

# 基于容量估计的数字水印算法

邵亚非, 吴国威, 张 利, 林行刚

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 为达到更好的鲁棒性和置信度, 水印的嵌入应当基于容量估计. 本文提出了两种基于容量估计的 DCT 域数字水印算法, 首先利用人眼视觉特性确定水印强度, 并在此强度下进行容量估计, 以确定实际用于嵌入的 DCT 系数. 它们能够满足高鲁棒性, 低失真和动态调整嵌入容量的要求, 具有良好的性能, 可以用于数据或者图像水印的嵌入. 在此基础上, 本文还提出了一种将水印与 JPEG 相结合的嵌入和压缩算法, 实验证明它能够同时满足压缩和水印嵌入的要求.

**关键词:** 数字水印; 人眼视觉; 容量估计

**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2002) 10-1441-04

## A Capacity Estimation Based Watermarking Algorithm

SHAO Ya-fei, WU Guo-wei, ZHANG Li, LIN Xing-gang

(Dept of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to be more robust and with higher fidelity, watermarking should be based on capacity estimation. In this paper, two capacity estimation based watermarking algorithms are proposed. First HVS are used to decide the embedding strength, and then these strength are used for capacity estimation to decide which coefficient are used to embed information bit. The algorithms can achieve high robustness, low distortion and dynamical adjustment of embedding capacity, and can be used for binary or image watermarking. A method combining watermarking and JPEG compression is also proposed here, and shows good performance for both requirements.

**Key words:** digital watermarking; human visual system; capacity estimation

### 1 引言

近年来, 随着人类社会进入数字时代, 数字媒体, 包括数字图像, 视频, 音频得到了广泛使用, 数字媒体可以在没有失真的情况下被任意复制, 如何有效的进行版权保护就成为人们日益关注的问题, 因此, 数字水印技术在近年来获得了很大的发展.

所谓数字水印技术, 即指通过修改媒体信号而在其中隐藏数据和信息, 并且这些隐藏的信息在视觉和听觉上不可感知, 即使在媒体被压缩, 编辑之后仍然能够复原<sup>[1]</sup>. 人们已经提出了许多种数字水印的算法. 有的技术是在空间域上进行嵌入, 有的算法则是在变换域如 DCT, 或小波域进行. 有的算法嵌入的是二进制序列, 也有的作者提出使用图像作为水印能够达到更好的版权保护作用.

目前水印研究所遇到的主要问题是, 如何提高算法的鲁棒性, 使水印能够在各种攻击手段, 如压缩, 剪切下, 保持高的检出率, 又不影响原始图像的质量. 同时, 应当能够根据嵌入的需要, 达到一定的容量. 传统的基于 DCT 的水印算法, 如 Cox 的基于全局 DCT 的方法, 随着嵌入比特数的增加, 进行

JPEG 攻击后, 其检出率大大下降, 因此, 即使在不大的压缩比下<sup>[2]</sup>, 它的容量也有限. 而许多基于分块 DCT 的方法, 对于不同的分块, 引入了 HVS 的概念, 采用不同的嵌入强度, 但对于每一分块则采用固定数目的系数用于嵌入, 例如一定数量的中频系数, 从而忽略了不同分块之间可供嵌入的系数容量之间的区别, 也即用于嵌入的系数中存在有冗余, 影响其鲁棒性<sup>[3]</sup>.

本文提出了一种基于容量估计的数字水印算法, 引入了人眼视觉系统(HVS)的特性, 对不同性质的 DCT 分块采用不同的嵌入强度, 以减少视觉上的失真, 根据嵌入强度对图像分块进行容量估计, 选取合适的 DCT 系数进行嵌入. 为了增强抗 JPEG 压缩的能力, 在水印的生成过程中引入了量化因子, 以达到更好的鲁棒性. 由于图像和二进制序列用于水印嵌入时有不同的要求, 前者需要更高的容量, 而后者则要求更高的检测率, 本文提出的算法, 在这两方面都能达到令人满意的效果. 在容量估计的基础上, 提出了一种数据压缩与水印嵌入相结合的方法, 在压缩的同时完成水印的嵌入, 在高压缩率下仍能保持很好的鲁棒性.

## 2 基于 DCT 的嵌入容量估计

水印的容量与所采用的嵌入方法是紧密相关的,在基于分块 DCT 的数字水印算法中,每一分块的特性各不相同,因而它们的嵌入容量也是不同的. 如果将水印的嵌入看作在噪声信道中传送信息,我们将图像分块 DCT 变换后的每一个系数视作一个嵌入的信道,而各种攻击则视作噪声,那么,对水印的攻击就是一个具有加性白噪声的并行信道通信问题<sup>[4]</sup>.

$$W'(i, j) = W(i, j) + Z(i, j) \quad (1)$$

式中  $W(i, j)$  是加入水印后的系数,  $Z(i, j)$  是噪声,  $W'(i, j)$  是噪声攻击后的系数.

由于 DCT 系数是互不相关的,各个信道可以视作相互独立. 如果基于修改极性的嵌入方法,那么每个信道可以嵌入 1bit 数据,只有当该信道的信噪比大于一定值时,我们认为,该信道是可以置信的,也即,该信道能够可靠的用来传递信息. 因此,可置信的信道,嵌入值才被计入总的容量中. 本文所考虑的主要噪声是 JPEG 压缩,也即 JPEG 的量化噪声对嵌入值的影响. 设 JPEG 量化步长为  $J_i$ , 当量化步长在一定范围内时, JPEG 量化噪声可用如下均匀分布描述:  $f(z) = 1/(2J_i)$ , 当  $|z| < J_i$  时. 则噪声功率为:

$$\delta_n = \int_{-J_i}^{J_i} z^2 f(z) dz = J_i^2/3 \quad (2)$$

总的嵌入容量则是所有可以置信的信道嵌入 bit 数之和. 这与通常的水溢的现象是一致的,即在相互独立的加性白噪声信道中分配信号能量时,信噪比较高的信道总是容易先被分配到,随着信道噪声的减小,越来越多的信道可以被分配到能量. 而总的嵌入容量是由各信道的噪声水平决定的. 如果要嵌入更多的 bit, 就应当尽量提高每个子信道的信噪比,即提高嵌入的强度以增加信号功率,或者降低噪声. 针对 JPEG 压缩而言,则可以减少量化步长  $J_i$  以降低噪声功率.

## 3 水印的嵌入和提取算法

算法的结构如图 1 所示.

### 3.1 自适应的嵌入方法

不同的分块,对于人眼的视觉效果是不同的. 通常,在复杂纹理区域的变化往往不易被察觉,而对于平滑区域的变化,则

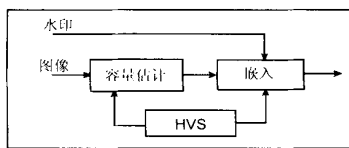


图 1 算法结构图

很容易引起视觉上的变化,对于简单的边缘区域,人眼也十分敏感. 因此,对于每个系数的修改应当和它所处的块的特性相关,当该块的纹理比较复杂时,相应的嵌入强度较大,反之亦然. 同时,为了增强鲁棒性,本文引入了量化的因素,由于高频的系数量化步长较大,因此相应的嵌入值也应该较大,这样,可以避免高频系数嵌入幅度小而影响鲁棒性. 而且,由于高频系数较为不敏感,因此也可以容忍较大的修改.

首先,将图像划分为  $8 \times 8$  的分块,对于每一分块的 DCT 系数,通过计算其块内方差  $\mu_m$  来衡量其活动性.

$$\delta_m = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_m - x_m(i, j)}{(n^2 - 1)}, \mu_m \text{ 为第 } m \text{ 个分块的方差, } n = 8.$$

若  $x_m(i, j)$  被选中作为嵌入系数,则嵌入按照下式进行:  
嵌入 0 时:

$$x_m(i, j)' = x_m(i, j) + \log(\delta_m) * x_m(i, j) * \alpha * Q(i, j), \text{ 当}$$

嵌入 1 时:  
则最终的嵌入强度为  $S_m(i, j) = |\log(\delta_m) * x_m(i, j) * \alpha * Q(i, j)|$ ,  $x_m(i, j)$  和  $x_m(i, j)'$  分别为修改前后的 DCT 系数值,  $Q(i, j)$  为量化参数,相对于高频系数应该较大,低频系数较小. 这里,我们采用 JPEG 标准量化表.  $\alpha$  为强度因子,由它最终决定嵌入强度.

对于边缘块而言,虽然其块内方差较大,但是,如果嵌入强度过大,很容易引起边缘失真,因此对于边缘和非边缘块,必须区别对待,对强度因子作相应调整<sup>[5]</sup>. 若某一分块含有边缘,令  $\alpha = k_1$ , 否则,  $\alpha = k_2$ ,  $k_2 > k_1$ .

### 3.2 容量估计

不同的分块,在 JPEG 压缩下具有不同的嵌入容量,对于每一分块可供嵌入系数  $C_m$  的估计,本文使用以下两种方法.

方法 1: 设第  $m$  个块 DCT 系数为  $x_m(i, j)$ , 则若  $\lfloor \frac{x_m(i, j)}{k * Q(i, j)} \rfloor$  不等于 0, 则该系数被用于嵌入. 而  $C_m(k)$  则为所有  $\lfloor \frac{x_m(i, j)}{k * Q(i, j)} \rfloor$  不等于零的系数个数,  $Q(i, j)$  为 JPEG 量化表,这里的  $k$ , 我们称之为容量因子,它决定了最终图像中可以嵌入的比特数.

因此,嵌入的总容量为  $C(k) = \sum_{m=1}^n C_m(k)$ ,  $n$  为总的分块数.

方法 2: 设第  $m$  个块的 DCT 系数为  $x_m(i, j)$ , 在 3.1 节中计算得到的该系数嵌入强度为  $S_k(i, j)$ , 则满足下列条件的系数可以被用来嵌入:

$$\lfloor \frac{x_m(i, j) + S_m(i, j)}{k * Q(i, j)} \rfloor > \lfloor \frac{x_m(i, j)}{k * Q(i, j)} \rfloor \quad (3)$$

$$\lfloor \frac{x_m(i, j) + S_m(i, j)}{k * Q(i, j)} \rfloor < \lfloor \frac{x_m(i, j)}{k * Q(i, j)} \rfloor \quad (4)$$

符号  $\lfloor \cdot \rfloor$  是用来四舍五入进行取整.

式(3)和式(4)保证了当量化表为  $k * Q(i, j)$  时仍然在系数  $x_m(i, j)$  上进行强度为  $S_k(i, j)$  的嵌入,不会因为量化因素而发生结果的变化,从而具有良好的抗压缩能力.

而  $C_m(k)$  则为  $m$  块中所有同时满足式(1)和式(2)的系数个数. 可供嵌入的总容量为  $C(k) = \sum_{m=1}^n C_m(k)$ ,  $n$  为总的分块数.

以上两种方法的性能有所差别,方法 1 的抗压缩性能比较稳定,而方法 2 在失配时,抗压缩性不如方法 1. 实验结果中我们会对两种方法进行详细比较.

在实际应用时,应当根据需要的嵌入容量来选择容量因子  $k$ . 如当水印是一个二进制短序列时,  $k$  的取值较大,从而

在高压缩比下仍能保持很好的检出率. 而需要嵌入尺寸较大的图像水印时,  $k$  的取值较小, 主要保证嵌入容量. 通过容量估计计算一定情况下的嵌入容量, 实际用于嵌入的系数应根据需要在其中选择. 设所需要嵌入的 bit 数为  $N$ , 选取合适的  $k$ , 使  $C(k) > N$ , 则第  $m$ th 块的实际嵌入 bit 数不应超过  $\lfloor \frac{C_m(k) * N}{C(k)} \rfloor$ . 相应的系数按照 zig-zag 顺序在容量估计选中的系数里分配.

3.3 提取算法

本文的水印算法在提取时需要使用原始图像, 其方法如下:

- (1) 对原始图像进行容量估计, 计算出嵌入用的 DCT 系数.
- (2) 根据下式进行提取:  
 如果  $x_m(i, j) > x_m(i, j)$  则嵌入值为 0;  
 如果  $x_m(i, j) < x_m(i, j)$  则嵌入值为 1.

本文中, 我们采用检出率来衡量算法性能, 即能够正确检测出的 bit 数所占的比例.

4 水印与压缩标准的结合

由于图像在传播和交换过程中, 一般都是通过压缩的形式进行的, 因此, 我们可以将水印的嵌入过程与压缩过程结合在一起. 利用方法 2 进行容量估计, 我们得出一种与 JPEG 压缩标准相结合的水印算法, 在对图像进行压缩的同时, 完成水印的嵌入. 其流程如下:

容量估计和量化采用的是相同的量化步长. 上文中的容量因子  $k$  可以由 JPEG 标准中的质量因子  $q$  换算而来. 其算法流程如图 3 所示.

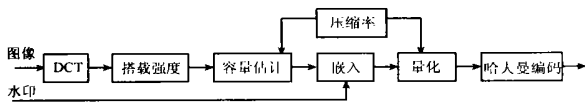


图 3 与水印相结合的 JPEG 压缩

5 实验结果及讨论

本文的实验是利用尺寸为  $256 \times 256$ , 256 灰度级的 lena 图像进行.

首先, 我们比较不同嵌入容量下的检测性能. 水印是一个 BPSK 调制后的高斯分布随机序列  $N(0, 1)$ . 利用方法 1 进行容量估计: 这里我们取容量因子  $k = 1$ , 则嵌入容量为 6224bit. 嵌入的强度因子  $k_2 = 0.002$ ,  $k_1 = 0.001$ , 计算出的容量全部用于嵌入. 嵌入后图像的 PSNR = 41.92dB. 我们计算在不同的 JPEG 压缩比下的检出率如表 1 所示.

表 1 方法 1  $k = 1$  嵌入容量 6224bit

压缩率	3.31	4.71	5.95	7.52	8.39	9.01	10.13	13.65	16.00
检出率	0.9993	0.9937	0.9619	0.9332	0.8646	0.7714	0.7148	0.6817	0.6342

取容量因子  $k = 6$ , 则嵌入的容量为 1320bit. 强度因子  $k_2 = 0.002$ ,  $k_1 = 0.001$ , 计算出的容量全部用于嵌入. 嵌入后图像的 PSNR = 46.20dB.

表 2 方法 1  $k = 6$  嵌入容量 1320bit

压缩率	3.28	4.72	5.85	6.95	7.78	8.89	10.49	13.42	20.46
检出率	1.0000	1.0000	0.9932	0.9780	0.9500	0.9069	0.8545	0.7735	0.6477

由表 2 可见, 本文的方法在不同嵌入容量下都具有很高的鲁棒性, 在压缩 20.46 倍的时候还能得到正确的响应, 以判断某种水印是否存在, 而此时经压缩的图像一般质量已经很差. 在压缩 7 倍以内时, 检出率都保持在很高的水平, 因此可以用来嵌入有意义的二进制序列. 同时, 这里得到的检测结果相对于压缩率是单调递减的, 其性能较为稳定. 并且, 嵌入容量越小, 检测结果越好.

当采用方法 2 时, 为了与方法 1 进行比较, 我们采用相同的强度因子  $k_2 = 0.002$ ,  $k_1 = 0.001$ , 令  $k = 1.35$ , 得到相近的嵌入容量, 6488bit, 嵌入后的图像 PSNR 为 41.24dB, 不同的压缩率下的检测结果如与方法 1 相比较如图 4 所示.

由图 4 可见, 方法 1 的平均性能较方法 2 为好. 对于方法 2, 当压缩 9.05 倍时的量化步长与容量估计中所使用的相同, 因此, 仍然能有很高的检出率, 而压缩倍数较小时, 反而由于量化步长的不匹配, 造成检出率的下降, 因此, 方法 2 的检出曲线不是单调递减的, 在容量估计与压缩倍数相一致时, 它能有更好的检出结果.

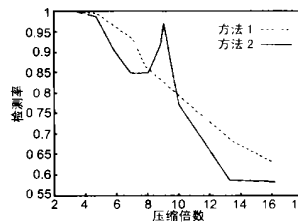


图 4 相近嵌入容量下两种方法抗压缩性能比较而言

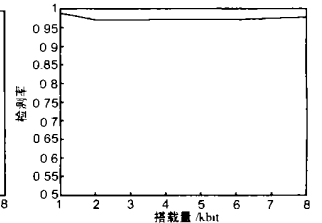


图 5 方法 2  $k = 1$  时嵌入量与检测率的关系

在同一  $k$  值下, 只要嵌入量不超过嵌入容量, 那么检出率基本与嵌入量无关, 而是始终稳定在同一水平上. 例如方法 2,  $k = 1$  时嵌入容量为 9293bit, 在这一嵌入容量内, 我们取各

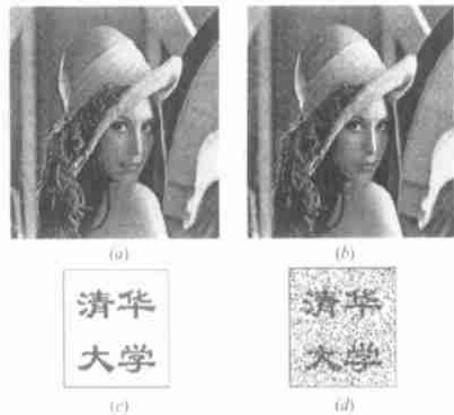


图 6 二值图像嵌入实验

(a) 原图; (b) 嵌入 c 后的图像, 嵌入 bit 数为 16384, PSNR = 39.60dB;

(c) 嵌入的二值图像; (d) b 经 JPEG 压缩 8.04 倍后的检出图像

种不同的实际嵌入量, 其在 JPEG 品质因子为 50 时的检出率如图 5 所示.

当嵌入容量较大时, 嵌入对象就可以是有意义的二值图像, 它们被认为更能达到版权保护的作用, 本文的方法在此方面也具有有良好的性能. 这里我们使用方法 2, 令  $k=0.6$ , 取  $k_2=0.0015$ ,  $k_1=0.001$  实验中的水印是分辨率为  $128 \times 128$  的二值图像. 嵌入后图像的 PSNR=39.60dB, 没有可感知的失真存在. 在 JPEG 压缩 8.04 倍时, 检测的像素正确率为 0.8501. 图 6(d) 是检测结果, 水印仍然可以清晰辨认.

另外, 本文的方法, 在其他攻击手段, 如低通滤波, 高斯噪声下都有很好的鲁棒性.

对于和压缩相结合的水印嵌入, 我们取不同的 JPEG 品质因数下嵌入的结果进行比较, 结果如表 3 所示.

表 3 与压缩相结合的水印算法性能

JPEG 品质因子	90	80	70	60	50	40	30	20	10
嵌入容量(bit)	32018	22460	17146	12471	9293	6884	4718	2778	972
嵌入量	1024	1024	1024	1024	1024	1024	1024	1024	972
检出率	0.9991	0.9988	0.9914	0.9885	0.9889	0.9869	0.9887	0.9875	0.9868
压缩倍数	3.280	4.710	5.845	6.953	7.791	8.885	10.421	13.343	20.474
压缩倍数(无水印)	3.286	4.713	5.850	6.954	7.793	8.889	10.472	13.355	20.525

表 3 中对标准 JPEG 和结合了水印的 JPEG 算法的压缩率进行了比较, 由于嵌入水印的缘故, 某些原来量化为 0 的系数现在变为非零, 因而结合水印的 JPEG 压缩率稍有下降. 同样的, 只要实际嵌入量不超过嵌入容量, 那么检出率不会随着嵌入量变化而改变.

## 6 结论

本文阐述了为达到更好的鲁棒性和置信度, 水印的嵌入应当基于容量估计这一观点, 本文提出了两种基于容量估计的水印算法, 利用人眼的视觉特性和图像特性, 自适应的调整嵌入强度, 并且利用嵌入强度进行容量估计并确定嵌入位置. 通过实验的全面评估表明, 它们能够满足高鲁棒性, 低失真和不同嵌入容量的要求, 具有良好的性能, 可以用于水印是数据或者图像的场所. 在此基础上, 本文还提出了一种将水印与 JPEG 相结合的嵌入和压缩算法, 实验表明, 它可以在基本不影响压缩性能的同时, 实现该压缩比下水印的高检出率.

## 参考文献:

- [1] M D Swanson, A H Tawfik. Multimedia Data Embedding and Watermarking Technologies [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(6): 1064-1085.
- [2] T Liang, J Rodriguez. Robust image watermarking using inversely proportional embedding [A]. Proceedings of 4th IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation [C]. Austin, Texas, USA: IEEE, 2000.
- [3] B Tao, B Dickinson. Adaptive watermarking in the DCT domain [A]. Proceeding of the international conference on image Processing [C]. Lausanne, Switzerland: ICIP, 1996.
- [4] D Kundur. Implications for High Capacity Data Hiding in the Presence of Lossy Compression [A]. Proceedings of International Conference on Information Technology: Coding and Computing [C]. Las Vegas USA: ICIT, 2000.
- [5] M S Kankanhalli, K R Ramakrishnan. Adaptive visible watermarking of images [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems [C]. Florence, Italy: IEEE, 1999.

## 作者简介:



邵亚非 男, 1974 年 10 月生于江苏, 1998 年本科毕业于清华大学电子工程系, 现为该系博士研究生, 研究方向为数字水印技术, 数字视频广播与条件接收, 宽带网接入.



吴国威 男, 1935 年 1 月生于浙江, 1958 年毕业于清华大学电子工程系, 现为清华大学电子工程系教授, 研究的方向为信号与图像处理, 数字视频广播等.

张利 男, 1965 年生于山东招远, 现为清华大学电子工程系副教授, 研究方向为视频监控、视频压缩等.