

率失真最优自适应量化及其系数阈值的设定^{*}

赵慧民¹, 朱立², 张光昭³

(1. 佛山科学技术学院电子信息工程系, 广东 佛山 528000;

2. 佛山科学技术学院信息中心, 广东 佛山 528000;

3. 中山大学电子与通信工程系, 广东 广州 512075)

摘要: 在最大 PSNR 的情况下, 针对 I 帧最优编码, 提出了一种实用的 MPEG-2 自适应量化算法。该方法包括自适应量化, 系数的阈值设置和一种新的量化系数减小技术共 3 个模块。结果表明, 和 TM5 方式比较, 该优化方法对 I 帧编码改善了 1.5~2 dB 的图像质量。

关键词: MPEG-2 编码; 自适应量化; 系数阈值设置; 系数幅度减小

中图分类号: TN919.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 03-0032-04

在传输带宽有限的实际多媒体应用系统中, MPEG-2 视频编码为了获得较好的图像质量需要通过前向反馈控制算法控制量化级的深度。这种情况往往导致量化器的频繁改变, 因此使图像编码效率降低。最优量化器选择的原理在文献 [1] 中已作了介绍。在一定的比特率限制条件下, 它利用拉格朗日乘法器 (Lagrange Multiplier) 对独立的编码单元设置量化级以优化全部的图像质量。然而, 在 MPEG 标准中, 改变量化级的设置涉及编码的操作开销问题。因此, 量化深度不能单独选择。文献 [2] 根据量化器开销大小提出了一种扩展的选择算法。提高编码效率的一个不同方式在文献 [3] 中也已经提出。本文结合以上的技术提出一种实用优化的量化器进程, 并为改善图像质量实现了系数幅度减小 (coefficient amplitude reduction) 的新技术。为了提高系统的实时处理, 本系统的自适应量化根据图像的活动性因子可以在初始化的头文件设定, 并用快速查找搜索法进行调用。

1 自适应量化

考虑每帧比特数为 $R_{\max}$ 的一个编码图像, 其最小均方误差 (MSE) 为 D_0 。每个图像由一个固定大小的编码单元组成 (如宏块), 每个编码单元用不同的量化级 q_i 来设置。当第 i 个宏块用 q_i 量化时, 定义其失真为 $D_i(q_i)$, 并设宏块需要的比特数为 $R_i(q_i)$ 。那么, 优化的问题可以表示为:

$$\min_{q_i} \sum_i D_i(q_i)$$

这样

$$\sum_i D_i(q_i) \leq R_{\min} \quad (1)$$

在文 [1] 中, Shoham 用 Lagrange Multiplier 的结构说明了这种优化问题, 其优化问题可以用 (2) 式等效变换表示为

$$\min_{q_i} \sum_i D_i(q_i) + \lambda R_i(q_i) \quad (2)$$

式中 λ 是一个常数。文献 [1] 也证明, 如果率失真函数是凸状, 变换问题的每种方式也是具有码率约束条件为 $R'_{\min} = \sum_i R_i(q_i)$ 的初始化问题。由于 $R'_{\min}$ 取决于常数 λ , 因此必须选择一个合适的 λ 值使 $R'_{\min} = R_{\min}$ 以解决初始化问题。选择 λ 合适值的途径可以通过二分搜索方法解决。(2) 式与最小操作数可以转换为

$$\sum_i \min_{q_i} D_i(q_i) + \lambda R_i(q_i) \quad (3)$$

这个公式表明全局优化现在能够通过独立的每个宏块实现。但是, 按照 MPEG 2 标准, 改变量化深度需要在宏块头部增加额外的比特数以对新的设置进行编码。头部开销中 2 bits 表示了编码宏块的模式, 5 bits 用于表示量化深度。特别地, 在低码率时, 这种头部开销不能忽视。因此, 我们引入的量化器可改变头部开销作为对率控制的一种方式:

* 收稿日期: 2003-09-26

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (990031); 广东省教育厅《软件技术》重点实验室研究基金资助项目; 佛山科学技术学院博士启动研究基金项目

作者简介: 赵慧民 (1966 年生), 男, 博士, 副教授, E-mail: zhaohuimin@tom.com

$$R^{ov}(q_1, q_{i-1}) = \begin{cases} 1 & \text{for } q_i = q_{i-1} \\ 7 & \text{for } q_i \neq q_{i-1} \\ 1 & \text{if } q_i \text{ is the first MB in a slice} \end{cases} \quad (4)$$

把 (4) 增加到 (2) 式后, 优化问题可以表示为

$$\min_{q_i} \sum_i D_i(q_i) + \lambda R_i(q_i) + \lambda R^{ov}(q_i, q_{i-1}) \quad (5)$$

对于每个宏块, 它可以通过动态可编程的方式来决定。图 1 中, 每个列节点代表一个宏块, 每一行定义了一个量化深度。每个路径对应一个可能的帧编码。所有的横向节点可推导出 $D_i(q) + \lambda R_i(q)$ 对应的操作开销; 而从行 q_1 到 q_2 的边沿开销为 $R^{ov}(q_2, q_1)$ 。因此, 总的路径操作等于公式 (5) 的值, 而最小操作路径定义了上述最小化问题的解决方案。

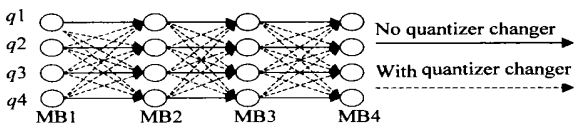


图 1 Lagrangian 最小问题的等效搜索示意图
Fig 1 The equivalent search for Lagrangian lowest question

2 阈值的设定

量化之后, Ramchandran^[3] 引入了系数阈值设置作为后处理以进一步降低码率, 并尽可能地保证图像质量。若要求编码的目标对象比特数是 R_{min} , 很明显量化之后比特数依然较大, 因此设置阈值用于减小此比特数。然而, 严格的帧比特数是未知的。为了解决这个问题, 我们把量化系数阈值设置和自适应量化的方法结合起来使用到单个 Lagrange 的结构中去。

简化期间, 考虑系数为 c_i 组成的一个 DCT 块。

其量化表示为 $c'_i = Q(c_i)$, 反量化表示为 $\hat{c}_i = Q^{-1}(c'_i)$ 。设 $C = \{(p_i, \hat{c}_i)\}$ 是非零量化后系数的升序排列(上升 p_i) 设置($\hat{c} \neq 0$), 这里 p_i 是 zig zag 排列时系数的位置。因此, 通过使用 Huffman 码长度表 $r(\text{run}, \text{value})$, 第 i 个编码系数所需要的比特数是 $r(p_i - p_{i-1} + 1, c'_i)$ 。忽略系数引入的附加失真为 c_i^2 。设 $S \subseteq C$ 是编码块中系数的子设置。因此, 在一个选择的 S 中, 规定 Lagrangian 最小化为:

$$\min_{S \subseteq C} \sum_{(p_i, c_i) \in C-S} + \sum_{i \leq |S|} (c_i - \hat{c}_i)^2 + \lambda r(p_i - p_{i-1} + 1, c'_i) \quad (6)$$

忽略操作的开销
编码量化系数操作的开销

类似于自适应量化, 通过计算一个等效图形的搜索来解决这个问题, 如图 2 所示。每个非零系数用一个节点来表示, 为增加的最后节点。每个非跳变边缘由权重 $(c_i - \hat{c}_i)^2 + \lambda r(p_i - p_{i-1} + 1, c'_i)$ 引起, 由量化误差和 Huffman 编码的长度组成; 而每个跳变边缘由 $\sum c_i^2$ 加权, 这里的求和运算包括了所有跳变的系数。

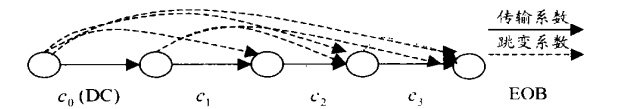


图 2 系数阈值设置的等效图搜索问题
Fig 2 The equivalent graph search problem to coefficient thresholding

为了有效地结合自适应量化和阈值设置, 我们把它们的图形合成为一个图, 如图 3。

图 3 是自适应量化和阈值设置在每个比特率的优化合成。注意, 用一个阈值设置图显示的每个方

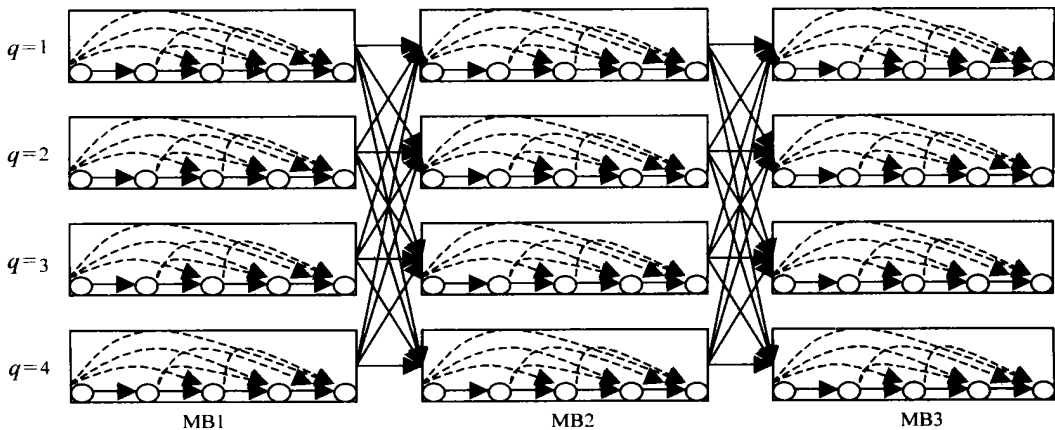


图 3 自适应量化图形与阈值设置图形的合成
Fig 3 Combination of adaptive quantization graph and thresholding graph
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

块实际上包含六个串联的阈值设置图 (每个宏块中包含 6 个 DCT 块, CIF=4:2:0)。

3 系数幅度减小技术

引入系数幅度的减小 (coefficient amplitude reduction, CAR) 作为系数阈值设置的产生。其思想是当保存的比特数比附加畸变更重要时, 减小系数值是有益的。由于 MPEG Huffman 表是单调的, 增加系数将不会出现更短的码字^[4]。

CAR 能通过扩展阈值设置图来实现, 扩展方式如图 4 所示。对于具有 c'_i 值的每个系数, 建立深一层扩展节点 c'_i , 代表系数 $(1, \dots, c'_i)$ 的新值。节点开销被适当地赋值。所有新的边界和模型节点都具有零开销。通过忽略图 4 的跳跃边沿, CAR 能通过阈值设置独立实现。很显然, CAR 选择了优化的系数值, 以等效于每二级节点之间最短的路径。通过用 CAR 图形代替阈值设置的子图形, 可以获得了理论上的优化帧编码。

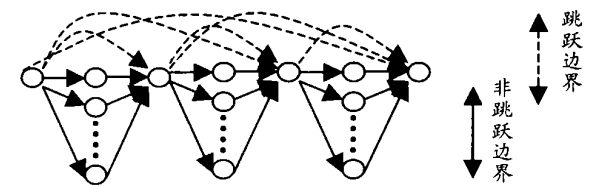


图 4 用幅度减小技术扩展的系数阈值设置图形
Fig 4 The coefficient amplitude reduction

4 实验结果

我们利用 SAMPEG^[5] 帧结构在一个多媒体数字存储显示系统中实现了以上的算法。从测试序列中选择单个帧, 用不同的量化与系数调整结合来编码。对量化, 采用了 3 种不同的方式: 常量量化 (所有宏块用同一量化深度), 自适应量化以及不考虑量化深度操作开销的自适应量化 (NOO)。同时, 把实验结果与 TM5 (MPEG-2 标准模型) 进行比较。对于系数调整, 我们使用: 单独进行阈值设置, 单独进行 CAR, 两者结合技术。表 1 显示了对固定比特率获得的绝对值 PSNR (峰值信噪比) 与常量量化 PSNR 增值情况的比较使用。自适应量化使 PSNR 增加了约 0.13 dB; 应用阈值设置使 PSNR 增加了 0.2~0.3 dB; 而从 CAR 获得的 PSNR 增量仅仅是临界上; NOO 几乎没有使 PSNR 增加。

其中, 编码器是基于 MPEG-2 MP@ML 应用的视频处理器, 其图像输入为 ITU-656 格式的数字视频信号, 经编码器压缩后, MPEG-2 PS 流信号通过可编程 IO 端口按照 4:2:0 图像格式输出到 FIFO 传输。编码器调节编码的性能正是通过控制自适应量化的深度来完成的。实际编码的比特率通过使用限定的 VBR 算法进行有效调节。

由测试的图形分析, 经本系统处理后的图像质量稳定、可靠, 达到了主观评价标准。

表 1 实验结果¹⁾
Tab 1 Overall results

Claire(≈67 800 bits)	no coeff. Mod.	CAR	thresholding	both
Constant q. scale	46.16(0.0)	n/a	n/a	n/a
TM5	44.91(−1.25)	n/a	n/a	n/a
Adapt./no overh. (NOO)	46.21(+0.06)	46.22(+0.07)	46.40(+0.24)	46.41(+0.25)
Adaptive quant.	46.29(+0.13)	46.30(+0.15)	46.46(+0.30)	46.47(+0.31)
Stefan(≈170 000 bits)	no coeff. Mod.	CAR	thresholding	both
Constant q. scale	36.87(0.0)	n/a	n/a	n/a
TM5	35.62(−1.25)	n/a	n/a	n/a
Adapt./no overh. (NOO)	36.96(+0.09)	36.96(+0.10)	37.27(+0.40)	37.27(+0.40)
Adaptive quant.	36.99(+0.12)	37.00(+0.13)	37.29(+0.42)	37.30(+0.43)

1) PSNR 用 dB 表示; 假设编码序列的比特率是 1.2Mbps.

5 结 论

在 MPEG-2 编码中, 针对 I 帧编码传输, 提出了一种优化的量化算法。在给定的帧比特率条件下, 它使图像质量有了一定的改善。用类似的方法, 在包含附加的宏块模式时, 本算法很容易扩展支持 P 帧和 B 帧的编码, 且图像质量稳定、可靠。

参考文献:

[1] SHOHAM Y, GERSHO A. Efficient bit allocation for an arbitrary set of quantizers [J]. IEEE Transactions on Acoustics and Signal Processing, 1988, 36(9): 1445–1453.
[2] ORTEGA A, RAMCHANDRAN K. Forward-adaptive quantization with optimal overhead cost for image and video

coding with applications to MPEG video coders[C] . In Spie Digital Video Compression , 1995.

[3] RAMCHANDRAN K, VETTERLI M. Rate-distortion optimal fast thresholding with complete JPEG/MPEG decoder compatibility[J] . IEEE Transaction on Image Processing, 1994, 3(5): 700—704.

[4] DIRK F, NIELS M, PETER H N. A software-based high-

quality MPEG-2 encoder employing scene change detection and adaptive quantization[J] . IEEE ICCE Digest, 2001: 148—149.

[5] DIRK F, NIELS M, PETER H N. SAMPEG, a scene adaptive, parallel MPEG—2 software encoder[J] . SPIE Visual Communications and Image Processing, 2001, 43(10): 272—283.

Rate-Distortion Optimal Adaptive Quantization and Coefficient Thresholding

ZHAO Hui min¹, ZHU Li¹, ZHANG Guang zhao²

(1. Department of Electronics Information Engineering, Foshan College, Guangdong Foshan 528000, China;
2. Center of the Information & Education Technology, Foshan Collage, Guangdong Foshan 528000 China;
3. Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A practical and optimal MPEG-2 adaptive quantization algorithm is presented for the optimal encoding of I-frames in the sense of maximizing PSNR. The method includes three key features: adaptive quantization, coefficient thresholding and a new coefficient amplitude reduction technology. The results show that I frames generated by the TM5 reference encoder are about 1.5 ~ 2 dB below the theoretical optimum.
Key words: MPEG-2 Encoding; adaptive quantization; coefficient thresholding; coefficient amplitude reduction

(上接第 31 页)

参考文献:

[1] KATZ J, PLOTKIN. Low speed aerodynamics: from wing theory to panel methods[M] . New York: McGraw Hill Book Company, 1991.

[2] GIESING. Nonlinear two-dimension unsteady potential flow with lift[J] . J Aircraft, 1968, 5(2): 135—143.

[3] BASU. The unsteady motion of a two-dimension aerofoil in incompressible inviscid flow[J] . J Fluid Mechanics, 1978, 87(1): 159—178.

[4] PIGOTT H. Power requirements for large-amplitude flapping

flight[J] . J Aircraft, 1998, 35, (3): 352—361.

[5] 曾锐, 昂海松. 仿鸟复合振动的扑翼气动分析[J] . 南京航空航天大学学报, 2003, 35(1): 6—12.

[6] TOBALSKE D. Flight kinematics of black billed magpies and pigeons over a wide range of speeds[J] . The J Experimental Biology, 1996, 199: 263—280.

[7] ZENG R, ANG H S, ROLF G. Flexible flapping-wing imitating a bird's wing, anniversary book in memory of the 65th birthday of Univ. — Prof. Dr. — Ing., Dr. — Ing. E. h. H. Rothert [M] . Germany: Technical University Dresden, 2003: 21—32.

The Model and Power of Flexible Flapping Wing

ZENG Rui¹, ANG Hai song¹, LIU Guo tao², LIU Liang gang²

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Department of Physics, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: On the basis of former rigid wing model and consideration of the velocity change and the distortion of wing plane, a flapping model is developed. The paper also computes the flapping power and flapping efficiency of the flexible flapping wing, and their changes with flapping angel, velocity, and so on. The results explain why the birds flap their wings by different rules in different flying phases, and provide referenced data for future design of ornithopter with flexible flapping wing.
Key words: flexible flapping wing; MAV; flapping model; power; numerical computation