

基于多级离散余弦变换的鲁棒数字水印算法

肖 俊 王 颖

(中国科学院研究生院计算与通信工程学院 北京 100049)

摘 要 将多级离散小波变换的“多级”思想引入到离散余弦变换中,并对多级离散余弦变换的特性进行了分析,在此基础上提出了一种基于多级离散余弦变换的数字水印算法,该算法从多级离散余弦变换系数中选择适当的位置嵌入水印信息.实验结果表明文中算法的鲁棒性优于常规基于离散余弦变换的数字水印算法,并且它的实时性不受多级变换的影响.此外,该文对多级离散余弦变换中变换系数和变换级数的选择进行了研究,实验结果表明合理选择变换系数进行二级变换可以获得最佳性能.

关键词 数字水印;多级变换;离散余弦变换;鲁棒性;抖动调制

中图法分类号 TP309 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.01055

A Robust Digital Watermarking Algorithm Based on Multiple-Level Discrete Cosine Transform

XIAO Jun WANG Ying

(College of Computing & Communication Engineering, Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The ‘Multiple-level’ idea is introduced from Discrete Wavelet Transform to Discrete Cosine Transform, and the properties of multiple-level Discrete Cosine Transform are analyzed. A digital watermarking algorithm is proposed based on multiple-level Discrete Cosine Transform. In the proposed algorithm, the watermark information is embedded in the selected coefficients of multiple-level Discrete Cosine Transform. Experimental studies show that the proposed algorithm has better robustness compared with common digital watermarking algorithms based on Discrete Cosine Transform, and its real-time property is not affected by the multiple-level transform. Besides, the methods of choosing transform coefficients and transform levels are studied, and experimental results show that the best performance can be achieved by reasonably choosing transform coefficients for the two-level transform.

Keywords digital watermark; multiple-level transform; discrete cosine transform; robustness; dither modulation

1 引 言

早期人们对数字水印的研究基本上是基于时空域的,1993年出现的两种数字图像水印实现方案也

是空域的,空域算法相对简单,但是鲁棒性等性能相对较差^[1].1996年Cox等提出了第一个变换域水印算法^[1-2],之后其良好的性能备受关注,很多研究者开始研究不同变换域的水印算法,包括离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)、离散傅立叶

变换(Discrete Fourier Transform,DFT)和离散小波变换(Discrete Wavelet Transform,DWT)等^[1]. 随后,哈德码变换域、Fresnel 变换域和 Zernike 变换域等变换域下也出现了很多数字水印算法. 直到现在,变换域水印算法仍然是研究热点之一,尤其是鲁棒数字水印算法^[3-7].

在众多变换中,DWT 是一种比较特殊的变换方式,它具有多分辨率分析的特点,而小波基和小波变换级数的选择更是给小波变换域数字水印算法的设计带来了很大的灵活性和优越性^[4-9],尤其是变换级数. 与 DWT 相比,DCT、DFT 等变换似乎没有这些特点,将 DWT 多级变换的思想用于 DCT 等变换域来设计数字水印算法会产生什么样的效果? 这是一个值得研究的问题. 本文针对这一问题展开研究,对载体进行多级 DCT 之后再嵌入水印信息,从而提出了一种新的鲁棒数字水印算法.

下面首先分析 DCT 的能量集中特性,其次介

绍基于多级 DCT 的数字水印算法,然后对算法的性能进行分析,最后给出全文结论.

2 DCT 的能量集中特性

DCT 具有很强的“能量集中”特性:大多数自然信号(包括声音和图像等)的能量都集中在离散余弦变换后的低频部分,而且当信号具有接近马尔可夫过程的统计特性时,离散余弦变换的去相关性接近于 K-L 变换(Karhunen-Loève 变换,它具有最优的去相关性)的性能. 以图像载体为例,在对图像进行一次 DCT 变换后,变换系数矩阵左上角的数值较大,这些系数相对较重要,一般称为低频系数,常用于嵌入水印信息. 图 1 以 8×8 的图像块系数为例说明了 DCT 的能量集中特性,其中图 1(a)显示的是一个图像块的空域系数矩阵,图 1(b)显示的是对该块进行一次 DCT 后获得的变换域系数.

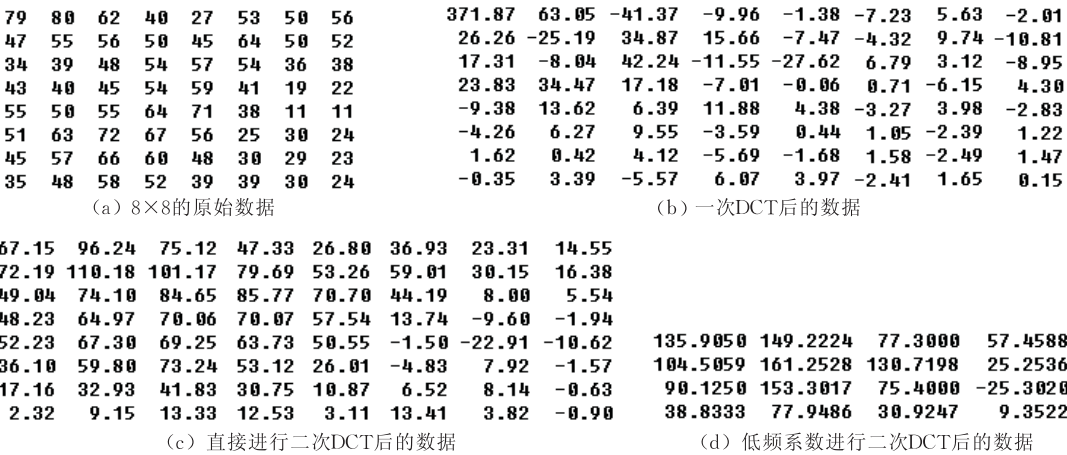


图 1 DCT 的能量集中特性示意图

正因为如此,DCT 经常被信号处理和图像处理所使用,常用于对图像进行有损数据压缩,同时 DCT 也倍受数字水印技术的青睐,Cox 等^[2]提出的第一个变换域扩频水印算法就是在 DCT 域下实现的. 与 Cox 等的第一个变换域数字水印算法类似,常规的 DCT 域数字水印算法仅对载体进行一次 DCT 变换,然后选择合适的变换系数嵌入水印信息,如图 2 所示,其中嵌入器完成 3 项工作:(1) 选择适合嵌入水印的变换域系数,(2) 以适当的方式修改选定的变换域系数实现水印信息的嵌入,(3) 用修改后的系数替换原始变换域系数.

对比 DWT 的多级分解思想,如果对载体进行多级 DCT,会得到怎样的结果? 本文对图 1(b)所示的 DCT 数据进行二次 DCT,得到图 1(c)所示的系数矩阵. 从图 1(c)可见,直接进行二次 DCT 并不能对系数进行再次“能量集中”,于是我们选择图 1(b)左上角 4×4 大小的低频系数块进行二次 DCT,得到了图 1(d)所示的系数矩阵,从中可以观察到能量被再次集成的特性.

本文将进行多次 DCT 变换的操作称为“多级 DCT”,并且对大量数据进行类似图 1 所示的实验得到了相同的结论:合理地进行多级 DCT 可以使 DCT 的“能量集中”特性得到更加充分的展示,从而获得更多数值较大的数据.

与多级 DWT 不同的是,多级 DCT 并不要求必



图 2 常规 DCT 域数字水印嵌入过程

须针对 $1/4$ 的 $k-1$ 级 DCT 系数进行第 k 级 DCT, 例如, 对 256×256 的图像进行一级 DCT 后, 允许选择一级 DCT 系数矩阵中左上角 128×128 的系数块进行二级 DCT, 也允许选择一级 DCT 系数矩阵中左上角 64×64 的系数块进行二级 DCT. 具体如何选择, 将在第 4 节展开讨论.

3 基于多级 DCT 的数字水印算法

常规的 DCT 域数字水印算法只对载体数据进行一次 DCT, 然后以适当的方式修改选择的变换系数实现水印信息的嵌入. 为了充分利用 DCT 的“能量集中”特性, 本文对载体数据进行多级 DCT, 使得系数进行多次能量集中, 然后选择合适的系数嵌入水印信息. 下面介绍基于多级 DCT 的数字水印算法.

基于多级 DCT 的数字水印算法与常规基于

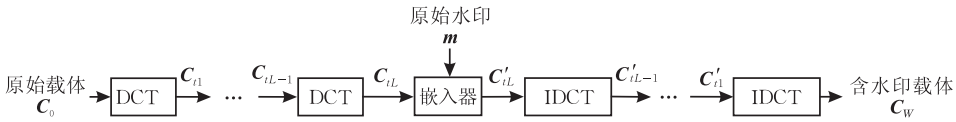


图 3 基于多级 DCT 的数字水印嵌入过程

水印提取过程是嵌入过程的逆过程, 首先按照与嵌入过程相同的方式对接收到的数据进行 L 级 DCT, 然后根据嵌入水印信息时所采用的嵌入方式, 选择相应的解码器提取水印信息, 例如采用扩频方式嵌入水印信息时可以采用相关检测解码^[2], 而采用量化方式嵌入水印信息时相应地采用最小距离解码^[10]等.

4 基于多级 DCT 的数字水印算法性能分析

在多级 DCT 中, 变换级数和每一级的变换系数都是可以选择的, 本节将分析这些因素对算法性能的影响.

4.1 变换系数的选择

根据第 2 节的结论, 对上一级变换所得部分变换系数进行下级变换与对上一级变换所得全部变换系数进行下级变换是有区别的, 本小节将比较这两种方式下算法的性能. 比较之前, 先给出用于比较的 3 种算法描述.

算法 1. 对载体做一级 DCT 之后, 选择绝对值最大的 N 个 DCT 系数以抖动调制^[10]的方式嵌入 N 比特水印信息, 这些嵌入位置作为密钥保存,

DCT 的数字水印算法类似, 整个嵌入过程可以分为如下 3 步:

(1) L 级 DCT. 首先对载体数据进行一次 DCT, 其次选择全部或者部分 DCT 系数进行第二次 DCT, 然后进行第三次, ..., 第 L 次, 直到得到期望的能量集中程度;

(2) 水印嵌入. 在进行 L 次 DCT 操作之后的系数中, 选择适当的系数以一种预定的嵌入方式嵌入水印信息, 嵌入方式可以是典型的量化方式^[10]或扩频方式^[2]等;

(3) L 级 IDCT. 根据多级 DCT 的情况, 进行 L 级 IDCT 得到含水印信息的数据.

嵌入过程也可以用图 3 进行描述, 其中 C_i 表示第 i 级 DCT 变换之后的数据, C'_i 表示对嵌入水印信息后的数据进行 $L-i$ 级逆 DCT (IDCT) 所得到的数据.

提取水印信息时要用到. 抖动调制的实现方式如图 4 所示, 其中 $d[b_k]$ 表示抖动量, 对于二值水印信息而言 $b_k \in \{0, 1\}$, 并且 $d[0]$ 和 $d[1]$ 之中的其中一个可以任意选择, 而另一个要受前一个制约, 例如 $d[0]$ 任意选择时, $d[1]$ 要根据下式确定^[10]:

$$\begin{cases} d[1] = d[0] + \frac{\Delta}{2}, & d[0] < 0 \\ d[1] = d[0] - \frac{\Delta}{2}, & d[0] > 0 \end{cases}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

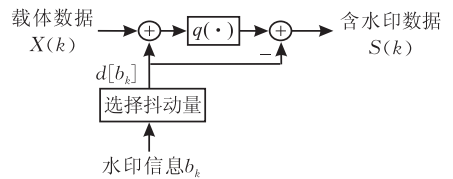


图 4 抖动调制的实现框图

其中 Δ 表示量化步长, 它需要在鲁棒性和不可感知性之间折衷, $q(\cdot)$ 是基本量化器, 即

$$q_{\Delta}(x) = \text{round}(x/\Delta) \times \Delta \quad (2)$$

水印提取过程是嵌入过程的逆过程, 首先对待检测数据进行与嵌入过程相应的一级 DCT, 并根据密钥确定可能含有水印信息的系数, 然后采用最小距离解码器解码, 如图 5 所示, 其中解码器按照

式(3)解码,

$$\hat{b}_k = \arg \min_{l \in \{0,1\}} |Y_k - S_{Y_k}[l]| \quad (3)$$

其中 $Y_k \in \mathbf{Y}$ 是可能含有水印信息的数据; $S_{Y_k}[0]$ 与 $S_{Y_k}[1]$ 分别是用 $d[0]$ 和 $d[1]$ 对 Y_k 进行抖动的情況下,得到的抖动调制结果.

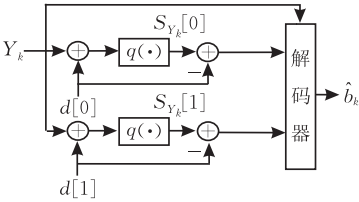


图 5 最小距离检测器的提取过程

算法 2. 对载体做一级 DCT 之后,对所得全部 DCT 系数进行二级 DCT,然后在二级 DCT 系数中选择绝对值最大的 N 个系数以抖动调制的方式嵌入水印信息.

算法 3. 对载体做一级 DCT 之后,选择系数矩阵左上角的 $M \times M$ 系数块进行二级 DCT,然后在二级变换系数中选择最大的 N 个系数以抖动调制的方式嵌入水印信息.

算法 2 和算法 3 的提取过程与算法 1 类似,这里不再详述.

本文对大量图像进行了测试,得到了相同的结论,出于篇幅的原因,下面仅给出以 Lena 图像(如图 6(a)所示)作为载体的实验结果. 实验中选择 256×256 的灰度图像作为载体, 32×32 的二值图像作为水印信息,取 $N=1024, M=50$,采用峰值信噪比(PSNR)衡量嵌入失真,用误码率度量鲁棒性. 图 6(b)显示的是原始水印信息,图 6(c)、(d)和(e)分别显示了算法 1、算法 2 和算法 3 所得到的含水印图像,其 PSNR 均为 39.5dB. 而表 1 给出了 3 种算法的量化步长和用于嵌入水印的最小 DCT 系数.



(a) 原始载体



(b) 原始水印



(c) 算法1所得含水印图像 (d) 算法2所得含水印图像 (e) 算法3所得含水印图像

图 6 以 Lena 图像为载体的实验结果

表 1 3 种算法的参数设置

算法	量化步长 Δ	用于嵌入水印的最小系数
算法 1	77.5	96
算法 2	74.8	241.1
算法 3	78.6	501

由图 6 可见,3 种算法的感知失真均不明显,但算法 2 的感知失真略大,因为在这 3 个算法中,算法 2 的量化步长较大,而用于嵌入水印的最小系数最小. 但另一方面,这也说明用 PSNR 衡量嵌入失

真具有一定的缺陷.

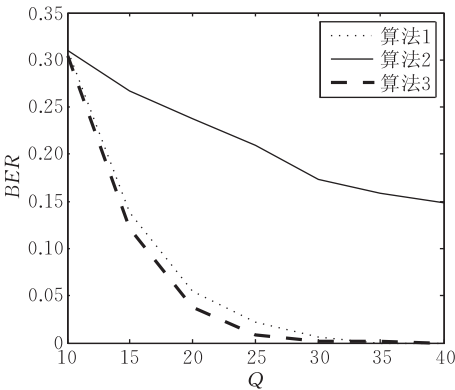
本文对图 6 所示的 3 幅含水印图像进行了各种攻击以比较其鲁棒性. 图 7 显示了 3 种算法在不同强度的 JPEG 压缩和高斯噪声攻击下的误码率比较,图 7(a)中横轴 Q 表示 JPEG 压缩因子,图 7(b)中横轴 Var 表示高斯噪声的方差,纵轴均表示误码率(BER). 而表 2 显示的是 3 种算法在其它常见攻击下的误码率比较.

表 2 算法 1、2 和 3 的鲁棒性比较

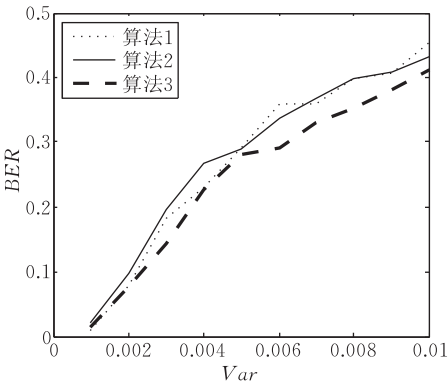
算法	误码率							
	放大 4 倍	缩小 1/4	3×3 空域低通滤波	4 领域平均	8 领域平均	3×3 中值滤波	1×3 中值滤波	中央剪切 1/8
算法 1	0.0762	0.0127	0.2510	0.1377	0.3201	0.0488	0.0186	0.4893
算法 2	0.0127	0.1416	0.3252	0.3809	0.2832	0.2832	0.0771	0.4802
算法 3	0.0156	0.0010	0.0586	0.0439	0.0635	0.0156	0.0078	0.4756

由图 7 和表 2 可见,针对大部分攻击时算法 3 的鲁棒性最优,仅针对放大攻击时算法 2 略优于算法 3. 而算法 1 和算法 2 在针对高斯噪声攻击时鲁棒性相当,针对剪切攻击时算法 2 略优于算法 1,其它情况下算法 2 均不及算法 1. 得到这样的结果主要有两方面的原因:首先,这与多级 DCT 的能量集中特性是对应的:合理地进行多级 DCT 可以获得

较多数值较大的变换系数,在其中嵌入水印信息可以提高算法的鲁棒性;其次,从表 1 所显示的参数可见:算法 3 中的最小系数最大,量化步长也最大,鲁棒性理应较好,而算法 2 中的最小系数虽然大于算法 1 中的最小系数,但其量化步长最小,鲁棒性不能得到提高.



(a) JPEG 压缩的误码率比较



(b) 高斯噪声攻击的误码率比较

图 7 3 种算法对抗 JPEG 压缩和高斯噪声的误码率比较

因此,要通过多级 DCT 来提高水印算法的鲁棒性,需要选择合适的系数进行多级 DCT 才能合理地利用 DCT 的能量集中特性,否则不能得到预期效果,甚至适得其反.

除鲁棒性外,算法的实时性在有些场合下也是一个需要考虑的指标,本文对 3 种算法的实时性进行了比较. 在 CPU 主频为 3.2GHz,内存为 1GB 的奔腾 4 台式机上运行 3 种算法的嵌入算法时,算法 1 的运行时间为 0.219s,算法 2 的运行时间为 0.296s,算法 3 的运行时间为 0.203s. 得到这样的结论并不奇怪,因为算法 1 和算法 2 需要在 256×256 个系数中搜索最大的 1024 个系数,而算法 3 只需要在 50×50 个系数中搜索最大的 1024 个系数. 而且 3 个算法的运行时间差别并不大,即使改进 3 个算法使得算法不需要对系数进行排序选择,3 种算法的运行时间也不会有很大的差别. 因此多级 DCT 并不影响算法的实时性,合理设计算法甚至可以提高实时性.

4.2 变换级数的选择

与 DWT 域数字水印算法类似,变换级数是基于多级 DCT 的水印算法中的一个可选项,但是进行多少级 DCT 比较合适? 本小节对此问题进行研究.

为了比较,本文设计了基于 3 级 DCT 的水印算法,为便于描述,称之为算法 4. 算法 4 的嵌入过程

为:对载体做一级 DCT 之后,选择系数矩阵左上角的 $J \times J$ 系数块进行二级 DCT,然后在二级变换系数矩阵中选择左上角 $M \times M$ 的系数块进行三级 DCT,最后在三级 DCT 系数中选择最大的 N 个系数以抖动调制的方式嵌入水印信息. 提取过程类似算法 1,这里不再详述.

为了与算法 1 和算法 3 获得相同的 PSNR,设置算法 4 中的量化步长为 77.7, $J=100$, $M=50$, $N=1024$. 在所选择的用于嵌入水印信息的 1024 个系数中,最小的系数为 22.2. 算法 4 得到的含水印图像如图 8 所示. 由图 8、图 6(c)和图 6(e)可见,算法 4 的感知失真比较大,这主要有两方面的原因:(1)用于嵌入水印的系数较小,而量化步长较大;(2)进行多级 DCT 和 IDCT 操作的过程中会导致一些误差积累.

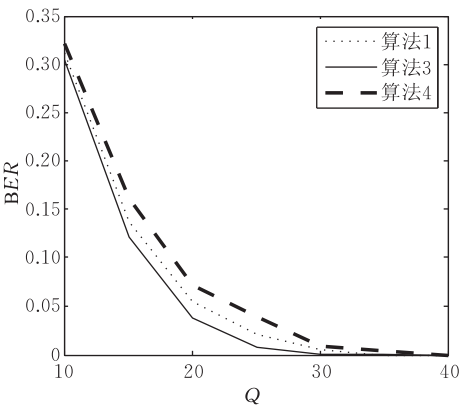


图 8 算法 4 所得含水印图像

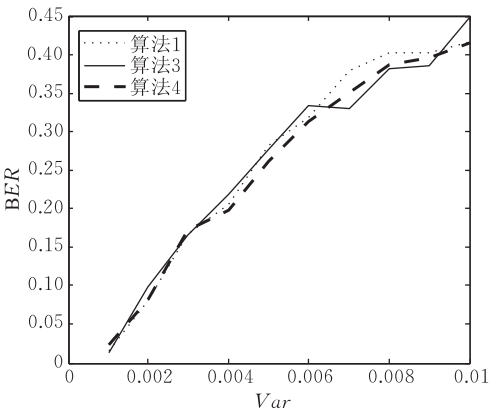
本文对算 1、算法 3 和算法 4 的鲁棒性进行了比较,实验结果如图 9 和表 3 所示. 由图 9 和表 3 可见,算法 3 对几乎所有攻击的鲁棒性仍然最优,仅在剪切攻击下略次于算法 4.

表 3 算法 1、3 和 4 的鲁棒性比较

算法	误码率							
	放大 4 倍	缩小 1/4	3×3 空域低通滤波	4 领域平均	8 领域平均	3×3 中值滤波	1×3 中值滤波	中央剪切 1/8
算法 1	0.0762	0.0127	0.2510	0.1377	0.3301	0.0488	0.0186	0.4873
算法 3	0.0156	0.0010	0.0586	0.0439	0.0635	0.0156	0.0078	0.4756
算法 4	0.0586	0.0264	0.2080	0.1230	0.2480	0.0664	0.0098	0.4170



(a) JPEG 压缩的误码率比较



(b) 高斯噪声攻击的误码率比较

图 9 算法 1、3 和 4 针对 JPEG 和高斯噪声攻击时的鲁棒性比较

此外,本文还进行了基于更多级的 DCT 水印算法性能测试,实验结果均不及 2 级 DCT 的情况.因此,合理地进行 2 级 DCT 可以使得算法性能达到最优.

5 结 论

本文首先类比多级小波变换的思想,将多级变换的思想引入 DCT 中,并分析了多级 DCT 的能量集中特性.为了充分利用 DCT 的“能量集中”特性,本文对载体数据进行多级 DCT 使得系数进行多次能量集中,然后选择合适的系数嵌入水印信息,从而提出了基于多级 DCT 的数字水印算法.实验结果表明,与常规基于 DCT 的水印算法相比,基于多级 DCT 的水印算法具有更好的鲁棒性,而且其实时性不受影响.此外,在变换系数和变换级数的选择上,实验研究表明合理选择变换系数进行二级 DCT 可以获得最佳性能.

参 考 文 献

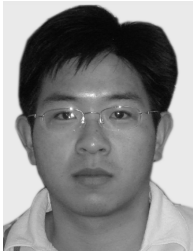
[1] Wang Ying, Xiao Jun, Wang Yun-Hong. Digital Watermarking Principles and Techniques. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
(王颖, 肖俊, 王蕴红. 数字水印原理与技术. 北京: 科学出版社, 2007)
[2] Cox I J, Kilian J, Leighton T et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Transactions on Image

Processing, 1997, 6(12): 1673-1687
[3] Chen Zhen-Yong, Tang Long, Tang Ze-Sheng, Xiong Zhang. Multi-watermark method toward goal of robustness. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(11): 2037-2043 (in Chinese)
(陈真勇, 唐龙, 唐泽圣, 熊璋. 以鲁棒性为目标的数字多水印研究. 计算机学报, 2006, 29(11): 2037-2043)
[4] Ge Weiwei, Cui Zhiming, Wu Jian. Robust gray level watermarking method based on wavelet. Journal of Information and Computational Science, 2008, 5(1): 391-396
[5] Bi Ning, Sun Qiyu, Huang Daren, Yang Zhihua, Huang Ji-wu. Robust image watermarking based on multiband wavelets and empirical mode decomposition. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 1956-1966
[6] Jin C, Peng J X. A robust wavelet-based blind digital watermarking algorithm. Information Technology Journal, 2006, 5(2): 358-363
[7] Hung K M, Wang Y T, Chen G, Yeh C H. A robust watermarking technique using Zernike moment and wavelet packet. WSEAS Transactions on Information Science and Applications, 2007, 4(5): 909-915
[8] Wang Qiu-Sheng, Sun Sheng-He, Zheng Wei-Min. The fragile watermark embedding algorithm for digital audio signal. Chinese Journal of Computers, 2002, 25(2): 520-525 (in Chinese)
(王秋生, 孙圣和, 郑为民. 数字音频信号的脆弱水印嵌入算法. 计算机学报, 2002, 25(2): 520-525)
[9] Huo Fei-Fei, Gao Xin-Bo. A 3D wavelet based video watermarking embedding and blind extraction algorithm. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(2): 447-450 (in Chinese)

(霍菲菲, 高新波. 基于三维小波变换的视频水印嵌入与盲提取算法. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 447-450)

[10] Chen B, Wornell G W. Quantization index modulation: A

class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(4): 1423-1443



XIAO Jun, born in 1981, Ph.D., lecturer. His research interests include image processing and digital watermarking.

WANG Ying, born in 1969, Ph. D. , professor. Her research interests include image processing and information security.

Background

With the wide application of digital watermarking in copyright protection and broadcast surveillance, digital watermarking has become one of the hottest research topics. As an embranchment of digital watermarking, robust watermarking has become one of the research hotpots, such as watermarking algorithms in Discrete Cosine Transform (DCT) domain, Discrete Wavelet Transform (DWT) domain, and Discrete Fourier Transform (DFT) domain.

As one of the typical transforms, DCT is widely used in digital watermarking, but usually DCT is used only once when embedding watermarks, and DWT is used many times. How many times of DCT can be used in watermarking is still unknown to us.

In this paper, the ‘Multiple-level’ idea is introduced from Discrete Wavelet Transform to Discrete Cosine Transform, and we call it multiple-level Discrete Cosine Transform. The properties of multiple-level Discrete Cosine Transform are analyzed compared with the common Discrete Cosine Transform. Then a digital watermarking algorithm is proposed based on multiple-level Discrete Cosine Transform. That is to say, we try to use DCT more than once when watermarking, and the watermarks are embedded in the coefficients of multiple-level Discrete Cosine Transform.

This work can be used to improve the performance of digital watermarking algorithms in Discrete Cosine Transform, and it will speed the development and application of watermarking algorithms in Discrete Cosine Transform, especially the robust watermarking algorithms.

The authors began to study watermarking in 2001, and have obtained some useful results, especially in the domain of watermarking with side information. By making full use of the side information idea, some refined side informed watermarking models are established, the performances of the watermarking systems with side informed coding and the strategies to improve the performances are studied, and many robust watermarking algorithms with side informed coding were proposed. Based on these studies, the authors have published two books and 40 papers. This work is one of the methods proposed to improve the robustness of watermarking algorithms in Discrete Cosine Transform domain.

This work is supported by the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China (No. 2003AA144080), National Natural Science Foundation of China (No. 60772155), Beijing Natural Science Foundation (No. 4082029) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 20080440553).