

文章编号: 1007-2780(2013)02-0278-06

“类整数 DCT”变换基去相关性能分析

吴君钦, 李艳丽, 刘 昊

(江西理工大学 信息工程学院, 江西 赣州 341000, E-mail: wujunqin@tom.com)

摘 要: 对整数 DCT 变换矩阵填充规则加以改进, 得到一类新的整数变换基, 称为“类整数 DCT”变换基。从海量“类整数 DCT”变换基中搜索出若干优选变换基, 应用于 MPEG4 编解码实验, 经实验测试和数据分析, 结果表明优选“类整数 DCT”变换基归一化正交矩阵与 DCT 变换的去相关性能相近, 可替代整数 DCT 变换在图像编码中所起的作用。由于“类整数 DCT”变换有完全快速算法, 便于硬件实现, 应用于图像编码, 可降低编码器复杂度。

关 键 词: 整数 DCT; 去相关; 快速算法; 图像编码; 硬件实现

中图分类号: TN91

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132802.0278

De-Correlation Characteristic Analysis of Variety Integer DCT Transform Radix

WU Jun-qin, LIU Hao, LI Yan-li

(Faculty of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China, E-mail: wujunqin@tom.com)

Abstract: Improve on the matrix filling rule of the integer DCT transform radix, a new type of integer transform radix was obtained, called variety integer DCT transform radix. Filtering the numerous of variety integer DCT transform radix, some optimum radix was obtained, and was applied to MPEG4 coding and decoding experiment, the analysis results of test data show that the normalized matrix of variety integer DCT transform radix have similar de-correlation characteristic with the original DCT matrix, and can replace functions of the integer DCT transform radix in image and video coding. Because variety integer DCT transform can be implemented by rapid butterfly algorithm completely, and can be implemented by hardware easily, applying to image and video coding, can reduce the complexity of coder and decoder greatly.

Key words: integer DCT transform; de-correlation; rapid algorithm; image coding; implemented by hardware

1 引 言

离散余弦变换 DCT (Discrete Cosine Transform) 是性能接近 K-L 变换的准最优变换, 在图

像和视频的压缩编码处理中得到了广泛的应用。浮点 DCT 变换需要较多浮点乘加运算才能实现, 编码器设计需要消耗很多的软硬件资源, 受限字长的编码器中, 浮点运算存在截断误差, 编码与解码

收稿日期: 2012-04-09; 修订日期: 2012-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 11062002); 江西省自然科学基金项目 (No. 2008GZS0030)

作者简介: 吴君钦 (1966—), 男, 江西赣州人, 副教授, 主要研究方向: 嵌入式系统应用 智能控制。

数据存在一定漂移,会造成不匹配现象。整数 DCT 采用整数代替浮点数表示变换矩阵,变换核心部分为整数变换,无浮点数运算,乘法可用移位和加法实现,精确度高,保证了编解码的可逆性,解决了编码器、解码器正逆变换之间的匹配问题。因此新一代音视频压缩标准 H. 264、中国国家音视频编码标准 AVS 等标准,均采用了整数 DCT 变换^[1-8]。

文献[1]提出了一类新的整数 DCT 变换(简称为:“类整数 DCT”变换)及其快速算法。因为整数变换基矩阵不是惟一的,在分析讨论整数变换的去相关效率、运算复杂度等指标定量计算的基础上,给出了优选变换基搜索方法方和步骤,并仔细评估了不同变换基对编码器整体性能的影响。

2 整数 DCT 变换

二维 8×8 离散 DCT 变换的矩阵形式为 $Y = PXP^T$,其中 X 为 8×8 图像帧内或帧间预测残差矩阵, Y 为变换后的系数矩阵,变换矩阵 P 表示为(1):

$$P = \begin{bmatrix} a & a & a & a & a & a & a & a \\ b & d & e & g & -g & -e & -d & -b \\ c & f & -f & -c & -c & -f & f & c \\ d & -g & -b & -e & e & b & g & -d \\ a & -a & -a & a & a & -a & -a & a \\ e & -b & g & d & -d & -g & b & -e \\ f & -c & c & -f & -f & c & -c & f \\ g & -e & d & -b & b & -d & e & -g \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中系数 $\{a, b, c, d, e, f, g\}$ 的取值见文献[1]公式(1),将它们对应的整数 DCT 变换矩阵系数分别用 $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$ 表示,则 8×8 整数 DCT 正变换矩阵表示为(2):

$$I = \begin{bmatrix} a_0 & a_0 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & -a_4 & a_3 & -a_2 & -a_1 \\ a_5 & a_6 & -a_6 & -a_5 & -a_5 & -a_6 & a_6 & a_5 \\ a_2 & -a_4 & -a_1 & a_3 & a_3 & a_1 & a_4 & -a_2 \\ a_0 & -a_0 & -a_0 & a_0 & a_0 & -a_0 & -a_0 & a_0 \\ a_3 & -a_1 & a_4 & a_2 & -a_2 & -a_4 & a_1 & -a_3 \\ a_5 & -a_6 & a_6 & -a_5 & -a_5 & a_6 & -a_6 & a_5 \\ a_4 & a_3 & a_2 & -a_1 & a_1 & -a_2 & a_3 & -a_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对 8×8 的整数 DCT 变换矩阵 I 进行归一化处理,归一化矩阵为 G ,归一化后的正逆变换可表示为(3):

$$Y = IXI^T \otimes S, \quad X = I^T(Y \otimes S)I \quad (3)$$

其中 $S = GG^T$, X 是 8×8 输入数据块, Y 是变换后系数矩阵,式(3)表明整数 DCT 变换是可逆的,将 $\otimes S$ 点乘运算与量化处理合并后,变换核心只有整数运算,解决了编解码数据的不匹配问题,变换核心的乘法可用加法和移位实现。虽然整数 DCT 变换会引入一些额外的误差,如量化误差,但变换最后阶段的量化误差对变换精度影响并不大。 8×8 整数 DCT 变换的核心运算可部分利用碟形算子实现快速算法。

3 类整数 DCT 变换及其快速算法

整数变换基的选择对 DCT 变换的性能起着决定性的作用,文献[1]、文献[2]归纳了整数变换矩阵需满足的条件。以往在寻找整数 DCT 变换基的过程中,主要追求的目标就是其归一化系数矩阵与原始 DCT 系数矩阵接近,以达到接近 $K-L$ 变换的最优变换性能。然而整数 DCT 并不是惟一的一类整数变换基,若设计目标更改为变换的去相关特性与 DCT 特性相接近,而不要求其归一化系数矩阵与 DCT 矩阵接近,则可以得到一类新的整数变换。根据新设计目标,对整数 DCT 生成规则加以改进,得到一类新的“类整数 DCT”变换基,其变换矩阵为(4):

$$H = \begin{bmatrix} a_0 & a_0 \\ a_1 & a_2 & a_2 & -a_1 & a_1 & -a_2 & -a_2 & -a_1 \\ a_3 & a_4 & -a_4 & -a_3 & -a_3 & -a_4 & a_4 & a_3 \\ a_5 & -a_6 & -a_6 & -a_5 & a_5 & a_6 & a_6 & -a_5 \\ a_0 & -a_0 & -a_0 & a_0 & a_0 & -a_0 & -a_0 & a_0 \\ a_2 & a_1 & -a_1 & a_2 & -a_2 & a_1 & -a_1 & -a_2 \\ a_4 & -a_3 & a_3 & -a_4 & -a_4 & a_3 & -a_3 & a_4 \\ a_6 & -a_5 & a_5 & a_6 & -a_6 & -a_5 & a_5 & -a_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

为了满足正交性,考虑式(5):

$$HH^T = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & k_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_0 & 0 & k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_2 & 0 & -k_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_0 & 0 & k_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $k_0 = 4(a_1 a_5 - a_2 a_6)$, $k_1 = 8a_0^2$, $k_2 = 4(a_1^2 + a_2^2)$, $k_3 = 4(a_3^2 + a_4^2)$, $k_4 = 4(a_5^2 + a_6^2)$ 。正交性要求公式(5)右边必须为对角矩阵,即要求 $k_0 = 0$, $a_1 a_5 = a_2 a_6$, 根据这一条件可以从整数组合中搜索出大量符合条件的变换基, 所得变换基可用向量 $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$ 表示。

容易证明, “类整数 DCT”变换是可逆的, 其二维逆变换的矩阵关系可以表示为: $Y = H X H^T \otimes S$, $X = H^T (Y \otimes S) H$, 其中 $S = G G^T$,

X 为原始输入数据矩阵, Y 为变换结果, G 为 H 的归一化矩阵, 矩阵点运算 $\otimes S$ 并入量化运算之中, 二维“类整数 DCT”变换可分解为两次一维变换。

众所周知, FFT 算法可完全用蝶形运算实现, “类整数 DCT”变换的核心部分也可以完全由蝶形运算实现。一维“类整数 DCT”变换矩阵表达式为 $X = H x$, 其中 x 、 X 为变换前后一维列向量, 展开成变换多项式则表示为(6):

$$\begin{cases} X_0 = a_0[(x_0 + x_7) + (x_3 + x_4)] + a_0[(x_1 + x_6) + (x_2 + x_5)] \\ X_4 = a_0[(x_0 + x_7) + (x_3 + x_4)] - a_0[(x_1 + x_6) + (x_2 + x_5)] \\ X_2 = a_3[(x_0 + x_7) - (x_3 + x_4)] + a_4[(x_1 + x_6) - (x_2 + x_5)] \\ X_6 = a_4[(x_0 + x_7) - (x_3 + x_4)] - a_3[(x_1 + x_6) - (x_2 + x_5)] \\ X_7 = a_6[(x_0 - x_7) + (x_3 - x_4)] - a_5[(x_1 - x_6) - (x_2 - x_5)] \\ X_3 = a_5[(x_0 - x_7) - (x_3 - x_4)] - a_6[(x_1 - x_6) + (x_2 - x_5)] \\ X_5 = a_2[(x_0 - x_7) + (x_3 - x_4)] + a_1[(x_1 - x_6) - (x_2 - x_5)] \\ X_1 = a_1[(x_0 - x_7) - (x_3 - x_4)] + a_2[(x_1 - x_6) + (x_2 - x_5)] \end{cases} \quad (6)$$

明显地, 方程组(6)中元素之间存在着强对称性, 可以像 8 点一维 FFT 算法一样, 通过三步蝶形运算快速计算变换结果, “类整数 DCT”变换的快速计算流程如图 1 所示。

了从大量“类整数 DCT”变换基中找出优质变换基, 必须给出“类整数 DCT”变换基去相关效率等综合性能指标的定量描述。“类整数 DCT”变换主要用于二维图象压缩编码, 去除块内相关性, 使变换后的能量集到低中频系数中, 经量化处理后便于熵编码, 所以可以用自相关函数来定义变换基的去相关性能。

若 X 为 8×8 输入残差矩阵, Y 为变换后系数矩阵, Y 按“Z”字扫描得到的一维列向量 $y(i)$, $i = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$, $N = 64$, 并对列向量进行周期性拓展 $y(i+N) = y(i)$, 则 Y 的各阶自相关系数 $R_Y(i)$ 计算公式为(7):

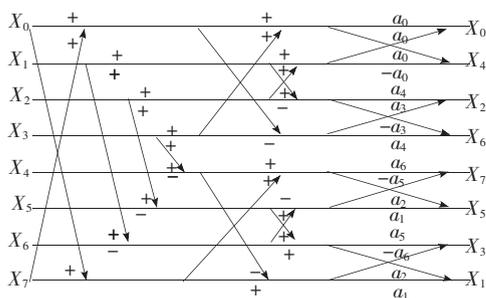


图 1 类整数 DCT 快速算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

图 1 中前两级无乘法运算, 第三级蝶形运算需整数乘法运算。“类整数 DCT”逆变换也有类似快速算法, 与正变换流程的顺序正好相反。根据图 1, 正逆变换算法非常易于用硬件实现。

4 类整数 DCT 变换的去相关效率

“类整数 DCT”变换具有正交性、存在完全的快速算法、系数值较小等特性。但不同“类整数 DCT”变换基的去相关特性是有较大差异的, 为

$$R_Y(i) = \sum_{j=0}^{N-1} y(j)y(j+i) \quad (7)$$

定义输出序列的自相关程度参数 ρ_Y :

$$\rho_Y = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |R_Y(i)|}{(N-1)R_Y(0)} \quad (8)$$

由自相关系数性质可知, 公式(8)分母中 $R_Y(0)$ 是信号总功率, 分子是各阶自相关系数绝对值之和。若输出信号 $y(i)$ 元素间不相关, 完全随机, 除 0 阶外其他各阶自相关系数应很小, 分子很小, 反之, 元素间关联越多, 0 阶以外各阶自相关系数会较大, 则分子大, 所以 ρ_Y 反映了输出信号自相

关程度大小,并满足 $0 < \rho_r < 1$ 。

对给定输入残差数据 X , 变换运算的去相关效率定义为(9):

$$\eta = (1 - \rho_r) \tag{9}$$

η 代表了变换输出信号的能量越集中度, 输出序列自相关越大, 信号能量就分散, 能量集中度就越小。对于给定残差数据块, 变换前的相关程度是确定的, 变换基的性能越好, 变换后能量越集中, 去相关效率就越大。优选变换基应满足: 不论输入数据相关程度如何, 变换后相关程度接近为零, 变换后能量集中度接近 100%。

5 编码器主要性能指标

运算复杂度: 不同变换基乘法运算实现的复杂度有较大区别, 若系数为小于 15 的整数, 乘法可分解为若干次移位操作和加减法运算。本论文所选择整数变换基元素都在 1~15 之间, 所有乘法运算可用有限次加/减法和移位操作组合来实现, 比如: $12 * x = (x \ll 3) + (x \ll 2)$, “*” 代表乘法操作, “ \ll ” 代表左移操作, 为了度量变换运算复杂度, 移位和加法的复杂度分别定量为 1, 则整数 12 的乘法实现复杂度因子为 3。表 1 是系数 1~15 的乘法实现复杂度因子表。

表 1 整数 1~15 乘法复杂度因子表

Table 1 Complexity factor of Multiplication

系数 a	复杂度 因子 O	系数 a	复杂度 因子 O	系数 a	复杂度 因子 O
1	1	6	3	11	4
2	1	7	2	12	3
3	2	8	1	13	4
4	1	9	2	14	3
5	2	10	3	15	2

因为“类整数 DCT”正变换只有最后一级蝶型运算涉及乘法运算, 前面两级运算复杂度与变换基系数无关, 只要计算最后一级运算复杂度就能度量变换基的整体复杂度, 根据图 1 可得到末级复杂度 D 计算公式为(10):

$$D = 4O(a_0) + 2O(a_1) + 2O(a_2) + 2O(a_3) + 2O(a_4) + 2O(a_5) + 2O(a_6) \tag{10}$$

峰值信噪比: 在给定帧内预测、帧间运动估计算法及量化等级等条件下, 通过考察图像编码质

量——峰值信噪比 PSNR 指标可判定变换基的优劣, PSNR 越大, 图像编码质量越好, 则变换基性能越好, PSNR 计算公式为(11):

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{(2^{r-1})^2}{MSE} \right) \tag{11}$$

公式(11)中对数运算式内分子部分表示像素最大值的平方, 一般 8 bit 灰度图像为 255×255 , 若 $f(i, j)$ 与 $g(i, j)$ 分别表示压缩前和压缩解压还原后的图像, 则 MSE 是原图像与处理图像之间的均方误差, 其计算公式为(12):

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [f(i, j) - g(i, j)]^2 \tag{12}$$

压缩比: 在相同信号编码质量前提下, 视频图像编码压缩比 r 是编码器最重要的性能指标之一, 若输入原始 YUV 码流文件长度为 YUV_LEN (字节), 输出 MPEG4 码流文件长度为 MPEG4_LEN (字节), 则压缩比 r 计算公式为(13):

$$r = \frac{YUV_LEN}{MPEG4_LEN} \tag{13}$$

6 优选变换基搜索与性能评估

因为存在海量满足正交变换条件的整数 DCT、“类整数 DCT”变换基, 所以需要从中选择部分综合性能好的优质变换基用于实际图像编码。在搜索变换矩阵系数 $\{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$ 的过程中, 对 1~15 整数所有组合使用遍历搜索方法, 先找出满足正交条件的变换基, 然后对这些变换基的性能做详细的分析和筛选。详细步骤为:

(1) $a_0 \sim a_6$ 可分别取值为 1~15, 从中找出满足正交变换条件 $k_0 = 4(a_1 a_5 - a_2 a_6) = 0$ 的组合, 用软件搜得约有 8 000 个组合满足要求;

(2) 从约 8 000 个组合中找出 400 个乘法运算实现复杂度较小的变换基;

(3) 把第 2 步找出的变换基应用于开源 MPEG4 编码器, 计算编码器的去相关效率、PSNR、压缩比等参数的平均值, 从中选出综合性能最优的变换基。

开源 MPEG4 视频编码器 Xvidcore-1.2.2 是功能完整的视频编解码, 包含帧内预测、运动估计与帧间预测、DCT 变换和熵编码几部分组成, 编码器输入是 QCIF 的视频序列, 输出是 MPEG4

格式的视频文件。输入视频帧图像经分块、帧内/帧间预测,形成 8×8 残差数据块送入变换、量化模块,最后经无损熵编码输出压缩视频数据,详细流程见图 2。为了分析整数变换性能,把编码器中的定点 DCT 正逆变换算子源代码更改为整数、“类整数 DCT”算子,并插入性能评估代码,计算编码器的去相关效率、PSNR、压缩比等参数的总体平均值,插入位置见图 2。

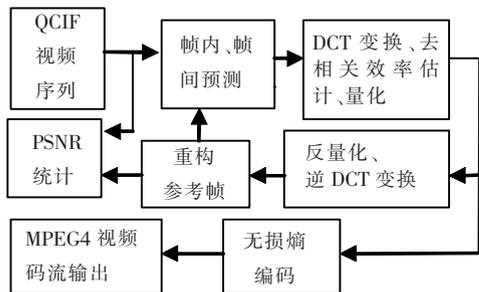


图 2 Xvidcore MPEG4 编码器流程图

Fig. 2 Flow chart of Xvidcore MPEG4 code

因为变换基的去相关效率、PSNR、压缩比等参数不仅与编码器本身有关,还与输入数据有关。为了让测试结果具有可比性,采用 Foreman 和 Container 两个 176×144 YUV 格式的 QCIF 标准测试序列文件作为编码器输入数据源,运行编码器命令行参数设置为:“-qtype 1-w 176-h 144-type 0-csp i420”,其中参数 qtype=1 代表量化级别。运行编码器程序时自动统计去相关效率、PSNR、压缩等参数,并把结果写入文件供后续分析。

表 2 优选变换基填充元素向量表

Table 2 Fill elements vector of optimum radix

变换基序号	变换基类型	变换基填充元素
1	标准 DCT	{a,b,c,d,e,f,g}
2	整数 DCT	{1,8,15,9,2,7,4}
3	整数 DCT	{1,8,15,9,2,4,3}
4	整数 DCT	{1,8,15,9,2,5,4}
5	整数 DCT	{1,8,15,9,2,3,4}
6	整数 DCT	{1,8,15,9,2,4,7}
7	类整数 DCT	{1,8,14,9,2,7,4}
8	类整数 DCT	{1,4,7,15,2,14,8}
9	类整数 DCT	{1,4,14,8,5,7,2}
10	类整数 DCT	{1,4,14,15,8,7,2}
11	类整数 DCT	{1,8,14,5,2,7,4}

表 2 是标准 DCT 及部分优选整数 DCT、“类整数 DCT”变换基填充元素向量表,表 3、表 4 给出了各变换基应用于 MPEG4 编码的性能评估结果,表 5 是统计范围内“类整数 DCT”变换基性能参数的最大值与最小值,反映了不同变换基性能差异的大小。

从表 3、表 4 可以看出,“类整数 DCT”变换应用于 MPEG4 编码,其压缩比、峰值信噪比、去相关效率等性能指标与标准 DCT 变换的偏差小于

表 3 编码 Foreman 序列性能比较

Table 3 Performance comparison of coding Foreman sequence

变换基序号	$\eta/\%$	平均 PSNR/dB	r	D
1	96.03	38.4	42.8	
2	96.01	38.2	43.1	
3	96.01	38.2	42.9	
4	96.01	38.2	42.7	
5	96.01	38.1	42.3	
6	96.00	38.0	42.1	
7	95.98	37.9	41.4	18
8	95.98	37.9	41.4	18
9	96.01	38.0	41.2	18
10	96.01	38.0	41.2	18
11	95.98	37.9	41.2	18

表 4 编码 Container 序列性能比较

Table 4 Performance comparison of coding Container sequence

变换基序号	$\eta/\%$	平均 PSNR/ dB	r	D
1	96.00	39.9	112.8	
2	95.94	39.6	113.6	
3	95.96	39.5	113.4	
4	95.94	39.5	112.8	
5	95.93	39.4	112.8	
6	95.93	39.3	113.1	
7	95.88	39.1	111.5	18
8	95.88	39.1	112.4	18
9	95.92	39.3	111.8	18
10	95.92	39.3	111.2	18
11	95.90	39.2	110.9	18

表 5 类整数 DCT 变换基性能极值表

Table 5 Extremum of variety integer DCT transform radix

性能指标	Foreman		Container	
	最大值	最小值	最大值	最小值
$\eta/\%$	96.01	95.91	95.96	95.85
平均 PSNR/dB	38.0	37.5	39.3	38.6
r	41.6	39.4	112.7	108.9
D	18	18	18	18

5%, 与整数 DCT 基相当。

图 1 快速算法前两级复杂度为 16, 最后一级除乘法操作外另需 8 个加法操作, 若采用逐位移位求和法实现一个 $4 \text{ bit} \times 8 \text{ bit}$ 并行乘法器的需要 3 次移位操作 3 次加法操作, 图 1 所示类整数 DCT 变换通用快速算法总体实现复杂度为 $16 + 12 \times 6 + 8 = 96$ (a_0 为 1 不需要乘法)。表 2 序号为 7~11 的优选“类整数变换基”快速算法硬件实现复杂为 $16 + 18 + 8 = 42$, 所以优选变换基快速算法实现可节约 54% 逻辑门资源。

根据文献[9]图 3.1 可估算出整数 DCT 变换通用快速算法最后一级需要 20 个 $4 \text{ bit} \times 8 \text{ bit}$ 并行乘法器及 12 个加法器, 表 2 序号为 2~6 的整数 DCT 快速算法的总体复杂度为 $16 + 20 \times 6 + 12 = 148$ 。类整数 DCT 快速算法与整数 DCT 算法相比, 可节约 71% 逻辑门资源。

7 结 论

表 3、表 4 的实验数据分析结果表明“类整数 DCT”变换去相关性能与标准 DCT 变换差异很小, 用“类整数 DCT”变换代替 DCT 变换对 MPEG4 编码器的压缩比、峰值信噪比等性能的影响极小。“类整数 DCT”正逆变换都存在图 1 所示完全快速算法, 乘法运算仅用加法和移位操作即可实现, 算法流程便于硬件实现。基于上述两点, 所以“类整数 DCT”是一组综合性能比整数 DCT 更优的整数变换基, 完全可以替代 MPEG4、H. 264、AVS 等标准中的 DCT 或整数 DCT 变换。这类新变换基的获得, 对进一步降低视频编解码器的复杂度, 提高性能, 具有积极的意义。

参 考 文 献:

- [1] WU J Q, LI Y L. A new type of integer DCT transform radix and its rapid algorithm [C]// *International Conference on Electric Information And Control Engineering (ICEICE)*, Ney York, USA: IEEE, 2011, (2): 1063-1066.
- [2] 王中元, 胡瑞敏, 田纲, 等. 整数 DCT 变换中变换基的通用生成算法 [J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(6): 1061-1064.
- [3] 毕厚杰. 新一代视频压缩标准——H. 264/AVC [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [4] 田晓华, 朱光喜, 王曜, 等. 视频编码中整数变换的优化设计 [J]. *计算机应用*, 2004, 24(5): 85-87.
- [5] 戴声奎, 刘建国, 汪国有, 等. 一种无乘法的整数 DCT 快速实现方法 [J]. *微电子学与计算机*, 2008, 25(5): 11-13.
- [6] Su R, Liu G Z, Zhang T Y. Fast mode decision algorithm for intra prediction in H. 264/AVC with integer transform and adaptive threshold [J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2007, 1(1): 11-27.
- [7] Xin J, Vetro A, Sun H F. Coverting DCT Coefficients to H. 264/AVC Transform Coefficients [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3332: 939-946.
- [8] Korah R, Perinbam J-R P. FPGA Implementation of Integer Transform and Quantizer for H. 264 Encoder [J]. *J. Signal Processing Systems*, 2008, 53(3): 261-269.
- [9] 侯兆然. 高速率 AVS 整数变换模块的研究 [D]. 上海: 上海大学, 2007: 26-27.