

图像高逼真度的盲水印算法

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: 提出了一种改进的图像高逼真度盲水印算法, 用相邻特征平均值和奇偶判决法在图像小波域的 3 阶子带上内嵌水印的同时, 利用 2 阶子带的频率特性, 来增加或减少 3 阶子带的水印强度, 在水印检测过程中不需要原始图像。实验结论和攻击测试表明, 本文所提出的算法从 PSNR 值的提高和主观视觉效果上都证明了能得到高逼真度的加水印图像, 并改善了对如 JPEG 有损压缩、中值滤波、附加噪声等各种图像处理攻击的稳健性。

关键词: 数字水印; 小波变换; 邻居特征平均值; 奇偶判决法; 高逼真度;

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

1 引言

随着多媒体技术和网络技术的飞速发展和广泛应用, 通过网络获取、交换和传输图像、音频、视频等多媒体内容变得异常容易, 多媒体数据的保护成为迫切需要的课题^[1]。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。近几年基于小波变换(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, 这其中最有代表性的是 Podichuk I 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^[2]。基于小波变换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, 其中盲水印问题最引人关注。盲水印算法, 就是在水印检测过程中不需要原始图像数据的水印算法。而迄今为止, 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^[3-4]。

如果可以利用原始图像数据进行水印检测, 水印的恢复常常具有非常稳健的性质, 而且在有原始数据的情况下, 水印恢复过程允许检测或跟踪数据的变化, 尤其是几何变化, 这将有助于水印的检测。但是在某些如数据检测和跟踪的场合, 无法得到原始数据, 对另外一些应用, 如水印在网络和数字图书馆上的自动验证以及视频水印, 因为信号的数据量太大, 使用原始数据是不现实的。所以, 有必要设计不需要原始图像数据的水印检测和恢复方案。

现在盲水印已成为水印研究的新热点之一, 已提出一些基于 DWT 的盲水印算法。但是由于水印检测必须脱离原始图像数据局限了水印内嵌算法, 这些算法的稳健性受到了影响。而且盲水印的要求更加大了基于 DWT 的水印算法抵抗几何攻击如裁剪、图像缩放、平移等的难度, 很多算法在一些简单的攻击下就难以生存。而且为达到盲水印的要求, 许多算法检测时计算极其复杂, 计算量很大, 影响了实用。

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。所以增强图像中内嵌的水印强度, 虽然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; 可是减小图像中内嵌的

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。所以应在保证图像高质量的前提下,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。在提高图像逼真度的同时也提高水印的稳健性,也是水印算法推向实际应用所要解决的问题。

本文提出了一种改进的图像高逼真度的盲水印算法,用相邻特征平均值和奇偶判决法^[5]在图像小波域的 3 阶子带上内嵌水印的同时,利用 2 阶子带的频率特性,来增加或减少 3 阶子带的水印强度。该算法有以下优点: 1) 内嵌水印强度的调整进一步保证了水印的透明性,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,内嵌水印强度的调整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、滤波等各种图像处理稳健性得到增强; 3) 实现了盲水印,在水印检测过程中保持了计算简单的优点; 4) 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 显示了整个水印内嵌处理的基本步骤,原始图像经过小波变换后,选择所需要的子带和系数,利用 2 阶子带的频率特性,来将 3 阶子带系数分类为光滑系数和纹理系数以便分别内嵌不同强度的水印,水印用相邻特征平均值和奇偶判决法内嵌在 3 阶子带上,既保证了含水印图像的逼真度,又进一步提高了水印的稳健性。

内嵌步骤:

1) 原始图像的小波变换和加水印子带的选择

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 LL 低频子带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。而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。

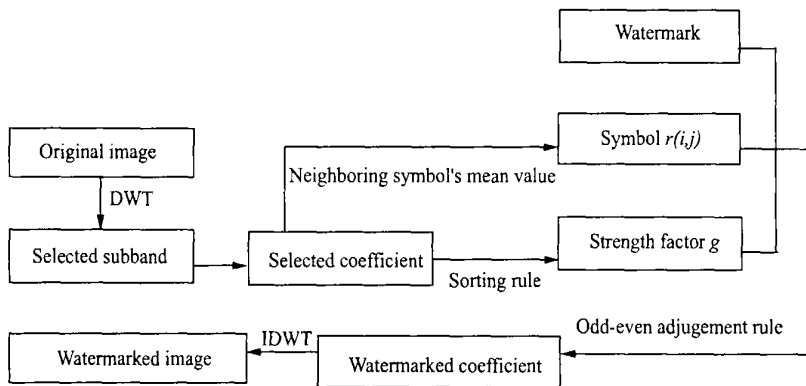


图 1 水印内嵌处理的基本步骤

Fig. 1 Watermark embedding procedure.

加水印子带的具体选择方法如下: 分别计算 LH_3 子带、 HL_3 子带和 HH_3 子带的方差 Var_{LH_3} 、 Var_{HL_3} 和 Var_{HH_3} , 所选择的子带 I_3 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

$$I_3 = \begin{cases} LH_3, Var_{LH_3} = \max(Var_{LH_3}, Var_{HL_3}, Var_{HH_3}) \\ HL_3, Var_{HL_3} = \max(Var_{LH_3}, Var_{HL_3}, Var_{HH_3}) \\ HH_3, Var_{HH_3} = \max(Var_{LH_3}, Var_{HL_3}, Var_{HH_3}) \end{cases}, \quad (1)$$

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或密钥, 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_3 子带上系数数目 S_{I_3} 的 $1/4$, 即

$$W_L = \frac{S_{I_3}}{4}, \quad (2)$$

3) 相邻特征平均值的计算

计算选择系数的相邻特征平均值。首先将 I_3 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:

$$f = \frac{Var_{I_3}}{M \cdot N} \cdot \alpha, \quad (3)$$

Var_{I_3} 是所选择子带 I_3 的方差, M 和 N 是 I_3 子带上系数的行和列尺寸, α 是加权因子。

为了更多地利用相邻系数之间的相关性, 选择所有 8 个相邻系数计算相邻特征平均值, 假如以 $x_3(i, j)$ 表示此时子带 I_3 上水印内嵌位置系数的值, 其相邻的邻居系数有 8 个, 分别是 $x_3(i-1, j-1)$, $x_3(i-1, j)$, $x_3(i-1, j+1)$, $x_3(i, j-1)$, $x_3(i, j+1)$, $x_3(i+1, j-1)$, $x_3(i+1, j)$, $x_3(i+1, j+1)$ 。为避免水印位置的交迭, 相当于在子带系数上隔行、隔点内嵌水印, 而边界的处理是对边界系数进行对称循环扩展。系数 $x_3(i, j)$ 的相邻特征平均值是 $m_3(i, j)$, $m_3(i, j)$ 用如下公式计算:

$$m_3(i, j) = \text{mean}[x_3(i-1, j-1), x_3(i-1, j), x_3(i-1, j+1), x_3(i, j-1), x_3(i, j+1), x_3(i+1, j-1), x_3(i+1, j), x_3(i+1, j+1)], \quad (4)$$

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, 将小波系数分别修改为其标志所对应的、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:

①将子带 I_3 上所选择的系数根据分类阈值 T_s 进行分类

利用 2 阶子带的频率特性, 对 3 阶子带的系数进行分类, 将系数分为纹理系数和光滑系数, 在纹理系数上内嵌较大强度的水印, 可以增强水印的稳健性; 在光滑系数上内嵌较小强度水印, 保证水印的透明性和加水印图像的高逼真度。这样充分利用了相邻子带的相关性, 又改善了水印的透明性和稳健性。

首先计算所选择的子带 I_3 的相应第 2 阶子带 I_2 上的所有系数绝对值的平均值 m_{I_2} , I_3 与 I_2 的对应关系是 LH_3 子带对应 LH_2 子带, HL_3 子带对应 HL_2 子带, HH_3 子带对应 HH_2 子带。因为 I_3 与 I_2 子带分别是图像同一方向的纹理和边缘信息的不同尺度、不同分辨率下的描述, 所以它们系数的相关性很强。

$$m_{I_2} = \frac{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L |x_2(i, j)|}{K \cdot L}, \quad (5)$$

其中 K 和 L 是 I_2 子带上系数的行和列尺寸。接着计算子带 I_3 上系数 $x_3(i, j)$ 在子带 I_2 上的对应点绝对值的平均值 $m_2(i, j)$, 而 $x_3(i, j)$ 在其相应的 I_2 子带上的对应点为 $x_2(2i-1, 2j-1)$, $x_2(2i-1, 2j)$, $x_2(2i, 2j-1)$, $x_2(2i, 2j)$, 即 $m_2(i, j)$ 如下计算。

$$m_2(i, j) = \text{mean}(|x_2(2i-1, 2j-1)|, |x_2(2i-1, 2j)|, |x_2(2i, 2j-1)|, |x_2(2i, 2j)|), \quad (6)$$

设立分类阈值 $T_s = 1.5 m_{I_2}$, 根据子带 I_2 上的分类阈值 T_s 来将 $x_3(i, j)$ 进行分类。

$$\begin{cases} g = g_s, & \text{if } m_2(i, j) < T_s \\ g = g_L, & \text{if } m_2(i, j) \geq T_s, \end{cases} \quad (7)$$

即当 $x_3(i, j)$ 在子带 I_2 上的对应点的 $m_2(i, j)$ 小于分类阈值 T_s , 就认为系数 $x_3(i, j)$ 是光滑系数, 则降低水印内嵌强度, 用小的加权值 g_s , 反之, 就认为系数 $x_3(i, j)$ 是纹理系数, 则加大水印内嵌强度, 用大的加权值 g_L 。

②计算标志 $k_3(i, j)$ 和 $r_3(i, j)$

$$k_3(i, j) = \text{round}\left(\frac{x_3(i, j)}{g \cdot m_3(i, j)}\right), \quad (8)$$

$$r_3(i, j) = \text{mod}(k_3(i, j), 2), \quad (9)$$

③按下列公式修改系数来加水印

首先设立一个修改阈值 T_D , $T_D = \beta \cdot g \cdot m_3(i, j)$, 其中 β 是一个加权因子, 同时为了表述

$$x'_3(i, j) = \begin{cases} x_3(i, j) & \text{if } (|x_3(i, j) - g \cdot k_3(i, j) \cdot m_3(i, j)| \leq T_D) \\ (k_3(i, j) - cf) \cdot g \cdot m_3(i, j) & \text{if } (|x_3(i, j) - g \cdot k_3(i, j) \cdot m_3(i, j)| > T_D) \text{ and } (e \leq 0) \\ (k_3(i, j) + cf) \cdot g \cdot m_3(i, j) & \text{if } (|x_3(i, j) - g \cdot k_3(i, j) \cdot m_3(i, j)| > T_D) \text{ and } (e > 0), \end{cases} \quad (10)$$

当 $[(W = 1) \text{ 且 } (r_3(i, j) = 0)]$ 或者 $[(W = 0) \text{ 且 } (r_3(i, j) = 1)]$ 时,

$$x'_3(i, j) = \begin{cases} x_3(i, j) & \text{if } (|x_3(i, j) - (k_3(i, j) - 1) \cdot g \cdot m_3(i, j)| \leq T_D) \text{ and } (e \leq 0) \\ (k_3(i, j) - 1 + cf) \cdot g \cdot m_3(i, j) & \text{if } (|x_3(i, j) - (k_3(i, j) - 1) \cdot g \cdot m_3(i, j)| > T_D) \text{ and } (e \leq 0) \\ x_3(i, j) & \text{if } (|x_3(i, j) - (k_3(i, j) + 1) \cdot g \cdot m_3(i, j)| \leq T_D) \text{ and } (e > 0) \\ (k_3(i, j) + 1 - cf) \cdot g \cdot m_3(i, j) & \text{if } (|x_3(i, j) - (k_3(i, j) + 1) \cdot g \cdot m_3(i, j)| > T_D) \text{ and } (e > 0), \end{cases} \quad (11)$$

cf 是微调系数, 其取值范围为 $0 < cf < 0.5$ 。

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 α 、 g_s 、 g_L 和选择加水印的子带 I_3 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

1) 加水印图像的分解

加水印图像进行 3 级小波变换。

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目序列, 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) 计算选择系数的相邻特征平均值

依据水印内嵌步骤 3 所描述的步骤来计算选择系数的相邻特征平均值。

4) 对所选择子带上的系数进行分类

用水印内嵌步骤 4 中的(1)小节所描述的步骤来对所选择子带上的系数进行分类, 判断系数的水印内嵌强度。

5) 奇偶判决法提取水印

方便, 定义 $e = x_3(i, j) - g \cdot k_3(i, j) \cdot m_3(i, j)$ 。

当 $[(W = 1) \text{ 且 } (r_3(i, j) = 1)]$ 或者 $[(W = 0) \text{ 且 } (r_3(i, j) = 0)]$ 时,

用水印内嵌步骤 4 中的(2)小节所描述的步骤来产生标志 $\hat{r}_3(i, j)$, 然后依据以下公式来提取水印。

$$W = \begin{cases} 1 & \hat{r}_3(i, j) = 1 \\ 0 & \hat{r}_3(i, j) = 0, \end{cases} \quad (12)$$

6) 最后对于水印检测, 要计算原始水印数据 W 和提取的水印数据 \hat{W} 之间的相关性, 完成水印测试, 相关计算公式如下:

$$\text{sim}(W, \hat{W}) = \frac{\sum_{n=1}^{W_L} W(n) \cdot \hat{W}_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{W_L} W^2(n) \cdot \sum_{n=1}^{W_L} \hat{W}_n^2}}, \quad (13)$$

此相关值和一个阈值相比较以决定水印是否存在, 理论上一般设置一个优化阈值使丢失水印目标的概率降到一个给定的错误检测率(Neyman-Pearson 标准)下, 即 $\text{sim}(W, \hat{W})$ 说明原始水印与提取水印的相似性, 设置 T 为判断图像中是否有水印的检测阈值, 一般取 $T = 0.2$, 当 $\text{sim}(W, \hat{W}) > T$ 时, 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

使用 LENA(512×512×8bits) 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 $\alpha = 1$, $\beta = 0.08$, $g_s = 0.02$, $g_L = 0.03$, $cf = 0.1$ 。采用长度为 1024 的伪随机信号序列作为水印信号, 当检测阈值 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= 49.0140dB, 和文献 [5] 相比, PSNR 值的提高和主观视觉效果都证实了应用所提出的方案提高了水印的透明性以及加水印图像的高逼真度。



图 2 原始图像

Fig. 2 Original image.



图 3 加水印图像

Fig. 3 Watermarked image.



图 4 裁剪图像

Fig. 4 Cropped image.

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 5 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 32:1 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, 攻击类型分别为中值滤波; 附加高斯噪声; 维纳滤波; 16 阶灰阶均衡器; 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 4 所示。

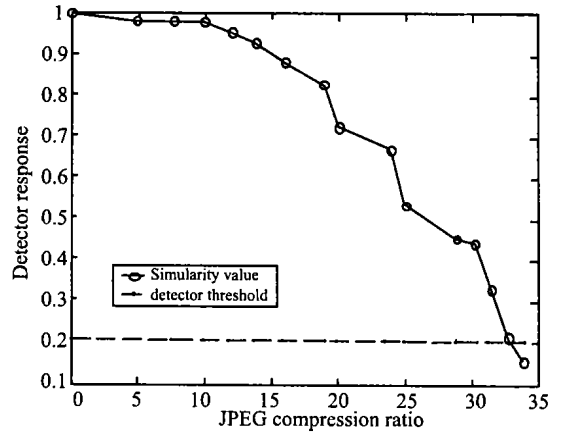


图 5 JPEG 有损压缩的检测响应曲线图

Fig. 5 Plot of the detector response corresponding to JPEG lossy compression ratio.

表 1 在不同攻击下的提取水印的检测响应, 水印图像的 PSNR 值

Table 1 The detector response of extracted watermarks, PSNR values of watermarked image after various attacks

Attack types	Detector response	PSNR values
No attack	1	49.0140
Median filter(5×5)	0.8926	35.7717
Gaussian noise(variation 0.001, mean value 0)	0.6089	29.9640
Wiener filter(6×6)	0.8643	34.796
16 gray level equalizer	0.8643	34.796
Scale down to 256×256	0.3594	27.2272
Scale up to 1024×1024	0.6875	30.8279
Negative operate	0.3652	9.6603
Cropping	0.6709	11.1734

由图表可看出, 水印面临如 JPEG 有损压缩、附加噪声、滤波等各种攻击时, 和文献 [5] 相比, 水印稳健性得到明显的提高, 在图像缩放、裁剪等几何攻击下水印仍保持一定的稳健性, 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改进算法的有效性。

4 结论

本文提出了自适应盲水印算法进一步的改

进, 利用 2 阶子带的频率特性, 来增加或减少 3 阶子带的水印强度, 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得到改善, 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] 杨洪波. 网上档案信息的安全及保密技术[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(6): 591_594.
- [2] Podilchuk C I, Zeng W. Image adaptive watermarking using visual models [J]. *IEEE Journal on Special Areas in Communications*, 1998, 16(4): 525_539.
- [3] Hsu C T. Multiresolution watermarking for digital images [J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, 1998, 45: 1097_1101.
- [4] Xia X. A multiresolution watermarking for digital images [A]. in *Proc. 4th IEEE Int. Conf. Image Processing '97, Santa Barbara* [C]. CA, 1997: 548_551.
- [5] 王沛. 基于小波变换的图像自适应盲水印算法[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 247_252.

Blind watermarking algorithm for high fidelity of image

WANG Pei, YU Song_yu

(*Institute of Image Communications and Information Processing,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 20030, China*)

Abstract: This paper proposes an improved watermarking algorithm for high fidelity of image. While the watermark is embedded in the third level subband of wavelet domain according to neighboring symbol's mean value and odd_even judgement rule, the watermark embedding strength of the third level subband can be increased or decreased according to frequency characteristics of the second level subband. This is a blind watermarking which can confirm the copyright without the original image. Experimental results and attack analyses show that the watermark algorithm can produce the watermarked image which has high fidelity and is robust against some image processing operations, such as JPEG lossy compression, filtering and additive noise attacks.

Key words: digital watermark; wavelet transform; neighboring symbol's mean value; odd_even judgement rule; high fidelity

作者简介: 王 沛(1970_), 女, 四川省泸州市人, 2000 年博士毕业于中国科学院长春光机所, 现为上海交通大学图像通信与信息处理研究所博士后, 从事图像通信与信息处理工作。