

文章编号: 0529-6579 (1999) 06-0016-05

一种低比特率 JPEG 编码图像质量改进算法^{*}

林 强

(深圳大学信息工程学院, 深圳 518060)

摘 要: JPEG 图像编码系统当比特率较低时, 常会产生“方块效应”, 即重建图像的子块边缘不连续. 用空间的低通滤波器对重建图像中每个子块的边界像素进行滤波, 也就是通过块间的平滑处理可以消除“方块效应”, 但滤去了图像边缘的高频分量而使边缘变模糊. 通过对未经量化的离散余弦变换(DCT)系数进行预测, 提供了一个后处理系统来减轻“方块效应”的影响且减少了边缘的模糊度. 实验表明, 该算法与低通滤波相比, 在减轻“方块效应”的同时, 保留了高频分量, 改善了信噪比, 图像质量明显改善.

关键词: 图像编码; 低通滤波; 离散余弦变换系数预测

中图分类号: TN 919.8 **文献标识码:** A

图像通信在当今信息时代显得尤其重要, 但由于图像通信的数据量大、传输频带宽, 因此对图像数据压缩技术的研究一直是一个重要的课题, 并已取得了较大的进展. 在目前众多的图像压缩技术中, JPEG^[1] 是很有效的图像压缩编码方法.

基于离散余弦变换(DCT)的 JPEG 图像编码系统当比特率较低时, 常会产生“方块效应”, 即重建图像的子块边缘不连续. 本文基于 DCT 系数预测算法和半象限正规化理论, 提出了一种新的 DCT 系数预测优化算法, 旨在寻求一种后处理系统来减轻“方块效应”的影响, 以期提高图像质量. 实验结果表明, 本文算法与半象限正规化算法和低通滤波方法相比较, 信噪比分别提高 0.3 dB 和 0.5 dB, 主观效果也有较大改善.

1 JPEG 编码后图像子块边界的空域低通滤波

从频谱上看, 噪声特别是随机噪声是一种具有较高频率分量的信号. 噪声使原本均匀和连续变化的灰度突然变大或变小, 形成一些虚假的物体边缘或轮廓. 低通数字滤波器, 可使高频信号得到较大的衰减. 因为 JPEG 算法在低比特率下产生的“方块效应”主要存在于每个子块的边界像素上(见图 2), 所以仅需对边界像素进行低通滤波.

设图像为 $f(x, y)$, 滤波器的冲激响应函数为 $H(x, y)$, 则卷积表达式为

$$g(u, v) = \sum_x \sum_y f(x, y) H(u - x + 1, v - y + 1)$$

在进行卷积之前, $f(x, y)$ 和 $H(x, y)$ 都必须进行如下的延拓

^{*} 收稿日期: 1999-04-01 作者简介: 林强, 男, 1946 年生, 副教授.

$$f_e(x,y)=\begin{cases} f(x,y) & 1\leq x\leq N, 1\leq y\leq N \\ 0 & N+1\leq x\leq M+N-1, N+1\leq y\leq M+N-1 \\ H_e(x,y) & 1\leq x,y\leq M \\ 0 & M+1\leq x(\text{或}y)<M+N-1 \end{cases}$$

M, N 分别为 $f(x, y)$ 和 $H(x, y)$ 的维数. 常用的冲激响应函数为

$$\boldsymbol{H}_1 = [C_1 \quad C_2 \quad C_3] = (1/4)[1 \quad 2 \quad 1], \quad \boldsymbol{H}_2 = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ C_4 & C_5 & C_6 \\ C_7 & C_8 & C_9 \end{bmatrix} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 4 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{H}_3 = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{H}_4 = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

实验发现, 用上面几种冲激响应函数分别进行滤波, 其效果差异不大. 当图像压缩率大时, 对重建图像的子块边界进行低通滤波, 可以明显减轻“方块效应”的影响, 信噪比也有较大的提高. 但由于对图像的边缘保护不够, 图像变得模糊; 而当压缩率小时, 因为图像的“方块效应”不明显, 对边界进行滤波只会使图像更加模糊, 图像信噪比减小, 质量变差. 以经过滤波器 1 (冲激函数为 $\boldsymbol{H}_2$) 为例, 对 Lenna 256×256 , 8 bit 标准图像在不同压缩率下与标准 JPEG 作比较, 结果如表 1 (主观效果指与对应的重建图像比较).

表 1 不同比特率下滤波后重建图像与 JPEG 的性能比较

Tab 1 The performance comparison between JPEG and lowpass filter at different compression rates

压缩率/%	比特率/ bpp	信噪比改善/ dB	主观效果
97.69	0.185	0.31	更好
97.08	0.234	0.28	更好
96.08	0.314	0.28	更好
94.90	0.408	0.17	一样
92.01	0.640	-0.44	更模糊

因此, 为了在低比特率下对边缘进行保护, 而且能够提高信噪比, 下面将进一步探讨预测 DCT 系数的算法.

2 优化 DCT 系数的预测

本文以 JPEG 编码中的量化表与每个子块的边界的像素值为基础, 预测每个子块未经量化的 DCT 系数. 考虑到对边缘的保护, 在目标函数中加上一个稳定函数, 并且用半局限正规范化 (half-quadratic regularization) 方法简化进行预测的目标函数, 以期给出一个后处理系统来减轻“方块效应”的影响且减少了边缘的模糊度.

2.1 DCT 系数的预测^[4]

为了在量化前预测 DCT 系数, 需从目标图像中得到一些有用的信息, 其中之一就是 DCT 系数的量化表. 因为边缘很少单独存在于 8×8 子块的边界, 所以假设在子块边界像素值的变化是平滑的.

设求极小值的最优化目标函数及约束函数为

$$J(F_{i,j}) = J_{1(i,j)} + J_{2(i,j)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad F_{i,j}(u, v) - Q_{uv}/2 \leq F_{i,j}(u, v) \leq F_{i,j}(u, v) + Q_{uv}/2$$

其中, (u, v) 是 8×8 子块的行与列; $F_{i,j}(u, v)$ 是反量化时第 (i, j) 个子块中相对的 DCT 系数, $F_{i,j}(u, v)$ 则是它的预测值; Q_{uv} 是量化阶距; $F_{i,j}(u, v) = (F_{i,j}(0, 0), \lambda, F_{i,j}(N-1, N-1))$; λ 是正规化参数. 公式 (1) 中的第 1 部分 $J_{1(i,j)}$ 定义为

$$J_{1(i,j)} = \sum_{k,l \in S} \{f_{i,j}(k, l) - \hat{f}_{i,j}(k, l)\}^2 \quad (2)$$

其中, $f_{i,j}(k, l)$ 表示经过低通滤波后子块中相对应的像素值; $\hat{f}_{i,j}(k, l)$ 则是经过 DCT 系数预测后重建图像的子块中相对应的像素值; S 是边界像素在子块中所处位置 (k, l) 的集合.

公式 (1) 中的第 2 部分 $J_{2(i,j)}$ 表示为

$$J_{2(i,j)} = \sum_{r=0}^3 \sum_{k,l} \varphi[(D_r f_{i,j})_{k,l}] \quad (3)$$

其中, $(D_0 f_{i,j})_{k,l} = f_{i,j}(k, l) - \hat{f}_{i,j}(k-1, l)$, $(D_1 f_{i,j})_{k,l} = f_{i,j}(k, l) - \hat{f}_{i,j}(k, l-1)$, $(D_2 f_{i,j})_{k,l} = (f_{i,j}(k, l) - \hat{f}_{i,j}(k-1, l-1))/\sqrt{2}$, $(D_3 f_{i,j})_{k,l} = (f_{i,j}(k, l) - \hat{f}_{i,j}(k-1, l+1))/\sqrt{2}$, $\varphi(t) = 2\sqrt{1+t^2} - 2$, 这是分别表示水平、垂直与 2 个斜方向的一次线性微分 (如图 1). 在 (1) 式中, 第 1 部分 $J_{1(i,j)}$ 预测的是 $f_{i,j}(k, l)$ 和 $\hat{f}_{i,j}(k, l)$ 之间的差值; 而第 2 部分 $J_{2(i,j)}$ 是个稳定函数, 从中使用了一个非线性函数 (9) 来处理图像中的不连续部分, 即图像的边缘. 因此, 所需要解决的问题变为解决一个有约束非线性最优化的问题.

2.2 半像限 (Half-Quadratic) 正规化^[3]

为了把目标函数, 即公式 (1) 简单化, 运用 Half-Quadratic 正规化的理论, 引入了辅助参数 $(\omega_r)_{k,l}$, $r=0, \dots, 3$, 辅助参数的作用是标出不连续部分 (边缘) 的位置, 并对之进行保护.

Half-Quadratic 正规化的理论的主要思想是: 引入一个新的目标函数, 即使这个目标函数是定义在一个扩展的领域上的, 当目标函数 $J(f)$ 达到最小值时, f 同样得到它的最小值, 并且可以用线性代数的方法对目标函数进行处理.

当目标函数 φ 满足边缘保护正规化的条件 ((a) ~ (c)), 就可以找到函数 φ^* 使得

$$\varphi(t) = \inf_{\omega} \{ \varphi^*(t, \omega) \} \quad (4)$$

(a) $\varphi'(t)/(2t)$ 在 $[0, +\infty)$ 范围内是连续且递增的

(b) $\lim_{t \rightarrow +\infty} \varphi'(t)/(2t) = 0$

(c) $\lim_{t \rightarrow 0^+} \varphi'(t)/(2t) = M, 0 < M < +\infty$

$$\varphi^*(t, \omega) = \omega t^2 + \psi(\omega) \quad (5)$$

可知, 当 ω 固定时, φ^* 是 t 的二项方程式. 所以

$$\varphi(t) = \inf_{0 < \omega < M} (\omega t^2 + \psi(\omega)) = \omega_t t^2 + \psi(\omega_t) \quad (6)$$

当且仅当 $\omega_t = \varphi'(t)/(2t)$ 时, (6) 式成立. 其中, $\psi(\omega)$ 是 $\varphi(t)$ 相对应的一致函数 (式 (7)).

$$\psi(\omega) = \omega + 1/\omega - 2 \quad (7)$$

综合以上的关系及公式 (3), 可得出

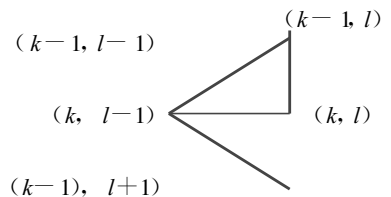


图 1 预测 DCT 系数示意图

Fig 1 The DCT coefficients used for prediction

$$J_{2(i,j)} = \inf_{\omega} J_{2(i,j)}^*, J_{2(i,j)}^* = \sum_{r=0}^3 \sum_{k,l} \{ (\omega_r)_{k,l} (Df_{i,j})_{k,l}^2 + \psi[(\omega_r)_{k,l}] \}$$

(8)

其中, $\omega = ((\omega_0)_0, 0, \lambda, (\omega_3)_N, N)$. 因此, 由公式(1)与(5)最后得出

$$\min_{F_{i,j}} J(F_{i,j}) = \min_{F_{i,j}} \min_{\omega} J^*(F_{i,j}, \omega)$$

(9)

$$J^*(F_{i,j}, \omega) = J_{1(i,j)} + \lambda J_{2(i,j)}$$

2.3 预测 DCT 系数的优化算法

因为在式 (9) 中, $F_{i,j}(u, v)$ 和 $(\omega_r)_{k,l}$ 是互相独立的, 因此 可以得出以下的算法, 这个算法是建立在 ARTUR 算法 (ARTUR 算法是基于这样的原则: 求出能量函数序列的最小值) 上的.

设定函数收敛门限 ϵ_0 , 初值 $F_{i,j}^{(0)} = 0$, 然后进入循环

$$\omega^{(n+1)} = \arg \min_{\omega} J^*(F_{i,j}^{(n)}, \omega)$$

$$(\omega_r^{(n+1)})_{k,l} = \frac{\varphi'[(D_r F_{i,j}^{(n)})_{k,l}]}{2(D_r F_{i,j}^{(n)})_{k,l}}, r = 0, \cdots, 3$$

$$F_{i,j}^{(n+1)} = \arg \min_{\omega} J^*(F_{i,j}, \omega^{(n+1)})$$

其约束条件为 $F_{i,j}(u, v) - Q_w/2 \leq F_{i,j}(u, v) \leq F_{i,j}(u, v) + Q_w/2$.

当 $F_{i,j}^{(n)}(u, v)$ 满足约束条件时退出循环, 此时 $F_{i,j}(u, v)$ 就是相对应的预测值; 如果循环到函数收敛时还找不到一个满足约束条件的 $F_{i,j}^{(n)}(u, v)$, 退出循环, 然后再用相对应 $F_{i,j}(u, v)$ 代替 $F_{i,j}^{(n)}(u, v)$.

函数收敛条件为 $\|F_{i,j}^{(n+1)} - F_{i,j}^{(n)}\|^2 / \|F_{i,j}^{(n)}\|^2 < \epsilon_0$

3 实验结果分析与图像效果

实验所用的图像是 Lenna 256 图像 (256×256 pels, 8 bits/pel) 以经过 JPEG 基本系统压缩编码为 0.185 bits/pel (压缩率为 97.69%) 的图像为例, 用本文算法与半像限正规化和低通滤波方法进行比较 (表 2, 图 2).

表 2 仿真结果比较

Tab 2 The comparison of simulation results

方法	信噪比/ dB	主观效果
JPEG	24.14	较好
LPF	24.45	差
半像限正规化	24.25	较好
本文算法	24.79	好



LENNA 原图像

JPEG 译码图像

半像限正规化译码图像

LPF 译码图像

本文算法译码图像

图 2 译码图像

Fig. 2 The decoding image

由上面的表格数据与图像效果可以看出, 本文算法与文 [2] 的低通滤波方法和文 [3] 的半象限正规化方法在相同比特率下信噪比分别改善了 0.3 dB 和 0.5 dB; 重建的图像更加清晰, 图像的平坦区 (如脸颊、肩头与帽子等) 的子块边界也有比较好的连续性, 显得更加平滑.

本文探讨了 JPEG 图像压缩在压缩比较高情况下的后处理问题. 使用低通滤波器确可减轻“方块效应”的影响, 但因滤去了高频分量而会使边缘不够清晰; 为此进一步探讨了预测 DCT 系数的方法, 使用了有约束非线性优化和半象限正则化 (Half-Quadratic Regularization) 的算法把进行预测的目标函数简单化. 结果表明, 在压缩率相同情况下, 本文算法重建的图像信噪比有较大改善, 图像也变得更清晰.

参考文献:

- [1] RAFAEL C G, RICHARD E W. Digital image processing [M]. New York: Faddison-wesley Publishing Company Inc. 1997. 175 ~ 232.
- [2] KOICHI F, AKIRA K. Blocking artifacts reduction for block-DCT coded images considering edges [J]. Proc of IMPS. 1997 (2): 25 ~ 26.
- [3] PIERRE C. Deterministic edge-preserving regularization in computed imaging [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997 (2): 298 ~ 311.
- [4] CHAIMAND B. Image restoration using an estimated Markov model [J]. Signal Processing. 1998. 15: 115 ~ 129.

An Improved JPEG Algorithm at Low Bit Rate for Image Coding

LIN Qiang^{*}

Abstract: At low bit rate, a JPEG image coding system frequently produces block-artifact. It means that the edges of the sub-blocks of the reconstructed image are not continuous. However, lowpass filter often drowns the high frequency, and the edges of the image become vague. In this paper we calculated the unquantified discrete cosine transform coefficients, and provided a subsequent processing system to eliminate the block artifact without blurring the edges. The experiment results show that, compared with the lowpass filter method, the algorithm proposed here lessens the block-artifact, preserves high frequency edges, improves the signal-noise rate and the object effect.

Keywords: image coding; lowpass filter; calculation on the discrete cosine transform coefficient

^{*} Information Engineering Faculty, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China