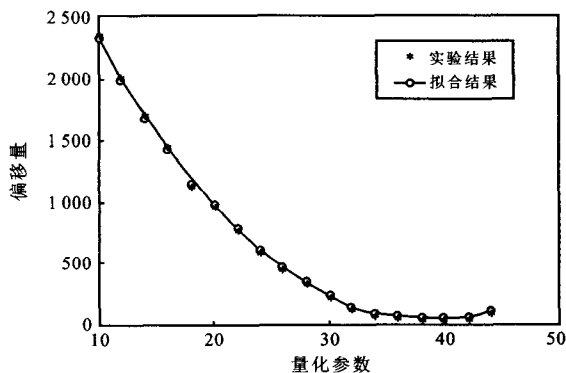
为了寻求 $f(q), g(q)$ 的显式表达式, 按如下方法进行实验. 对每个固定的量化参数 q_i , 采用不同的帧内刷新率 β 进行实验, 根据式(4), 对实验结果进行曲线拟合, 即可获得对应的一组 (d_i, e_i) , 改变 q_i 的值, 获得对应的另一组 (d_i, e_i) , 依此类推, 最后可得到曲线 $d-q$ 和 $e-q$. 图 1 所示为实验结果, 可以看出, 斜率 d 和量化参数 q 、偏移量 e 与量化参数 q 具有二次线性关系. 因此 $f(q), g(q)$ 可表示如下:

$$\begin{cases} f(q) = f_2q^2 + f_1q + f_0 \\ g(q) = g_2q^2 + g_1q + g_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $f_2, f_1, f_0, g_2, g_1, g_0$ 为模型参数, 一般通过数学拟合的方法求得.



(a) 斜率和量化参数的关系曲线



(b) 偏移量和量化参数的关系曲线

图 1 斜率 d 和偏移量 e 与量化参数 q 的关系曲线

从图 1 中还可以看出, 式(5)较准确地描述了式(4)中斜率 d 及偏移量 e 和量化参数 q 间的对应关系.

结合式(4)和式(5), 合并量化参数 q 项, 则有

$$R(\beta, q) = (r_5\beta + r_2)q^2 + (r_4\beta + r_1)q + (r_3\beta + r_0) \quad (6)$$

式中, $r_5 = f_2, r_4 = f_1, r_3 = f_0, r_2 = g_2, r_1 = g_1, r_0 = g_0$ 为模型参数.

比较式(2)和式(6)可以看出, 这两个公式具有

相同的形式. 式(2) 阐明了在一定的帧内刷新率条件下视频编码输出码率和量化参数之间的关系. 而式(6) 充分考虑帧内刷新率和量化参数对编码码率的影响. 因此, 可以认为式(2) 是式(6) 的特例.

4 视频编码失真模型

文献[8] 指出, 编码失真和量化参数之间服从线性关系, 即

$$D(q) = m \cdot q \quad (7)$$

式中, m 是模型参数, 和视频内容统计特性有关. 针对某一视频序列而言, 可通过后处理曲线拟合的方法求取.

模型(7) 被很多文献采用, 主要原因是该模型较为简单, 且具有普适意义. 需要指出的是, 由于帧内编码的主要作用之一就是周期性地控制误差的蔓延, 提高帧内刷新率 β 意味着提高编码性能. 因而应当考虑 β 编码失真的影响. 图2 示出了编码失真 D 和帧内刷新率 β 的关系图. 可以看出, 在高码率(量化参数取大值时) 和低码率(量化参数取小值时) 的情况下, 虽然 β 的影响有所不同, 但这种差别并不是很明显. 因此, 可以认为 β 对编码性能的影响在高码率和低码率的情况下是相同的. 即从直观上说, 不同量化参数 q 时的 R - β 是平行的, 即帧内刷新率对编码性能的影响是可加性的. 因此, 考虑帧内刷新率的影响后, 式(7) 可修正如下:

$$D(\beta, q) = d_2\beta + d_1q + d_0 \quad (8)$$

式中, d_0, d_1, d_2 为模型参数, 可用数学拟合的方法计算出来.

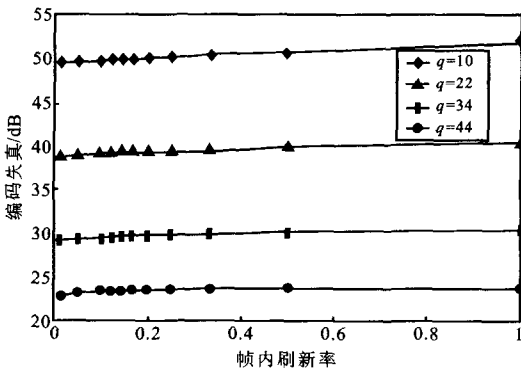


图2 编码失真和帧内刷新率的关系曲线

5 功率率失真模型

由于难以对信源分布特性和压缩系统进行数学建模, 因此直接建立 P-R-D 三维模型几乎是不可能的任务, 建立基于中间编码参数的 P-R-D 模型是行

之有效的研究方法. 以上几节我们分别建立基于量化参数和帧内刷新率等中间编码参数的视频编码功耗模型、码率模型和失真模型, 结合式(1)、(6)、(8) 的结果, 即可得到基于量化参数和帧内刷新率的 P-R-D 模型:

$$\begin{cases} (1) P(\beta, q) = p_3\beta + p_2q^2 + p_1q + p_0 \\ (2) R(\beta, q) = r_5\beta^2 + r_4\beta q + r_3\beta + r_2q^2 + r_1q + r_0 \\ (3) D(\beta, q) = d_2\beta + d_1q + d_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $p_3, p_2, p_1, p_0, r_5, r_4, r_3, r_2, r_1, r_0, d_2, d_1, d_0$ 为模型参数, 它们和视频内容相关. 从式(9) 表明, 视频编码功耗、码率和失真三者之间是有很强的内在联系的, 它们通过编码量化参数和帧内刷新率强耦合地联系在一起. 在由编码功耗、编码码率和编码失真组成的三维流面中, 任意一个参量微小的变化都将引起整个流面的波动. 例如, 如果功耗 P 的大小发生变化, 势必导致中间编码参数即量化参数和帧内刷新率的变化, 从而引起编码码率和编码失真相应的变化, 反之亦然. 因此, 建立视频编码 P-R-D 的三维动态模型, 将满足在一定条件下使视频数据在功耗约束及带宽受限条件下达到视频质量、带宽、功耗动态平衡的最优. 这种内在联系为设计符合各种需要的无线通信系统提供了理论指导.

6 实验结果

为验证所建立模型的准确性, 实验如下: 实验平台为 H. 264 源编解码器 JM86, 采用 6 个序列 (Bus, Coastguard, Football, Foreman, Mobile, News) 的前 100 帧进行测试, 图像大小为 QCIF (176 × 144) 格式. 这 6 个序列基本涵盖了视频场景的所有运动特征和内容细节. 运动估计采用一个参考帧并以 SAD 为匹配准则; 运动向量取 1/4 像素精度, 最大搜索范围是 16; 帧率为 30 frame/s; 使用哈达码变换和率失真优化; 采用统一变长编码 (UVLC) 进行熵编码; 取量化参数 $q = (10, 12, \dots, 42, 44)$ 共 18 个、帧内刷新率 $\beta = (1, 5, 10, 12.5, 14.29, 16.67, 20, 25, 33.33, 50, 100)\%$ 共 11 个.

(1) 验证功耗模型

可参见文献[6].

(2) 验证码率模型

以 Bus 序列为例, 经过拟合, 求得模型参数为 $r_5 = 0.23, r_4 = -37.90, r_3 = 1288.44, r_2 = 2.72, r_1 = -220.00, r_0 = 4543.69$. 表 1 中列出了 $\beta = (5, 10, 16.67, 25, 50)\%, QP = (12, 16, 20, 24,$

28, 32, 36) 时相应的模型预测误差 δ_R , δ_R 定义如下:

$$\delta_R = \frac{R_m - R}{R} \cdot 100\%$$

式中, R_m , R 分别为模型计算结果和实测结果.

可以看出, 在高码率条件下 ($QP = 12$), 模型预测的相对误差小些; 而在低码率条件下, 模型的预测误差大些. 这是因为在低码率时, 数据量很小, 产生的一点绝对误差都会造成很大的影响的缘故.

表 1 码率模型预测误差结果 %

$\beta(\%)$	5	10	14.29	16.67	25	50
$QP = 12$	-0.58	-0.5	-0.16	-0.04	-0.3	0.27
$QP = 16$	0.45	0.52	0.91	0.95	0.83	1.28
$QP = 20$	3.03	3.03	3.48	3.59	3.18	3.18
$QP = 24$	2.48	2.72	2.93	3.14	3.14	3.49
$QP = 28$	-2.34	-1.71	-1.19	-0.81	-0.29	1.23
$QP = 32$	-10.69	-9.46	-8.42	-7.67	-6.41	-2.62
$QP = 36$	-21.46	-19.27	-18.01	-16.83	-14	-7.92
$QP = 40$	-13.49	-12.15	-11.38	-10.69	-8.67	-4.88

(3) 验证失真模型

以 News 序列为例, 求得失真模型参数为 $d_2 = 0.9225$, $d_1 = -0.7393$, $d_0 = 57.8313$, 表 2 所示为相应的模型预测误差. 可以看出, 失真模型是非常精确的, 最大的预测误差仅为 -0.3383 dB ($QP = 16$, $\beta = 50\%$).

表 2 失真模型预测误差结果 dB

$\beta(\%)$	5	10	14.29	16.67	25	50
$QP = 12$	0.1938	0.1039	0.0245	0.0185	-0.0487	-0.2401
$QP = 16$	-0.0064	-0.0933	-0.1637	-0.1737	-0.2469	-0.3383
$QP = 20$	0.0714	-0.0365	-0.1099	-0.1299	-0.1821	-0.2115
$QP = 24$	0.2072	0.1173	0.0349	0.0179	-0.0413	-0.0297
$QP = 28$	0.19	0.0731	-0.0093	-0.0273	-0.0535	-0.0049
$QP = 32$	0.2598	0.1479	0.1005	0.0784	0.0633	0.1669
$QP = 36$	0.1586	0.0467	-0.0247	-0.0038	-0.0009	0.1367
$QP = 40$	-0.1116	-0.1775	-0.2229	-0.214	-0.1791	0.0055

(4) 功率率失真模型

图 3 所示为式(9)所示模型的实验结果 (News 序列). 可以看出, 在码率一定的条件下, 随着编码功耗的增加, 峰值信噪比 (PSNR) 随着编码功耗的增加而增加, 即编码的 PSNR 性能是功耗的增函数. 这表明, 在信道带宽一定的情况下, 可以通过增大编码功耗来提高视频质量, 同时满足信道带宽的要求. 而在相同的能量提供前提下, 随着码率的增加, PSNR 性能也随着增加, 这是传统率失真理论的研究成果. 因此, 模型反映了视频编码功耗、码率和失真的内在关系: 视频质量、码率及编码功耗是可以转

换的. 当信道带宽受限时, 可以通过提供更多的能量进行编码, 从而可以维持或提高视频编码的质量; 当终端移动设备的能量提供有限时, 可以通过适当降低视频质量来维持或延长移动终端的能量供应周期, 即可以质量换取能量. 这种内在关系为设计符合各种需要的无线通信系统提供重要的理论指导.

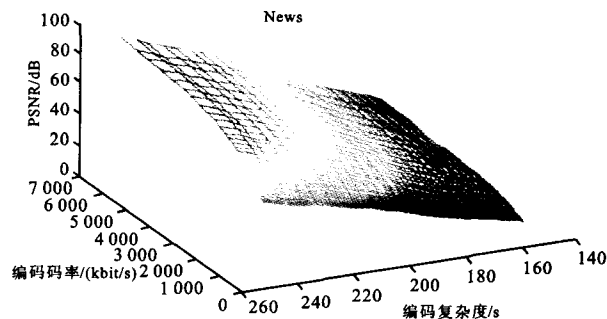


图 3 功率率失真模型 (News 序列)

7 结束语

针对无线移动终端功耗有限的问题, 本文将功耗问题引入到经典率失真分析中, 并对基于量化参数的传统率失真模型进行拓展和修正, 建立了功率—码率—失真三维模型, 实验结果表明该模型的准确性. 该模型为能量供应有限的无线视频通信设备和多媒体终端的系统设计及性能优化提供有力的理论指导.

参考文献:

- [1] He Z, Liang Y, Ahmad I, et al. Power-rate-distortion analysis for wireless video encoding under energy constraint[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004(4): 57—68.
- [2] Brites C, Pereira F. Encoder rate control for transform domain Wyner—Ziv video coding[C]// Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP). San Antonio: IEEE, 2007: 16—19.
- [3] Wang A, Zhao Y, Pan J S. Residual distributed video coding based on LQR—hash[J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 18(1): 109—112.
- [4] Ding G. Distributed video coding based on part intracoding and soft side information estimation[J]. Multimedia Tools Appl, 2009, (41): 183—195.
- [5] Luo H, Argyriou A, Wu D, et al. Joint source coding and network—supported distributed error control for video streaming in wireless multihop networks[J]. IEEE Transactions on multimedia, 2009, 11(7): 1362—1372.

(下转第 22 页)

样本进行故障诊断,10 次实验,取平均值. 结果如表 1 所示.

实例表明:Bagging 方法集成的差异性主要来自对样本空间的扰动,应用于不稳定学习算法效果比较明显,但用于稳定学习算法效果不好,当样本达不到一定数量,其预测精度比一般多分类支持向量机还要低.

表 1 测试结果比较				%
	SVM	Bagging	AB	本文方法
$[R_4 \downarrow]$	94	92	94	96
$[R_1 \downarrow]$	94	90	92	98
$[C_1 \uparrow]$	90	92	94	100
$[C_2 \downarrow]$	90	94	96	94
无故障	92	88	92	98
平均	92	91.2	93.6	97.2

AB 算法是基于特征空间扰动的集成方法,对于含有较多冗余属性的样本具有较高的泛化精度,从表 1 可以看出 AB 算法的预测精度要高于多分类支持向量机和 Bagging 算法.

本文算法具有最高泛化精度,原因一是在结合了特征空间扰动和模型参数扰动后,利用本文算法训练的基分类器在保证较高分类精度的前提下具有较大的差异性,二是利用多数投票法进行两次集成能更大程度上减小集成输出的方差.

5 结束语

作为稳定算法,支持向量机对样本空间扰动不敏感,但对特征空间和模型参数空间的扰动比较敏感,据此特点,提出基于特征空间和模型参数空间双重扰动的支持向量机算法并在国际标准电路中进行验证,结果显示了本文方法的优越性. 模拟电路故障

特征形成的决策表,属性大多为连续值,而离散化不当会破坏数据的原始分类能力,因此,广义粗糙集模型下支持向量机连续属性约简集成及其在模拟电路故障诊断中的应用将是进一步研究的内容.

参考文献:

[1] 廖薇,许春冬,刘锦高. 基于神经网络的模拟电路故障诊断研究[J]. 微电子学与计算机,2010,27(5):125-128.

[2] 刘美华,彭良玉. 基于小波分析和信息融合技术的故障诊断[J]. 微电子学与计算机,2009,26(1):166-168.

[3] Robert B, Ricardo G O, Francis Q. Attribute Bagging: Improving accuracy of classifier ensembles by using random feature subsets[J]. Pattern Recognition, 2003, 36(6):1291-1302.

[4] Valentini G, Dietterich T. Bias - variance analysis of support vector machines fo the develop ment of SVM-based ensemble methods[J]. J of Machine Learning Research, 2004, 5(6): 725-775.

[5] 陈彩云,李治国. 关于属性约简和集合覆盖问题的探讨[J]. 计算机工程与应用,2004,(2):44-47.

[6] 权光日,洪炳溶,叶风,等. 集合覆盖的启发函数算法[J]. 软件学报,1998,9(2):156-160.

[7] 张浩,张铁男,沈继红,等. Tent 混沌粒子群算法及其在结构优化决策中的应用[J]. 控制与决策,2008,23(8): 857-862.

作者简介:

马 超 男,(1983-),博士研究生. 研究方向为防空导弹模拟电路智能故障诊断方法.

陈西宏 男,(1961-),博士,教授,博士生导师. 研究方向为防空导弹武器系统信息技术与智能故障诊断方法等.

姚懿玲 女,(1982-),硕士. 研究方向为防空导弹通用测试技术.

韩 明 男,(1982-),硕士. 研究方向为防空导弹故障诊断方法.

(上接第 16 页)

[6] 韦耿,王亮,朱斌. 无线移动环境视频编码动态功耗模型研究[J]. 传感技术学报,2009,22(3): 354-357.

[7] Ortega A, Ramchandran K. Rate - distortion methods for image and video compression[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1998, 15(6): 23-50.

[8] SMPTE Standard for Television: Compressed Video Bitstream Format and Decoding Process (VC1)[S]. White Plains, NY: The Society of Motionpicture and Television Engineers, 2003.

作者简介:

韦 耿 男,(1977-),博士,博士后. 研究方向为多媒体信息处理.

吴乐南 男,(1964-),教授,博士生导师. 研究方向为多媒体信息处理及通信信号处理.

朱 斌 男,(1981-),博士生,讲师. 研究方向为多媒体信息处理.