

# 基于嵌入式小波编码的数字图象水印算法

张鸿宾 张素娟

(北京工业大学计算机学院, 北京 100022)

**摘要** 提出了一种基于嵌入式小波编码的水印算法. 该算法根据 Watson 关于小波系数量化噪声可见性研究的一些结果, 将水印自适应地嵌入到小波变换的不同分辨率和不同方位的重要系数中. 水印的检测是分级渐进地进行的, 从而提高了水印检测的效率. 文中实现了两种不同形式的水印: 标志图象的水印和伪随机序列的水印. 实验结果表明, 该水印算法对图象处理和压缩等运算有较强的鲁棒性.

**关键词** 数字水印 版权保护 离散小波变换 嵌入式小波编码

**中图分类号**: TP391.4 TP309.7 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2002)02-0105-06

## Digital Image Watermarking Based on Embedded Wavelet Coding

ZHANG Hong-bin, ZHANG Su-juan

(Computer Institute of Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

**Abstract** Watermarking is one of the current copyright protection methods that have recently received considerable attention. In this paper, we introduce a wavelet transform based watermark casting scheme for digital images. The proposed method searches the significant coefficients across subbands to embed the watermarks into the significant wavelet coefficients. The watermark is adaptively weighted in different subbands according to the recommended mask values of wavelet coefficients by Watson. The current quantization threshold for each subband is also used as the weighting function of the embedded watermark. The fidelity of the watermarked image can be adjusted by using a weighting factor of the cast watermark. The casting and detecting of watermarks is hierarchical. In the case when the received image is not distorted significantly, the calculation of cross correlations with the whole size of the image may not be necessary, therefore much of the computational load can be saved. Experimental results show that the DWT based watermark approach can provide an excellent protection under various attacks.

**Keywords** Digital watermarking, Copyright protection, DWT, Embedded wavelet coding

## 0 前言

近年来,随着数字化技术的进步和 Internet 的迅速发展,数字多媒体(数字图象、视频、音频以及计算机图形等)的应用取得了惊人的发展.然而,多媒体技术在给社会带来进步的同时,也使得它的知识产权保护成为一个迫切需要解决的问题.作为版权保护的一种手段——数字水印技术的研究,自 20 世纪 90 年代初开始就引起了人们的极大关注<sup>[1]</sup>.

所谓数字水印就是把标识信息嵌入数字媒体中,用以辨识数据的版权、合法所有者,认证或控制数据的使用.水印应该是不可感知的,并且能够经受常用的信号处理、编码和解码、A/D 和 D/A 转换等运算以及恶意的攻击.水印的嵌入可以在空、时域内进行,也可以在频域内进行.一般来说,空(时)域的水印算法易于实施,但较难保证对信号处理和恶意攻击有较好的抵抗性.目前的水印算法大多是在离散余弦变换(DCT)后的频域内进行的,利用广播通讯(spread spectrum communication)的原理,将伪随机序列(如

基金项目:国家自然科学基金(60075002);北京市自然科学基金(4992002);北京市教委科技发展计划基金

收稿日期:2000-11-30;改回日期:2001-04-11

M-序列)嵌入到 DCT 的中频系数里<sup>[2,3]</sup>。这一类的水印算法是和当前的 JPEG、MPEG1-2 的压缩标准相适应的。然而,由于小波变换良好的空频局部性质和多分辨率表示的优点,以及它在压缩标准 JPEG2000 和 MPEG4 中的作用,研究小波变换域的水印算法就成了一个重要的课题。

本文提出一种和嵌入式小波编码相适应的水印算法。该算法依据人类的视觉特性,将水印信息自适应地嵌入到小波变换域的不同分辨率和不同方位重要系数中。基于小波变换的水印和基于分块 DCT 的水印不同,它具有不同的空间支持区域,因而具有局部水印和全局水印的双重优点。基于局部空间支持的水印分量可以抵抗诸如剪切一类的攻击,而基于全局支持的水印则对低通滤波和图象缩放等攻击有较强的鲁棒性。另外,本文的算法是和嵌入式小波编码的算法相适应的,对这类压缩算法,如 EZW (Embedded Zero-tree Wavelet coding) 和 SPIHT (Set Partitioning In Hierarchical Tree) 等也有很好的鲁棒性。

## 1 离散小波变换和嵌入式编码

一个二维信号  $X$  的离散小波变换(DWT)可以看作是一个分级的四通道滤波运算,分别对行和列进行高通和低通滤波的不同组合,可以得到  $X$  在子带  $LL_1$ 、 $LH_1$ 、 $HL_1$  和  $HH_1$  上的变换系数。对于子带  $LL_1$  继续进行分解,直到达到需要的级数为止。下面用  $\lambda$  表示小波分解的级数,用方位  $\theta \in \{1, 2, 3, 4\}$  表示低通和高通滤波的 4 种不同组合  $\{LL, LH, HL, HH\}$ , 而  $\lambda$  和  $\theta$  的组合  $(\lambda, \theta)$  就规定了小波变换的一个子带  $S(\lambda, \theta)$ 。

水印算法应该考虑和图象编码相适应。图象编码一般由变换、量化和熵编码 3 个主要部分组成。通常的编码方法是各个变换系数逐个进行的,即在一个系数完全编码之后再下一个系数的编码。这种编码方式不适应网上传输多媒体数据时的渐进和低位率发送 (progressive and low bit-rate transmission) 的要求,不适合诸如图象浏览等一些场合的应用。

近几年发展起来的嵌入式小波编码是一种位平面编码。它的主要思想是:在量化变换系数时,首先把最重要的码位组织成一个位平面进行编码发送,接下来再进行次要码位的位平面处理,如此进行下

去。编码、发送的顺序和码位的重要性是一致的。随着更多位平面的发送,对原图象的近似也就越来越精确。根据对图象近似程度的要求,人们可以在一定的码位上停止编码或者解码,以最少的码位取得最好的近似。Shapiro 的嵌入式零树小波(EZW)编码是最早提出的这类编码方法的一个代表<sup>[4]</sup>,而 SPIHT 则是这类算法中公认最有效的一个算法<sup>[5]</sup>。

在一个二进量化的嵌入式编码中,子带  $S(\lambda, \theta)$  中的每个系数  $C_{\lambda, \theta}(i, j)$  可以表示为

$$C_{\lambda, \theta}(i, j) = \text{sign} \cdot \left\{ a_0 \frac{T}{2^0} + a_1 \frac{T}{2^1} + \dots + a_b \frac{T}{2^b} + \dots \right\}$$

其中,  $\text{sign}$  表示系数的符号值 +1 或 -1。  $b$  是位平面的序数,  $b=0$  时是最重要的位平面层。  $a_b$  是第  $b$  个位平面层的二进制位。  $T$  是子带  $S$  的起始阈值,一般取  $T = \max\{C_{\lambda, \theta}(i, j)\} / 2$ 。

在下面的水印算法中,将根据变换系数的重要性自适应地调节水印的嵌入量,以获得较好的攻击性和不可见性。

## 2 水印的嵌入和检测

根据用途的不同,数字水印也有多种形式。例如,嵌入和检测一个伪随机序列,可以证明图象中有无有效的水印。也可以嵌入一个二值或多值的标志图象作为水印。还可以在一个媒体中嵌入多个水印来标识版权、产品编码以及交易人等信息,或用来检测或监视媒体是否受到了篡改,媒体的完整性是否遭到了破坏等。

本文主要研究二值的标志图象水印和伪随机序列的水印。标志图象水印的意义在于,除了它本身可以用来标识版权之外,还可以通过把多位的二值序列组织成一定的模式图案而转化为标志图象,便于在水印检测时引入类似错误校正的算法,提高检测的准确率。

为了尽可能地加大水印的嵌入量,提高水印的鲁棒性,同时保持它的不可见性,水印算法必须利用人类的视觉系统(HVS)特性。人类的视觉特性与亮度、频率以及信号分量间的对比度屏蔽(masking)效应有关。人眼对图象中平滑区域的变化较敏感,而对纹理区域和边缘处的微小变化则不太敏感。在小波变换后,纹理和边缘特征一般集中在高频子带  $HH$ 、 $HL$  和  $LH$  中。把水印信息加在这些子带中幅

值较大的系数上人眼不易察觉, 可以加大水印的嵌入量。

### 2.1 标志图象水印的嵌入

标志图象是一个小的二值图象, 把它的各个象素重复地嵌入到原图象小波变换的各个重要系数中去, 然后进行逆变换就可以得到加了水印的图象。其过程如图 1 所示。

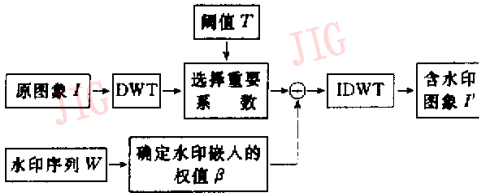


图 1 水印嵌入流程

由于标志图象水印的长度一定, 嵌入时按照从重要位平面向次要位平面的顺序来选取重要系数重复地嵌入标志水印。

水印的嵌入公式为

$$C_{b,s,k}(i, j) = C_{b,s,k}(i, j) + \alpha \times \beta(b, S(\lambda, \theta)) \times w_k$$

式中,  $C_{b,s,k}$  是原图象的  $S$  子带第  $b$  个位平面上的第  $k$  个重要系数,  $w_k$  是水印的第  $k$  个分量,  $C'_{b,s,k}$  是嵌入水印后的系数。  $\beta(b, S(\lambda, \theta))$  是和  $b, S$  有关的自适应调节因子,  $\alpha$  是比例系数。自适应调节因子  $\beta$  的值应该考虑人眼的视觉特性, 在水印的不可见性和鲁棒性之间进行折衷。参考 Watson 关于小波系数量化噪声可见性的研究成果<sup>[6]</sup>, 本文采用了如下的调节因子:

$$\beta(b, S(\lambda, \theta)) = r\{S(\lambda, \theta)\} \times T_b$$

式中,  $T_b$  是第  $b$  个位平面的量化阈值,  $r\{S(\lambda, \theta)\}$  的值见表 1。

表 1 小波系数的屏蔽特性值

$\theta$	$\lambda$			
	第 1 级	第 2 级	第 3 级	第 4 级
LL	0.239	0.189	0.193	0.247
LH	0.392	0.250	0.216	0.241
HH	1.000	0.483	0.333	0.304
HL	0.392	0.250	0.216	0.241

另外, 由于人眼对彩色图象中亮度的变化比色调的变化敏感, 所以可以将彩色图象由 RGB 系统转换到 YCbCr 系统, 将水印嵌入其亮度(Y)分量中。

### 2.2 标志图象水印的检测

水印的检测过程和嵌入时相反, 其流程如图 2 所示。从重要的位平面开始, 从原图象的小波分析图

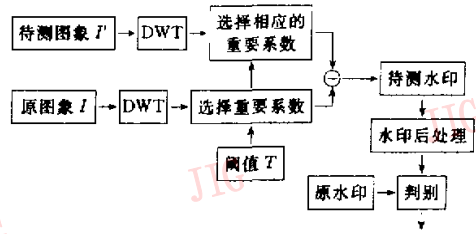


图 2 水印检测的流程

象中确定重要系数集, 并以这些重要系数的地址作为索引, 从含水印图象的小波分析图象中选择相应的系数作为待测重要系数集。当两者相应分量的差大于某个阈值时, 可以认为该位置上有水印分量存在, 其值为 1, 否则为 0。为提高水印检测的准确性, 对检出的水印图象进行了中值滤波, 其作用类似于错误校正的功能。

将检测出的水印图象  $W'$  与原水印  $W$  进行比较, 可以判别水印的真伪。判别函数采用了平均错位率  $MEB$  (Mean Error Bits), 即  $W'$  和  $W$  间的哈密距离  $H(W', W)$  除以水印分量的总个数  $N_w$

$$MEB = \frac{H(W', W)}{N_w}$$

### 2.3 伪随机序列的水印算法

和标志图象的水印不同, 伪随机序列水印的功能只是证明是否存在有效的水印。它嵌入的信息量是 1 比特的有、无信息, 因此可以更冗余地嵌入, 获得更好的鲁棒性。采用服从正态分布  $N(0, 1)$  的伪随机序列做水印检验了上述的水印算法。与标志图象水印的算法相比, 由于伪随机序列的水印采用了相似函数作为水印是否存在的检测标准, 因此本文的水印算法能更好地利用嵌入式小波编码分级和分子带进行的特点, 实现水印序列的分级检测, 节省了水印检测的计算时间。

伪随机序列水印的嵌入与检测过程和标志图象水印类似。当在较高分辨率层上的相似函数值超过一定的阈值后, 水印的检测就可以终止, 因而可以提高水印检测的效率。

这里采用的待测水印  $W'$  与原水印序列  $W$  的相似函数为

$$SIM(W', W) = \frac{\sum_{i=1}^{N_w} w'_i \cdot w_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_w} (w'_i)^2 \sum_{i=1}^{N_w} (w_i)^2}}$$

式中,  $N_w$  为水印序列的长度。

### 3 实验结果

对上述的水印算法采用各种不同性质的彩色和黑白图象进行试验,下面是在 Lena 图象(256 × 256,256 级灰度)上的实验结果.实验中采用了两种水印:64 × 64 的二值标志图象水印和服从正态分布

$N(0,1)$ 的伪随机序列的水印.

#### 3.1 二值标志图象水印的实验结果

图 3 的(a)、(b)和(c)分别为原图象、水印图象及加水印后的图象.从视觉效果看,很难感觉到水印的存在.该图嵌入水印后的峰值信噪比为:35.808dB.

图 4 用放大的形式给出了 Lena 图象两级 Haar 小波分解后的图象及本文算法选中的水印嵌入位置.

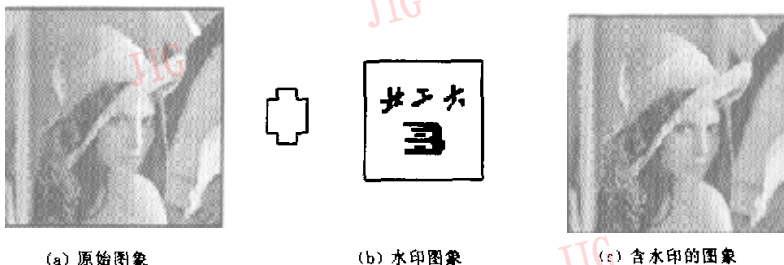


图 3

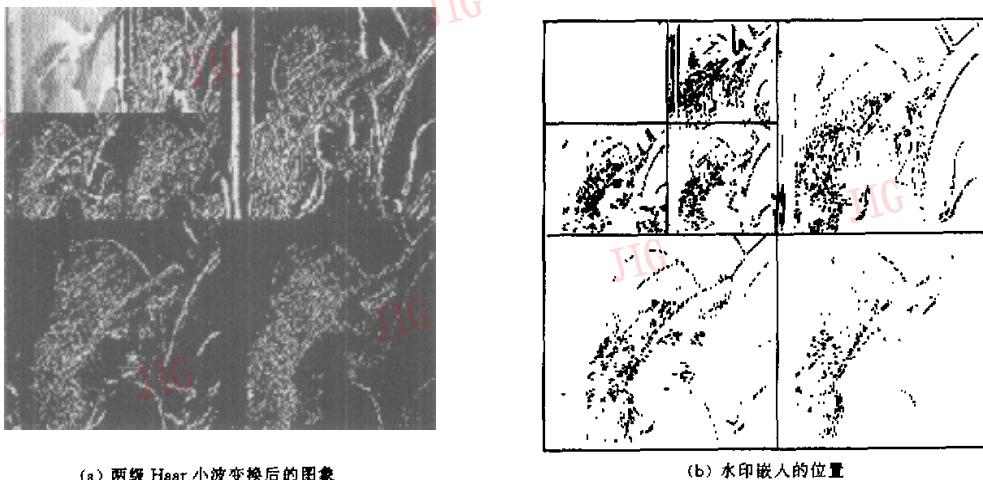


图 4

对上述水印算法抵抗常见的图象处理和攻击的性能进行实验,下面是部分实验结果:

(1) 抗 SPIHT 压缩编码的性能  
将生成的含水印图象用 SPIHT 算法进行压缩

(压缩比 32 : 1)和解压<sup>[5]</sup>,然后提取水印,其中对 Lena 图象进行实验的结果如图 5 所示.水印检测的平均错位率  $MEB$  约为 0.181,中值滤波后的平均错位率  $MEB$  约为 0.034.

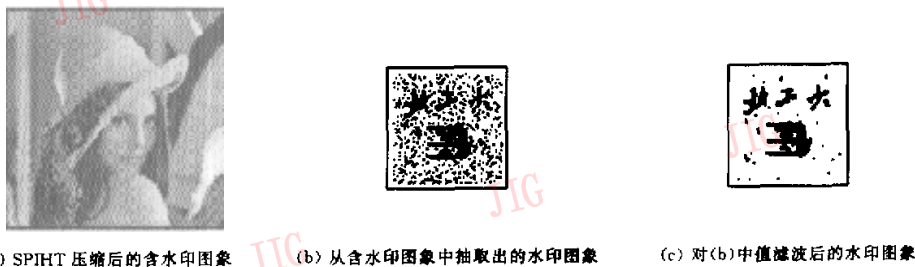


图 5

(2) 抗剪切的性能

对生成的含水印图象减去大小为原图象 20% 的一块图象后再补以白色象素点,其水印抽取结果如图 6 所示。水印检测的平均错位率  $MEB$  约为 0.118,中值滤波后的平均错位率  $MEB$  约为 0.046。

(3) 抗低通滤波和噪声的性能

对含水印图象进行低通滤波(卷积模板为  $M$ )或添加高斯噪声,其峰值信噪比分别为 25.4dB 和

28.92dB。水印检测的结果如图 7 所示,平均错位率  $MEB$  分别为 0.157 和 0.162。中值滤波后的平均错位率  $MEB$  分别为 0.092 和 0.068。

$$\text{其中, } M = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

(4) 抗图象放缩的性能

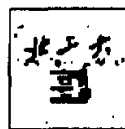
图 8 是对含水印图象进行 7 倍放大后再缩小 8



(a) 剪切了 20% 后的含水印图象



(b) 从剪切后的含水印图象中抽出的水印图象



(c) 对(b)中值滤波后的水印图象

图 6



(a) 低通滤波后的含水印图象



(b) 抽出的水印图象



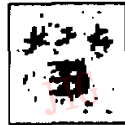
(c) 对(b)中值滤波后的水印图象



(d) 添加噪声后的含水印图象



(e) 抽出的水印图象



(f) 对(e)中值滤波后的水印图象

图 7



(a) 放缩后的含水印图象



(b) 从放缩后的含水印图象中抽出的水印图象



(c) 对(b)中值滤波后的水印图象

图 8

倍,水印检测的结果. 缩放后图象的峰值信噪比为 28.1dB, 中值滤波前的平均错位率  $MEB$  约为 0.158, 中值滤波后的平均错位率  $MEB$  约为 0.033.

### 3.2 以伪随机序列做水印的实验结果

采用服从正态分布  $N(0,1)$  的伪随机序列做水印, 水印检测的结果可以验证有无有效的水印 (Yes/No). 选择 4 层位平面嵌入水印时, 可嵌入的水印长度为 5351. 原图象与生成的含水印图象的峰值信噪比为: 43.3dB. 对含水印图象进行常用图象处理的攻击, 然后用相似函数的方法进行水印检测, 实验结果如表 2 所示.

表 2 伪随机序列水印抗攻击的实验结果

运算	峰值信噪比或 剪切比率	相似函数值				结论
		位层 1	位层 2	位层 3	位层 4	
低通滤波	25.4	0.892				YES
	16.1	0.365				YES
添加噪声	28.9	0.289	0.341			YES
	27.0	0.235	0.291	0.303		YES
剪切	52%	0.535				YES
	65%	0.371				YES
SPIHT 压缩	35.2	0.223	0.308			YES
	33.3	0.227	0.287	0.304		YES

由于水印是分级检测的, 如果在某一层上的相似函数值大于某一阈值, 即可确定水印的存在, 从而节省了水印检测的计算. 实验中的阈值为 0.3. 从实验中可以看出, 即使对含水印图象进行过一定程度的运算, 仍能从中检测出水印的存在.

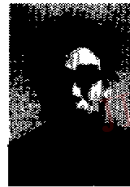
## 4 小 结

本文提出了一种基于小波变换的水印算法, 这种方法根据人类的视觉特性, 将水印信息分级、分区域自适应地嵌入到小波变换的重要系数上. 对标志图象和伪随机序列两种形式的水印进行实验的结果表明, 生成的水印具有较好的不可见性和鲁棒性. 该水印算法和嵌入式小波编码过程是相适应的.

值得指出的是, 目前 JPEG2000 标准已经采用了稍微修改的 EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation) 作为压缩工具<sup>[7]</sup>. 进一步的工作是针对 EBCOT 的一些特性, 研究适应 JPEG2000 的水印算法.

## 参 考 文 献

- Petitcolas F A P, Anderson R J, Kuhn M G. Information hiding—a survey[J]. Proc. of IEEE, 1999, 87(7):1063~1077.
- Bors A, Pitas I. Image watermarking using DCT domain constraints [A]. In: Proc. Int. Conf. Image Processing (ICIP) [C], Lausanne, Switzerland, Sept. 1996.
- Cox I J, Kilian J, Leighton F T *et al.* Secure spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(12):1673~1687.
- Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993, 41(12):3445~3462.
- Said A, Pearlman W A. A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 243~250.
- Watson A B, Yang G Y, Solomon J A *et al.* Visibility of wavelet quantization noise [J]. IEEE Trans. On Image Processing, 1997, 6(8):1164~1175.
- JPEG2000 part1 final committee draft version1.0. Tech. Rep [R]. ISO/IEC FCD15444-1, march, 2000.



张鸿渊 1944年生, 教授, 博士生导师, 1981年清华大学模式识别与智能控制专业研究生毕业. 曾分别于1986~1989年在日本京都大学, 1993~1994年在美国RPI作访问学者. 目前的主要研究方向为模式识别、计算机视觉、人工神经网络、数据隐藏和数字水印等.



张彦妍 1975年生, 1997年山东大学计算机科学与技术系本科毕业, 2000年北京工业大学计算机应用专业研究生毕业, 工学硕士. 目前主要从事计算机应用的研究与开发.