

改进的层式 DCT 在数字水印技术中的应用

吕 慧, 张贵仓

(西北师范大学 数学与信息科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 数字水印问题研究中, DCT 块效应是困扰版权保护的一大难点. 结合小波特性, 提出一种改进的层式 DCT 算法, 并应用于数字水印. 将 DCT 变换后所得子块的低中频系数分别抽样, 然后将水印信息的变换域量值分别叠加到原始载体经改进的层式 DCT 变换后的低中频系数中, 同时对改进的层式 DCT 变换的分层层数进行了研究. 实验结果表明, 水印方案具有很好的整体去方块效应, 提高了水印的不可见性, 对抗压缩、剪切等常规几何攻击具有较强的鲁棒性, 并且两者之间达到了一个较好的平衡. 进一步扩大了层式 DCT 的实际应用.

关键词: 数字水印; 抽样; 子带; 鲁棒性; 不可见性

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)02-0103-04

Improved Layer DCT Applied to Digital Watermark

LV Hui, ZHANG Gui-cang

(College of Mathematics and Information Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In the research of digital watermark, blocking-artifact problem is a very big difficulty of copyright protection. An improved layer DCT algorithm is proposed based on wavelet features, and it is applied to the digital watermark. The low-frequency and middle-frequency coefficients were extracted after DCT transform and reconstructed by the spatial position. The digital watermark was embedded in low-frequency and middle-frequency domain, and the number of layers which should be chosen was researched. The result shows that the improved layer DCT algorithm does well in removing the blocking artifact, and satisfies the request of invisibility. The improved layer DCT algorithm has better robustness with the attacking experiments, and the practical application of layer DCT is enlarged.

Key words: digital watermarking; sampling; sub-bands; robustness; invisibility

1 引言

近年来, 许多基于变换域的水印算法被提出, 其中, 离散余弦变换(DCT)因其能量集中特性和压缩比高而被广泛应用. 常规 DCT 算法是基于块的操作, 在实际应用中, 产生了一定的 DCT 块效应, 水印不可见性较差. Kuan^[1]类比小波变换级数的全局变换思想提出了一种层式 DCT 算法, 图像的去方块效应局部得到了优化.

针对上述问题, 本文提出了一种改进的层式

DCT 算法, 并用于数字水印. 根据 DCT 子块间的相关性, 利用频带描述 DCT 系数, 充分利用 DCT 的多分辨特性^[2], 既扩大了水印的嵌入空间, 又引进了小波的全局变换思想. 首先, 对原始载体与水印信息分别做 DCT 变换, 对 DCT 分块后的四个子块分别抽取低中频系数. 其次, 把具有相同频带的子块按原来的空间位置组合成同频子带, 水印子块信息分别在原始载体对应层嵌入. 最后, 对改进的层式 DCT 变换的分层层数进行了研究.

收稿日期: 2011-05-11; **修回日期:** 2011-07-18

基金项目: 甘肃省自然科学基金(0803RJZA109); 甘肃省自然科学研究基金计划(1010RJZA019); 甘肃省科技攻关项目(2GS052-A052-011)

2 改进的层式 DCT

图像经 DCT 变换后,每个子块的左上角集中了图像主要能量,是人眼最敏感区域,右下角代表高频分量,剩余分量为中频分量,容量较大.利用频带的观点来看待 DCT 系数,组成类似小波变换后的结构,这样可以将一幅图像作为整体考虑,克服了传统的 DCT 块效应.改进的层式 DCT 是将传统层式 DCT 的抽样范围扩大:将一幅图像进行 $N \times N$ 的 2D-DCT 变换后,不仅从每个子块的低频子带抽取 $M \times M (M < N)$ 子块,而且从每个子块的中频子带抽取 $M \times M$ 子块,再把具有相同频带的子块按原来的空间位置组合成同频子带,最后对各子块做离散反余弦变换^[3] (IDCT).这一过程称为 $N > M$ 的 DCT 抽样,其逆过程称为 DCT 插值^[4].

改进的层式 DCT 抽样有效地将图像分为低通的抽样部分(中低频子带)和高通的细节部分,将此 DCT 抽样不断的作用于低通部分,图像的数据结构则会形成一个金字塔式结构.由 DCT 本身所具有的能量集中特性可知,越接近顶层,能量越大.图 1 所示为改进的层式 DCT 抽样原理图,以三层抽样为例,其中,中低频系数集中了图像的主要能量,是图像重构的主要信息,高频系数显示图像的细节部分,可以进行粗略量化^[5],但并不影响重构图像质量.

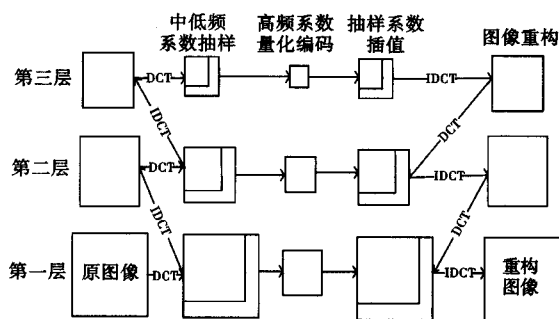


图 1 改进的层式 DCT 抽样原理图

改进的层式 DCT 变换主要步骤为:

(1) 将原图像进行 $N \times N$ 的 2D-DCT 变换.

(2) 每个 DCT 块均分为 4 个子块.然后从每个子块中分别抽取低频子带和中频子带的 $M \times M (M < N)$ 子块,再把同频子块按原来的空间位置组合成同频子带,这样输入图被分为 4 部分:左上角的低频部分,右上角的低高频部分,左下角的高低频部分,右下角的高频部分,分别记为 LL、LH、HL、HH.

(3) 对低中频子块做 $M \times M$ 的 IDCT 变换,得到的图像作为第二层的输入图.剩下的高频子带不做处理,直接作为第一层的系数.

(4) 对第二层输入图做相同的变换,产生第三层的输入图和第二层的系数.如此抽样,直到满足要求.经此变换后,原图就变换成分层的 DCT 系数,DCT 系数所在的层数越高,其对应图像的分辨率就越低.

(5) 对最后一层的输入图不做任何处理,直接作为顶层数据.

3 水印算法

3.1 水印的嵌入过程

原始载体为灰度图像,水印信息为二值图像.水印信息嵌入过程如下所示.

(1) L 次 DCT 抽样:首先对原始载体图像进行改进的层式 DCT 变换,假设抽样次数为 L ,这样,DCT 域被分为 $L+1$ 层,除顶层不做分块外,将任一 $m (m=1,2,\dots,L)$ 层的子带图像,按照频带的不同,分为无重叠的三个子块,分别记为 $X_{ij}^k(u,v) (k=1,2,3)$.水印信息做同样变换,将子块信息分别记为 $w^k(u,v) (k=1,2,3)$.

(2) 水印嵌入:由步骤(1),每一子块的水印算法为

$$X'_{ij}^k(u,v) = X_{ij}^k(u,v) + \alpha w^k(u,v) \quad (1)$$

式中, $k=1,2,3$, $X_{ij}^k(u,v)$ 为原始 DCT 系数, $X'_{ij}^k(u,v)$ 为嵌入水印后的 DCT 系数, α 为水印嵌入强度因子 ($0 \leq \alpha \leq 1$), $w^k(u,v)$ 为待嵌入水印.

3.2 水印的提取过程

水印提取过程为嵌入过程的逆过程,其关键步骤为:

(1) L 次 DCT 抽样:将含水印图像按照与嵌入过程相同的方式进行 L 次 DCT 抽样运算.

(2) 水印提取:在经抽样所得各层中,根据嵌入水印时所采用公式的逆运算提取水印子块信息.式(2)为提取水印信息的表达式:

$$w^k(u,v) = \frac{X'_{ij}^k(u,v) - X_{ij}^k(u,v)}{\alpha} \quad (2)$$

4 仿真实验与结果

4.1 优化仿真方法

通过具体的实验验证改进的层式 DCT 的优越性,将其应用于数字水印领域,并对水印算法性能和分层层数进行了讨论.在 Matlab 7.0 平台上进行仿真实验.

4.2 改进的层式 DCT 编码

实验中对 512×512 的“baigong”图像进行了传

统层式 DCT 变换和改进的层式 DCT 变换, $N=32$, $M=16$, 变换层数均为 3 层, 然后进行嵌入式零树编码^[6]. 图 2 所示为两种编码方法在不同的压缩比下的峰值信噪比 (PSNR), 以此作为客观评价参数来衡量两种算法的压缩效果. 计算公式如下:

PSNR =
$$10\lg\left(\frac{255^2mn}{\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n||I(i,j)-K(i,j)||^2}\right) \quad (3)$$

式中, m, n 分别为图像的宽度与高度, $I(i, j)$ 为原始图像的灰度值, $K(i, j)$ 为压缩后图像的灰度值.

图 3 所示为两种编码方法解压后得到的图像.

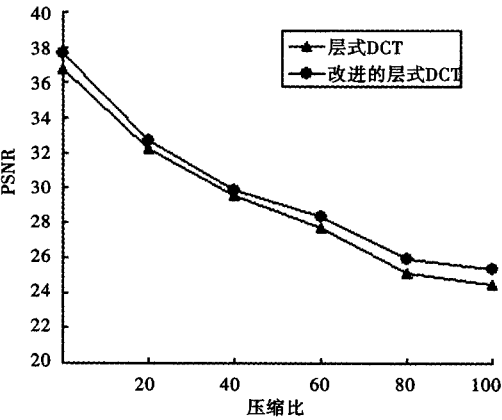


图 2 两种算法的压缩效果比较



(a) 传统算法 (b) 本文算法

图 3 两种算法的解压效果

图 2 中表明, 在压缩比相同时, 本文算法具有更高的 PSNR 值, 图 3 所示为两种算法的解压图比较, 传统算法得到的解压图在边缘位置有明显的方块效应, 而本文算法得到的解压图则更加光滑, 其主要原因是: 本文算法不仅对低频系数进行了抽样, 对中频系数同样进行了抽样, 充分利用了中频子带与低频子带的相似性, 将图像作为整体考虑, 在经过抽样后, 本层输入图因 DCT 分块而产生的边界有一半落入了更高层输入图的 DCT 分块内, 原来由这些边界产生的方块效应基本被消除.

4.3 数字水印算法性能分析

实验以 256×256 的二维“baigong”图像作为原始载体, 32×32 的二值图像“西北师大”作为原始水印, α 选取 0.075, $N=8, M=4$.

传统算法只在低频子带中嵌入水印信息, 本文算法在中低频子带中嵌入水印信息, DCT 域分四层. 图 4 中分别显示了利用本文算法与传统算法得到的含水印信息的图像, 利用 PSNR 值来评价嵌入性能, PSNR 值越高, 说明水印的不可见性越好.



PSNR=36.02 PSNR=34.78
(a) 本文算法 (b) 传统算法

图 4 两种算法的压缩效果比较

对图 4 所示的两幅含水印图像进行各种攻击, 利用提取水印 w' 与原始水印 w 的差异, 即相关系数来衡量鲁棒性的大小, NC 值越接近 1, 表明提取出的水印越接近原始水印. 相关系数定义为

$$NC(w, w') = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M w_{i,j} w'_{i,j}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |w_{i,j}|^2} \quad (4)$$

实验结果如表 1 所示.

表 1 传统算法与本文算法的鲁棒性比较

	随机噪声	中值滤波	剪切(1/4)	旋转(30°)
传统算法	0.863 2	0.866 1	0.804 5	0.827 9
本文算法	0.873 8	0.882 7	0.829 2	0.834 3

本文算法提取的水印图像如图 5 所示. 表 1 表明, 本文算法在常规攻击下, 除了旋转攻击略大约传统算法外, 其他方面均更具优势. 经不同的 JPEG 因子压缩后提取的水印信息, 从 NC 值可以看出, 本文算法鲁棒性更强, 这是因为本文算法所选取的系数覆盖面更大, 更能体现图像的特征.

本文算法中, DCT 域不同的分层层数对算法性能具有不同的影响, 下面讨论 DCT 域被分为二层, 三层, 四层, 五层时的仿真实验结果.

图 6 中显示了四种分层情况下的 PSNR 值, 以此来衡量嵌入水印的不可见性.

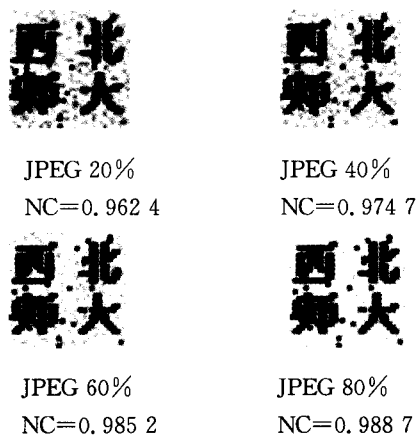


图5 本文算法提取水印效果

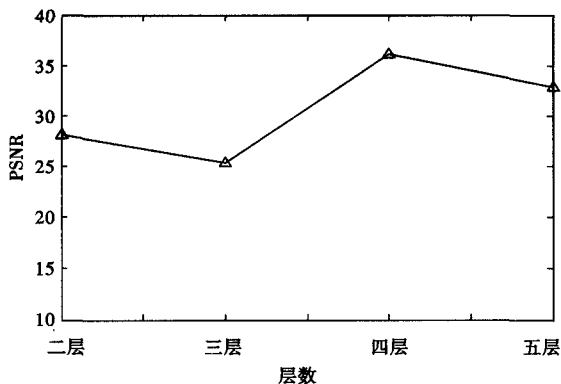


图6 四种分层的 PSNR

图6表明,分四层时 PSNR 值最大,此时,水印的不可见性最好.因为此时抽样系数较大,能量比较集中.但在分五层时,PSNR 值出现了骤减,这说明,DCT 域分层的层数越高,不可见性不一定更优,因为用于嵌入水印的 DCT 系数虽然进行了更大的能量集中,但在进行多次的 DCT 与 IDCT 过程中,会导致一定的误差.图7所示为分四层、五层时提取的水印图像.

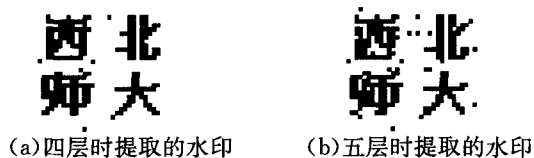


图7 分四层、五层时提取的水印图像

分别对分二、三、四、五层的四幅含水印图像进行各种攻击后提取水印信息,同样利用 NC 值来衡量其鲁棒性.

实验结果如表2所示.表2表明,DCT 域分四层的时候,水印的鲁棒性最佳.本文通过将抽样系数扩大,并且选取合理的分层层数,以不同的频带作为载体嵌入水印信息,低频子带抗干扰能力最佳,是水印嵌入的首选位置,但是中频子带更能确保良好的

不可见性^[7],具有较大的感觉容量,以便嵌入水印后不会引起原始载体质量的明显改变.实验证明,本文算法在不可见性和鲁棒性之间达到了一个较好的平衡.

表2 二层、三层、四层、五层的鲁棒性比较

	JPEG (80%)	随机 噪声	中值 滤波	剪切 (1/4)	旋转 (30°)
二层	0.964 3	0.860 9	0.866 7	0.7921	0.812 4
三层	0.972 5	0.863 7	0.871 4	0.800 9	0.825 5
四层	0.988 7	0.873 8	0.882 7	0.829 2	0.834 3
五层	0.981 5	0.867 8	0.870 6	0.828 1	0.832 6

5 结束语

本文提出了一种改进的层式 DCT 算法,提高了图像的整体去方块效应,应用于数字水印领域,更好的实现了水印的不可见性.同时对含水印图像进行 JPEG 压缩、随机噪声、中值滤波、剪切和旋转后提取水印信息,与传统算法相比,本文算法 NC 值更高,说明本文算法具有更强的鲁棒性,这较好的调和了水印的不可见性和鲁棒性之间的矛盾,有利于版权保护认证.在 DCT 域分层层数的选择上,通过实验证明,选择中低频系数,分四层的时候,效果最佳.改进的层式 DCT 为数字水印技术提供了一种新的思路.

参考文献:

- [1] Kuan Hui Tan, Mohammad Ghanbari. Layered image coding using the DCT pPyramid [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1995, 11(4): 512-516.
- [2] 鲁业频,李凤婷,朱仁义,等.基于 DCT 编码的新进展[J].中国图像图形学报,2004,9(1): 3-12.
- [3] 张民,郭玉彬,张德伟.基于小波系数块能量和 HVS 的 FCM 水印算法[J].微电子学与计算机,2010,27(5): 139-142.
- [4] 孙圣和,路哲明,牛夏牧.数字水印技术及应用[M].北京:科学出版社,2004.
- [5] 黎绍发,李凤婷,陈兆龙.离散余弦变换编码的现状与发展研究[J].通信学报,2003,21(3): 84-87.
- [6] 肖俊,王颖.基于多级离散余弦变换的鲁棒数字水印算法[J].计算机学报,2009,32(5): 1055-1061.
- [7] 黎绍发,詹青.层式余弦变换的零树编码法[J].通信学报,2000,21(3): 84-87.

作者简介:

吕慧女,(1985—),硕士.研究方向为数字水印技术、数字图像处理技术.

张贵仓男,(1964—),博士,教授.研究方向为计算机辅助几何设计、数字水印.