

DCT 域图像水印: 嵌入对策和算法

黄继武^{1,2}, Yun Q. SHI³, 程卫东⁴

(1. 中山大学电子系, 广州 510275; 2. 中国科学院自动化所模式识别国家重点实验室, 北京 100080)

3. Dept. of ECE, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA; 4. 成都气象学院电子系, 成都 610041)

摘 要: DCT 域的隐形水印应嵌入哪里, 水印才足够稳健? 尽管许多关于 DCT 域水印算法的文献赞成水印应放在对视觉效果重要的分量, 但 DC 分量总是被无一例外地排除在外。本文提出了一个 DCT 域隐形水印的嵌入对策和一个应用该对策的自适应水印算法。基于对图像 DCT 系数振幅的定量分析, 我们指出: DC 分量比任何 AC 分量有更大的感觉容量, 从稳健性的角度, DC 分量最适合用来嵌入水印。应用这个对策, 本文提出了一个把视觉系统纹理掩蔽特性结合到水印编码过程的自适应水印算法。实验结果有效地支持了这个结论, 所产生的隐形水印体现了很好的稳健性。

关键词: 图像水印; 嵌入对策; 视觉掩蔽; DCT; DC 分量

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2000)04-0057-04

Image Watermarking in DCT: an Embedding Strategy and Algorithm

HUANG Ji-wu^{1,2}, Yun Q. SHI³, CHENG Wei-dong⁴

(1. Dept. of Electronics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

2. NLP, Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;

3. Dept. of ECE, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA;

4. Dept. of Electronics, Chengdu Institute of Meteorology, Chengdu 610041, China)

Abstract: Where should invisible image watermarks be embedded in DCT domain in order for the image watermarks to be invisible and robust? Though many papers in the literature agree that watermarks should be embedded in perceptually significant components, DC components are explicitly excluded from watermark embedding. In this paper, a new embedding strategy and an algorithm applying the strategy for watermarking in DCT domain is proposed. Based on a quantitative analysis on magnitude of DCT components, we argue that more robustness can be achieved if watermarks are embedded in DC components since DC components have much larger perceptual capacity than any AC components. Applying this embedding strategy, an adaptive watermarking algorithm incorporating the feature of visual masking of human vision system is presented. Experimental results demonstrate that the embedding strategy is effective and the invisible watermarks thus generated are very robust.

Key words: image watermarking; embedding strategy; visual masking; DCT; DC components

1 引言

随着数字媒体(数字图像、数字音频、数字视频)的广泛应用, 其版权保护也显得日益重要。作为传统加密方法的有效补充手段, 数字水印(digital watermarking)近年来引起了人们的高度重视并逐渐成为多媒体信号处理领域的一个研究热点。

稳健性是对图像隐形水印最基本的要求。影响水印稳健性的因素有二: 水印结构和嵌入对策。Cox 等^[1]对水印结构进行了研究后指出, 由 Gaussian 随机序列构成的水印具有最好的稳健性。我们的实验支持了这个结论^[2]。

从实现的角度, 图像水印算法可分为二类: 空域的方法和变换域的方法。这两类方法分别通过改变某些像素的灰度和

变换域一些系数的值来隐藏水印。与空域的方法相比, 变换域的方法具有如下优点: (1) 在变换域中嵌入的水印信号能量可以分布到空域的所有像素上, 有利于保证水印的不可见性。(2) 在变换域, 视觉系统(HVS)的某些特性(如频率掩蔽特性)可以更方便地结合到水印编码过程中。(3) 变换域的方法可与国际数据压缩标准兼容, 从而实现在压缩域(compressed domain)内的水印编码。

本文主要探讨 DCT 域的水印嵌入对策问题: 在 DCT 域水印应放在哪里才足够稳健? 在大多数早期的水印算法中, 为了保证水印的不可见性, 原始图像像素最低有效位的比特面(LSB)被用来嵌入水印。在 DCT 域, 与 LSB 方法等效的做法

是把水印嵌入到高频系数中. 由于图像的 LSB 对常见的信号处理和噪声比较敏感, 这些算法所产生的水印稳健性较差. 为提高稳健性, Cox 等^[1]提出水印应放在视觉系统感觉上最重要的分量上(对应于 DCT 域中的低频系数^[3]). 其理由是感觉上重要的分量是图像信号的主要成分, 携带较多的信号能量, 在图像有一定失真的情况下, 仍能保留主要成分. 因此, 若水印嵌入到感觉上重要的分量, 则稳健性较好. 当然, 为了保证不可见性, 对感觉上重要的分量的改变应小心进行. 一些学者则进行了折衷^[4,5], 把水印放在 DCT 域的中频系数上. 尽管 Cox 等的观点已逐渐为人们所赞同和采纳, 但在基于块 DCT 的水印算法中, DC(直流)分量总是被明确地排除在外. 这样处理的考虑在于避免加水印的图像出现块效应现象.

根据对图像块 DCT 系数定性/定量的分析, 我们提出了一个新的嵌入对策: 从稳健性的角度, 在保证水印不可见性的前提下, DC 分量比 AC(交流)分量更适合于嵌入水印. 在此基础上, 本文提出了一个自适应水印算法. 实验结果证实了所提出的隐形水印对于噪声干扰和常见图像处理技术(如压缩、低通滤波、裁剪和子抽样等)十分稳健.

2 DCT 域系数分析——水印应放在哪里

在 DCT 域, 不同的 DCT 系数作为水印载体对水印的稳健性有不同的影响. 为了使水印具有较好的稳健性, 用来嵌入水印的 DCT 系数应满足如下条件:

(1) 在经过常见信号处理和噪声干扰后仍能很好地保留, 即这些 DCT 系数不应过多地为信号处理和噪声干扰所改变.

(2) 具有较大的感觉容量(perceptual capacity), 以便嵌入水印后不会引起原始图像视觉质量的明显改变.

第一个要求是为了保证水印在嵌入图像后有较好的稳健性. 当加入水印的 DCT 系数被改变较小时, 水印便更可能被保留, 这是显然的. 第二个要求是同时针对不可见性和稳健性而提出. 较大的感觉容量意味着在主观视觉效果不变的前提下有较大的改变裕度. 这也意味着可以嵌入较强的水印信号.

根据这二个要求, 低频 AC 系数作为嵌入水印的位置的较好选择已被逐渐采用, 并得到共识. 然而被人们忽视的一个事实是, DC 分量比任何 AC 分量更适合嵌入水印信号. 这个

事实有二方面的理由:

(1) 与 AC 系数相比 DC 系数的振幅大得多. 图 1 显示了几幅常用的图像(均为 $256 \times 256 \times 8\text{bits}$)在经过分块 8×8 DCT 变换后在不同的空间频率上系数的平均值(平均振幅).

在图像中嵌入水印可视为在强背景下添加一个弱信号. 根据 Weber 定律^[6]和视觉系统的照度掩蔽(luminance masking)特性^[7], 背景亮度越亮(DC 系数值越大), 嵌入信号的可见性检测门限就越高, 即 DC 系数(代表图像块的平均亮度)的感觉容量越大. 图 1 表明, DC 系数的值通常比最大的 AC 系数值还要大几十倍, 甚至上百倍以上. 空间频率越高, 系数的平均振幅越小. 分析和实验结果表明, 与 AC 系数相比, 尽管 DC 系数可以被改变的比例不如 AC 系数大, 但可改变的绝对值却比 AC 系数大得多. 这意味着 DC 系数具有比 AC 系数更大的感觉容量.

(2) 根据信号处理理论, 嵌入水印的图像最有可能遭遇到的信号处理过程, 如数据压缩、低通滤波、次抽样、插值、D/A 和 A/D 转换等, 对 DC 分量的保护比 AC 分量要好. 实验结果表明, Gaussian 噪声干扰对 DC 分量和 AC 分量的影响程度大致相同.

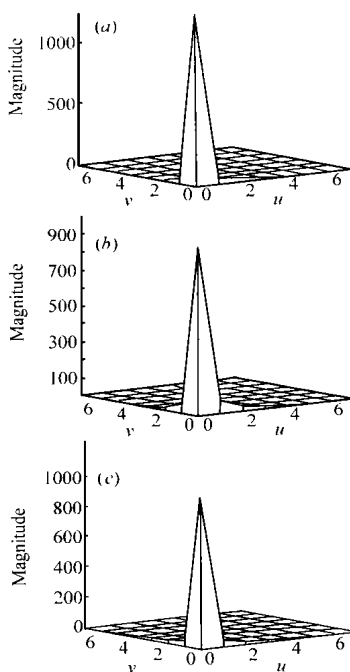


图 1 DCT 系数的振幅分析 (a) “Lena” 图像; (b) “Pepper” 图像; (c) “Baboon” 图像.

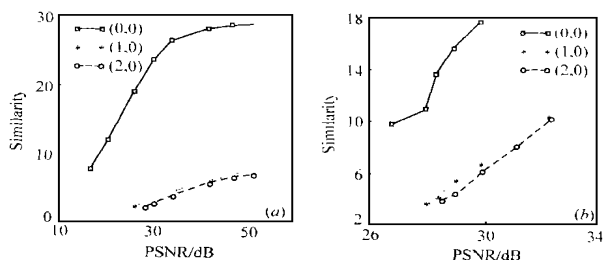


图 2 利用 DC 和 AC 分量实现的水印稳健性比较. (a) 抗 JPEG 压缩的性能; (b) 抗 Gaussian 噪声干扰的性能

图 2 比较了嵌入 DC 分量和低频 AC 分量的水印在 JPEG 压缩和 Gaussian 噪声干扰下的稳健性能. 纵轴表示从失真的水印图像中抽取的水印 W^* 与原始水印 W 的相似度:

$$\rho(W^*, W) = \frac{\sum_{i=0}^{K-1} (x_i^* \cdot x_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{K-1} (x_i^*)^2}}$$

其中 x_i^* 和 x_i 分别代表 W^* 与 W 的分量. 为使比较尽量合理, 如下实验条件在二种情况下均保持相同: (1) 嵌入公式选择方程 $F'_k(u, v) = F_k(u, v)(1 + \alpha x_i)$, $F_k(u, v)$ 和 $F'_k(u, v)$ 分别为嵌入水印分量前后的 DCT 系数, α 为拉伸因子. (2) 水印由二进制随机序列所构成, 即 $W = \{x_i\}$, $x_i = \{-1, 1\}$. (3) 对应于利用 DC 分量和 AC 分量二种情况, 拉伸因子分别被选择为 $\alpha = 0.08$ 和 $\alpha = 0.2$, 以保证嵌入水印后的图像具有相同的 PSNR 值(在二种情况下均为 44.1 dB).

实验中, AC 分量以 $F_k(1, 0)$ 和 $F_k(2, 0)$ 为例. 利用 $F_k(0, 1)$ 和 $F_k(0, 2)$ 可以得到类似的结果. 可以推断, 若利用其它 AC 系数来嵌入水印, 其稳健性能将随着空间频率的增加而下降.

尽管实验仅考虑了 JPEG 压缩和噪声干扰的情况, 不难分析, 对于水印稳健性所考虑的其它场合, 嵌入 DC 分量的水印都会比嵌入 AC 分量的水印更加稳健. 因此, 得出如下结论:

在 DCT 域, 就稳健性而言, DC 分量最适合于嵌入水印。

3 利用 DC 分量的自适应水印算法

如前所述, 水印嵌入可视为在强背景下迭加一个弱信号。根据视觉系统特性, 仅当迭加的信号超过一定的强度时, 它可以被视觉系统检测到。迭加信号的可见性门限受到背景照度、背景的纹理复杂性、背景和信号的空间频率所影响。

(1) 背景越亮, 可见性门限越高(照度掩蔽^[7])。 (2) 背景纹理越复杂, 可见性门限越高(纹理掩蔽^[8])。 (3) 空间频率对可见性门限的影响由对比度敏感性函数(CSF)所描述, 称为频率掩蔽(frequency masking)^[9, 10]。文献[10]提出了一个利用频率掩蔽特性的水印算法。

基于上一节的分析, 本节提出一个 DCT 域的水印算法。该算法具有二个特点: (1) 利用 DC 分量来嵌入水印。 (2) 利用视觉系统的照度掩蔽和纹理掩蔽特性, 根据空域中的块分类结果, 水印强度自适应地调整。分类器参数采用边缘点密度。

所提出的水印算法分三个步骤实现: (1) 图像分裂和块分类。 (2) DCT 和水印嵌入。 (3) DCT 反变换。

图像分裂 原始图像 $f(x, y)$ 首先被分裂为互不覆盖的 8×8 图像块, 记为 $B_k, k=0, 1, \dots, K-1$ 。即

$$f(x, y) = \bigcup_{k=0}^{K-1} B_k = \bigcup_{k=0}^{K-1} f_k(x', y'), 0 \leq x', y' < 8$$

分类 图像纹理越强, 水印的可见性门限越高, 即可以嵌入更高强度的水印信号。根据图像的局部纹理复杂性, 尽可能提高嵌入水印的强度, 是提高水印稳健性的有效办法。为此, 把图像块分为二类: 具有较弱纹理的为第一类, 记为 S_1 ; 较强纹理的图像块为第二类, 表示为 S_2 。由于边缘点代表图像像素灰度的突变点, 图像块内边缘点越多, 纹理越强。因此, 边缘点密度可用于块的分类^[11]。

块分类可描述为: 如果 $\text{number}\{e(x, y) \neq 0 \mid (x, y) \in B_k\} \leq T_1$, 则 $B_k \in S_1$; 否则, $B_k \in S_2$ 。其中, $e(x, y)$ 代表从原始图像 $f(x, y)$ 中抽取的二值化边缘图, T_1 为预先设定的门限。

DCT 变换和水印嵌入 分类后, 对每一图像块进行 DCT 变换:

$$F_k(u', v') = \text{DCT}\{f_k(x', y'), 0 \leq x', y' < 8, 0 \leq u', v' < 8$$

水印 W 由服从 Gaussian 分布 $N(0, 1)$ 的随机序列所构成, 长度为 K , 即 $W = \{x_i, 0 \leq i < K-1\}$ 。水印编码通过改变 DC 系数来实现。

$$F'_k(u', v') = \begin{cases} F_k(u', v') (1 + \alpha x_i), & \text{if } u' = v' = 0 \\ F_k(u', v'), & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中 α 为拉伸因子。上式表明, 迭加的水印信号强度与图像块的平均亮度成正比。根据 Weber 定律, αx_i 理论上应小于 0.02。根据对具有不同纹理特征的常见图像的实现, 本文中取

$$\alpha = \begin{cases} 0.015, & B_k \in S_2 \\ 0.006, & B_k \in S_1 \end{cases}$$

DCT 反变换 对 DCT 域中调整后的图像块进行 DCT 反变换, 得到包含水印的图像为:

$$f'(x, y) = \bigcup_{k=0}^{K-1} \text{IDCT}\{F'_k(u', v')\}$$

水印检测 水印检测方法采用如下假设检验

$$H_0: E = F^* - F = N \quad (\text{无水印})$$

$$H_1: E = F^* - F = W^* + N \quad (\text{有水印})$$

其中, F^* 和 F 分别代表待测试图像和原始图像, W^* 为待测试的水印序列, N 为噪声。待测水印序列可通过下式抽取:

$$W_k^* = F_k^*(0, 0) - F_k(0, 0);$$

$$W^* = \{x_i^*, 0 \leq i < K-1\} = \bigcup_{k=0}^{K-1} W_k^*$$

W^* 与 W 的相似度为

$$\rho(W^*, W) = \frac{\sum_{i=0}^{K-1} (x_i^* \cdot x_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{K-1} (x_i^*)^2}}$$

水印存在与否的判定标准为: 若 $\rho(W^*, W) > T_2$, 可以判定被测图像中有水印 W 存在; 否则, 没有水印 W 。 T_2 的选择要同时考虑虚警概率和漏警概率。 T_2 减小, 漏警概率降低而虚警概率提高; T_2 增大, 则虚警概率降低而漏警概率提高。根据^[1], 若 W^* 与 W 不相关, $\rho(W^*, W) > T_2$ 的概率等于具有 Gaussian 分布的随机变量超过其均值 T_2 倍方差的概率。本文中, T_2 被设定为 5。

4 实验结果与结论

本文在 $256 \times 256 \times 8$ 的“Lena”图像上测试所提出水印算法的稳健性能, 水印序列长度为 1024。图 3(a)、(b) 分别为原始图像和嵌入水印后的图像。主观视觉效果证实了应用所提出算法实现的水印的不可见性。图 4 证实了水印抗压缩编码的稳健性。图 4(a) 显示了相关检测器输出与 JPEG 压缩后图像质量(PSNR)的关系。可以看到, 当含有水印的图像经 JPEG 压缩后的 PSNR 低达 26dB 时, 相关检测器的输出仍足够强(高于门限值), 即水印尚未丢失。图 4(b) 为 JPEG 对含有水印的图像以 0.22bpp 的压缩率进行压缩后的重建图像。即使图像质量已严重下降, 水印仍可被可靠检测出来。这表明, 对于通常所允许的失真范围的压缩编码, 水印具有足够的稳健性。图 5 则证实了水印抗噪声干扰的稳健性。类似的, (a)、(b) 分别为相关检测器输出随 PSNR 的变化曲线和 Gaussian 噪声干扰后的含有水印的图像。即使 PSNR 下降到 13dB, 水印仍存在。

对于其它的信号处理过程, 所实现的水印也表现了足够的稳健性。嵌入水印的图像在分别经过 7×7 均值滤波、四分之一裁剪(丢失 75% 的水印信息)、水平与垂直方向 $2:1$ 抽样后, 相关检测器的输出仍高达 7.9、14.5 和 11.3, 均在检测门限之上。

根据对 DCT 系数进行定性定量的分析, 本文提出了一个新的 DCT 域水印嵌入对策。由于担心嵌入水印的图像产生块效应而影响到不可见性, 以前的所有文献均有意避开 DC 分量。然而, 通过理论分析和实验, 我们提出了完全不同的论点和新的嵌入对策。这对于提高图像隐形水印的稳健性能是十分有意义的。

应该注意到除了 DC 系数外, 低频 AC 系数也可以利用, 特别是在水印序列较长(超过图像块总数)时。同时, 适当利用一些 AC 系数, 也有助于加强水印嵌入位置的秘密性。然而, 根据初步实验, 对 DC 分量和 AC 分量, 应该采用不同的嵌入公式, 进一步的研究正在进行中。



图 3 水印的不可见性效果。
(a)原始的“Lena”图像;
(b)嵌入水印的图像

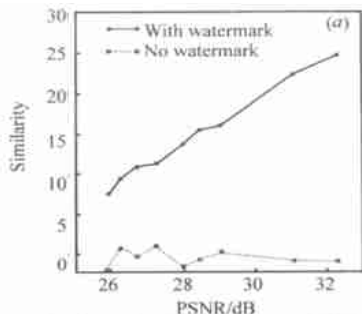


图 4 水印抗 JPEG 压缩编码的稳健性。
(a)检测器输出与 PSNR 的关系;
(b)JPEG 对图 3(a)压缩后的重建图像,
0.22bpp, PSNR=26 dB, 水印仍可被检测

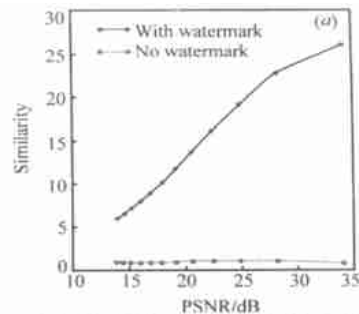


图 5 水印抗噪声干扰的稳健性
(a)检测器输出与 PSNR 的关系;
(b)图 3(a)受 Gaussian 噪声干扰后的
图像, PSNR=13dB 水印仍可被检测

在新的嵌入对策下,结合视觉系统的纹理掩蔽特性,本文也提出了一个基于块分类的自适应水印算法。所实现的水印具有很好的抗常见信号处理(如 JPEG 压缩、低通滤波、裁剪、次抽样等)和噪声干扰的性能,在 PSNR 低达不到 13dB 的强噪声干扰下,水印仍可被可靠检测出来,显示了所提出嵌入对策的合理性和所实现算法的优良性能。

参考文献

- [1] I. J. Cox, J. Kilian, T. Leighton and T. Shamon. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Trans. on Image Processing, Dec., 1997, 6(12): 1673 ~ 1687
- [2] Jiwu Huang and Yun Q. Shi. An adaptive image watermarking scheme based on visual masking. IEE Electronics Letters, Apr., 1998, 34(8): 748 ~ 750
- [3] A. H. Tewfik and M. Swanson. Data hiding for multimedia personalization, interaction, and protection. The Past, Present, and Future of Multimedia Signal Processing, IEEE Signal Processing Magazine, July, 1997, 14(7): 41 ~ 44
- [4] M. Bami, F. Bartolini, V. Cappellini, and A. Piva. A DCT-domain system for robust image watermarking. Signal Processing 1999, 66(3): 357 ~ 372
- [5] C.-T. Hsu and J.-L. Wu. Hidden signature in images. IEEE Trans. on Image Processing, Jan., 1999, 8(1): 58 ~ 68
- [6] C. Gonzalez and P. Wintz. Digital Image Processing, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Co., 1987
- [7] B. Watson. DCT quantization matrices visually optimized for individual images SPIE: Human Vision, Visual Processing and Digital Display IV, 1993 1913:202 ~ 216

- [8] N. Jayant, J. Johnston and R. Safranek. Signal compression based on model of human perception. Proceedings of the IEEE, Oct., 1993, 81(10): 1385 ~ 1421
- [9] B. Watson. Efficiency of a model human image code. J. Opt. Soc. Am., Dec., 1987, 4(12): 2401 ~ 2416
- [10] M. D. Swanson, B. Zhu, and A. H. Tewfik. Multiresolution scene-based video watermarking using perceptual models. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, May, 1998, 16(4): 540 ~ 550
- [11] Jiwu Huang, Li Chen, and Yun Q. Shi. In integrated classifier in classified coding. Proc. of IEEE ISCCAS' 98, Monterey, CA, USA, Vol. IV, May 1998, 146 ~ 149



黄继武 工学博士,中山大学电子系教授、《中国图像图形学报》和《模式识别与人工智能》编委、广东省图像图形学会常务理事。1982 年毕业于西安电子科技大学电子对抗专业并获得学士学位。1987 年研究生毕业于清华大学通信与电子系统,获工学硕士。1998 年在中国科学院自动化研究所模式识别与智能系统专业毕业并获博士学位。发表论文 40 多篇,其中 10 多篇为 SCI 或 EI 所收录。主要研究方向为图像处理、图像压缩编码、图像水印技术。

Yun Q. SHI 博士,美国新泽西理工学院电气与计算机工程系终生教授、IEEE 高级会员。本科和硕士毕业于上海交通大学。1987 年在美国匹兹堡大学获博士学位。出版著作 2 部,发表论文近 100 篇。主要研究方向为数字水印、图像处理、视频编码、多维系统和信号处理。图像序列分析和模式识别等。入编 Marquis Who's Who.