

## 图像高逼真度的自适应盲水印算法<sup>1</sup>

王 沛 余松煜

(上海交通大学图像通信与信息处理研究所 上海 200030)

**摘 要** 随着计算机和网络技术的飞速发展,数字图像、音频和视频产品越来越需要一种有效的版权保护方法,所谓数字水印就是一种嵌入到图像、视频或音频数据中的不可见标志,可以用于多媒体数据的版权保护、认证和标注等。该文提出了一个有效的自适应盲水印算法,在水印检测过程中不需要原始图像,原始图像经小波变换后,选择内嵌水印所需要的子带,水印根据邻居特征平均值法和奇偶判决法内嵌到频域中所选择的子带上。实验结论和攻击测试表明,该文所提议的算法能得到高逼真度的加水印图像,对如 JPEG 有损压缩、中值滤波、附加噪声、伸缩、裁剪等各种图像处理的攻击有较强的稳健性。

**关键词** 数字水印,小波变换,邻居特征平均值,奇偶判决法  
**中图分类号** TN911.73

### 1 引 言

数字水印是一种嵌入到图像、视频或音频数据中的不可见标志,可以用于多媒体数据的版权保护、认证和标注等,水印技术在知识产权保护上的重要特性是不可见并且稳健的。近几年基于离散小波变换(DWT)的水印技术在水印研究者中引起强烈兴趣,并被过去几年所提出的算法数目以及方法数量所证实。

很多基于 DWT 的水印算法直接从大多数常用的基于 DWT 的压缩算法得到启发,这些方法的主要思想是将水印隐藏在子带的有意义大系数上<sup>[1-3]</sup>,既保证了水印的不可见性,又能尽可能地增大水印强度来抵抗压缩等攻击,这其中最有代表性的是 C. I. Podichuk 等提出的利用视觉模型来判断水印加在图像上的位置及可加水印强度的上限<sup>[4]</sup>。基于小波的水印技术近年来虽然发展比较快,但离实际应用尚有一段距离,有很多实际问题尚有待解决。

(1) 首先是无法很好地协调水印透明性和稳健性之间的矛盾。减小图像中内嵌的水印强度,可以保证水印的不可见性,提高加水印图像的逼真度,但水印却容易被攻击破坏;增强图像中内嵌的水印强度,能增强水印对攻击和图像处理的免疫力,但将导致一个相对于原始图像有较低逼真度的加水印图像,图像质量下降。加水印的目的是为了保护图像的知识产权,同时也要保护图像,水印信号对于图像来说,其实是附加了噪声,所以应在保证图像高质量精度的前提下,同时提高水印的稳健性,以得到图像信息损失最小的高逼真度的加水印图像。

(2) 其次是不易实现盲水印。迄今为止,大部分基于 DWT 的水印算法在检测水印时,都需要将加水印后的图像与原始图像进行比较以提取水印,不能与水印在网络和数字图书馆上的自动验证结合起来,所以盲水印算法,即不需要原始图像数据进行水印检测的水印算法,已成为水印研究的重要关注点之一。

(3) 对几何攻击稳健性差。基于 DWT 的水印算法对裁剪、图像缩放、平移等几何攻击抵抗能力有限,很多算法在一些简单的攻击下就难以生存。

本文提出了一种图像的高逼真度、自适应盲水印算法,水印用提出的相邻特征平均值和奇偶判决法在图像的小波域上内嵌水印,并能对系数修改量适度微调。该算法有以下优点:(1) 内嵌水印强度不大,水印透明性好,图像信息损失小,能得到高逼真度的加水印图像;(2) 在保证图像质量的前提下,同时也提高了水印的稳健性,水印对不同攻击如 JPEG 有损压缩、附加噪声、灰阶调整等各种图像处理稳健性好;(3) 实现了盲水印,在水印检测过程中算法简单、不

<sup>1</sup> 2002-05-24 收到, 2002-12-04 改回

需要原始图像数据；(4) 提高了水印在图像缩放、裁剪等几何攻击下的生存能力；(5) 该算法自适应于图像特征，不论在纹理、边缘丰富的区域还是大面积光滑区域，水印的稳健性都很好。

## 2 主要研究内容

数字水印方法一般包括水印内嵌处理过程和水印提取过程。

### 2.1 水印内嵌处理

图 1 显示了本文整个水印内嵌处理的基本步骤，其中加阴影的系数即表示内嵌水印的系数。原始图像经过小波变换后，选择所需要的子带，用相邻特征平均值算法，根据所需要嵌入的水印值的不同，在子带的系数上进行不同修改，将产生的水印信号嵌入到图像中。

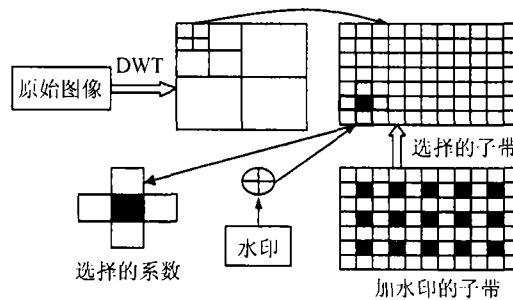


图 1 水印内嵌处理的基本步骤

内嵌步骤：

#### (1) 原始图像的小波分解和加水印子带的选择

小波变换是构建一个分级的子带系统，它具有多分辨率特性和分级结构，以及没有 DCT 的方块效应等优点。原始图像进行  $L$  阶离散小波变换后，产生一个低频子带 LL 和相应于每级分解阶上的水平、垂直和斜向方向上的细节子带序列  $LH_i, HL_i, HH_i (i = 1, 2, \dots, L)$ 。

因为本文水印算法的特点是检测时需要利用小波系数之间的相关性，而不同子带的系数之间相关性较小，所以决定选择同一分解阶的同一个子带上的系数内嵌水印。LL 低频子带因为包含图像的重要信息不适合内嵌水印，否则会带来图像的质量退化，容易被人眼感知。在低阶子带上内嵌水印虽然会带来知觉上的低可见性，却不可避免地易受类似低通和中值滤波的攻击。所以决定将图像进行 3 阶分解，水印内嵌位置选择为第 3 阶子带中的一个，即  $LH_3$  子带、 $HL_3$  子带和  $HH_3$  子带之一。

原始图像用 DWT 作 3 阶分解，选择  $LH_3$  子带， $HL_3$  子带和  $HH_3$  子带其中之一来内嵌水印，具体选择方法如下：

分别计算  $LH_3$  子带， $HL_3$  子带和  $HH_3$  子带的方差  $\text{Var}_{LH_3}$ ， $\text{Var}_{HL_3}$  和  $\text{Var}_{HH_3}$ ，所选择的子带  $I$  为其中具有较大方差的子带，因为子带的方差越大，表示其中的边缘纹理分量就越丰富，适合隐藏信息，不易被感知，即

$$I = \begin{cases} LH_3, & \text{Var}_{LH_3} = \max(\text{Var}_{LH_3}, \text{Var}_{HL_3}, \text{Var}_{HH_3}) \\ HL_3, & \text{Var}_{HL_3} = \max(\text{Var}_{LH_3}, \text{Var}_{HL_3}, \text{Var}_{HH_3}) \\ HH_3, & \text{Var}_{HH_3} = \max(\text{Var}_{LH_3}, \text{Var}_{HL_3}, \text{Var}_{HH_3}) \end{cases} \quad (1)$$

#### (2) 水印的产生

通常所用的水印信号是伪随机序列信号，为了保证水印信号的唯一性，在产生随机信号时，

一般将作者信息或设定的密钥作为随机信号的参数来使用, 即作为“种子”来产生一个伪随机序列信号, 这个伪随机序列信号就唯一取决于作者, 攻击者无法伪造水印信息。

以设定的密钥为“种子”产生伪随机序列  $W$ , 设定其长度和所选择的图像小波分解后的子带相关, 为让这个任意数目适合所选择的  $I$  子带的尺寸, 伪随机序列长度  $W_L$  被设定为  $I$  子带上系数数目  $S_I$  的  $1/4$ , 即

$$W_L = S_I/4 \quad (2)$$

### (3) 邻居特征平均值的计算

计算选择系数的邻居特征平均值。首先将此子带上所有系数加上一个  $f$ , 使所有系数都变成正数。计算  $f$  的具体公式如下:

$$f = \text{Var}_I \cdot \alpha / (M \cdot N) \quad (3)$$

$\text{Var}_I$  是所选择子带的方差,  $M$  和  $N$  是所选择子带系数的行和列尺寸,  $\alpha$  是加权因子。

然后假如我们以  $x_{i,j}$  表示此时子带上水印内嵌位置系数的值, 选择其 4 个相邻系数<sup>[5]</sup> 计算邻居特征平均值, 为避免水印位置的交叠, 相当于在子带系数上隔行、隔点内嵌水印, 如图 1 所示。而边界的处理是对边界系数进行对称循环扩展。系数  $x_{i,j}$  的邻居特征平均值是  $m_{i,j}$ ,  $m_{i,j}$  用如下公式计算:

$$m_{i,j} = \text{mean}(x_{i-1,j}, x_{i,j-1}, x_{i,j+1}, x_{i+1,j}) \quad (4)$$

### (4) 奇偶判决法内嵌水印

奇偶判决法的思想就是根据水印值的不同, 将小波系数分别量化为其标志所对应的、最相邻的奇区间或偶区间中的值。在所选择的系数上内嵌水印的具体方法如下:

(a) 计算标志  $k_{i,j}$  和  $r_{i,j}$ ,

$$k_{i,j} = \text{round} \left[ \frac{x_{i,j}}{g \cdot m_{i,j}} \right] \quad (5)$$

$$r_{i,j} = \text{mod}(k_{i,j}, 2) \quad (6)$$

(b) 按下列公式修改系数来加水印

首先设立一个阈值  $T_s$ ,  $T_s = \beta \cdot g \cdot m_{i,j}$ , 其中  $\beta$  是一个加权因子, 同时定义  $e = x_{i,j} - g \cdot k_{i,j} \cdot m_{i,j}$ 。

当 ( $W = 1$  且  $r = 1$ ) 或者 ( $W = 0$  且  $r = 0$ ) 时,

$$x'_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j}, & |x_{i,j} - g \cdot k_{i,j} \cdot m_{i,j}| \leq T_s \\ (k_{i,j} - c_f) \cdot g \cdot m_{i,j}, & |x_{i,j} - g \cdot k_{i,j} \cdot m_{i,j}| > T_s \text{ and } e \leq 0 \\ (k_{i,j} + c_f) \cdot g \cdot m_{i,j}, & |x_{i,j} - g \cdot k_{i,j} \cdot m_{i,j}| > T_s \text{ and } e > 0 \end{cases} \quad (7)$$

当 ( $W = 1$  且  $r = 0$ ) 或者 ( $W = 0$  且  $r = 1$ ) 时,

$$x'_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j}, & |x_{i,j} - (k_{i,j} - 1) \cdot g \cdot m_{i,j}| \leq T_s \text{ and } e \leq 0 \\ (k_{i,j} - 1 + c_f) \cdot g \cdot m_{i,j}, & |x_{i,j} - (k_{i,j} - 1) \cdot g \cdot m_{i,j}| > T_s \text{ and } e \leq 0 \\ x_{i,j}, & |x_{i,j} - (k_{i,j} + 1) \cdot g \cdot m_{i,j}| \leq T_s \text{ and } e > 0 \\ (k_{i,j} + 1 - c_f) \cdot g \cdot m_{i,j}, & |x_{i,j} - (k_{i,j} + 1) \cdot g \cdot m_{i,j}| > T_s \text{ and } e > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$c_f$  是微调因子, 其取值范围为  $0 < c_f < 0.5$ 。

(5) 得到加水印图像

再将此子带上所有系数减去  $f$ ，然后进行逆离散小波变换 (IDWT)，产生加水印图像。产生水印随机序列信号的“种子”、加权因子  $\alpha, g$  和选择加水印的子带  $I$  作为密钥，在水印检测时用到。

## 2.2 水印提取处理

水印检测是水印内嵌的逆步骤，在检测处理中，加水印图像首先进行小波变换，在已知所选择的子带上仍然用相邻特征平均值算法和奇偶判决法来提取水印，整个水印提取过程不需要原始图像数据。提取步骤如下：

(1) 加水印图像的分解

加水印图像进行 3 级 DWT。

(2) 产生原始水印

通过用水印检测步骤中相同的“种子”制造和在水印内嵌步骤中产生的相同的伪随机数日序列，即原始水印  $W$ 。仅有版权持有者才知道这把钥匙来确认版权。

(3) 奇偶判决法提取水印

用水印内嵌步骤 (3) 和步骤 (4) 所描述的步骤来产生标志  $\hat{r}_{i,j}$ ，然后依据以下公式来提取水印：

$$\hat{W} = \begin{cases} 1, & \hat{r}_{i,j} = 1 \\ 0, & \hat{r}_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

(4) 最后用相似函数来测试原始水印数据  $W$  和提出的水印数据  $\hat{W}$  之间的相似性，完成水印测试：

$$\text{sim}(W, \hat{W}) = \frac{\sum_{n=1}^{W_L} W(n) \cdot \hat{W}(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{W_L} W^2(n)} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{W_L} \hat{W}^2(n)}} \quad (10)$$

$\text{sim}(W, \hat{W})$  说明原始水印与提出水印的相似度， $T$  为判断图像中是否有水印的阈值，即若  $\text{sim}(W, \hat{W}) > T$ ，就能判定被测试图像中有水印  $W$  存在。

## 3 实验数据和性能分析

我们使用 Lena(512 × 512 × 8bit) 图像作为测试图像，如图 2，小波变换参数为 Daubechies 9/7 滤波器，小波分解为 3 阶，取  $\alpha = 1, \beta = 0.08, g = 0.02, c_f = 0.1$ 。采用长度为 1024 的伪随机信号序列作为水印信号，当  $T$  取 0.2 时，判断水印信号存在的错检率小于  $10^{-9}$ ，所以将  $T$  设定为 0.2。加上水印后的图像如图 3，内嵌水印后的图像，PSNR=51.3075dB，PSNR 值和主观视觉效果都证实了应用所提议的方案实现的水印的不可感知性以及加水印图像的高逼真度性。

将加水印图像针对容易遇到的攻击进行水印检测响应的相似度测试，图 4 是 JPEG 有损压缩的攻击下的提取水印的检测响应曲线图，其中 JPEG 压缩比为 30:1 时，仍然能检测出水印信号。表 1 是加水印图像在几种常见的图像处理攻击下，提取水印的检测响应测试数据，攻击分别为中值滤波；附加高斯噪声；维纳滤波；16 阶灰阶均衡器，即将 256 阶灰度图像转换为 16 阶灰度图像；图像尺寸缩小为 256 × 256；图像尺寸放大为 1024 × 1024；底片处理；裁剪，裁剪后的图像如图 5 所示。



图 2 原始图像



图 3 加水印图像

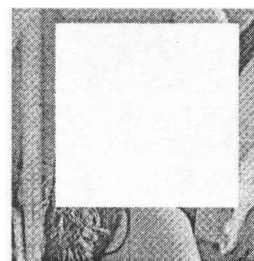


图 5 裁剪图像

由试验结果的图表可看出, 加水印图像的 PSNR 值很高, 水印隐藏效果好, 达到了加水印图像高逼真度的要求, 在所加水印强度不大的情况下, 面临如 JPEG 有损压缩、附加噪声、灰阶调整等各种攻击, 水印稳健性好, 水印在图像缩放、裁剪等几何攻击下的稳健性得到改善, 即使受到攻击的水印图像 PSNR 值低到 10dB 左右, 水印仍然能很好地生存, 足以证明本文所提出的算法是一个有效的图像高逼真度的盲水印算法。

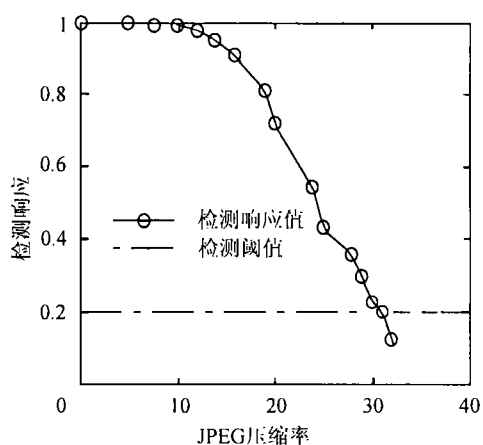


图 4 JPEG 有损压缩的检测响应曲线图

表 1 在不同攻击类型下的提取水印的检测响应, 受攻击水印图像的 PSNR 值

攻击类型	检测响应	PSNR 值
无攻击	1	51.3075
中值滤波 (5×5)	0.5879	32.0019
高斯噪声 (偏差 0.001, 均值 0)	0.6132	29.9639
维纳滤波 (6×6)	0.2852	33.2965
16 阶灰阶均衡	0.9981	32.2272
缩小到 256×256	0.4863	29.3446
放大到 1024×1024	0.5820	31.0537
底片处理	0.8770	9.9631
裁剪	0.3594	9.0467

## 4 结 论

本文提出的自适应盲水印算法, 在得到高逼真度的水印图像前提下, 对各种攻击及大多数图像处理技术稳健性好, 同时也改善了水印对几何攻击的抵抗力, 而且算法对图像特征的自适应性好, 能应用在各种图像上, 在水印检测过程中不需要原始图像, 尤其是检测过程的计算十分容易, 是一个易于推向实用的水印算法。

## 参 考 文 献

- [1] X. Xia, C. G. Bonchelet, G. R. Arce, A multiresolution watermark for digital images, Proc. 4th IEEE Int. Conf. Image Processing'97, Santa Barbara, CA, 1997, 548-551.
- [2] I. J Cox, *et al.*, Secure spread spectrum watermarking for multimedia, IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 12(6), 1673-1687.
- [3] R. Dugad, K. Ratakonda, N. Ahuja, A new wavelet-based scheme for watermarking image, 1998 International Conference on Image Processing, Chicago, USA, 1998, vol 2, 419-423.
- [4] C. I. Podilchuk, W. Zeng, Image-adaptive watermarking using visual models, IEEE J. on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4), 525-539.
- [5] Ikpyo Hong, *et al.*, A blind watermarking technique using wavelet transform, Industrial Electronics, 2001, Proceedings, ISIE 2001, IEEE International Symposium, Pusan, Korea, 2001, vol 3, 1946-1950.

A BLIND ADAPTIVE WATERMARKING ALGORITHM FOR  
HIGH FIDELITY OF IMAGE

Wang Pei Yu Songyu

*(Inst. of Image Comm. & Info. Proces., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)*

**Abstract** A digital watermark is an invisible mark embedded in digital images, video or audio documents, which may be used for a number of different purposes including copyright protection, authentication and captioning. In this paper, an effective adaptive watermarking algorithm for still images is proposed. This is a blind watermarking which can confirm the copyright without original image. The original image is transformed using wavelet transform and the watermark is embedded in selected subband of frequency domain according to neighboring symbol's mean value and odd-even adjugement rule. Experimental results and attack analysis show that the watermark algorithm proposed in this paper can produce the watermarked image which has high fidelity and is robust against some image processing operations, such as JPEG lossy compression, median filtering, additive noise, scaling, and cropping attacks.

**Key words** Digital watermark, Wavelet transform, Neighboring symbol's mean value, Odd-even adjugement rule

王 沛: 女, 1970 年生, 博士后, 研究兴趣为数字水印、图像压缩等.

余松煜: 男, 1941 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为视频通信、图像处理等.