

高稳健性图像水印算法

刘金虹^{1,2)} 姚维¹⁾ 章玮¹⁾ 陆系群³⁾

¹⁾ (浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

²⁾ (实达网络有限公司, 福州 350002) ³⁾ (浙江大学计算机科学与技术学院, 杭州 310027)

摘要 提出了一个以8位灰度图像作为水印的DCT域水印算法。首先对以往的基于人眼视觉掩蔽特性(HVS)的块分类方法进行了改进,使其能更充分地挖掘载体图像的信息隐藏能力。在图像水印的嵌入方法上,将水印图像进行DCT变换,然后将DCT系数的低频分量嵌入到拉伸因子较大的块中。同时,对水印图像的DCT系数进行调整,使得各频率的能量基本相当,间接地提高了提取的水印图像的信噪比。实验结果表明,所提出的水印算法对多种攻击具有较好的稳健性,尤其对JPEG压缩、旋转和剪切攻击,其稳健性更明显。

关键词 正交余弦变换 图像水印 块分类 稳健性

中图分类号: TP391 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2004)10-1228-06

An Image Watermarking Algorithm with High Robustness

LIU Jin-hong^{1,2)}, YAO Wei¹⁾, ZHANG Wei¹⁾, LU Xi-qun³⁾

¹⁾ (College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027) ²⁾ (Star-Net Co. Ltd., Fuzhou 350002)

³⁾ (College of Computer Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract A DCT-domain watermarking algorithm with 8 bits gray image's watermark is proposed. First, the method of block classification based on HVS is improved, which enhances the information hiding ability of cover image. In the watermark embedding process, we transform the image's watermark into DCT domain, and embed the low-frequency coefficients to the blocks that have bigger elongation factor. At the same time, we adjust the DCT coefficients of image's watermark to make them in the same level. This increases the SNR of extracted watermark. The experimental results show that the mentioned algorithm is more robust to many attacks, especially to JPEG compression, rotation and cropping.

Keywords DCT, image watermarking, block classification, robustness

1 引言

随着多媒体技术和互联网的发展,互联网上的数字媒体应用正在呈爆炸式的增长,越来越多的知识产品,如图像、音频、视频等都被数字化并通过互联网来发行,这虽然给大家带来了很大的便利,但也让盗版者不用花费很多时间及版权费用就能得到相同质量的拷贝,而且很方便对原版文件进行编辑、修改、拷贝和散布。传统的加密系统在数据传输过程中虽有保护作用,但数据一旦被接收并解密,其保护作用也就随着消失。为了解决这一难题,近几年来国际上提出了一种新的数字产品著作权保护技术——数字水印。

图像水印是一种最常用的数字水印,分可见和隐形两种。不可见性和稳健性是对隐形水印的两个基本要求。不可见性是指嵌入水印的图像与原图像比较无明显差异,这就要求水印信号不能太强;稳健性是指水印能够抵抗一些常见的噪声、编辑和恶意的攻击,这就要求水印信号有一定强度,受到攻击和噪声影响后仍能被检测到。显然,这是一对矛盾,解决这一矛盾是要在保证不可见的前提下,尽可能使嵌入水印的强度足够大。

2 DCT 水印技术

水印算法的实现包括空域方法和变换域

(DCT, DFT 和 DWT)方法,相比较而言,变换域方法的性能更优越,其中,DCT 域方法以计算量小、与国际数据压缩标准(JPEG 等)兼容而得到较广泛的应用。

Cox 对宿主信号整体做 DCT 变换,利用高斯随机数发生器产生标准正态序列(N(0,1)分布)作为水印信息,选取除去 DC 系数之外部分较低频率系数叠加水印信息^[1]。Hsu 和 Wu 把图像进行 8×8 分块,对各块进行 DCT,并将一个二进制序列作为水印嵌入各块的 DCT 中频区^[2]。

基于块分类的 DCT 数字水印技术^[3],先把图像进行 8×8 分块,并对各块按块均匀度和块灰度均值进行分类,利用人的视觉掩蔽特性(HVS, human visual system)给不同类的块分配不同的拉伸因子β,将高斯随机序列作为水印乘以相应的拉伸因子嵌入到各块的 DCT 低频系数上。

近年来,许多关于水印算法的论文^[1~3]都是以高斯随机序列为水印,对此类水印,这些算法的稳健性都不错。然而它们都没有涉及图像水印的嵌入与提取。

针对图像作为水印的特殊性,提出了一种清晰图像水印的嵌入与提取算法。它的基本原理是对载体图像进行 8×8 分块并做 DCT 变换,对各分块进行分类,不同类的块分配不同的拉伸因子,对水印图像也进行 8×8 分块并做 DCT 变换,将其 DCT 系数由低频到高频嵌入到载体图像的块中。另外,为了更大地挖掘载体图像隐藏信息的能力,对文献[3]所提出的块分类方法进行了改进,提出了一种新的分类方法,并把分类数增加到 5 类。

3 对块分类水印技术的改进

文献[3]的块分类是根据块均匀度和块灰度均值进行的,块均匀度的定义如下:

$$d(B_k) = \frac{1}{n^2} \sum_{(x,y) \in B_k} w(m_k) \frac{|f(x,y) - m_k|}{m_k} \quad (1)$$

其中, $f(x,y)$ 为图像, B_k 为图像的一个分块, n 为块的边长, m_k 为分块 B_k 的灰度均值, $w(m_k)$ 遵循下式:

$$w(m_k) = (1/m_k)^\gamma \quad \gamma = 0.6 \sim 0.7 \quad (2)$$

块按 $d(B_k)$ 和 m_k 分为 3 类: $d(B_k)$ 和 m_k 均较小的为第 1 类,它们的 β 值较小; $d(B_k)$ 和 m_k 均较大的为第 3 类,它们的 β 值较大;其余的为第 2 类,它们的 β 值介于上述二类的 β 值之间。这样就实现了

水印嵌入的自适应,从而在一定程度上保证嵌入的水印具有良好的稳健性。

这种水印算法的优点是显然的,但在试验中发现它的分类方法还有一些可以改进的地方,主要有以下 3 点:

(1) 高亮度的地方被嵌入大强度的水印,有时比较容易被发现,而很暗的地方嵌入水印的强度太弱,而在实验时发现这些块可嵌入的水印强度还可以大一些,这个看法和文献[4]、[5]一致。

(2) 根据 $d(B_k)$ 和 m_k 的定义,在一般的图像中, $d(B_k)$ 和 m_k 均较大的块为数极少,这样所能嵌入强度最大的水印的块太少,对提高水印的稳健性帮助较小。

(3) $d(B_k)$ 大的块纹理不一定丰富。灰度渐变的块和纹理较丰富的块,在它们的 $d(B_k)$ 值基本相同情况下,前者并不适合嵌入强度大的水印。

为了更大地挖掘载体图像隐藏信息的能力,对文献[3]所提出的块分类方法做了改进,首先,改进分类器的分类方法,按块的亮度和复杂程度进行分类。在这里,复杂程度 $d(B_k)$ 由下式描述:

$$d(B_k) = \sum_{i=2}^{n-1} \sum_{j=2}^{n-1} \sqrt{dx^2(i,j) + dy^2(i,j)} \quad (3)$$

$$dx(i,j) = [f(i-1,j-1) + f(i,j-1) + f(i+1,j-1)] -$$

$$[f(i-1,j+1) + f(i,j+1) + f(i+1,j+1)] \quad (4)$$

$$dy(i,j) = [f(i+1,j-1) + f(i+1,j) + f(i+1,j+1)] -$$

$$[f(i-1,j-1) + f(i-1,j) + f(i-1,j+1)] \quad (5)$$

其中, $f(i,j)$ 为图像, B_k 为图像的一个分块, n 为块的边长。 $dx(i,j)$ 和 $dy(i,j)$ 分别代表图像在 (i,j) 处横、纵两个方向梯度的近似值,所以 $d(B_k)$ 在一定程度上表示了块 B_k 的复杂度。按亮度 m_k 和复杂度 $d(B_k)$ 将块分为 5 级,第 1 级是较平坦且较亮的块,第 5 级是纹理最多且较暗的块,具体的分类规则如表 1 所示,分类结果如图 1(a)所示。

表 1 分类规则

	5	4	3	2	1
m_k	(0,0.5)	(0,0.5)	(0,0.2)	[0.2,0.5]	[0.2,0.5]
$d(B_k)$	[9,+∞)	[7,9]	[0,7]	[5,7]	[1.5,5]
β	0.36	0.24	0.16	0.11	0.07

然后,将上述的分类结果进行调整。在实验中发现水印的不可见性不仅跟块的亮度和复杂度有关,还跟它相邻块的情况有关。如果一个纹理丰富的块周围有很多亮度很均匀的块,当它被嵌入很大强度水印的时候也很容易被察觉。调整规则如下:



图 1 块分类结果(Lena 256×256)

对于 3、4、5 类,如果周围比它低两级的块多于 4 个就降低它的级别;如果周围比它级别高的块多于 4 个就升高它的级别。经过调整后的分类结果如图 1(b)所示。

4 图像水印的嵌入与提取算法

图 2(a) 是水印图像的嵌入过程。首先,将水印图像分割成 8×8 的块,对每个块进行 DCT 变换。每个块的 DCT 系数,通过 ZigZag 扫描将它变成一个向量 α_0 ,这个向量的第 1 个元素是直流分量 DCT 系数,其后是频率由低到高排列的交流分量 DCT 系数,最后一个元素是最高频分量,即

$$\alpha_0 = [DC \ AC_{01} \ AC_{10} \ \dots \ AC_{76} \ AC_{77}]^T \quad (6)$$

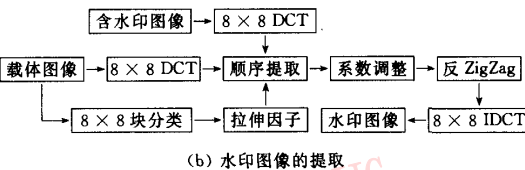
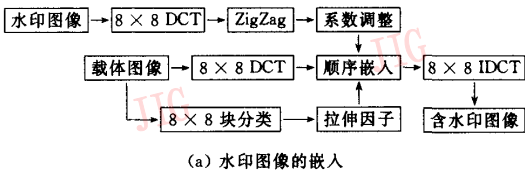


图 2 水印图像的嵌入与提取

对于一般的图像,从低频分量到高频分量,能量有逐渐递减的趋势,而且低频分量的能量远大于高频分量。如果将 α_0 直接嵌入载体图像中,为照顾到整体水印的不可见性,高频分量会损失得很厉害,所以,有必要对 α_0 进行调整,使其系数不会相差太大。幸运的是,对大多数常见图像来说,这种递减的态势很相似。通过对大量将被作为水印的图像进行分析,获得了一条较具有代表性的、能表示这种递减态势的曲线(图 3(a)中的虚线)。用它对 α_0 进行调整,可以得到一个高频和低频能量较均衡的向量 α :

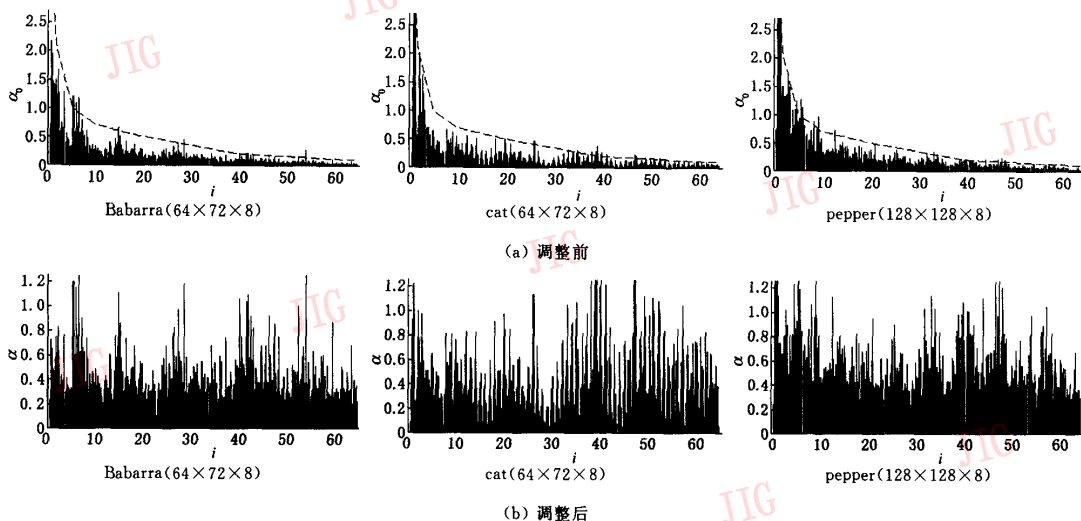
$$\alpha(i) = \alpha_0(i) / l(i) \quad i = 1, 2, \dots, 64 \quad (7)$$

其中, l 为系数调整函数(即图 3(a)中的虚线),对所有的水印图像它是一样的。以 α 作为水印高频成份就不会损失太大。在水印的提取过程中,再通过 l 函数对所提取的数据进行还原,这种做法和杜比降噪系统的原理^[6]相似,就是把信号中能量较低的成份进行放大,再调制到载体中,解调时进行还原,从而达到降噪的目的。

接下来,将所有块 α 中的系数由低频到高频排成一个向量,这就是下面要嵌入的水印 W :

$$W = [DC^{(1)} \ DC^{(2)} \ \dots \ DC^{(n)} \ AC_{01}^{(1)} \ AC_{01}^{(2)} \ \dots \ AC_{01}^{(n)} \ \dots \ AC_{77}^{(1)} \ C_{77}^{(2)} \ \dots \ C_{77}^{(n)}] \quad (8)$$

其中, n 为水印图像块的个数。这样,水印就准备好了。

图 3 系数调整前后的 α_0

在嵌入水印前,要先把载体图像也做 8×8 的 DCT 变换,同时按前面所提到的方法进行块分类,每个类对应一个拉伸因子(如表 1 所示)。

对于一般图像而言,低频成份在视觉上往往是比较重要的部分,而且低频成份的能量也远比高频成份的大,所以把水印图像的低频 DCT 系数嵌入到拉伸因子较大的块中,而把高频 DCT 系数嵌入到拉伸因子较小的块中,直到所有的块都嵌入了足够的水印图像的 DCT 系数或整个 W 都被嵌入到块中。具体过程如下:

- (1) Block_Class=5, Index=1;
- (2) Block_Index=1;
- (3) If (Class_of_Block(Block_Index)=Block_Class)
 - {嵌入 $W(\text{Index}) \sim W(\text{Index}+4)$, Index=Index+5;
 - If End_of_ W Return;}
- (4) Block_Index= Block_Index+1;
- If End_of_Block
 - {Block_Class=Block_Class-1;
 - If Block_Class ≤ 0 Return;
 - Else 返回 2;}
 - Else 返回 3;

提取水印的过程与嵌入水印的过程基本相同,所不同的是第 3 步中嵌入水印数据变为提取水印数据。

对于 $256 \times 256 \times 8$ 的载体图像,每个块嵌入 5 字节水印数据,总共可以嵌入的数据量为 5120 字节。当水印图像小于 5120 个像素时, W 可以被完整地嵌入载体图像中,而对于超过 5120 像素的水印

图像,可以只嵌入 W 中前 5120 个单元。由于其余单元是水印图像 DCT 域高频分量的系数,舍弃这些单元对水印图像的质量不会造成太大的影响,这样就可以用 $128 \times 128 \times 8$ 这样的图像作为水印。

5 稳健性实验

在这里,以 Lena 图像($256 \times 256 \times 8$)做载体,分别用 Barbara 64×72 、cat 64×72 、pepper 128×128 这 3 个图像(8 位灰度)做水印,每个块嵌入 5 个水印数据。图 4(b)为嵌入水印后的图像,虽然它的 PSNR 值只有 37.8dB,但人眼几乎察觉不到水印的存在,因为较严重的改变都发生在纹理较多和较暗的块,对较平坦和较明亮的块所做的改变则很小(图 4(c)可以说明这一点),所以水印具有较好的隐蔽性,嵌入水印后的图像和原载体图像(图 4(b))几乎看不出差别。

图 5 为 3 个水印图像在未受攻击和受有损压缩和噪声攻击后提取的水印图像。可以看出得到的水印图像的质量较好,特别是图 5(a)、(b)在未受攻击的情况下,所提取的水印图像相对于原水印图像的 PSNR 值约有 47dB。而图 5(c)由于只嵌入水印图像 DCT 域的前 5120 个系数,相当于预先对水印图像进行了一次有损压缩,所提取的水印图像的 PSNR 值稍低,仅有 29.3dB。

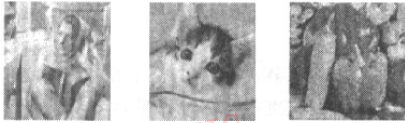
对于 8 位灰度水印图像,相似度 NC 已难以区分所提取水印图像质量的优劣,图 5 中水印图像的



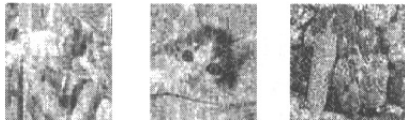
图 4 水印后图像



未受攻击所提取的水印



受质量因子 30% JPEG 压缩攻击后提取的水印 (压缩比为 12.2)



受 3% 随机噪声攻击后提取的水印

(a) Barbara (64×72×8) (b) cat (64×72×8) (c) pepper (128×128×8)

图 5 水印提取及压缩噪声攻击实验

NC 值均很接近于 1(0.98 至 1), 所以本文用所提取水印图像相对于原水印图像的峰值信噪比 PSNR 值来衡量其质量。表 2 列出了嵌入水印后载体图像的 PSNR

值, 及所提取的水印图像的 PSNR 值。表 2 显示出在经过质量因子为 30%(压缩比为 12.2)的 JPEG 压缩后, 提取出的水印的 PSNR 值仍然有 25.5dB, 由此可见本算法对 JPEG 压缩具有较好的稳健性。

表 2 图 5 实验的各项数据 单位: dB

图 5	载体图像 PSNR			水印图像 PSNR		
	未受攻击	压缩	噪声	未受攻击	压缩	噪声
(a)	37.8729	30.7873	25.9244	47.1040	25.5383	17.4726
(b)	38.3576	30.8757	25.7948	46.9112	25.4989	18.1638
(c)	36.3364	30.4480	25.8522	29.3164	21.7640	15.7258

图 6 是 cat(64×64×8) 水印图像受其他攻击后提取的水印图像, 其中图 6(a) 为对图 4(b) 进行 3×3 平均滤波后提取的水印图像, 它的 PSNR 值为 16.9190dB; 图 6(b) 是将图 4(b) 缩小到原来的 1/4, 然后插值放大到原有大小, 再提取得到的水印图像, PSNR 值为 16.6397dB; 图 6(c) 是将图 4(b) 顺时针旋转 5 度, 再逆时针转回后提取的水印图像, PSNR 值高达 28.3308dB; 图 6(d) 为截去图 4(b) 左上角 1/4 (截去的部分用不含水印的载体图像代替) 后提取的水印图像, 其 PSNR 值为 24.2392dB; 图 6(e) 是将图 4(b) 对比度增强 25% (灰度从 [0.1, 0.9] 扩展为 [0, 1]) 后提取的水印图像, 其 PSNR 值为 17.0175dB。

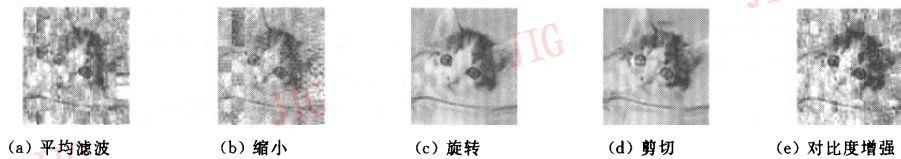


图 6 其他攻击实验

以上的攻击实验表明, 本文提出的水印算法在保证水印不可见的前提下, 具有较好的稳健性, 尤其是对 JPEG 压缩、旋转和剪切攻击, 稳健性更明显。

6 结论

本文提出了一个以 8 位灰度图像作为水印的

DCT 域水印算法, 该算法首先对以往的基于人眼视觉掩蔽特性(HVS)的块分类方法进行了改进, 使其能更充分地挖掘载体图像的信息隐藏能力。在图像水印的嵌入方法上, 将水印图像进行 DCT 变换, 将 DCT 系数的低频分量嵌入到拉伸因子较大的块中。同时, 对水印图像的 DCT 系数进行调整, 使得各频率的能量基本相当, 间接地提高了提取的水印图像

的信噪比。实验结果表明,该算法对多种攻击具有较好的稳健性,尤其对 JPEG 压缩、旋转和剪切攻击,其稳健性更明显。

参 考 文 献

- 1 Cox I J, Kilian J, Leighton T, *et al.* Secure spread spectrum watermarking for images, audio and video[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 96) [C], Lausanne. Switzerland, 1996, Ⅱ: 243~246.
- 2 Hsu C T, Wu J L. Hidden signature in images [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 96)[C], Lausanne. Switzerland, Sept. 1996, Ⅱ: 223~226.
- 3 黄继武. 一种自适应图像水印算法[J]. 自动化学报, 1999, 25(4): 476~482.
- 4 曹长修, 柏森, 张邦礼. 改进的图像小波域水印算法[J]. 贵州科学, 2002, 20(4): 5~9.
- 5 杨恒伏, 陈孝威. DCT 域自适应公开水印技术[J]. 计算机工程, 2003, 29(15): 88~90.
- 6 Dolby Laboratories Inc.. Dolby B, C, and S noise reduction systems [EB/OL]. <http://www.dolby.com/cassette/bcsnr/btype.html>, 2003-11.



刘金虹 1974 年生。1998 年毕业于浙江大学化学工程专业, 现为浙江大学电气工程学院控制理论与控制工程专业硕士研究生。主要从事智能控制理论及应用、图像水印技术等方面的研究。



姚 维 1966 年生。副教授、副所长。1997 年于浙江大学获工业自动化专业博士学位。主要从事工业过程的先进控制和在线优化、数字图像处理技术等方面的研究。
E-mail: yaowei@cee.zju.edu.cn



章 玮 1967 年生。副教授、副所长。2001 年于浙江大学获电气工程专业博士学位。主要从事电机及其控制、数字图像处理技术等方面的研究。



陆系群 1969 年生。副教授。1997 年于华南理工大学获通信与电子系统专业博士学位。主要研究方向为图像处理、神经网络与时间序列分析与预测、多通道分折/综合滤波器阵列理论与设计等。