

一种基于全相位余弦双正交变换的 JPEG 算法

侯正信 高志云 杨爱萍

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 为了进一步改进 JPEG 算法提高编码的效率和重建图像质量,提出了一种新的变换方法即全相位余弦双正交变换(APCBOT)来替代传统的 DCT 变换。这种新的变换来源于离散余弦列率滤波(DCSF)的卷积算法,它在把原始图像变换到频率域的同时对各高频分量进行相应的衰减,从而简化了图像变换后的量化步骤。用 Matlab 进行了数据仿真,结果表明,本文提出的变换和 DCT 相比有很大的优势,不但量化简单(无量化或仅需一个参数的一致量化),而且使 JPEG 算法的压缩率和重建图像质量均有可观的优化。

关键词 APCBOT 双正交变换 一致量化 压缩比

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)11-2012-06

A New JPEG Algorithm Based on All Phase Cosine Biorthogonal Transform

HOU Zheng-xin, GAO Zhi-yun, YANG Ai-ping.

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract In order to improve the JPEG algorithm and heighten coding efficiency, a new transform method, the All Phase Cosine Bi-Orthogonal Transform(APCBOT), is presented in this paper which is an alternative of DCT in traditional JPEG. This new transform is originated from the convolution algorithm of Discrete Cosine Sequence Filtering(DCSF). It can appropriately attenuate the high-frequency components while transform the original images into the frequency domain, making the subsequent quantization step very simple. The simulational data in Matlab is given in this paper. The experimental results show that the APCBOT-based JPEG is superior to DCT-based JPEG in the following aspects: the simpler quantization, better quality and higher compressive rate of reconstruction image.

Keywords APCBOT, bi-orthogonal transform, identical quantization, compressive ratio

1 引言

JPEG 是一个适用范围很广的静态图像数据压缩标准,它利用了人的视觉系统的特性,使用量化和无损压缩编码相结合来去掉视觉的冗余信息和数据本身的冗余信息。通常意义的 JPEG 压缩算法就是采用以离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)为基础的有损压缩算法。在基于 DCT 的压缩编码系统里,图像数据被分成块,每个块中是 8×8

个像素并且每个块进行相同的处理:首先,使用正向 DCT 把空间域表示的图像变换成频率域表示的图像,去除数据冗余,即 $F = DfD^T$ (f 表示图像矩阵, F 表示变换系数矩阵, D 表示 DCT 变换矩阵);然后,使用量化表对 DCT 系数进行量化;最后,对差分 DC 系数进行差分脉冲编码调制(DPCM)编码并对 zig-zag 扫描的交流系数进行 Huffman 编码^[1-5]。

从 JPEG 标准提出开始, JPEG 就被广泛的应用到图像压缩系统中,同时也在各个细节上进行了各种优化和改进。文献[6]提出把 DCT 块按频率分成

收稿日期:2006-06-30; 改回日期:2006-08-14

第一作者简介:侯正信(1945 -),男,教授、博士生导师。主要从事图像处理及视频处理、小波分析等方面的研究。E-mail:zhengxinhou@

几个波段,并且每个波段采用各自的码表,文中数据显示数据压缩效率有可观提高。文献[7]用 RD-OPT 算法对 DCT 的量化矩阵进行了优化。文献[8]提出了一种基于 WDCT (warped discrete cosine transform) 的图像压缩算法。如上所述方法均是在原有基于 DCT 的 JPEG 算法基础上进行的优化和改进,本文通过把余弦列率滤波的卷积算法应用到图像压缩中,提出了用全相位余弦双正交变换 (all phase cosine bi-orthogonal transform, APCBOT) 替换 DCT。这种基于 APCBOT 的图像压缩方法与基于 DCT 的压缩方法相比,量化矩阵简单、易调整,并且在相同的压缩效率下重建图像的峰值信噪比 (PSNR) 高。

2 全相位余弦双正交变换

全相位余弦双正交变换方法是文献[9]中提出的 DCSF (discrete cosine squence filter) 在图像变换中的应用。离散余弦列率滤波的卷积算法可以大大提高传统列率滤波的速度,避免波形失真,性能优良且易于实现。

2.1 DCSF

余弦列率滤波可由下式表示:

$$Y_L = C^T \{ F \cdot CZ_L \} \quad (1)$$

其中, Z_L 是时域离散信号 $\{z(n)\}$ 经方块化得到的第 L 段长度为 N 的数据向量, C 和 C^T 分别为 $N \times N$ 的 DCT 和 IDCT 变换矩阵, F 是长度为 N 的列率响应向量, \cdot 表示两向量对应元素相乘, Y_L 是滤波输出向量,将包含样点 $z(n)$ 的各个不同相位的在该点的响应取平均得到全相位滤波输出信号 $y(n)$ 。

根据文献[1]可知,余弦列率滤波可简化为一

$$A = \begin{bmatrix} 0.1250 & 0.1250 & 0.1250 & 0.1250 & 0.1250 & 0.1250 & 0.1250 & 0.1250 \\ 0.1094 & 0.0854 & 0.0617 & 0.0262 & -0.0156 & -0.0575 & -0.0930 & -0.1167 \\ 0.0938 & 0.0374 & -0.0221 & -0.0783 & -0.0938 & -0.0543 & 0.0221 & 0.0952 \\ 0.0781 & -0.0078 & -0.0709 & -0.0657 & 0.0156 & 0.0787 & 0.0396 & -0.0676 \\ 0.0625 & -0.0408 & -0.0625 & 0.0169 & -0.0625 & -0.0169 & -0.0625 & 0.0408 \\ 0.0469 & -0.0557 & -0.0175 & 0.0498 & -0.0156 & -0.0368 & 0.0488 & -0.0198 \\ 0.0313 & -0.0510 & 0.0221 & 0.0101 & -0.0313 & 0.0341 & -0.0221 & 0.0068 \\ 0.0156 & -0.0301 & 0.0267 & -0.0216 & 0.0156 & -0.0096 & 0.0046 & -0.0012 \end{bmatrix}$$

图 1 和图 2 分别是 $N = 8 \times 8$ 时 APCBOT 的分解基矢量和合成基矢量。

般的卷积形式: $y(n) = Q(n) * z(n)$

而余弦卷积滤波器 Q 具有线性相位

$$Q(k) = Q(-k) \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

因此只要求出 $Q_{1/2} = [Q(0), Q(1), \dots, Q(N-1)]^T$, 即可由对称性得到整个滤波器。

可以证明

$$Q_{1/2} = \frac{1}{N^2} V F \quad (3)$$

其中, $V/N^2 = A$ 是由列率响应向量到时域滤波器的过渡矩阵, 矩阵 V 的元素为

$$V(m, n) = \begin{cases} N-m & 0 \leq m \leq N-1, n=0 \\ (N-m) \cos \frac{m n \pi}{N} - \csc \frac{n \pi}{N} \sin \frac{m n \pi}{N} & 0 \leq m \leq N-1, 1 \leq n \leq N-1 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 全相位余弦双正交变换

由式(4)可以看出过渡矩阵 V 的行向量具有列率的性质,列率随行号 m 的增大而增大,而变化幅度则随列率增大而减小。利用这一性质,定义 1 维数据 f 的全相位余弦双正交变换 (APCBOT) 为 $F = Af$, 其反变换 (IAPCBOT) 为 $f = A^{-1}F$ 。显然, A 的行向量是分解基矢量而 A^{-1} 的列向量是合成基矢量,二者都具有列率的性质而且是对偶双正交的,即也可以把上述合成基矢量用作分解,而把分解基矢量用作合成。二者共同组成了全相位余弦双正交变换。

以矩阵 $A = V/N^2$ 作为 JPEG 算法中的变换矩阵代替 DCT 矩阵,以求简化量化矩阵。当 $N = 8$ 时:

$$A(m, n) = \begin{cases} \frac{8-m}{64} & 0 \leq m \leq 7, n=0 \\ \left(\frac{8-m}{64} \right) \cos \frac{m n \pi}{8} - \csc \frac{n \pi}{8} \sin \frac{m n \pi}{8} & 0 \leq m \leq 7, 1 \leq n \leq 7 \end{cases}$$

即

在 2 维图像数据情况下, APCBOT 的正变换为 $F = AfA^T$, 反变换为 $f = A^{-1}F(A^{-1})^T$ 。

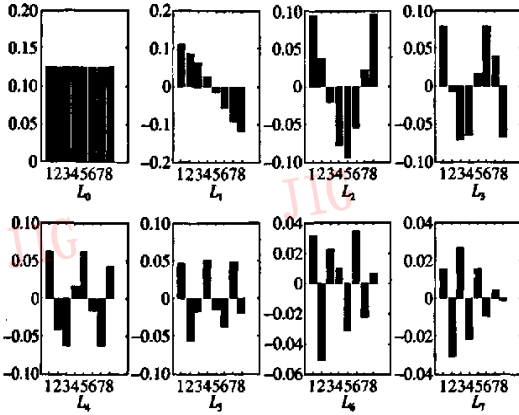


图 1 分解基矢量

Fig.1 Resolutive base vector

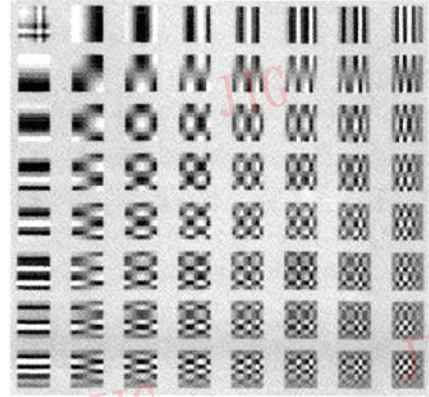


图 4 2 维合成基图像

Fig.4 2D resultant base image

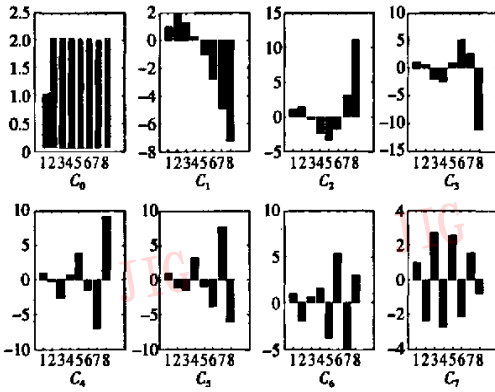


图 2 合成基矢量

Fig.2 Resultant base vector

图 3 和图 4 所示分别是 APCBOT 的 2 维分解基图像和 2 维合成基图像。

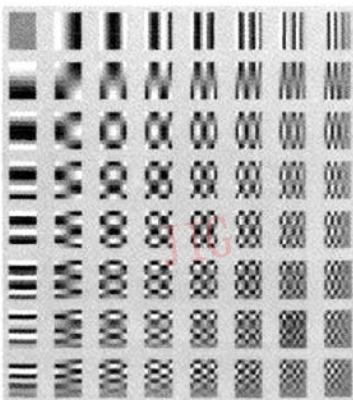


图 3 2 维分解基图像

Fig.3 2D resolutive base image

3 实验及结果分析

3.1 基于 APCBOT 的 JPEG 算法

基于 APCBOT 的 JPEG 压缩编码系统与基于 DCT 的基本一致,只是变换矩阵和量化方式不同。

与 DCT 相比,APCBOT 对原始图像的高频部分进行了相应的衰减,即在一个 8×8 的系数块中每一行从左到右依次衰减了约 1~8 倍,同样每一列从上到下也依次衰减了约 1~8 倍。这样从左上角到右下角根据系数所在位置衰减逐渐增强,从而压缩了图像的高频分量。在 DCT 编码中为了降低码率对高频系数采用大的量化间隔,而对于具有压缩高频分量作用的 APCBOT 则有可能取消量化表,对多个变换系数用同一个量化电平量化,从而使算法简化,易于码率调整。

3.2 无量化的 APCBOT

在 Matlab 仿真实验中,发现采用 A 作为变换矩阵时,即使不对变换系数进行量化,压缩效率和重建图像的质量也可以满足一般应用的需要^[10,11]。如表 1 和表 2 所示分别是采用基于 DCT 量化表和基于无量化 APCBOT 的 JPEG 算法的实验数据。

图 5~图 8(b)、(c)所示为在上述实验中得到的部分图像,用基于 APCBOT 的无量化的 JPEG 压缩算法得到的重建图像主观感觉与基于标准量化 DCT 的情况相比无明显差别。根据表 1 和表 2 的数据可知,用基于 APCBOT 的无量化的 JPEG 压缩算法与基于标准量化的 DCT 相比压缩比提高了将近一倍,并且 PSNR 只有不大的差距。而在 Matlab 仿

表 1 基于标准量化 DCT 的压缩编码指标

Tab.1 The compression data of JPEG algorithm based on DCT with standard quantizaion table

图像	压缩比	比特率 (bps)	峰值信噪比 (dB)
cornfield	7.3624	1.0866	35.1126
boats	8.6888	0.9207	34.7255
peppers	10.6231	0.7531	34.7759
girl4	21.4560	0.3729	40.4828
model	17.1584	0.4662	40.6479
mountain	3.0223	2.6470	25.1261
miramar	3.7693	2.1224	27.0520
Lena	10.6024	0.7545	35.8050

表 2 采用 $A = V/N^2$ 无量化 APCBOT 的压缩编码指标

Tab.2 The compression data of JPEG algorithm based on APCBOT with $A = V/N^2$ and without quantizaion table

图像 (512 × 512 × 8)	压缩比	比特率 (bps)	峰值信噪比 (dB)
cornfield	12.0332	0.6648	34.3896
boats	15.3645	0.5207	34.2039
peppers	18.8312	0.4248	34.3036
girl4	33.8551	0.2202	40.9968
model	29.5619	0.2706	40.0241
mountain	4.9347	1.6212	24.5904
miramar	6.8082	1.1750	26.7873
Lena	19.3582	0.4133	35.1557



(a) 原始图像



(b) DCT 变换



(c) 无量化



(d) 一致量化

图 5 不同方法的 cornfield 图像的压缩编码结果

Fig.5 Cornfield



(a) 原始图像



(b) DCT 变换



(c) 无量化



(d) 一致量化

图 6 不同方法的 girl4 图像的压缩编码结果

Fig.6 Girl4



(a) 原始图像



(b) DCT 变换



(c) 无量化



(d) 一致量化

图 7 不同方法的 model 图像的压缩编码结果

Fig.7 Model



图 8 Lena

Fig. 8 Lena

真实验中计算时间则减少了 10s 多。由于省略了量化环节并且压缩比高,这种无量化的压缩编码方法不但可以加快图像处理的速度而且节约传输带宽。非常适用于图像传输带宽有限而对图像质量要求不是很高的场合。

3.3 一致量化的 APCBOT

上述无量化的 APCBOT 相当于量化间隔为 1 的一致量化,为了得到比无量化更高质量的重建图像,理论上来说一致量化的间隔应为小于 1 的分数,为了避免这种情况可以对变换矩阵 A 进行修正。例如取 $A = V/N$,这相当于采用求和代替平均的全相位滤波的过滤矩阵^[9]。

表 3 所示为 8 幅图像在 $A = V/N$ 一致量化间隔 $Q = 52$ 时的实验数据,与基于标准量化 DCT 的压缩编码重建图像相比,前者在质量上略优于后者或与后者基本相当,并且压缩比较后者大。由于采用的量化表的量化步长只有一种,省去了量化表的存储空间,在码率调节时,每一个图像块可节省量化因子与量化表的 63 次乘法运算。可见采用修正的

表 3 采用 $A = V/N$ 和 $Q = 52$ 的一致量化时的压缩编码指标

Tab. 3 The compression data of JPEG algorithm with uniform quantization ($Q = 52$)

图像 (512 × 512 × 8)	压缩比	比特率 (bps)	峰值信噪比 (dB)
cornfield	7.524 0	1.063 3	35.336 6
boats	8.458 7	0.945 8	35.027 4
peppers	10.995 9	0.727 5	34.806 5
girl4	24.971 4	0.320 4	40.790 0
model	19.377 9	0.412 8	40.801 5
mountain	2.647 9	3.021 3	25.488 5
miramar	3.220 5	2.484 1	27.487 8
Lena	10.890 6	0.734 6	35.816 7

APCBOT 时平均压缩比和峰值信噪比都优于 DCT。

图 5 ~ 图 8 (c)、(d) 为对 4 幅 512 × 512 的灰度图像分别进行基于 DCT 和基于 APCBOT (无量化和全 52 一致量化) 的压缩和解压缩的对比结果。可见,应用 APCBOT 的 JPEG 算法 (全 52 一致量化) 的重建图像质量比基于 DCT 的 JPEG 算法的高,甚至无量化的基于 APCBOT 的 JPEG 算法在主观观察上也没有明显的差别。大部分的基于 APCBOT 的 JPEG 算法不但压缩率高而且重建图像质量也略好。

对选定 4 幅图像在各种压缩效率下分别进行基于 DCT 和基于 APCBOT 的压缩编码和解码重建实验。结果见图 9 中的率失真曲线,图中圆点连线和三角形连线分别是 APCBOT (全 52 一致量化) 和 DCT (标准量化表) 的情况。从图中可以看到,对于图像,特别是当对重建图像要求不高的时候,在相同的比特率下,基于 APCBOT 压缩编码的重建图像比基于 DCT 的质量高;在相同的峰值信噪比下,基于 APCBOT 的压缩编码比特率比基于 DCT 时低。总之,与基于 DCT 的压缩编码算法相比基于 APCBOT 的压缩编码算法可以实现更好的编码特性,同时省去了量化表,简化了量化算法。

4 结论

本文给出了一种基于新型变换 APCBOT 的 JPEG 算法,并用 Matlab 与基于 DCT 的 JPEG 算法进行了横向和纵向的比较实验。实验结果表明,这种基于 APCBOT 的 JPEG 算法量化简单且编码性能优异,特别是无量化的情况适合图像质量要求一般而传输信道受限的场合。这种改进的 JPEG 算法对于图像压缩和传输有广泛的应用前景。

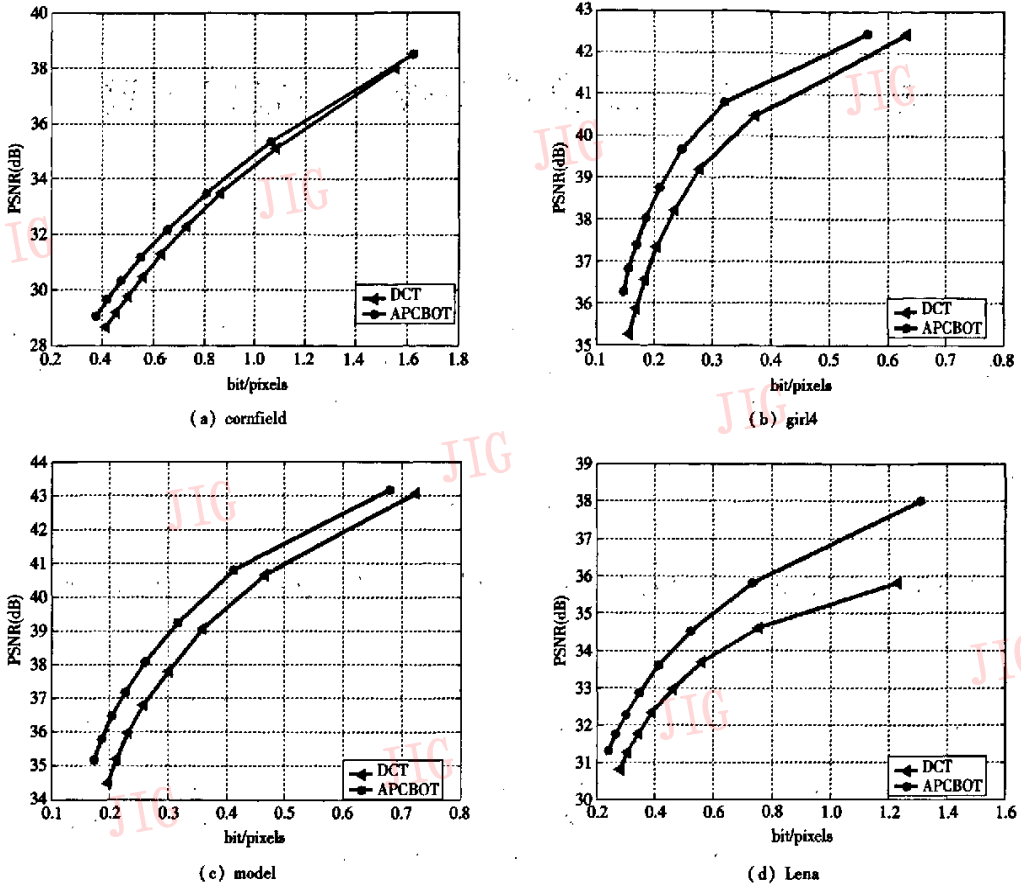


图 9 率失真曲线

Fig. 9 Rate-distortion graph

参考文献 (References)

- 1 ISO/IEC 10918-1/ITU-T Rec. T. 81. Digital Compression and Coding of Continuous-Tone Still Images[S].
- 2 Pennebaker W B, Mitchell J L. JPEG Still Image Data Compression [M]. New York: Van Nostrand Reinhard, 1993.
- 3 Wallace G K. The JPEG still picture compression standard [J]. Communication ACM, 1991, 34(1): 30-44.
- 4 Gibson J D, Berger T, Lookabaugh T, et al. Digital Compression for Multimedia[M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1998.
- 5 Ahmed N, Natarajan T, Rao K R. Discrete cosine transform [J]. IEEE Transactions on Computer, 1974, 23(1): 90-93.
- 6 Lakhani Gopal. Modified JPEG Huffman coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(2): 159-169.
- 7 Ratnakar Viresh, Livay Miron. An efficient algorithm for optimizing DCT quantization [J]. IEEE Transactions on Image Processing,

2000, 9(2): 267-270.

- 8 Cho Nam Ik, Mitra Sanjit K. Warped discrete cosine transform and its application in image compression [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2000, 10(8): 1364-1373.
- 9 Hou Zheng-xin. The convolution algorithm of discrete cosine sequence filter and its application [J]. Journal of Tianjin University, 1999, 32(3): 324-328. [侯正信. 离散余弦列率滤波的卷积算法及其应用 [J]. 天津大学学报, 1999, 32(3): 324-328.]
- 10 Zhang Chun-tian. Transform coding [J]. Broadcasting and Television Technology, 1995, 22(2): 52-59. [张春田. 变换编码 [J]. 广播电视与电视技术, 1995, 22(2): 52-59.]
- 11 Zhang Yi-zhen, Liu Tao. MPEG/JPEG Encoding/decoding Technology Implemented with Visual C++ [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2002: 38-65. [张益贞, 刘涛著. Visual C++ 实现编解码技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002: 38-65.]