

文章编号 1004-924X(2006)06-1057-06

结合图像空间域和小波域特性的自适应盲水印算法

王 沛,姚 恒,李 莉

(上海师范大学 数理信息学院,上海 200234)

摘要:本文针对传统的基于人类视觉系统(HSV)特性的空间域与变换域结合算法的不足,提出了一种有效的自适应盲水印新算法。通过利用图像的局部纹理特性产生伪随机码与水印序列组成扩频水印来增强水印的抗干扰能力。利用密钥产生一串伪随机数控制水印嵌入位置来增强水印的保密性。水印嵌入过程中使用了改进的量化水印算法。通过计算相邻特征平均值来自适应调整待量化小波系数的量化间隔,大大提升了水印系统的逼真度。根据奇偶判决法来实现盲检测。经实验表明水印是不可察觉的,算法对于遭受 JPEG、均值滤波、维纳滤波等手段攻击后提取出的水印仍与原始水印具有 0.85 以上的相似度,具有很好的鲁棒性。

关键词:数字水印;扩频水印;相邻特征平均值;奇偶判决

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

A adaptive digital watermarking algorithm combining spatial and DWT domain

WANG Pei, YAO Heng, LI Li

(Mathematics and Sciences College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: A novel effective adaptive digital watermarking algorithm was proposed without using the traditional method of combining spatial and DWT domain based on the features of human visual system (HVS). The loaded image was divided into several blocks and calculated their variances. A pseudo random sequence was produced after comparing these variances with the variance of the whole loaded image. Then a spread spectrum watermark sequence was created after combining original watermark and pseudo random sequence, and the robustness was accordingly enhanced by utilizing the spread spectrum codes. The loaded image was decomposed by DWT (Discrete Wavelet Transform) into 2-level sub-band images. The watermark sequence was embedded into the high-frequency coefficients of the loaded image. An innovative quantization method was proposed. To improve the security of the watermark system, the cryptography technology was used in the embedding procedure. A long periodic pseudo random m-sequence was created to choose the location of watermark to be embedded in. Each bit watermark that used to embed in load image needs to mark choice every time. The traditional quantization methods usually use the constant quantized interval and the scheme proposed in this paper is called odd-even adjudgment rule. The scheme could adaptively adjust the quantized interval

收稿日期:2006-07-16;修订日期:2006-10-27.

基金项目:上海市教育委员会科学项目资助(No. 04DC33)

by calculating the adjacent symbols' mean value of the wavelet coefficients which is selected to embed the watermark. The top-left, top and left coefficients were selected as the adjacent symbols of embedded wavelet coefficient's neighboring symbols. The fidelity of the watermarked image and the invisibility of the watermark have been enhanced by this method. The main idea of odd-even adjudgement rule is to quantize the coefficients into the most adjacent odd quantization mark or even quantization mark according to the watermark's value. The blind extraction could be realized by using this rule. Experimental results show that the watermark proposed in this paper is invisible (the PSNR is higher than 41) and is robust in the case of against some normal attacks such as JPEG compression, additive noise and filtering, etc. (the similarity between the original watermark and extracted watermark is almost above 0.85).

Key words: digital water marking; spread spectrum waterwark; neighboring symbols' mean value; odd-even adjudgement rule

1 引言

数字水印技术是一种通过在被保护的数字对象中嵌入不可见信息来证明版权归属或跟踪侵权行为的新兴技术。

目前多数的结合空间域和变换域的数字水印算法^[1-4]都利用了人类视觉模型的照度和纹理掩蔽特性即一般背景的亮度越高,纹理越复杂,人类视觉对其轻微变化就越不敏感。其中最典型的算法是 PODICHUK C I^[1]等提出的利用视觉模型来判断水印加在图像上的位置和可加水印强度的上限。目前结合空间域和变换域算法尚有待解决的问题有:

(1)无法很好协调水印嵌入容量,透明性和稳健性之间关系。当有选择的嵌入位置后,虽然改善了水印的不可见性。但同时也减小了水印的嵌入容量。增强图像中内嵌水印强度可以增强水印系统的稳健性,但同时又会降低水印的不可见性。因此全面的提高水印三方面的性能变得尤为困难。

(2)不易实现盲水印。目前传统的基于视觉模型的变换域数字水印算法大都需要将加水印图像与原始图像进行比较以提取水印。而目前的实际需求中需要盲水印检测的占有很高的比重。

(3)保密性较差。由于利用视觉掩模来选择嵌入位置的算法已经得到广泛采用,因此根据这种算法提取出水印的复杂度不高,不利于保密通信中的使用。

本文提出了一种结合图像空间域和小波域特

性的自适应盲水印算法。该算法有如下优点:①独创性的利用图像的局部纹理特性生成扩频码,大大增加了水印系统的鲁棒性,打破了传统的利用移位寄存器生成扩频序列的方法;②水印嵌入过程中引入加密方法,增强了水印系统的保密性;③自适应调整小波系数的量化间隔,增加了图像的逼真度;④实现盲水印检测。

2 自适应盲水印算法原理

本算法主要分为水印生成、水印嵌入和水印提取三个部分。

2.1 水印生成方法

(1)先将原始水印信息转换成二进制流 m' , 再通过映射得到由 1 和 -1 组成的序列 m , 长度为 N , 即:

$$m = \{m_i | m_i \in \{-1, 1\}, 0 \leq i \leq N-1\}, \quad (1)$$

映射规则采用:

$$m_i = \begin{cases} 1, & \text{if}(m_i' = 1) \\ -1, & \text{if}(m_i' = 0). \end{cases} \quad (2)$$

(2)水印的生成方式采用了基于片率概念的扩频方法^[5],该方法对原始信息按片率进行扩展后再用伪随机序列进行调制。

将序列 m 以片率 $cr = 16$ 按位进行扩展^[5],得到长度为 $16N$ 的扩展序列 s 。扩展表达式为:

$$s = \{s_j | s_j = m_i, \\ i = [j/cr], 0 \leq j \leq N \times cr - 1, cr = 16\}, \quad (3)$$

(3)利用载体图像 I 的局部纹理特性产生一组长为 16 位的伪随机二值序列 p 。具体方法如下:

将图像分为 16 个块,计算每个块的方差,再通过与整幅图像的方差进行判决比较,产生 16 位的伪随机序列 p 。判决规则为:

$$p_i = \begin{cases} 1, & \text{if}(Var_i \geq Var_I) \\ -1, & \text{if}(Var_i < Var_I) \end{cases} \quad (0 \leq i \leq 15), \quad (4)$$

其中 Var_i 表示第 i 个块的方差, Var_I 表示整幅图像的方差。

方差计算采用公式(5):

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V [x(u,v) - \mu]^2}{U \times V - 1}, \quad (5)$$

其中 U, V 为所选图像 x 的长宽尺寸, μ 为图像的均值。 μ 的计算采用公式(6):

$$\mu = \frac{\sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V x(u,v)}{U \times V}, \quad (6)$$

对该伪随机序列 p 进行周期延拓,可得到扩展的伪随机序列 p'

$$p' = \{p_j' \mid p_j' = p_i, i = j \bmod(16), 0 \leq j \leq 16N - 1\}, \quad (7)$$

(4)最后将序列 s 和 p' 相乘即可得到长度为 $16N$ 的扩频水印序列 W 。即:

$$W = \{w_j \mid w_j = s_j \times p_j', 0 \leq j \leq 16N - 1\}, \quad (8)$$

2.2 水印嵌入方法

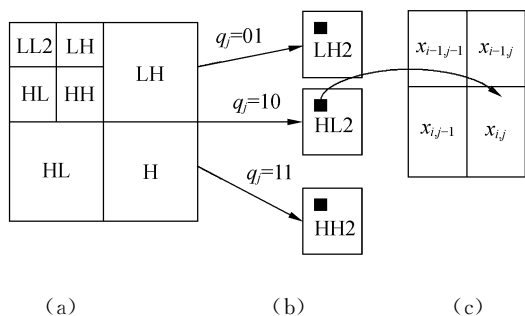
2.2.1 水印嵌入位置的选择

对原始图像进行两层的小波分解,从嵌入容量和不影响图像逼真度的角度考虑,选择在 LH2, HL2, HH2 三个子带中嵌入水印,每一位水印具体嵌入哪个子带由一串较长的伪随机序列决定。伪随机序列采用 m 序列。 m 序列又称为最大长度线性反馈移位寄存器序列。它是由二进制线性反馈移位寄存器产生的周期为 $2^n - 1$ 的伪随机序列,由 0 和 1 组成。在检测阶段利用移位寄存器的初值和本原多项式就可以复原伪随机数。目前 m 序列在扩频通信中得到广泛的应用。将这个很长的二进制伪随机数每两位分为一对,每一位水印 w_i 与一对二进制数 q_j 相对应,通过判决法则,判决每一位水印嵌入哪一个子带。具体判决法则为:

$$w_i \text{ 嵌入的子带} = \begin{cases} \text{LH2, if}(q_j = 01) \\ \text{HL2, if}(q_j = 10) \\ \text{HH2, if}(q_j = 11) \end{cases}, \quad (9)$$

如果 $q_j = 00$,则用下一对 q_{j+1} 与 w_i 进行对应,重复公式(9)的判决

每一位水印嵌入到一个 2×2 大小的子块里。选择将水印信息嵌入到图 1 中所示的子块的右下角系数 $x_{i,j}$ 中。其他三个系数 $x_{i-1,j-1}, x_{i-1,j}, x_{i,j-1}$ 用来自适应确定量化间隔。



(a) 原始图像 2 层小波分解 (b) 嵌入子带位置的选择 (c) 选择的系数

(a) 2 levels DWT of original image (b) The choice of which sub-band embedded (c) Selected coefficients

图 1 水印嵌入基本步骤

Fig. 1 Basic procedure of watermark embedding

2.2.2 计算相邻特征平均值

以图 1 中的 $x_{i-1,j-1}, x_{i-1,j}, x_{i,j-1}$ 作为相邻系数,计算选择系数的相邻特征平均值^[6-7],首先将所选 3 个子带上所有系数加上一个 f 使所有系数成正数, f 的具体公式如下:

$$f = Var_I \times \alpha, \quad (10)$$

其中 Var_I 是所选子带的方差, α 是加权因子。 α 的取值通过实验来确定。

然后以图 1 所示的三个邻域系数计算相邻特征平均值。

$$m_{i,j} = \text{mean}(x_{i-1,j-1}, x_{i-1,j}, x_{i,j-1}), \quad (11)$$

2.2.3 奇偶判决法嵌入水印

奇偶判决法的思想就是根据水印值的不同,把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 $r_{i,j}$ ^[6-7]:

$$k_{i,j} = \text{round} \left[\frac{x_{i,j}}{g \times m_{i,j}} \right], \quad (12)$$

这里 g 为加权因子,根据实验选取。传统的基于量化的方法中多采用固定的由实验得到的量化间隔,固定的量化间隔必然造成了图像逼真度

的降低。因此通过将待修改小波系数的相邻特征平均值乘以一个加权系数的方法可以使被修改的小波系数自适应的调整量化间隔,大大增加了水印图像的逼真度。

$$r_{i,j} = \text{mod}(k_{i,j}, 2), \quad (13)$$

(b) 按公式修改系数加水印:

定义 $e = x_{i,j} - g \times k_{i,j} \times m_{i,j}$ 。

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

$$x_{i,j}' = k_{i,j} \times g \times m_{i,j}, \quad (14)$$

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

$$x_{i,j}' = \begin{cases} (k_{i,j} - 1) \times g \times m_{i,j}, & \text{if}(e \leq 0) \\ (k_{i,j} + 1) \times g \times m_{i,j}, & \text{if}(e > 0) \end{cases}, \quad (15)$$

2.2.4 得到水印图像

将所有嵌入系数的子带减去 f , 再进行小波逆变换, 产生加水印图像 I' 。

2.3 水印提取方法

采用产生伪随机判决序列的移位寄存器的初值和本原多项式系数, 公式(10)中的加权因子 α 和公式(12)中的 g 作为密钥。

提取步骤如下:

(1) 水印图像 2 级 DWT 分解。

(2) 通过密钥得到判决序列, 确定水印的嵌入位置。具体方法采用水印嵌入步骤(2.2.1)。

(3) 奇偶判决提取水印。

用水印嵌入步骤(2.2.2)和(2.2.3)所描述的方法来产生标志 $r_{i,j}'$, 根据下列公式来提取扩频水印 W' :

$$W' = \begin{cases} 1, & \text{if}(r_{i,j}' = 1) \\ 0, & \text{if}(r_{i,j}' = 0) \end{cases}, \quad (16)$$

(4) 扩频水印解扩。

将水印图像 I' 按水印生成步骤(2.2.3)得到伪随机序列 p'' 。

将 W' 每 16 位分为一组(共可分为 N 组, 记为 $w_j, j \in [0, N-1]$), 每一组与 p'' 相乘再累计, 得到长为 N 的序列 t 即:

$$t = \{t_i \mid t_i = \sum_{j=1}^{16} p_j'' w_{ij}, 0 \leq i \leq N\}, \quad (17)$$

其中 w_{ij} 表示第 i 组第 j 个值。

通过判决 t 的大小, 得到原始序列 m'' :

$$m_i'' = \begin{cases} 1, & \text{if}(t_i \geq 0) \\ 0, & \text{if}(t_i < 0) \end{cases}, \quad (18)$$

再通过做与水印生成步骤(1)相逆的变换, 即可得到原始水印信息。

3 试验数据和分析

本次试验采用 512×512 大小的 Lena 灰度图像作为载体图像(如图 2(a)), 采用 haar 小波作为小波基, 取 $\alpha = 0.45, g = 0.08$ 。嵌入水印后的图像(如图 2(b))峰值信噪比: PSNR = 41.535, 水印在添加后仍然具有良好的不可见性。



(a) 原始 lena 图像
(a) Cover image 'lena'



(b) 水印嵌入后的图像
(b) Watermarked image

图 2 水印不可见性实验

Fig. 2 Invisibility of watermark

采用 16×16 的二值图标作为原始水印(如图 3(a))。针对水印图像容易受到的攻击进行鲁棒性测试。图 3(b)–(h)给出了针对均值滤波(3×3), 维纳滤波(3×3), 中值滤波(3×3), 高斯滤波, JPEG 压缩($Q=75, 50, 40$)攻击手段下检测到的水印图标。图 4 给出了 JPEG 有损压缩攻击下提取出水印的响应曲线图。表 1 是加水印图像在常见攻击下提取出的水印与原始水印的相似度测试数据, 攻击分别为均值滤波, 维纳滤波, 中值滤波, 高斯滤波, 高斯噪声, 直方图均衡化, 椒盐噪声和动态范围压缩。相似度计算公式如下:



图 3 水印鲁棒性实验
Fig. 3 Robustness of watermark

$$\text{sim}(W, W') = \frac{\sum_i W(i) \times W'(i)}{\sqrt{\sum_i W^2(i)} \times \sqrt{\sum_i W'^2(i)}}, \tag{19}$$

由图 2 可以看出,加水印图像达到了水印透明性的要求,水印隐藏效果较好;图 3 表明遭受 JPEG,均值滤波,维纳滤波等手段攻击后提取出的水印仍然与原始水印具有很高的主观相似度。(基本可以清晰的看到“SHNU”四个大写字母);图 4 和表 1 证明了本算法在受到各种常见攻击后提取出的水印与原始水印具有很高的客观相似度。

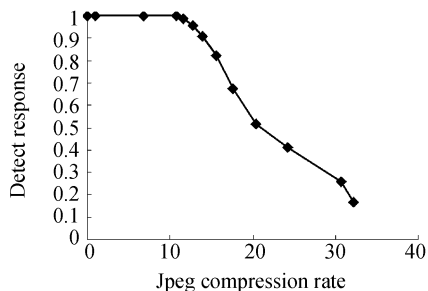


图 4 JPEG 压缩响应曲线
Fig. 4 JPEG compression response curve

表 1 Lena 受到攻击后提取水印与原始水印的相似度

Tab. 1 Similarity between original watermark and detected watermark after various attacks

Attack types	Similarity	Attack types	Similarity
Averaging filter(3×3)	0.9867	Gaussian noise (mean value 0, variation 0.005)	0.7556
Wiener filter(3×3)	0.9894	Histogram equalization	0.9841
Median filter(3×3)	0.9894	Salt-and-pepper noise	0.8700
Gaussian filter	0.9974	Dynamic range compression	0.9316

4 结 论

本文针对二值图标水印提出了一种基于图像

局部纹理特性的扩频水印方案,并实现了自适应盲水印检测。扩频水印生成和解扩过程中不再需要使用移位寄存器,并且在满足不可见性条件和保密性的前提下,对各种攻击表现出了良好的稳

健性。图像嵌入过程中使用密钥提高了水印系统的保密性,不易被捕捉。由于使用了通过计算相邻特征平均值的自适应量化方法,大大提高了图像的自适应性,能够应用于各种图像上。

当然,本方案仍有值得改进之处。主要有:①水印嵌入容量有限;②尚没有完全结合图像空间和变换域特性;③抗几何攻击效果差。这些不足之处需要在今后的研究中进一步改进。

参考文献:

- [1] PODILCHUK C I, ZENG W. Image-adaptive watermarking using visual models [J]. *IEEE Journal on Select Areas in Communications*, 1998, 16(4): 525-539.
- [2] HUANG J W, SHI Y Q. An adaptive image watermarking scheme based on visual masking [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(8): 748-750.
- [3] VOLOSHYNOVSKI S, DEGUILLAUME F, PUN T. Content adaptive watermarking based on a stochastic multi-resolution image modeling [C]. *Proceedings of the 10th European Signal Processing Conference Tampere, Finland: EUSIPCO*, 2000.
- [4] 王慧琴, 李人厚. 一种结合空间域和 DCT 域的数字水印新算法 [J]. *通信学报*, 2002, 23(8): 81-86.
WANG H Q, LI R H. A new digital watermarking algorithm combining spatial and DCT domain [J]. *Journal of CHINA Institute of Communications*, 2002, 23(8): 81-86. (in Chinese)
- [5] VASSAUX B, NGUYEN P, BAUDRY S, et al. Scrambling technique for video object watermarking resisting to MPEG-4 [C]. *Proceedings of the 4th EURASIP-IEEE Region 8 International Symposium on Video/Image Processing and Multimedia Communications (VIPromCom)*, Zadar, Croatia, June 16-19, 2002: 239-244.
- [6] 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.
WANG P. Adaptive blind watermarking algorithm based on wavelet transform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 247-252. (in Chinese)
- [7] 王沛, 余松煜, 袁晓兵. 图像高逼真度的盲水印算法 [J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(5): 448-453.
WANG P, YU S Y, YUAN X B. Blind watermark algorithm for high fidelity of image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5): 448-453. (in Chinese)

作者简介:王 沛(1970-),女,四川泸州人,副教授,主要从事图像通信与信息处理领域的研究;E-mail: peiwang@shnu.edu.cn;

姚 恒(1982-),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主要研究方向为数字水印和图像处理。E-mail: henry_yao_1982@163.com