

# 小波域的扩频数字图像水印算法<sup>1</sup>

纪 震 张基宏 蒋一峰\*

(深圳大学信息工程学院 深圳 518060)

\*(西安交通大学图像所 西安 710049)

**摘 要** 该文利用小波变换良好的时频局部特性,提出了基于小波变换的数字图像水印嵌入方案,提高了数字水印的隐蔽性;把扩频通信的概念和方法引入数字水印系统中,采用了扩频理论中的伪随机序列进行处理,提高了数字水印的稳健性,同时扩频通信的多址原理也将对实现多重水印起一定的作用。该文详细讨论了该算法的视觉效果,抗 JPEG 压缩、抗随机噪声和抗尺寸变换能力,以及多重水印的实现。

**关键词** 数字图像水印, 版权保护, 小波变换, 扩频

**中图分类号** TN941.1, O177.6

## 1 引 言

数字水印是信息时代版权保护的一种手段。隐蔽性和稳健性是其两个基本的特征和要求<sup>[1]</sup>。从实现的角度,图像水印算法可分为两类:空域与变换域。空域(或时域)<sup>[2]</sup>方法, Wolfgang<sup>[3]</sup>等人提出了最低有效位算法(LSB),即利用图像某些像素的低位来储存水印信息,这样做有较好的隐蔽性,但是抗攻击能力较差。Brassil<sup>[4]</sup>等人提出了文档结构微调方法,数字信息通过轻微调整文档中的结构来完成编码,该算法可以抵抗照相复制和扫描复制,但是仅适于文档图像类。变换域的方法在综合性能上要比空域方法优越,在目前的研究中占了主要地位。变换域方法包括 DCT<sup>[1-5]</sup>和 DWT(Discrete Wavelet Transform)等几种。DCT 域的水印通常加在视觉效果重要的分量上(DC 或者低频的 AC),那么严重的方块效应就成为了该算法的致命缺陷。

小波变换具有良好的时频局部化特性,应用小波变换对图像进行编码和压缩已经取得了相当好的效果,不但有较高的压缩比,而且不会出现 JPEG 压缩的方块效应和蚊式噪声,新一代静止图像压缩标准(JPEG2000)已经采用了小波变换。小波变换符合人类视觉系统(HVS)的某些特性(频率掩蔽特性),可以增强水印的隐蔽性。Y.S.Kim<sup>[6]</sup>提出了按比例将水印信息加权后分别嵌入到各频段,提高了水印的稳健性。H.Inoue<sup>[7]</sup>等人在此基础上结合零树结构,使水印的嵌入与视觉特性的结合更好。

本文提出了一种在小波域内结合扩频技术的水印算法。水印算法的关键是稳健性,影响水印的稳健性因素有两个:嵌入对策和水印结构。由于小波变换具有良好的时频局部化特性,本文研究了在小波域如何嵌入图像水印,同时嵌入的对策将结合 HVS。对于水印结构,扩频通信的隐蔽性和强大抗干扰能力正是数字水印所需要的,本文把扩频通信的概念和方法引入数字水印系统中,将水印信号采用了伪随机序列进行调制,扩展成比信息带宽大得多的带宽信号,提高了数字水印的稳健性。同时扩频通信的多址原理也对实现多重水印起一定的作用。

## 2 基于小波变换的数字水印原理

**2.1 小波变换** 对于二维图像信号  $f(x,y) \in L^2(R^2)$ , 可以利用小波分解为  $N$  层,用符号  $W_o^j(m,n)$  表示  $o$  方向第  $l$  层小波系数,其中  $o = LL, LH, HL, HH; j = 1, 2, \dots, N; (m,n)$  为二维坐标。一般图像分解成 3 层,即  $N = 3$ 。可以在指定的分辨率和方向上对二维的小波系数进行必要的分块。小波变换与人类视觉的多通道特性十分相似,基于小波变换的数字水印技术就是要充分利用人类视觉特性,在视觉不敏感的频带和区域上尽可能多地加入水印数据,在视觉敏感的频带和区域少加或不加。

<sup>1</sup> 2000-06-27 收到, 2000-11-10 定稿

2.2 嵌入对策 水印的自适应嵌入方法一般要结合图像的背景亮度、背景纹理复杂性、背景和信号的空间频率,将图像在空域的分块分为纹理强弱不同的区域,水印的强度自适应地调整。具体为

$$F_W(x, y) = F(x, y)(1 + \alpha W) \quad (1)$$

其中  $F(x, y)$  为原始图像,  $W$  为水印数据,  $F_W(x, y)$  为加过水印的图像,  $\alpha$  用于调整水印的强度,一般典型地选取 0 到 2.0 之间。

如果采用 DCT 分块的方法,在频域加入的水印等价于干扰,在 DCT 逆变换时,这种干扰将分布到每一块中,那么就会在块与块边界处出现分块效应。而采用小波变换在逆变换时是全局的变换,在自适应地调整水印强度的同时,这种干扰会分布到全局中,这就避免了明显的分块效应。本文就提出了如下的水印嵌入方法:

$$w_{W_{j,k}}(x, y) = w_{j,k}(x, y)(1 + \alpha_k W) \quad (2)$$

其中  $w_{j,k}(x, y)$  为图像的小波系数,  $w_{W_{j,k}}(x, y)$  为加水印图像的小波系数,而  $\alpha_k = 2^j \sigma_k m_k \alpha$ 。 $m_k, \sigma_k$  是小波系数分块  $i$  的亮度均值和亮度方差。 $\alpha_k$  的调整是基于如下原则: (1) 背景亮度越亮,可见性门限越高(亮度掩蔽)。(2) 背景纹理越复杂,可见性门限越高(纹理掩蔽)。(3) 越低频( $j$  增加),抗噪声能力越强。

一般认为,人眼对于水平、垂直方向的高频频带的噪声和失真最不敏感,而低频部分对于图像的主观质量有较大影响,这部分分量的噪声和失真最易察觉。图像的高频部分既是视觉隐蔽特性最好的地方,也代表了图像细节丰富的区域,水印数据一般应加在这些地方。实际上,低频部分集中了图像的大部分能量,如果对图像进行三层小波分解,从能量的分布来看,95% 以上的能量集中在第三层的低频子图  $I_{LL}^3(m, n)$  上,强大的能量和小波系数的大幅度,给数据的隐藏提供了很好的掩护,并且把数据加在低频部分能有效抵抗低通滤波的影响,因此本文选择把数据加在小波域的低频子图上( $j = 3$  或者 2)。

水印的检测方法可以采用假设检验:

$$H_0: E = w_W(x, y) - w(x, y) = N \text{ (无水印)} \quad H_1: E = w_W(x, y) - w(x, y) = W' + N \text{ (有水印)} \quad (3)$$

采用  $\lambda$  检验,计算相关系数:

$$r = \frac{\sum_i W_i^* \cdot W_i}{\left( \sqrt{\sum_i W_i^{*2}} \sqrt{\sum_i W_i^2} \right)} \quad (4)$$

当选定显著水平  $\alpha$  时,假设检验的置信区间  $r > R_\alpha(n-2)$ , 其中  $R_\alpha(n)$  可以查表得到,  $n$  为样本数。

### 3 水印的扩频处理

#### 3.1 伪随机序列

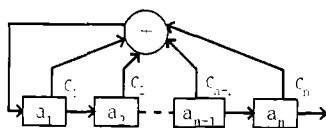


图 1 反馈移位寄存器结构

$m$  序列是由线性移位寄存器网络产生的,反馈移位寄存器结构如图 1 所示,其中  $C_1 \cdots C_n$  为抽头系数,0 表示无反馈,1 表示有反馈。关于符合什么条件的抽头系数才能产生  $m$  序列的问题,在扩频通信的论著中多有讨论,在此不赘述。

$m$  序列的互相关系数的计算比较复杂,事实上,  $m$  序列的互相关特性并不十分好,互相关特性较好的  $m$  序列称为相互优选对,只有相互优选对才能在实际的通信系统中使用,以达到减

少相互干扰和区分地址的作用。m 序列相互优选对的数目是很少的, 即使增加移位寄存器的级数, 可用地址也增加不了多少。也就是说, 在 m 序列中寻找更多的互相关值尽量小的码组是不可能的, 这样, 实现多址通信就有困难了。所以一般都采用 m 序列的组合码, 如 Gold 序列。

Gold 序列是 m 序列的组合码, 它是由两个长度相同、速率也相同, 但码字不同的 m 序列相互优选对逐个模 2 加得到的, 当改变两个 m 序列的相对位移时, 又会得到一个新的 Gold 序列, 它是由两个 m 序列自身码 m1 和 m2 构成的, 可得到总数  $2^n + 1$  个序列, 可见 Gold 序列数比 m 序列多得多。Gold 序列同样具有良好的自相关特性, 各个码组之间的互相关特性与原来两个 m 序列相互优选对的互相关特性一样, 最大的互相关值不会超过原来两个 m 序列相互优选对的最大互相关值。良好的自相关和互相关特性, 以及庞大的码组数, 使得 Gold 序列成为最有实用价值的伪随机序列。

3.2 水印的扩频 水印目前主要有两种, 水印图像和特征串。前者是嵌入代表版权的商标等图案能有效表明产品的所有权, 属于较直观的水印, 可以通过人类视觉进行判断, 水印可以容忍一定的失真, 但是图案的数据量较大, 难以嵌入很大的图案。后者是嵌入产品专利号、版权保护编号等文字信息, 文字符号虽然信息量较少, 但对抗干扰能力却有很高的要求, 一个符号的误判则意味着整个水印的失效。本质上这两种水印是一致的。

假如要加入的水印为一字符串, 把它转换为相应的二进制, 即把它们的 ASCII 码用二进制表示, 并把 0 映射为 -1, 1 映射为 1, 若水印为图像则先把图像二值化再映射到  $\{-1, 1\}$  上, 得长度为  $n$  的二进制序列  $a_j \in \{-1, 1\}, j = 1, 2, \dots, n$ 。这个序列要用伪随机序列来调制, 如用 15 位 m 序列  $p_i = \{1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, -1\}$  来调制, 即当  $a_j = 1$  时, 嵌入的数据为  $\{1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, -1\}$ , 当  $a_j = -1$  时, 嵌入的数据为  $\{-1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, 1, 1\}$ , 正好反相。

理论上当 m 序列长度趋于无限长时, 叠加在图像上的噪声与伪随机序列  $p_i$  的相关输出应当趋向于零, 而实际用的 m 序列不但不长, 甚至非常短, 在实验中只用到 15 位、31 位和 63 位三种, 图像中的噪声也不完全与通信中遇到的噪声一样, 所以有可能造成误判, 这就给水印的检测和恢复造成困难, 可能降低了水印的抗干扰能力。

#### 4 实验结果与讨论

由于利用了低频系数能量大的特点和引入了扩频通信的概念, 本文的数字水印嵌入方案都有良好的视觉效果和抗压缩、抗随机噪声和一定的抗尺寸变换的能力, 还支持多重水印。

以下实验均采用标准的 Lena(256×256×8bit) 图。

4.1 抗压缩能力分析 JPEG 是典型的有损压缩方法, 互联网上的数字图像多数都是以 JPEG 形式进行压缩的, 抵抗 JPEG 压缩的能力是数字水印的重要指标之一。表 1 给出了抗压缩能力的测试。

表 1 扩频嵌入 ASCII 码后的抗压缩和抗噪声能力

m 序列长度 (位)	加水印失真 PSNR(dB)	JPEG 压缩比极限	JPEG 压缩 PSNR(dB)	抗噪声极限 PSNR(dB)
15	45.563	9.6	31.769	33.218
31	45.536	18.3	30.302	28.315
63	45.533	25.3	28.993	22.370
127	45.540	34.5	27.671	20.763

JPEG 压缩比极限是指压缩图像中尚能够检测出水印的最大压缩比, JPEG 压缩 PSNR 是指此时的峰值信噪比。可以看出, 随着使用 m 序列长度的增加而不断提高, 其抗压缩能力不断增强, 这体现了引入扩频概念的成效。PSNR = 27.671 时, 图像主观质量下降得已经不能接受, 所以这样的 JPEG 压缩攻击在设计中应该是很少出现的, 那么也就说明了本文的算法已经满足了抗 JPEG 压缩的能力。

4.2 抗随机噪声能力分析 加入随机噪声是对数字水印攻击的一种手段,由于加噪声本身会对图像质量造成较大的影响,所以这种方法并不高明,实验证明了本文算法能有效抵抗随机噪声的干扰,见表1。攻击的噪声采用白噪声。

表1中可见本文提出的水印嵌入方法具有很强的抗随机噪声干扰的能力,即使是15位m序列扩频的水印只能抵抗33dB的噪声干扰,由于加噪声本身对图像质量的破坏较大,所以其抗噪声能力也是足够的。

4.3 抗尺寸变换能力分析 由表2可见,对于放大的操作,经还原后均能完全恢复出水印;对于缩小操作,嵌入图像的方法有较好的抵抗能力,只要变化比例不是太大,都能较好的恢复水印。使用127位和63位m序列时多数情况下都能完全恢复水印,使用31位和15位m序列时抵抗能力就显得不足了。

表2 抗尺寸变换能力

图像尺寸	m 序列长度 =127	m 序列长度 =63	m 序列长度 =31	m 序列长度 =15
250 × 250	◇	◇	△	▲
128 × 128	◇	▲	▲	▲
192 × 192	▲	▲	▲	▲
231 × 231	◇	◇	◇	▲
300 × 300	◇	◇	◇	◇
411 × 411	◇	◇	◇	◇
256 × 192	◇	◇	▲	▲
192 × 256	◇	▲	▲	▲

◇完全恢复 △大部分恢复 ▲无法恢复

4.4 多重水印 多重水印是指允许多个水印共存,可以在数字产品出版、发行的不同环节上加入不同的水印,便于跟踪作品的制作、发行和购买,也可以辨别产品的所有者和使用者等。多重水印具有非常重要的实际意义,但是目前的许多算法都没有进行多重水印的研究。

小波域扩频嵌入水印的方法应用了直接序列扩频的概念。从扩频理论中,可以知道用不同m序列进行扩频的信号之间能够在互相干扰中共存,为了尽量降低不同信号间的干扰,必须使用互相关性小的m序列,如m序列优选对和Gold序列,本文正是利用了扩频通信的这个多址原理特性,使得两个水印能够在互相干扰中共存。表3是采用127位m序列优选对和63位Gold序列嵌入二重ASCII码水印的效果。

表3 二重 ASCII 码水印性能

伪随机序列	图像失真 PSNR(dB)	压缩比极限	抗压缩极限 (dB)	抗噪声极限 (dB)
127(1)+127(2)	41.963	15.2	28.748	22.482
Gold63(1)+Gold63(2)	42.171	10.6	30.691	28.492

多重水印是以牺牲图像的质量和水印的抗干扰能力为代价的。在叠加多重水印后,图像的PSNR都降低了,但从视觉上效果还是属于十分良好的;水印的抗压缩和抗噪声性能也有所下降,但在二重水印和使用较长伪随机序列的条件下,水印间的干扰不大,抗压缩和抗噪声能力仍然很强。估计抗尺寸变换的能力也会有轻微减弱。

多重水印还可在一定程度上缓解m序列长度和水印嵌入量的矛盾,采用互相关性低的m序列则可在图像上重复嵌入不同水印,从而增加水印数据量,当然,这同样是以降低图像质量和水印抗干扰能力为代价的。

## 5 总结

本文提出并实现了小波域扩频嵌入水印的算法,实验证明了算法具有较好的抗JPEG压缩能力、抗随机噪声干扰能力和一定的抗尺寸变换能力,还具有了支持多重水印的基础,但是对数字水印的要求还不只是这些。在今后的研究还应继续提高水印性能,主要是进一步利用人类视觉特性,以进一步提高水印的稳健性并解决抗裁剪、抗旋转缩等问题。

## 参 考 文 献

- [1] A. H. Twfik, M. Swanson, Data hiding for multimedia personalization, interaction, and protection, The past, present, and future of multimedia signal processing, IEEE Signal Processing Magazine, 1997, 14(7), 41-44.
- [2] 李忠源, 郭全成, 任亚萍, 图像中的信息隐舍及水印技术, 电子学报, 2000, 28(4), 61-63.
- [3] P. Wolfgang, E. Delp, A watermark for digital images, In Proc. IEEE Internet Conf. Image Processing'96, San Francisco, Sept, 1996, 219-222.
- [4] Brassil, S. Low, N. Maxemchuk, Electronic marking and identification techniques to discourage document copying, Proc. of Infocom'94, Seattle, 1994, 377-382.
- [5] 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.
- [6] Y. S. Kim, O. H. Kwon, R. H. Park, Wavelet based watermarking method for digital images using the human visual system, Electronics Letters of the IEE(UK), 1999, 35(6), 466-468.
- [7] H. Inoue, T. Katsura, A. Miyazaki, A digital watermark technique based on the wavelet transform and its robustness on image compression and transformation, IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, 1999, E82-A(1), 2-10.
- [8] S. G. Mallat, A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation, IEEE Trans. on PAMI, 1989, 11(7), 674-693.

IMAGE WATERMARKING TECHNIQUE BASED ON WAVELET  
TRANSFORM AND SPREAD SPECTRUM

Ji Zhen      Zhang Jihong      Jiang Yifeng\*

*(College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)**\*(Image Processing Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)*

**Abstract** In this paper, the wavelet transform is used to increase the invisibility of the digital image watermark because it can exploit the temporal and spatial phenomena of human visual system. The more robustness can be achieved if watermarks are first spread and then modulated with pseudo noise spread sequence. The multiple address characteristic of spread spectrum will also help multiple watermarking. The performances of the proposed digital image watermarking algorithm based on wavelet transform combined with spread spectrum theory are discussed in this paper, such as resisting the damages from JPEG compression, random noising, geometrical transformation and multiple watermarking.

**Key words** Digital image watermarking, Copyright protection, Wavelet transform, Spread spectrum

纪 震: 男, 1973 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向: 医学图像处理、数字水印、小波分析等。99 年获国家教育部科技发明奖二等奖 (第二获奖人)。

张基宏: 男, 1964 年生, 博士, 教授, 主要研究方向: 图像矢量编码、遗传算法等。

蒋一峰: 男, 1976 年生, 博士生, 主要研究方向: 数字水印。