

H. 264 标准中整数 DCT 图像压缩算法的优化及实现

陈宝远, 吴孟泽, 张清喜, 郝艳莉

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: H. 264 视频编码标准采用整数离散余弦变换 (DCT) 算法, 避免了反变换中的误匹配问题, 与传统的余弦变换相比, 整数 DCT 加快了变换速度, 且易于硬件实现. 本文分析了 H. 264 的整数 DCT 的原理及采用蝶形快速算法的实现方法, 对整数 DCT 的变换核进行了优化, 并对新的变换核应用 MATLAB 软件进行了仿真. 结果表明, 采用优化后的变换核的整数 DCT 更接近于离散余弦变换, 且提高了重建视频图像的主观质量.

关键词: 整数 DCT; 蝶形快速算法; 变换核

中图分类号: TN912.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2009)05-0027-04

Research and Implementation of Integer DCT in H. 264 Based on DSP

CHENG Bao-yuan, WU Meng-ze, ZHANG Qing-xi, HAO Yan-li

(School of Measure-control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: Using the integer Discrete Cosine Transform (DCT), H. 264 avoids the mismatch problem, and increases the computation speed and make hardware implementation easy. This paper analysed the principle of the H. 264 integer DCT and fast papilionaceous algorithm, and changed its transform core, simulated the new core using MATLAB. The results show that integer DCT with new transform core is closer than DCT, and enhances the subjective quality of reconstruction image.

Key words: integer DCT; fast papilionaceous algorithm; transform core

0 引言

H. 264 是国际电信联盟 (ITU) 和国际标准化组织 (ISO) 共同制定的新一代视频编码标准, 对图像或预测残差数据采用基于块的变换编码, 以去除图像数据的空间冗余. 基于 4×4 块的整数 DCT 变换, 可以消除浮点运算, 减少运算量, 同时整数 DCT 可以减小编码的变换和解码的反变换间的误差, 但其去相关性没有达到最优. 本文分析了整数 DCT 变换的原理, 权衡了算法的复杂度和变换核的去相关性, 确定了新的变换核, 给出了采用新变换核的整数变换的公式, 用 MATLAB 进行了实验. 实验结果表明: 该变换可逆, 编解码效果更接近于离散余弦变换, 且经反变换重构的图像失真小^[1].

1 传统的 DCT

一维 N 点离散余弦变换及其逆变换定义如下:

$$X(k) = C_k \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\sqrt{2}}{N} x(n) \cos \frac{(2n+1)k}{2N} \quad (1)$$

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k \frac{\sqrt{2}}{N} X(k) \cos \frac{(2n+1)k}{2N} \quad (2)$$

收稿日期: 2008-08-11

作者简介: 陈宝远 (1970—), 男, 高级实验师, 硕士研究生导师, E-mail: chenbaoyuan@126.com.

以上两式 $n, k = 0, 1, \dots, N-1$; 系数 $C_k: C_0 = 1/\sqrt{2}$, 当 $k = 0, C_k = 1$.

二维 DCT 及其逆变换定义为

$$Y_{uv} = \frac{2}{N} C_u C_v \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} X_{ij} \cos \frac{(2i+1)v}{2N} \times \cos \frac{(2j+1)u}{2N} \quad (3)$$

$$X_{ij} = \frac{2}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} C_u C_v Y_{uv} \cos \frac{(2j+1)v}{2N} \times \cos \frac{(2i+1)u}{2N} \quad (4)$$

其中: X_{ij} 是 $N \times N$ 图像块 X 中第 i 行第 j 列元素; Y 是 DCT 系数.

2 整数 DCT

H.264 标准中的整数 DCT 算法对输入图像也采用基于块的变化编码,但与传统的 8×8 点离散 DCT 变换不同,整数 DCT 变换算法以 4×4 像素子块为单位,在变换和反变换过程中只包含整数运算.整数 DCT 变换算法采用了全新的变换核和量化公式,该算法可以通过 16 位运算来实现,有效地降低对存储器的要求,同时简化了运算步骤,在计算时只使用加法和移位运算,而无须使用乘法运算.使用这种算法做变换和反变换同样是可逆的,不存在误匹配问题^[2-3].

2.1 整数 DCT 原理

H.264 对 4×4 的图像块进行变换操作,则相应的 4×4 变换矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} a & a & a & a \\ b & c & -c & b \\ a & -a & -a & a \\ c & -b & b & -c \end{bmatrix}$$

相应的矩阵形式的 2-D DCT 定义如下:

$$Y = AXA^T = \begin{bmatrix} a & a & a & a \\ b & c & -c & b \\ a & -a & -a & a \\ c & -b & b & -c \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} a & b & a & c \\ a & c & -a & -b \\ a & -c & -a & b \\ a & b & a & -c \end{bmatrix} \quad (5)$$

式 (5) 可以等效为:

$$Y = (CXC^T) \times E = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & d & -d & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ d & -1 & 1 & -d \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & d & -1 & -1 \\ 1 & -d & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -d \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \\ a^2 & ab & a^2 & ab \\ ab & b^2 & ab & b^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $d = c/b$ (0.414). 为了简化计算,取 $d = 1/2$, 整理可得整数 DCT 变换公式:

$$Y = (C_f X C_f^T) \odot E_f = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 2 \\ 1 & -2 & 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a^2 & \frac{ab}{2} & a^2 & \frac{ab}{2} \\ \frac{ab}{2} & \frac{b^2}{4} & \frac{ab}{2} & \frac{b^2}{4} \\ a^2 & \frac{ab}{2} & a^2 & \frac{ab}{2} \\ \frac{ab}{2} & \frac{b^2}{4} & \frac{ab}{2} & \frac{b^2}{4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其变换核 " $C_f X C_f^T$ " 仅用加减和左移即可以实现,而 " $\odot E_f$ " 可以合并到后面的量化过程中去.整数 DCT 的变换与通常 DCT 运算结果近似,但因为 b 和 c 的值有所变化,所以结果有差别^[4-5].

2.2 整数 DCT 变换核的优化

上文分析得到了整数 DCT 的变换公式,由参数 b, c 确定其变换核 " $C_f X C_f^T$ ", 选取不同的 b, c 值可以得到不同的变换核,推导公式过程如上文.为方便起见,在本文中,用 "变换 (b, c)" 来表示由参数 b, c 所确定的变换矩阵.在 H.264 标准的整数 DCT 中,其变换核最先采用了变换 (17, 7),但它需要 32 位的数学运算,2005 年 3 月的 ITU-T 的 H.264 标准中采用了变换 (2, 1),但变换 (2, 1) 并不能很好的接近 DCT 变换矩阵,需要对变换核进行优化,以便更接近于传统 DCT 的变换矩阵^[6].

在视频编码中,变换矩阵通常用于去除输入信号之间的相关性,这种去相关性可以通过变换效率

来衡量: 越大,去除相关性的能力越强.设输入向量为 1 维零均值、去相关系数为 ρ 的马尔代夫过程的采样,为了得到效率高的矩阵,对 $c < 8$ 和 $d < 5$ 条件下不同变换的进行了计算,同时也比较了 DCT 变换.

表 1 给出了当 $\rho = 0.9$ 时的运算结果,从表中可以看出,当 $d = 2.4$ 时去相关性最佳.为了确定最佳的 (b, c) 值,还要考虑两个条件:

1) 为了减少计算复杂度, (b, c) 值越小越好,

这样加法和乘法运算的次数会减少。

2) 为了提高去相关性, 整数变换矩阵每行元素的比应尽量接近 DCT 变换。

表 1 当 $a = 0.9, c = 1, 2, \dots, 7$ 时的最佳变换

变换效率 /%	变换 (b, c)
95.24	(2, 1)
95.62	(5, 2)
95.89	(7, 3)
95.76	(9, 4)
95.78	(12, 5)
95.59	(13, 6)
95.82	(16, 7)
95.73	(17, 7)

变换 (2, 1) 并不能很好的接近 DCT 变换矩阵, 而变换 (5, 2) 比变换 (2, 1) 更接近 DCT 变换矩阵, 其值也较小, 因此选择变换 (5, 2) 作为上面两个条件的折中, 此时 $a = 0.5, c = \sqrt{2/29}$ 变换 (5, 2) 的正变换可以表示为:

$$Y = (C_f X C_f^T) \times E_f = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 5 & 2 & -2 & -5 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 2 & -5 & 5 & -2 \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} 1 & 5 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & -1 & -5 \\ 1 & -2 & -1 & 5 \\ 1 & -5 & 1 & -2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a^2 & ac/2 & a^2 & ac/2 \\ ac/2 & c^2/4 & ac/2 & c^2/4 \\ a^2 & ac/2 & a^2 & ac/2 \\ ac/2 & c^2/4 & ac/2 & c^2/4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

对 8bit 的输入像素数据而言, 预测误差需要 9bit 来表示, 变换矩阵 C_f 的每一行绝对值之和的最大值为 14, 因此变换后的变换系数需要 $9 + \log_2 14 * 14 = 17$ 位来表示。由于许多处理器执行 32 位乘法运算的代价大于 16 位的乘法运算, 因为把变换系数值的范围限制在 16bit 内以便于 16 位定点 DSP 实现。对式 (8) 进行矩阵变换得:

$$Y = (C_f X C_f^T) \times E_f = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 5 & 2 & -2 & -5 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 2 & -5 & 5 & -2 \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} 1 & 5/2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -5/2 \\ 1 & -1 & -1 & 5/2 \\ 1 & -5/2 & 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a^2 & ac & a^2 & ac \\ ac/2 & c^2/2 & ac/2 & c^2/2 \\ a^2 & ac & a^2 & ac \\ ac/2 & c^2/2 & ac/2 & c^2/2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

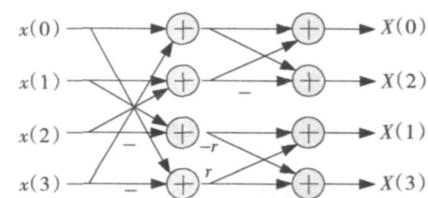
式 (9) 矩阵变换后的变换系数需要 $9 + \log_2 14 * 7 = 16$ 位来表示, 实现时用右移操作代替除 2 的除法操作, 当操作数为奇数时, 右移操作会产生截断误差, 但这些误差会被量化过程中的误差所覆盖。相应的反变换可以表示为:

$$X = C_g^T (Y \times E_f) C_g = \begin{bmatrix} 1 & 5/2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -5/2 \\ 1 & -1 & -1 & 5/2 \\ 1 & -5/2 & 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a^2 & ac & a^2 & ac \\ ac & c^2 & ac & c^2 \\ a^2 & ac & a^2 & ac \\ ac & c^2 & ac & c^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 5/2 & 1 & -1 & -5/2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -5/2 & 5/2 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

为了较低复杂度, 可以采用蝶形快速算法, 二维变换可以先通过两次一维变换来实现, 采用左移和右移操作代替乘法和除法操作, 优化变换核后的整数 DCT 变换只有加法和移位操作, 且更接近于传统的 DCT, 在图像压缩中能够更好的重构图像。

2.3 采用蝶形快速算法实现整数 DCT

可以将式 (8) 的矩阵乘法运算通过两次一维整数 DCT 变换来实现, 先对矩阵的每行进行一维整数 DCT 变换, 再对所得矩阵的每列应用一维整数 DCT 进行变换, 这样每次一维整数 DCT 就可以采用蝶形快速算法进行运算, 可以节省运算时间, 如图 1 所示。



其中, $r=2$: 整数 DCT 变换; $r=1$: Hadamard 变换

图 1 一维快速变换算法

蝶形快速算法利用了矩阵乘法中的重复单元,将这些冗余计算储存起来,很大程度上减少了运算次数,易于在 DSP 处理器上实现^[7]。

3 整数 DCT 的 MATLAB 仿真

本文使用了 Mathworks 公司的 MATLAB 软件对蝶形快速算法进行验证,试验结果将验证采用新的变换核的整数 DCT 变换模块功能。

对两帧连续的图像“foreman1.bmp”和“foreman2.bmp”(如图 2-4),进行简单的矩阵求差,得到的残差矩阵,然后对这些残差像素值进行整数变换和量化运算^[9]。



图 2 连续的两帧图像

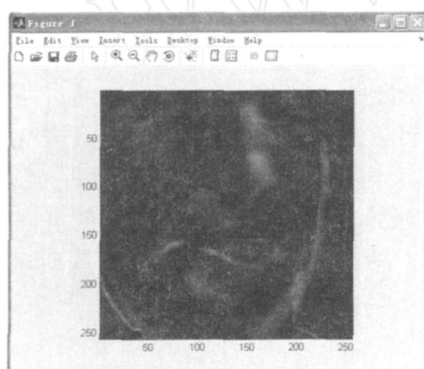


图 3 MATLAB 得到的残差图像

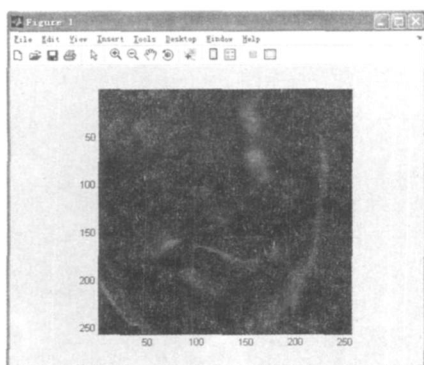


图 4 整数 DCT 反变换后的重构图像

```
>> A = imread('foreman1.bmp');
```

```
>> B = imread('foreman2.bmp');
```

```
>> C = imsubtract(B,A);
```

```
>> D = C(257:512,257:512);
```

截取其中的 256 × 256 图像得到的残差图像如图 3 所示,对其中的 256 × 256 像素进行验证。

其中的 D 为得到的残差矩阵,对此残差矩阵进行分割,将 256 × 256 矩阵分割成 64 个 4 × 4 矩阵,然后进行如下变换和量化:

```
>> X = [5,11,8,10;9,8,4,12;1,10,11,4;19,6,15,7]; % 输入的残差矩阵;
```

```
>> C = [1,1,1,1;5,2,-2,-5;1,-1,-1,1;2,-5,5,-2]; % 整数变换矩阵;
```

```
>> Y = C * X * C'
```

```
>> ...
```

```
>> D = [1 5/2 1 1;1 1 - 1 - 5/2;1 - 1 - 1 5/2;1 - 5/2 1 - 1]; % 反变换矩阵;
```

```
>> XX = D * W * D';
```

```
>> R = round(XX/64);
```

运行结果如下:

变换后 $Y = [140 \ -1 \ -6 \ 7; \ -19 \ -39 \ 7 \ -92; \ 22 \ 17 \ 8 \ 31; \ -27 \ -32 \ -59 \ -21]$;

对 Y 进行量化后 $Z = [17 \ 0 \ -1 \ 0; \ -1 \ -2 \ 0 \ -5; \ 3 \ 1 \ 1 \ 2; \ -2, \ -1, \ -5, \ -1]$;

对 Z 进行反量化和反变换后

$R = [4 \ 13 \ 8 \ 10; \ 8 \ 8 \ 4 \ 12; \ 1 \ 10 \ 10 \ 3; \ 18 \ 5 \ 14 \ 7]$;

比较变换前的残差矩阵 X 和反变换后的矩阵 R,经反变换后的误差最大是 1.78%^[10]。

通过 H.264 的参考软件 JM10.2 来测试新的变换核,对 QCIF 和 CIF 格式的视频序列进行了测试。实验条件为 QP = 16, 20, 28, 32, 两个参考帧,运动向量的搜索范围为 32, 用 IPP...P 帧格式编码,编码频率为 30Hz。图 5 给出了 QCIF 格式的 foreman 视频序列的变换 (5, 2) 和变换 (2, 1) 失真曲线比较,从

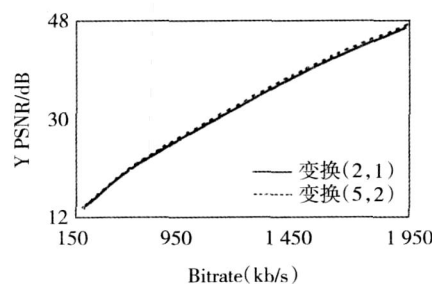


图 5 失真曲线比较

(下转第 34 页)

经一元线性回归计算^[6]得到回归方程 $V = 0.5009C_x + 0.0343$, 线性相关系数为 0.999978, 说明该检测电路具有良好的线性。

4.2 杂散电容对电容层析成像检测系统的影响

在电容/电压转换电路运放 OPA627 的反相端和地之间接入一个标准电容来模拟杂散电容 C_s , 通过改变标准电容值, 来测量杂散电容 C_s 变化对电容电压转换电路输出的影响。取 C_s 值分别为 140 pF, 150 pF, 160 pF, 170 pF, 180 pF 在输入电容为 4 pF 下进行测量, 曲线如图 6 所示。实验表明: 测量结果和理论分析基本一致, 输出电压值基本保持不变。

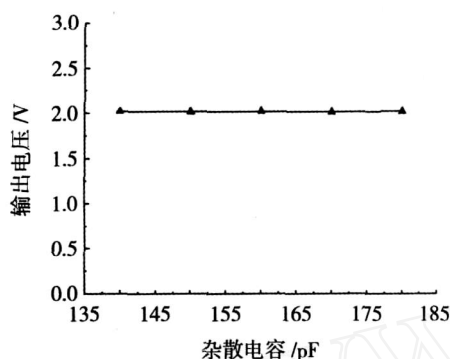


图 6 杂散电容与输出电压关系

5 结 语

由上述试验及分析可知, 相干电容层析成像方法可以避免通过计算移相器固定相移导致的检测误差, 有效地抑制杂散电容对系统中附加相位差的影响, 使得系统检测结果更加准确。同时, 系统的灵敏度和稳定性也得到一定程度的提高。

参考文献:

- [1] 陈德运, 赵 霞, 于晓洋. 油水两相流电容层析成像系统电容测量电路的设计 [J]. 北京: 电路与系统学报, 2004, 19 (4): 107 - 109.
- [2] YANG W Q, STOTT A L. High Frequency and High Resolution Capacitance Measuring Circuit for Process Tomography [J]. IEEE Proc., 1994, 141 (3): 215 - 219.
- [3] HÄHNEL H, YANG W Q, YORK T A. An AC-Based Capacitance Measuring Circuit for Tomography Systems and its Silicon Chip Design [J]. IEEE Colloquium: Advances in Sensors, 1995, 12: 6/1 - 6/8.
- [4] 张亚利. 提高 ECT 系统性能的方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2004.
- [5] 王卫东. 高频电子电路 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [6] 贾玉新. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.

(编辑: 付长缨)

(上接第 30 页)

图中可以看出, 采用优化算法得到的变换 (5, 2) 失真小于变换 (2, 1), 从而得到了保真的反变换图像。

5 结 语

采用优化后新的变换核的整数 DCT, 其所有的操作都是基于整数的, 全过程可用 16bi 整数运算完成, 避免了浮点运算带来的四舍五入误差, 核心算法只有加法和移位的操作, 可以提高运算速度, 易于实现。经多次实验取得的大量实验数据表明, 优化变换核后的整数 DCT 变换应用于图像编解码中效果上更接近传统的离散余弦变换, 经反变换重构后的图像失真小, 同时可以进一步提高速度和图像质量。

参考文献:

- [1] RICHARDSON, H. 264/MPEG-4 Part 10 White Paper [Z]. Oct 2007.
- [2] 刘春龙, 刘 泊. 基于 H. 264 帧内模式快速选择算法 [J]. 哈尔

滨理工大学学报, 2007 (2): 40.

- [3] 王 伟, 蒋 宏. 自适应多子值图像分割算法 [J]. 自动化技术与应用, 2007 (8): 71.
- [4] 王克奇, 朱金魁, 白雪冰. 基于小波分析和 DCT 的人脸特征提取 [J]. 自动化技术与应用, 2009 (4): 65 - 67.
- [5] 张 霞, 张登福. H. 264 低复杂度变换和量化分析 [J]. 中国科技信息, 2007 (1): 142 - 143.
- [6] 魏利风. AVC/H. 264 整数离散余弦变换及反变换的结构设计 [J]. 现代电子技术, 2008 (4): 45 - 46.
- [7] HU Feng, LU Jia, CHEN Shuzhen. Improved Diamond Search Algorithm for H. 264/AVC Video Coding Standard [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2008 (1): 14 - 15.
- [8] 黄宏飞. Matlab 下 DCT 变换在信号压缩中的应用 [J]. 电气电子教学学报, 2007 (1): 31 - 32.
- [9] 张 华, 叶海建, 王 彦. 改进的二值图像的交叉扫描检测算法 [J]. 自动化技术与应用, 2009 (3): 48 - 49.
- [10] 胡 鹏, 李见为. 基于 Gabor 小波和流形的人脸识别研究 [J]. 自动化技术与应用, 2009 (7): 57 - 59.

(编辑: 王 萍)