

# 基于小波变换的数字水印算法研究

张楠 范铁生  
(辽宁大学信息学院 辽宁沈阳 110036)

**摘要:** 基于小波变换的数字水印技术是当前很重要的研究热门,《基于小波变换的数字水印算法研究》系统分析和总结了基于小波域的数字水印算法,并根据水印算法的特点对其进行了分类,详细分析了各类水印算法的各种嵌入和检测技术以及各自的优缺点,最后给出了基于小波变换的数字水印算法的优点。

**关键词:** 小波变换 数字水印 水印算法  
中图分类号: G633.67

**保护版权**  
文献标识码: A

文章编号: 1674-098x(2008)02(b)-0002-02

## 1 引言

随着计算机通信技术,多媒体传输及存储技术的发展,数字产品的传输已经大面积的普及,然而,盗版现象也跟随进入了计算机领域。这样仅用低价的投入可以复制出未被授权的数字产品,由于技术的粗糙,造成了对消费者使用数字产品的不安全,也给正版的数字产品制造商带来了巨大的经济损失。数字产品的版权所有者的迫切需要一种维权的措施。

为了达到保护版权的目的,信息隐藏技术在1995年被正式提出。而数字水印技术就是信息隐藏技术的一个分支,也是数字版权保护技术的主要技术。它主要用于:阻止非法复制(间接的)、确定所有权(作者、发行人、分发商、合法的最终用户)、确定作品的真实性和完整性(是否伪造、被篡改)、证实收件人、不可否认的传送、法庭证据的验证、赝品甄别、识别文件来源与版本、Web网络巡逻监视盗贼等。

目前数字水印算法主要是基于空域和变换域的。

空域算法有很多种,其中最普遍的是首先把一个密钥输入一个m-序列发生器来产生水印信号,然后排列成二维水印信号,按像素点逐一嵌入到原始图像最不重要的像素位最低位(LSB: least significant bits)。这可保证嵌入的水印是不可见的。但是由于使用了图像不重要的像素位,算法的鲁棒性差,水印信息很容易被滤波、图像量化、几何变形的操作破坏,因此不够强壮。

而变换域算法最主要的一种是方法通过改变频域的一些系数的值,采用类似扩频图像的技术来隐藏数字水印信息。主要有离散余弦变换(DCT)、小波变换(WT)、付氏变换(FT 或FFT)以及哈达马变换(Hadamard Transform)等等。其中小波变换因其优良的多分辨率分析特性,使得它广泛应用于图像处理。特别是2000年新一代静止图像压缩编码标准JPEG2000(相对于JPEG,它放弃了JPEG所采用的DCT,而采用DWT)公布并开始实行,使基于小波变换的水印算法越来越引人注目。

## 2 小波变换

长期以来,傅里叶变换一直是信号处理领域中最完美、应用最广泛的一种分析手段。

但傅里叶变换只是一种纯频域的分析方法。在时域上无任何定位能力,即无法提供任何局部时间段上的频率信息。为了继承傅里叶分析(余弦变换和正弦变换都可以视为傅里叶变换的特例)的优点,同时又克服它的许多缺点,人们一直在寻找新的方法。小波理论是近年来兴起的新的学科,基本思想就是把图像进行多分辨率分解,分解成不同空间、不同频率的子图像,然后再对子图像的系数进行

处理。根据S.Mallat的塔式分解算法,图像经过小波分解后被分割成4个频带:水平方向、垂直方向、对角线方向以及低频部分,其中低频部分可以继续分解。图像经过小波变换后,产生 $LHi$ 、 $HLi$ 、 $HHi$  ( $i=1, 2, 3$ )三个高频带系列和一个 $LL3$ 低频带,图像的能量主要集中在低频部分,而水平、垂直和对角线部分的能量则较少;水平、垂直和对角线部分表征了原图像在水平、垂直和对角线部分的边缘信息,具有明显的方向特性<sup>[1]</sup>。

## 3 数字水印的设计需要考虑的几个方面

(1)鲁棒性:是指被保护的信息经过某种改动后抵抗隐藏信息丢失的能力。例如传输过程中的信道噪音、滤波操作、重采样、有损编码压缩、D/A或A/D转换、图像的几何变换(如平移、伸缩、旋转、剪裁等)。

(2)不可检测性(不可见性):是指隐藏载体与原始载体具有一致的特性。如具有一致的统计噪声分布等,以便使非法拦截者很难判断是否有隐藏信息。

(3)透明性:是指经过一系列隐藏处理后,原始数据没有明显的降质现象。

(4)安全性:要求隐藏算法有较强的抗攻击能力(篡改、伪造、去除水印),使隐藏信息不会被破坏。如:不因文件格式转换而丢失水印,且未经授权者不能检测出水印。

(5)自恢复性(自相似性):由于经过一些操作或变换后,可能会使原数据产生较大的破坏,如果只从留下的片段数据,仍能恢复隐藏信号,而且恢复过程不需要原数据,这就是自恢复性。

### 3.6 水印容量

水印容量和鲁棒性之间是相互矛盾的。水印容量的增加会带来鲁棒性的下降,对不可见性也有影响。为抵抗各种变换,水印通常按照一定的排列方式反复加入多次,当水印容量大时重复次数只好减少,而鲁棒性不好就会导致检测结果的不可靠。

## 4 数字水印嵌入技术

与其他域的水印技术一样,小波域水印也分为水印嵌入和水印检测两部分,其中水印嵌入过程如图1所示<sup>[2]</sup>。

### 4.1 图像水印的嵌入法

图像数字水印技术是根据图像小波变换

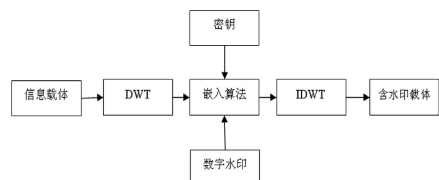


图1 水印嵌入过程

后小波系数的特点,把一幅 $m \times m \times k$  bit ( $k=8 \dots 24$ )的图像作为水印信息嵌入到图像中,其中 $m$ 表示图像的大小, $k$ 表示颜色的深度。图像水印嵌入的位置为载体图像小波变换后的低频子带和高频子带中。

### 4.1.1 低频子带嵌入法

低频子带水印嵌入方法是在原图小波分解后低频子带的系数中嵌入水印。由于低频子带代表图像中平坦的部分,具有较高的感觉容量,嵌入水印的鲁棒性强。该类方法对高频滤波、有损压缩都有较好的抗攻击性。但同时正因为低频分量直接影响着图像的质量,水印嵌入容量过大会直接影响图像的视觉效果。

该嵌入方法基本思想是:对原始图像进行 $n1$ 层小波变换,得到图像小波变换系数细节子图 $p_c^i(x, y)$  ( $c$ 表示分解的层次,  $c=1, 2, \dots$ , 其中 $i=1, 2, 3$ 分别代表水平方向、垂直方向和对角线方向的三个细节子图,下同)和一个逼近子图 $p_3^0(x, y)$ ;对水印图像进行 $n2$ 层小波变换,得到水印的小波变换系数 $w_c^i(x, y)$  ( $i$ 和 $c$ 的意义同上),考虑到图像进行图像压缩的顽健性,水印图像小波变换次数 $n2$ 小于原始图像小波变换次数 $n1$ ,根据相应的策略,把水印图像小波系数矩阵 $w_c^i(x, y)$ 嵌入到某一 $p_c^i(x, y)$ 中。大多算法采用如下嵌入公式<sup>[3]</sup>。

$$p'(x, y) = p(x, y) + \delta \cdot w(x, y) \quad (1)$$

$$p'(x, y) = p(x, y) * (1 + \delta \cdot w(x, y)) \quad (2)$$

其中 $\delta$ 为水印嵌入的强度, $\delta$ 越大,水印的稳健性越好,但水印的可见性越差,反之, $\delta$ 越小,水印的可见性越好,但水印的稳健性越差。对 $p'$ 进行逆小波变换将得到嵌入水印的图像。

### 4.1.2 重复嵌入法

为了提高水印嵌入的稳健性,该方法在低频子带嵌入算法的基础上,采用低频重复嵌入方法来提高水印的稳健性,即:

(1)对大小 $M \times M$ 的原始图像 $X$ 进行 $n$ (一般取 $n=3$ )层小波分解,得到不同分辨率下的细节子图 $p_c^i$ 和一个逼近子图 $p_3^0$ ;

(2)把所有的细节子图分割成互不重叠的子图块,并且使每一子图块的大小与水印的大小相同;

(3)将水印中的数据分别与每一子图块依次进行分块组合,高频部分被反复的嵌入水印,而低频部分只嵌入一次水印,嵌入公式可参考公式(1)和公式(2);

(4)把经过运算的子图块进行重新拼接得完整的小波变换系数,再进行逆小波变换,即可实现水印图像的嵌入。

### 4.1.3 位平面分解嵌入法

该方法在嵌入灰度图像不是像基于低频域方法那样,其主要思想是先把灰度层水印 $W$

(i, j) 分解为 N 个二值位图平面<sup>[4]</sup>, 这些二值图像相当于若干个 0-1 序列, 在根据相关策略把这些 0-1 序列嵌入到原始图像当中, 具体的嵌入方法在下面介绍。

#### 4.2 序列数字水印嵌入方法

序列数字水印技术是把要嵌入水印信息(如作者的姓名、序列号等信息)生成一个固定长度的随机序列, 主要包括 0-1 序列、满足某种分布的随机序列以及二值图像等, 再把该序列嵌入到载体信息当中。

##### 4.2.1 量化算法

该类方法通过修改载体图像的同分辨率层中三个不同方向的细节分量系数的幅度关系, 来嵌入一种二值水印。在其方案中, 水印是二值序列{0, 1}。使用 Daubechies 小波对原始图像进行三级分解。该算法在高频子带中随机选择水印嵌入位置(当然选择系数的个数不少于水印序列的个数, 位置的选择可设置密钥来控制), 每一次在小波分解的每一级的三个高频子带中各选择一个系数, 即  $p_c^i(x, y)$  (c 代表小波分解的第 c 级,  $i=1, 2, 3$  分别表示水平垂直和对角线方向的高频子带)。首先, 将这三个系数按由小到大的顺序排列, 假设  $p_c^1(x, y) \leq p_c^2(x, y) \leq p_c^3(x, y)$ 。然后, 对中间的系数  $p_c^2(x, y)$  进行量化用来代表一个水印信息位  $W_i$ 。量化中,  $p_c^1(x, y)$  到  $p_c^3(x, y)$  的范围被等分为  $2^Q - 1$  份, 即每一份的宽度  $d = (p_c^3(x, y) - p_c^1(x, y)) / (2^Q - 1)$ , 其中 Q 可以自己定义, 用来控制量化步长, Q 越小, 水印越鲁棒, 但同时带来更大的失真。量化公式为:

$$s(t) = p_c^1(x, y) + (t-1) \cdot d \quad (3)$$

当要嵌入信息位“0”时, t 取偶数, 当要嵌入信息位“1”时, t 取奇数, 把  $s(i)$  量化成离  $p_c^2(x, y)$  值, 再  $p_c^2(x, y) = s(i)^{[5]}$ 。

##### 4.2.2 细节分量嵌入算法

小波变换后近似图像系数的分布是很均匀的, 大多数的系数接近于 0, 只有很少一部分对应于图像边缘和纹理信息的系数具有较大的峰值, 含有较明显的能量。如果有水印信息落在这些区域, 那么在进行有损数据压缩时, 这部分水印会丢失。另外在进行低通滤波或受到噪声干扰时, 这些小系数也会受到较大影响。所以在细节分量系数中可靠嵌入水印, 必须选择一些显著系数进行水印嵌入或者对

水印系数进行加权, 以便在显著系数中嵌入更多的能量。水印嵌入强度可以自适应于子带能量, 分解层和子带的方向。在一般的算法当中, 系数的显著性由系数和门限 T 的比较而确定<sup>[2]</sup>:

$$T(c, i) = \max\{|p_c^i(x, y)|\} / 2 \quad (4)$$

该门限值由第 c 分解层、方向为 i 的子带的系数绝对值的最大值决定。另一改进的细节分量水印算法为: 先对待嵌入的原始图像  $f(x, y)$  进行三层小波变换, 得到不同分辨率的细节子图  $p_c^i(x, y)$  和一个逼近子图  $p_0^0(x, y)$ ; 对  $p_3^i(x, y)$  ( $i=1, 2, 3$ ) 子图分割成不重叠的  $4 \times 4$  的子图块, 然后查找大于阈值的子图块, 在该子图块中嵌入水印。

#### 5 数字水印检测技术

水印检测的过程为水印嵌入的逆过程。根据水印检测时需要的信息, 可分为非盲检测、半盲检测和盲水印。非盲检测时需要原始图像的参与来提取水印; 半盲检测时需要一些参考信息; 而盲算法只需要嵌入水印的图像, 因此更加灵活, 但是也更难实现。

##### 5.1 非盲检测算法

非盲水印检测算法通常针对水印为数字图像。水印提取时, 采用嵌入的逆过程, 提取公式为:

$$w = (p' - p) / a \quad (5)$$

$$w = (p' / p - 1) / a \quad (6)$$

其中:  $p'$  待检测图像点,  $p$ : 原始图像点。非盲水印检测的缺点就是在水印检测时需要原图的参与。

##### 5.2 半盲检测算法

半盲水印的检测过程不需要原图, 但需要一些参考信息。一般的自适应水印属于这一类型, 此类算法需要通过阈值来筛选嵌入水印的位置, 往往生成一个定位水印位置的 0-1 矩阵, 1: 代表嵌入, 0: 代表未嵌入; 或产生一个一维序列, 记录嵌入位置的坐标。

##### 5.3 盲检测算法

盲水印检测是水印检测的最高标准, 检测过程不需原图或参考信息, 它灵活, 但算法较复杂, 主要是针对嵌入水印为随机序列的情况, 常将提取水印与嵌入水印进行相关性计算, 结果与阈值做比较, 来检测水印是否存在。先根据嵌入方法从载体中的相关分量中

提取水印信息  $w'$ , 再将  $w'$  和原始的水印信息  $w$  来计算求出他们相关系数, 相关系数的计算主要公式有:

$$\text{sim}(\omega, \omega') = \frac{\omega' \omega}{\|\omega'\|^2} \quad (7)$$

$$\text{sim}(\omega, \omega') = \frac{\sum \omega' \omega}{\sqrt{\sum \omega^2} \sqrt{\sum \omega'^2}} \quad (8)$$

再将相关系数 sim 与阈值 T 进行比较来判断是否嵌入水印。还有一种就是不需提取水印, 他们的相关值计算是通过检测图像与原始水印进行计算, 公式如下:

$$\rho(X', W) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X'_{k,o}(u, v) \omega(i) \quad (9)$$

$X'_{k,o}$  表示 k 层 方向的图像。阈值 T 的确定与虚警概率和漏警概率有关, 减小 T, 漏警概率降低而虚警概率提高, 反之, 增加 T, 虚警概率降低而漏警概率提高。盲检测技术具有非常广泛的应用前景, 但由于阈值往往难以给出, 导致其实现起来难度较大。

#### 6 结语

基于小波变换的数字水印方法具有可选择性高, 安全性强, 良好的空间 - 尺度定位, 且能充分利用 HVS 的特性以及计算简单等特性, 本文对基于小波变换的数字水印算法进行系统全面的分析, 随着基于小波的图像编码技术的飞速发展, 尤其是新一代图像压缩编码标准 JPEG2000 的公布, 这一领域越来越受到关注。

#### 参考文献

- [1] 张晓峰, 等. 基于小波变换的图像水印方法[J]. 计算机工程与应用, 2004(11): 667-671.
- [2] 王炳锡, 等. 数字水印技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [3] 张冉, 等. 一种基于小波变换的灰度数字水印嵌入技术[J]. 通信学报, 2004(2): 125-130.
- [4] 张军, 等. 数字图像的自适应公开水印技术[J]. 计算机学报, 2002(12): 1371-1377.
- [5] 李宗志, 等. 基于图像小波变换的数字水印[J]. 计算机工程, 2004(21): 109-110.

(上接 1 页)

由  $E(|ch(n)|^k) = (2\delta^2)^{\frac{k}{2}} \Gamma(\frac{1}{2}(2+k))$ ,  $k \geq 0$  [9], 可以得到  $E(|ch(n)|^2) = 2\delta^2$ ,  $E(|ch(n)|^4) = 8\delta^4$  和  $E(|ch(n)|^6) = 48\delta^6$ 。

可以定义对信号 u 进行识别的两个参数为

$$m_{20} = \frac{M_{4,2}(u)}{M_{2,1}^2(u)} = 2k_{20} \quad (18)$$

$$m_{30} = \frac{M_{6,3}(u)}{M_{2,1}^3(u)} = 6k_{30} \quad (19)$$

#### 2 仿真结果与分析

只考虑高斯噪声情况, 分别在 0 dB 和 10 dB 的信道环境下, 对单载波信号 BPSK, QPSK, 16QAM 和多载波 OFDM 信号, 采用四

阶高阶累积量进行 50 次蒙特卡罗仿真。其中, OFDM 信号的子载波数为 64, 子载波采用 16QAM 调制。

仿真结果与理论值相符, 具有很高的识别率, 见图 1。

图 1(c) 为信号经过具有 Rayleigh 衰落的信道环境时, 单载波信号呈现在高斯性, 仍然采用高阶累积量的仿真结果, 可以清楚的看到, 此时高阶累积量的识别方法已经失去意义。

此时采用联合高阶矩的方法对经过具有 Rayleigh 衰落的信号进行识别, 信噪比为 10 dB 的信道环境下, 做 50 次蒙特卡罗仿真。从图 1(d) 中可以得到与理论值相符的结果, 本方法有效。

#### 3 结语

本文针对信号在经过 Rayleigh 信道后单

载波信号出现高斯渐进性采用高阶累积量识别算法的不足, 采用了一种更加实用而且有效的混合高阶矩的识别算法, 通过理论分析与仿真验证, 对 OFDM 信号具有很好的监测和识别效果, 具有很高的理论和实用价值。

#### 参考文献

- [1] 吕新正. 利用高阶累积量实现数字调制信号的自动识别[J]. 电子对抗技术, 2004, 6.
- [2] Akmouch W. Detection of multi-carrier modulations using 4th-order cumulants[C]//Proc of IEEE MIL-COM 99. Atlantic City, NJ, USA: IEEE, 1999: 432-436.
- [3] 张贤达. 现代信号处理[M]2版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 282.