

基于自适应频带选择的数字水印技术¹

钟 桦 焦李成

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 如何选择水印的隐藏区域是水印算法中的关键问题。该文提出了一种自适应 DCT 域水印算法,利用了人眼视觉系统(HVS)和图像局部特性自适应地选择水印隐藏区域,有效地实现了水印的稳定性和不可见性的折衷。与其它水印算法比较,该文提出的自适应算法适合于具有不同总体特性和局部特性的图像。实验结果表明该算法具有很好的感知质量,水印稳健性好,可以抵制各种图像处理操作诸如加性白噪声(AWGN),JPEG 压缩以及裁剪,中值滤波,缩放等。

关键词 数字水印, DCT 变换, 人眼视觉系统, 视觉掩蔽

中图分类号 TP391.4

1 引 言

作为一种有效的版权保护手段,数字水印技术引起人们的高度重视并得到很快的发展。数字水印技术的实现主要要考虑两个因素,即稳健性和不可见性^[1]。一个可靠的数字水印系统应该是稳健性和不可见性的最佳折衷。

数字水印技术一般可以分为两类:空域水印和变换域水印。由于 DCT 变换在 JPEG 压缩算法中的应用, DCT 域水印具有内在的优越性,关于 DCT 域水印的研究可以在国内外很多文献找到^[2-5]。与空域水印及其它变换域水印相比较, DCT 域水印具有如下优点: (1) DCT 域水印是一种扩谱水印,具有较好的稳健性和不可见性; (2) 可以很方便地与各种感知编码结合; (3) 实现算法简单。

DCT 域水印算法中需要解决的一个主要问题是如何选择水印的隐藏区域。一般来说,选择水印隐藏区域主要根据以下目的: (1) 水印稳健性; (2) 水印的不可见性。在这一方面已经有人做了大量的工作。利用中频带或低频带作为水印的隐藏区域已经成为大多数学者的共识。但是在大多数算法中,具体隐藏区域的选取,甚至低频带和中频带的定义,并没有达成一致。从另一个角度看,每一幅图像的纹理不同,其低频分量和中频分量的能量分布也不一样,固定的隐藏区域显然不是最佳选择。而且同一幅图像其局部特性也有差异,固定的隐藏区域显然不是自适应的,总而言之,如何从中频带和低频带挑选最优的隐藏区域这一问题并没有得到解决。

本文从人眼视觉系统特性出发,提出了一种基于自适应频带选择的 DCT 域水印算法。该算法适用于不同纹理的图像,以及不同的图像局部特性。实验结果表明加水印图像具有很好的感知质量,水印稳健性好,可以抵制各种图像处理操作诸如加性白噪声, JPEG 压缩以及裁剪,中值滤波,缩放等。

2 水印隐藏区域的选取

水印算法必须满足两个基本要求: (1) 水印的不可见性; (2) 水印的稳健性。为满足这两个要求,首先要合理地选择水印的隐藏区域,同时利用人眼视觉系统的特性,结合视觉伪装来增大水印强度同时提高水印的不可见性。

2.1 频带选择

到目前为止, DCT 域水印隐藏区域的选取主要可分为 4 类:

¹ 2001-08-14 收到, 2002-03-08 改回
国家自然科学基金(60133010)资助项目

(1) 高频带 从保证水印不可见性的角度来看, 高频带是作为水印隐藏区域的最佳选择。根据人眼视觉系统 (HVS) 特性, 人眼对高频信息如复杂纹理和变化剧烈的区域的敏感度低于对低频信息如平滑区域的敏感度, 因此对高频区的噪声和失真也不太敏感。选择高频区域作为隐藏区域可以有效地实现水印的不可见性。但是高频信息很容易被各种有损压缩去除, 水印的稳健性达不到要求。

(2) 低频带 从水印的稳健性角度出发, Cox^[6] 等人提出水印应该嵌入到图像感知重要的分量, 亦即把水印的隐藏区域确定为图像的低频带。低频分量携带能量较多, 产生的水印稳健性好。但是由于图像感知重要的分量同时也是人眼视觉系统敏感度较大的部分, 低频带水印对图像质量影响较大。

(3) 中频带 一些学者则采取折衷^[3], 选择中频带作为水印的隐藏区域。中频带水印在稳健性和不可见性方面都可达到较好的效果。

(4) DC(直流) 分量 有些学者^[2] 根据 DC 分量感知容量大, 水印稳健性好的优点, 提出将 DC 分量作为水印的隐藏区域。与低频带水印一样, 为保证水印的不可见性, 对 DC 分量的修改必须非常小心地进行, 否则很容易产生块效应。

由于高频带是有损压缩的主要对象, 因而不能作为水印的隐藏区域。基于低频带和中频带的 DCT 域水印算法成为当前的主流。但是这些算法都有一个共同缺点: 无论水印嵌入位置是低频带还是中频带, 其具体隐藏位置在整个算法中都是固定的。这显然忽视了图像的总体和局部特性。也就是说, 隐藏区域的选取不是自适应的。当水印隐藏区域的频率信息很少或感知不重要时, 图像很容易产生失真, 稳健性也有所下降。下面本文将提出一种频带自适应选择的方法, 从人眼视觉系统模型的角度分析如何在中频带和低频带中选择隐藏区域。

2.2 自适应频带选择

每一图像的总体特性不可能完全相同, 而且同一幅图像的局部特性也是随空间位置而变化的。也就是说, 对任一图像的任一子块, 其频率信息和能量的分布并不一样。本文认为频率信息和能量都比较集中的频带才是最佳的水印隐藏区域。有以下两个理由:

(1) 从视觉掩蔽^[2] 的角度看, 水印嵌入可以看作在强背景条件下叠加一个弱信号, 当该信号达到被视觉系统检测到的强度时, 这一强度称作可见门限, 或临界可见误差 (JND)^[4]。当嵌入水印信号的强度处于这一门限时, 水印的稳健性和不可见性达到最佳折衷。利用视觉掩蔽确定水印的可见门限, 可以有效地提高嵌入水印的稳健性和不可见性。根据人眼视觉系统的特性, 视觉掩蔽可以分为 3 种模型^[4]:

(a) 频率敏感度: 是指在不同频率下, 人眼对这一频率变化的敏感程度。在给定最小观测距离的情况下, 利用这一模型可以基本确定每一频带的可见门限^[7]。

(b) 照度掩蔽: 指在恒定背景下对噪声的检测门限。图像背景越亮, 可见门限越高。

(c) 对比度掩蔽: 指在某一信号存在的情况下对另一信号的检测门限。当这两个信号具有相同的空间频率, 方向和位置时, 对比度掩蔽作用达到最大。

频率敏感度是一个固定参数, 可以作为基本的检测门限。而照度掩蔽和对比度则可以用来对可见门限进行局部调整。例如, 可以通过图像子块的亮度和纹理进行分类来加权水印嵌入强度。但是换个角度看, 对于固定的水印隐藏区域, 当区域内的频率信息很少时, 对比度掩蔽作用将大大减小。特别是系数量化过后多数为零, 当对其进行修改时, 频率信息从无到有, 很容易导致图像失真。由上面分析可以知道, 为使对比度掩蔽作用达到最大, 这两个信号应该处于相同的空间频率, 方向和位置。对于具有不同局部特性的图像块, 频率信息并不集中于某一频段, 固定的隐藏区域很可能与这一频带失配。

(2) 从感知重要性的角度来看, 并非只有图像的低频带才是感知最重要的分量, 虽然这在一般情况下是正确的。图像的总体和局部特性不同, 其能量将集中于不同的系数上。这些幅值较大的系数称为感知重要的系数^[4,6]。如果所选择的水印隐藏区域内不包含感知重要的系数, 我们说水印是不稳健的。感知重要的系数一般在低频带较多, 但是也可能集中于中频带, 这将随

图像的具体特性而定。显然固定的隐藏区域对于不同总体特性的图像以及同一图像的局部特性并不是自适应的, 因而也不是总能够得到稳健的水印。

基于以上分析, 本文提出了一种自适应频带选择的 DCT 域水印算法。水印的隐藏区域自适应地选择为中频带和低频带中频率信息和能量最丰富的一段频带, 这样可以充分利用对比度掩蔽的作用, 起到局部自适应的效果。同时水印嵌入是通过修改感知重要的系数而嵌入, 保证了水印的稳健性。

自适应频带选择的具体算法如下。设图像块的 DCT 系数为 $\{x_{u,v}, 1 \leq u \leq 8, 1 \leq v \leq 8\}$, 按标准 JPEG 量化矩阵(如图 1 所示)对系数量化。我们定义感知重要的系数是量化块中不为零的系数。不考虑 DC 分量, 按图 2 扫描顺序可得到量化的系数序列 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_{63}\}$, 如果量化系数序列 $F'_i = \{f_i, f_{i+1}, \dots, f_{i+L-1}\}$ 满足 $NZ(F'_i) = \max_k \{NZ(F'_k)\}$, $1 \leq k \leq 63-L+1$, 其中函数 $NZ(\cdot)$ 表示序列 F'_k 中非零元素的个数, 则选取下标 $\{i, i+1, \dots, i+L-1\}$ 所对应的 DCT 系数作为水印的隐藏区域。当有多个区域满足以上条件时, 如果算法强调水印的不可见性, 则应该选择处于中频段的隐藏区域, 而如果算法更注重水印的稳健性, 则应该优先考虑低频区域。在本文中将优先考虑最低频段的隐藏区域。

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

图 1 JPEG 量化表

1	2	6	7	15	16	28	29
3	5	8	14	17	27	30	43
4	9	13	18	26	31	42	44
10	12	19	25	32	41	45	54
11	20	24	33	40	46	53	55
21	23	34	39	47	52	56	61
22	35	38	48	51	57	60	62
36	37	49	50	58	59	63	64

图 2 DCT 扫描顺序

3 数字水印的嵌入和提取算法

3.1 水印嵌入算法

根据上一节中的分析, 本文提出一种简单的 DCT 域水印算法, 具体如下:

(1) 对原始图像逐块进行 DCT 变换。为与标准 JPEG 压缩算法兼容, 块的大小取为 8×8 。

(2) 根据 2.2 节自适应确定水印的隐藏区域 $\{i, i+1, \dots, i+L-1\}$ 。

(3) 为抵抗剪切操作, 对原始水印 $\{w_i\}$, $w_i \in \{0, 1\}$ 伪随机排序得到 $\{\tilde{w}_i\}$, $\tilde{w}_i \in \{-1, 1\}$, 其中比特 0 变为 -1 。排序由密钥控制, 以保证安全。

(4) 根据式 $x_j^w = x_j + \alpha \cdot T_{u,v} \cdot \tilde{w}_j$ 修改隐藏区域中的 DCT 系数, 其中 x_j 和 x_j^w 分别为原始和加水印的 DCT 系数, $T_{u,v}$ 是其对应的量化阶, α 是加权因子。根据文献 [2], 采用图像自适应的参数 α 可以进一步提高水印的稳健性和不可见性。为简单起见设 α 为常数, 通过实验取 $\alpha = 0.4$ 。

(5) 通过 DCT 反变换得到加水印图像。

3.2 水印提取算法

水印提取算法与嵌入算法相仿, 具体步骤如下:

(1) 对原始图像和加水印图像分别进行 8×8 逐块 DCT 变换。

(2) 根据原始图像的 DCT 系数确定水印的隐藏区域。

(3) 逐一比较原始图像和加水印图像在同一隐藏区域内的系数值。设 f_j 是原始图像系数, f'_j 是加水印图像系数。如果 $f'_j > f_j$, 则嵌入的水印比特为 1; 反之, 则嵌入的水印比特为 0。

(4) 利用同一密钥对得到的水印比特序列进行伪随机反排序, 即可得到提取的水印 $\{w'_i\}$ 。

为客观评价提取水印与原始水印的相似程度, 采用以下归一化相似度计算公式^[3]: $NC = \sum_i w_i \cdot w'_i / \sum_i w_i^2$ 。其中 w_i 和 w'_i 分别表示原始水印和提取的水印。

4 实验结果

实验中使用经典的 $256 \times 256 \times 8$ 的 Lena 图像作为原始图像, 原始水印是一幅 64×64 的二值图像, 分别如图 3(a), 3(b) 所示。实验中水印图像仅嵌入一次, 因此取 $L = 4$ 。由本文算法得到的自适应加水印图像以及提取的水印图像如图 3(c), 3(d) 所示。其中 NC 表示归一化相似度。可以看出自适应加水印图像在不可见性这一方面是令人满意的。

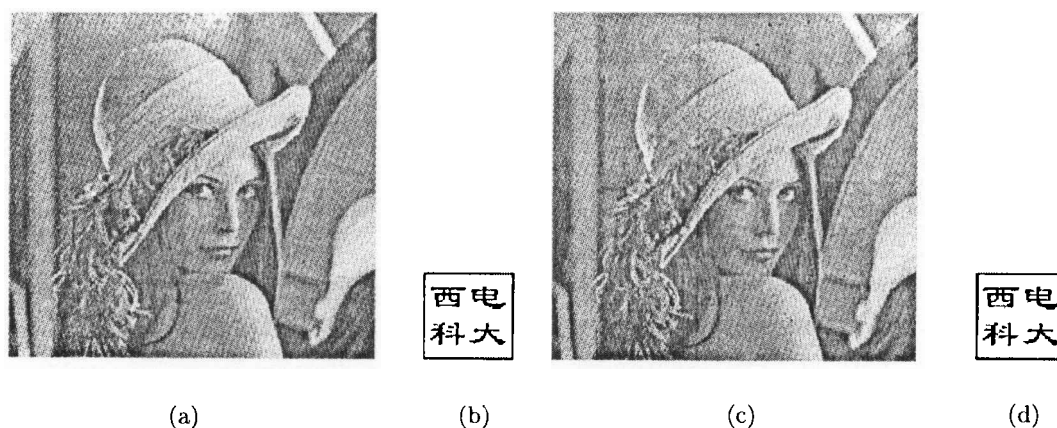
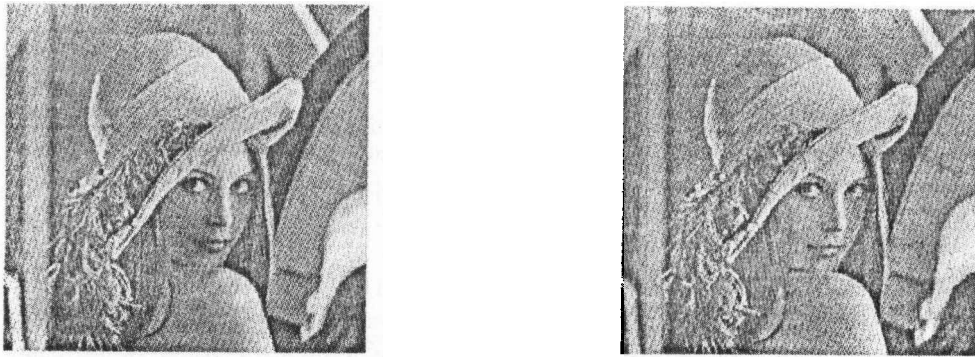


图 3 (a) 原始图像 (b) 原始水印图像 (c) 自适应加水印图像 PSNR=45.45dB; (d) 由图 (c) 提取出的水印, 相似度 NC=1

为做比较, 给出了相同条件下的低频带加水印图像和中频带加水印图像, 如图 4 所示。低频带和中频带的选取如图 5 所示。根据自适应频带选择的原理分析可知, 对于图像中的平滑区域, 水印应该嵌入到低频带, 而对于纹理区域, 水印应嵌入到中频带。由图 4(b) 可见, 中频带加水印图像在平滑区域出现了一些纹理失真, 这一失真是由于中频成分增加而导致。低频带水印与自适应加水印图像的感知质量相差不大, 但是低频带加水印图像的纹理区域在亮度上则不如自适应加水印图像接近原始图像, 如图 4(a) 所示。实验结果与 2.2 节的分析一致。这两点说明自适应水印算法适合于具有不同局部纹理特性的图像。

本文对图 3(c) 进行了多种图像处理操作的稳健性测试。图 6 中分别给出了自适应加水印图像对 AWGN(SNR=25dB), JPEG 压缩(压缩率为 9.9084), 1/4 修剪, 3×3 中值滤波, 缩放等失真的水印提取结果。可以看出, 所提取出的水印图像具有较好的分辨效果。这说明本文所提出的自适应频带选择水印算法是稳健的。



(a) 低频带加水印图像, PSNR=45.75dB

(b) 中频带加水印图像, PSNR=38.44dB

图 4

1	2	6	7	15	16	28	29
3	5	8	14	17	27	30	43
4	9	13	18	26	31	42	44
10	12	19	25	32	41	45	54
11	20	24	33	40	46	53	55
21	23	34	39	47	52	56	61
22	35	38	48	51	57	60	62
36	37	49	50	58	59	63	64

图 5 低频带和中频带隐藏区域



(a) (b) (c) (d) (e)

图 6 (a) AWGN, SNR=25dB, NC=0.7730; (b) JPEG 压缩, 压缩比为 9.9084, NC=0.8096

(c) 3 × 3 中值滤波, NC=0.8029; (d) 1/4 修剪, NC=0.8711

(e) 放大 2 倍, NC=0.8865

5 结 论

由于图像的最终接收者是人眼视觉系统, 利用人眼视觉特性来设计水印算法具有非常重要的意义。本文通过分析人眼视觉特性, 提出了一种基于自适应频带选择的 DCT 域水印算法。与其它的 DCT 域水印算法不同, 水印的隐藏区域是自适应确定的。较之隐藏区域固定的水印算法, 本文提出的算法适合于具有不同总体特性和局部特性的图像。实验结果表明该算法是有效的。

参 考 文 献

[1] F. Hartung, M. Kutter, Multimedia watermarking techniques, Proc. IEEE, 1999, 87(7), 1079-1107.

- [2] 黄继武, Yun Q. SHI, 程卫东, DCT 域图像水印: 嵌入对策和算法, 电子学报, 2000, 28(4), 57-60.
- [3] Hsu Chiou-Ting, Wu Ja-Ling, Hiding digital watermarks in image, IEEE Trans. on Image Processing, 1999, 8(1), 58-68.
- [4] C. I. Podilchuk, Zeng Wenjun, Image-adaptive watermarking using visual models, IEEE J. on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4), 525-539.
- [5] Lin Shinfeng D., Chen Chin-feng, A robust DCT-based watermarking for copyright protection, IEEE Trans. on Consumer Electronics, 2000, 46(3), 415-421.
- [6] I. J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton, T. Shamoon, Secure spread spectrum watermarking for multimedia, IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(12), 1674-1687.
- [7] M. D. Swanson, Zhu Bin, A. H. Tewfik, Multiresolution scene-based video watermarking using perceptual models, IEEE J. on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4), 540-550.

A DIGITAL WATERMARKING ALGORITHM BASED ON ADAPTIVE SELECTION OF FREQUENCY-BAND

Zhong Hua Jiao Licheng

(National Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract How to select the hidden area for watermarking is an important issue in the design of watermarking algorithm. In this paper an adaptive DCT watermarking algorithm is proposed, in which the hidden area is selected according to human visual system model and local characteristics of image. Thus robustness and imperceptibility could be well balanced. Experimental results demonstrate that this algorithm is effective, and invisible watermark is robust against many kinds of image processing such as additive white Gaussian noise, JPEG compression, cropping, median filtering and resizing.

Key words Digital watermarking, DCT transformation, HVS models, Visual masking

钟 桦: 男, 1976 年生, 博士生, 主要研究领域为智能信息处理, 信息隐藏, 数字水印.

焦李成: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为智能信息处理, 非线性理论, 数字水印.