

# 基于小波和余弦变换组合的图像水印方案

周亚训,叶庆卫,徐铁峰

(宁波大学电信系,浙江宁波 315211)

**摘 要:** 数字水印作为数字媒体版权保护的有效手段,近几年来在国际上引起了人们极大的兴趣.本文针对数字图像水印进行了研究,提出了一个基于离散小波变换和离散余弦变换组合的图像水印新方案.实验结果表明,该水印方案很好地体现了图像水印的鲁棒性和不可视性间的统一,在相同的水印图像质量条件下,对常规的图像处理和噪声干扰比其它图像水印方案具有更好的鲁棒性.

**关键词:** 图像水印; 离散小波变换; 离散余弦变换; 鲁棒性

**中图分类号:** TP309 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1693-03

## A New Scheme of Image Watermarking Based on Wavelet and Cosine Transform

ZHOU Ya-xun, YE Qin-wei, XU Tie-feng

(Dept. of Electronic Information, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract:** As an effective method to provide copyright protection for digital media, digital watermarking has drawn extensive attention recently. The paper proposes a new scheme of digital image watermarking based on the combination of discrete wavelet transform and discrete cosine transform. The experimental results demonstrate its better unification between the watermarking robustness and watermarking invisibility. Compared to the other image watermarking schemes, the watermarking with the proposed scheme is much robust against noise interference and commonly used image processing technique under the condition of same watermarking image quality.

**Key words:** image watermarking; DWT; DCT; robustness

### 1 引言

随着多媒体网络的不断普及,数字化媒体(数字图像、数字视频、数字音频等)的传输和获取变得越来越便捷.这一方面促进了人类信息的共享,推动了社会的进步,但另一方面也带来了新的问题,即版权问题.因此,如何更好地保护数字媒体的版权问题已成为当前信息时代一个迫切需要解决的课题.数字水印技术正是为解决这一问题而被提出<sup>[1]</sup>.

依据数字水印的载体不同,数字水印主要可以分为图像水印、视频水印、音频水印和文本水印.其中,数字图像水印是数字水印技术中的主要研究内容.

水印鲁棒性和不可视性是数字图像水印的两个基本要素.水印鲁棒性,就是要求嵌入的数字水印具有抵御一般的数字图像处理操作及外来干扰的能力.水印不可视性,就是要求嵌入的数字水印不能破坏原始图像的视觉效果.水印鲁棒性和不可视性是一对相互矛盾的因素,它们取决于水印的具体嵌入方案.在文[2,3]中,水印被嵌入到数字图像某些象素的最低有效位中,以保证水印的不可视性,然而最低有效位中的信息也最容易在数字图像处理过程中被丢掉,因而不能保证水印的鲁棒性.在文[4,5]中,水印被嵌入在视觉上最重要的图像位置处,以期具有足够的鲁棒性,但视觉上重要的位置处信息改变对水印不可视性影响较大.文[6,7]则进行了折衷,以求达到在水印的鲁棒性和不可视性间兼顾的目的.显然,要达到水印鲁棒性和不可视性间的有机协调,必须充分利用人

眼的视觉特性.

人眼存在着视觉掩盖效应.人眼视觉对图像信息低于视觉阈值的变化是感觉不到的,这是图像水印化的基础,但该视觉阈值随原始图像背景内容和信号频率的不同而不同.心理视觉研究认为<sup>[8,9]</sup>,除平滑的低频信息外,图像的高频边缘细节也是影响人眼视觉的主要因素,它们结合在一起构成了人眼对图像的主要视觉效果.在这些位置处视觉阈值最低,任何对图像的处理操作当以保持图像边缘细节的完整性和尽可能少改变图像的平滑低频部分信息为准则.而具有较强纹理背景的图像区域,视觉阈值较高,对这些中频信息人眼能容忍较大的视觉失真.鉴于此,本文提出了一个借助离散小波变换(DWT)和离散余弦变换(DCT)组合的图像水印新方案.首先,原始图像被作适当层次的二维小波分解,分解出高频边缘等细节信息,然后对以低频信息为主的小波逼近子图再作二维DCT,略过低频DCT系数而将一组伪随机实数嵌入到中高频段DCT系数中.实验结果表明,本文提出的图像水印方案对常规的图像处理和噪声干扰具有明显改善的鲁棒性.

### 2 离散小波变换和离散余弦变换

#### 2.1 小波变换和多分辨率分析

小波变换是近几年兴起的一个崭新的信号分析理论,是一种新的可达到时域或频域局部化的时-频域分析方法.小波变换的基本思想就是对信号进行细致的频率分离即多分辨率分解,如图1所示,这与人眼对图像的视觉感知过程相匹

配. 通过小波变换, 原始图像被分解为 4 个子带图像: 水平和垂直方向的低频子带图像 LL, 水平方向的高频和垂直方向的低频子带图像 LH, 水平方向的高频和垂直方向的高频子带图像 HL, 水平和垂直方向的高频子带图像 HH. 若对子带图像 LL 再进行小波分解, 又可得更低分辨率的 4 个子带图像. 如此反复, 可对数字图像进行多级小波分解.

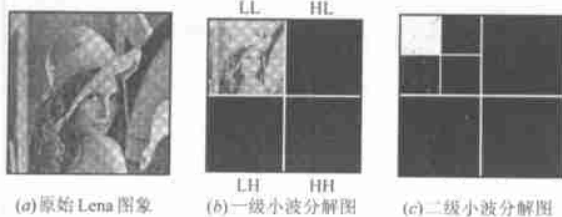


图 1

子带图像 LL 集中了原始图像的绝大部分信息, 称为原始图像的逼近子图. 子带图像 LH、HL 和 HH 保持了原始图像的垂直边缘细节、水平边缘细节和斜边缘细节, 统称为原始图像的细节子图, 它们刻画了原始图像的边缘细节特征, 但这些边缘细节易受外来噪声、常规图像处理等因素影响, 其稳定性较差. 表 1 给出了 Lena 灰度图像 (256 × 256 × 8bit) 经退化处理后其各小波子图受影响的程度, 用归一化方差值表示之. 归一化方差值依下式计算

$$Std = \frac{1}{N \cdot N} \cdot \frac{\sum_{i,j} [I(i,j) - I(i,j)]^2}{(\text{Max}(I(i,j)))^2} \quad (1)$$

其中  $I(i,j)$ 、 $I(i,j)$  分别是处理前后对应的小波子图系数值,  $N \cdot N$  是小波子图大小.

表 1 图像处理对 Lena 各级小波子图的影响 (×10<sup>-3</sup>)

	LL <sub>2</sub>	LH <sub>2</sub>	HL <sub>2</sub>	HH <sub>2</sub>	LH <sub>1</sub>	HL <sub>1</sub>	HH <sub>1</sub>
加正态分布噪声	2.6	17.0	10.3	17.8	22.9	17.2	34.3
3 × 3 中值滤波	0.2	1.1	1.3	1.7	1.5	2.5	2.3
JPEG 压缩 Cr=10.8	0.2	1.0	0.8	1.8	1.6	2.2	2.9

表 1 显示, 图像经退化处理后其小波逼近子图 LL<sub>2</sub> 的归一化方差值要远小于其它的小波细节子图, 较小的归一化方差值意味着其具有较强的抗外来攻击的能力, 即稳定性好. 因此, 作为数字水印, 不应嵌入在原始图像的小波细节子图区域, 这一方面确保了数字水印的鲁棒性, 另一方面也有利于保持图像边缘细节的完整性, 减少由于水印的嵌入引起的图像视觉模糊.

## 2.2 余弦变换

小波逼近子图受外界影响小, 稳定性好, 是水印嵌入的理想区域. 但小波逼近子图集中的是原始图像的低频信息, 这些信息也是人眼视觉敏感点, 对其直接调制嵌入数字水印同样会引起图像视觉效果的破坏. 考虑到其细节信息仍然比较丰富, 行列间存在着很大的相关性, 用解相关和聚能作用的离散余弦变换 (DCT) 对其作进一步的频率分离.

经过离散余弦变换, 图像信息被进一步集中到少数低频 DCT 系数中. 这些低频 DCT 系数对原始图像的质量和视觉效果影响极大, 应当保持不变. 其余的大部分中高频段 DCT 系数构成了原始图像的一部分中频段信息, 人眼视觉敏感度

相对较低, 对这部分系数的改变, 可以做到水印鲁棒性和不可视性间的协调.

## 3 图像水印嵌入和检测

图像水印的嵌入过程可以通过图 2 表示.

首先, 原始图像经适当层次的二维离散小波变换分解成一个逼近子图和多个细节子图, 对逼近子图再进行二维离散余弦变换, 得到 DCT 系数阵  $F(u, v)$ .

水印  $W(i, j)$  ( $i=1, 2, \dots, I, j=1, 2, \dots, J$ ) 是一组均值为 0、方差为 1 即  $N(0, 1)$  正态分布伪随机实数,  $i$  表示水印序列号,  $I$  是水印序列总数,  $J$  是水印序列长度. 通过下式将水印嵌入到逼近子图的中高频段 DCT 系数中

$$F_{k+j} = F_{k+j} + |F_{k+j}| \cdot W(i, j) \quad j=1, 2, \dots, J \quad (2)$$

式中  $F_k$  是逼近子图 DCT 系数阵  $F(u, v)$  经 Zg-Zag 扫描一维排列后第  $k$  个系数, 作为水印嵌入的起始点. 为水印嵌入强度因子, 其值的选取应结合人眼视觉特性, 由实验确定.

将调制后的 DCT 系数经 Zg-Zag 逆扫描恢复成二维 DCT 系数矩阵  $F(u, v)$ , 再经过二维逆 DCT 得到嵌入水印后的逼近子图

图, 最后结合细节子图进行适当层次的二维逆 DWT 组合成水印图像.

图像水印检测基于相关技术. 出于图像安全的需要, 水印检测不应涉及到原始图像. 其检测过程如下.

将一个待测图像进行适当层次的二维离散小波变换分解, 并将所得的逼近子图进行二维 DCT, 再 Zg-Zag 扫描将其系数排列成一维序列.

根据水印的嵌入位置, 抽取相应的 DCT 系数测试序列

$$F = \{F_{k+1}, F_{k+2}, \dots, F_{k+j}, \dots, F_{k+J}\} \quad (3)$$

定义待测试序列与第  $r$  组伪随机实数序列  $W(r, j)$  的相关度

$$(r) = \frac{F_{k+j} \cdot (r, j) / \sqrt{(F_{k+j})^2}}{j} \quad r=1, 2, \dots, I \quad (4)$$

若相关度  $(r)$  大于某一门限  $T_0$ , 则可判定为待测图像中存在着水印, 否则, 就认为没有水印. 门限  $T_0$  选取为伪随机实数序列方差的 5 倍, 即  $T_0 = 5$  比较合适<sup>[4]</sup>.

## 4 实验结果

实验中, 对原始图像进行二级小波分解 (再继续小波分解对水印鲁棒性的提高不明显, 反而会加大算法的运算量). 为了检测本文水印方案的性能, 使用了 1000 组具有正态分布  $N(0, 1)$  的伪随机实数序列即  $I=1000$ , 每组伪随机数为 100 即  $J=100$ . 其中选取水印嵌入强度因子  $=2$ , DCT 系数起始点  $K=2500$ . 水印图像质量的客观评价采用峰值信噪比 PSNR.

图 1(a) 是原始 Lena 灰度图像 (256 × 256 × 8bit), 图 3(a) 是嵌入第  $i=500$  组伪随机实数后的水印 Lena 图像. 可以看到, 在该水印嵌入强度下, 水印图像的客观质量很好 (PSNR = 40.9dB). 从主观视觉效果上评价, 与原始图像非常一致, 即使两者放在一起比较, 也很难感觉到水印的痕迹, 达到了水印的

不可视性要求. 图 3(b) 是水印检测结果, 可见, 在水印图像上存在着一个明显的响应 [ $(500) = 8.8$ ].

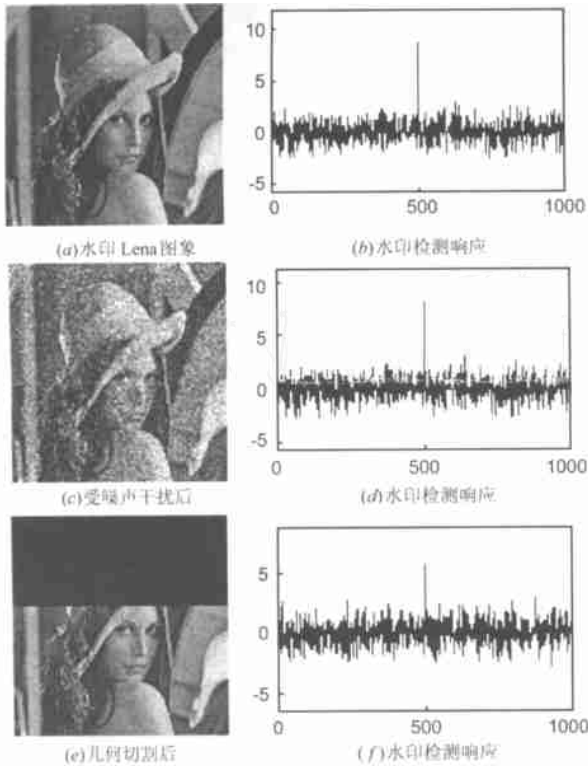


图 3

图 3(c) —(f) 显示了水印图像抗噪声干扰、几何失真的鲁棒性. 尽管水印图像受加性噪声干扰, 图像质量变得很差 ( $PSNR = 20.0\text{dB}$ ), 视觉效果产生严重破坏, 但检测器的响应达到 8.4; 当水印图像被切割掉几何面积 41% 后, 检测器响应仍有 5.8. 实验发现, 只要切割面积不大于 50%, 检测器响应高于判决门限, 水印能被可靠地检测出.

图 4 具体显示了水印抗一些常规图像处理的鲁棒性. 图 4(a) 是水印图像经不同窗口尺寸的中值滤波器滤波后检测器的响应. 我们看到, 中值滤波器窗口尺寸在  $5 \times 5$  范围内, 检测器响应保持足够强大, 水印能被可靠地检测出. 当窗口尺寸大于  $5 \times 5$  时, 检测器响应虽迅速减弱, 但水印图像也已严重退化, 不过这时仍可以较大概率检测出水印. 图 4(b) 是水印图像的检测响应与压缩比的关系. 当水印图像经 JPEG 压缩其压缩比  $C_r > 10$  时, 嵌入的水印几乎没受到影响. 即使压缩比达到 30, 水印图像产生很大失真, 这时检测器响应仍高于判决门限, 说明水印能可靠地存在于图像中. 同时, 图 4 给出了基于 DCT 域的图像水印方案<sup>[6]</sup>的检测结果, 结果是在相同的

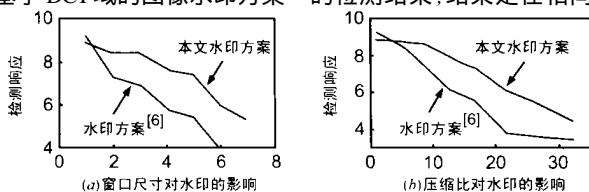


图 4

水印图像客观质量条件下得到的. 虽然对未受退化处理的水印图像, 其检测响应略大于本文方案, 但经中值滤波或压缩处理后, 其检测响应迅速退化. 而且, 在同样的窗口尺寸滤波、同样的压缩比下检测响应远弱于本文方案. 对水印图像进行加噪、间隔 2:1 抽样等处理, 结果也是如此. 这说明本文水印方案的鲁棒性明显好于前者.

## 5 结论

本文根据人眼视觉掩盖特性, 结合外来因素对图像不同频段信息的影响, 运用小波多分辨率分解和离散余弦变换的组合处理, 有效地提取出人眼视觉敏感度低且相对稳定的图像中频部分信息, 通过对这部分信息的调制, 实现了图像水印的嵌入. 模拟实验表明, 本文水印方案实现了水印鲁棒性和不可视性间的有机协调. 在相同的水印图像质量条件下, 本文水印方案在鲁棒性方面比其它水印方案有明显的提高. 而且, 图像水印的检测基于相关技术, 这不需要涉及到原始图像, 有效地保证了原始图像的安全.

## 参考文献:

- [1] G Voyatzis, I Pitas. The use of watermarks in the protection of digital multimedia products [C]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1197 - 1207.
- [2] R G Van Schyndel, A Z Tirkel, C F Osborne. A digital watermarks [A]. In: IEEE Int. Conf. on Image Processing [C], 1994, 2: 86 - 90.
- [3] D J Fleet. Embedding invisible information in color images [A]. In: IEEE Int. Conf. on Image Processing [C], 1997, 1: 532 - 535.
- [4] I J Cox, J Kilian, F T Leighton, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [C]. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(12): 1673 - 1687.
- [5] M D Swanson, M Kobayashi, A H Tewfik. Multiresolution data embedding and watermarking technologies [C]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(6): 1064 - 1087.
- [6] A Piva, M Barni, F Bartolini, et al. DCT-based watermark recovering without resorting to the uncorrupted original image [C]. In: IEEE Int. Conf. on Image Processing, 1997, 1: 520 - 523.
- [7] M Barni, F Bartolini, V Cappellini, et al. A DCT-domain system for robust image watermarking [J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 357 - 372.
- [8] J Johnston, N Jayant, R Safranek. Signal compression based on models of human perception [C]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(10): 518 - 526.
- [9] L Torres, M Kunt. Video Coding, The Second Generation Approach [M]. Kluwer Academic Publishers, 1995.

## 作者简介:



周亚训 男, 1965 年生于浙江奉化, 1987 年毕业于南开大学电子科学系, 获硕士学位. 现为宁波大学电信系副教授, 从事数字信号、图像处理、光纤通信等方面的教学和研究工作, 发表论文近 20 篇.