

# 一种基于图象内容的小波域鲁棒水印技术

张 力 韦 岗

(华南理工大学电信学院电子与通信工程系, 广州 510641)

**摘 要** 为了提高水印的鲁棒性及抗攻击能力,提出了一种基于图象内容的小波变换域水印技术,该技术是将水印内容的选取与原始图象的内容相联系,并在水印嵌入之前,先对水印进行伪随机排列、分块、扩展等预处理,以增强鲁棒性,其与传统的水印方法不同的是,在水印嵌入过程中先将分块后的水印嵌入,然后将整个水印嵌入,这样水印不仅嵌入到图象小波分解系数的低频分量中,也嵌入到高频分量中,而提取过程中,也同样提取分块后的水印和整个水印,并将基于图象内容的水印与事先给定水印在相同条件下进行了比较实验,实验结果表明,这种水印技术的鲁棒性明显好于传统水印技术,同时还证明了水印嵌入的容量不仅与视觉系统的刚刚可分辨门限有关,而且与水印信号本身的一些特性有关系。

**关键词** 数字水印 小波变换 基于图象内容的水印 鲁棒性 刚刚可分辨门限

**中图法分类号:** TP309.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)09-0975-05

## A Digital Watermarking Technique with High Robustness Based on Content of Original Image in Wavelet Domain

ZHANG Li, WEI Gang

(Dept. of Electronics and Communication Engineering, College of Electronic & Information Engineering,  
South China University of Technology, Guangzhou 510641)

**Abstract** In this paper a new digital watermarking technique is proposed based on discrete wavelet transform. In order to enhance the robustness of watermark, watermark was based on the content of the original image. Pseudorandom permutation, division and spectrum spread techniques were used to improve the robustness of watermark. Different from the traditional techniques, in our method, watermarks were embedded for two times, the holistic watermark was embedded first and then was divided watermark, and watermark here was embedded both into the low-frequency components of the wavelet transform of the image but also to the high-frequency components. The extraction process extracted both the holistic watermark and the divided watermark in turn. The watermark based on the content of the original image and the watermarks that given beforehand were compared in the same condition and the experimental results showed that this kind of watermark has a more robust than the techniques used the watermarks given beforehand. The experimental results also showed that the capacity of embedded watermark was related not only to the just noticeable difference of the human visual system but also to the characteristics of the watermark itself.

**Keywords** Digital watermark, Wavelet transform, Watermark based on the content of the original image, Robustness, Just noticeable difference

## 0 引 言

随着媒体的数字化以及互联网的普及和发展,大

量信息已可在网上传输、发布,但也出现了篡改信息和破坏信息现象,因此如何在网络环境下实现有效的版权保护和信息安全已成为一个重要的现实问题。数字水印技术是一种解决版权保护和信息安全的技术,

基金项目:国家自然科学基金项目(69866246)

收稿日期:2001-03-26; 改回日期:2002-03-12

它是将要传输的机密文件先秘密隐藏在一般的文件中,然后通过网络进行传输,以便逃过非法拦截者的拦截和破解,并用于跟踪侵权行为和提供法律保护。

数字水印技术中所采用的水印可以是事先给定的,也可以是根据原始图象的内容产生的.现在见到的数字水印技术文献中采用的都是事先给定的水印,例如已知的图象、文字、随机信号序列或者噪声等等,这方面的数字水印技术包括空间域的水印技术<sup>[1,2]</sup>和变换域水印技术.其中,变换域的水印方法有很多种,如DFT<sup>[3]</sup>(Discrete Fourier Transform)、DCT<sup>[4]</sup>(Discrete Cosine Transform)、DWT<sup>[5,6]</sup>(Discrete Wavelet Transform)等.由于小波变换具有良好的空-频分解特性,而且具有能够很好地匹配人类视觉系统(Human Visual System, HVS)的特性<sup>[7]</sup>,同时DWT域的水印技术可以与新的JPEG2000标准相兼容,因此采用DWT域的数字水印技术来进行实验具有更好的前景.文献[8,9]中提出了自适应图象水印,但是所采用的水印仍然是0均值、单位方差的高斯随机噪声序列,只是图象嵌入的强度和位置与具体的图象内容有关系。

本文的创新之处在于:(1)水印是基于原始图象的内容产生的,由于这种水印的能量分布与原始图象的能量分布大致相同,因此嵌入水印的鲁棒性比较好,而且嵌入水印后的图象很难再嵌入另外的水印,同时由于水印的内容与原始图象的内容有关,从而提高了水印的保密性;(2)为了提高水印的鲁棒性,在进行水印嵌入之前,对水印信号进行了伪随机排列的预处理;(3)水印嵌入过程中,先将原始图象分块后进行小波变换,然后将伪随机排列后的水印分块扩展后嵌入,这样水印不仅嵌入到图象小波变

换系数的低频分量中,也嵌入到高频分量中;(4)将整个经过伪随机排列后的水印,扩展后嵌入到图象中,即在水印嵌入过程中进行了两级水印嵌入;(5)提取过程中,先提取分块后的水印,然后提取整个水印信号;(6)实验证明,水印嵌入的容量不仅与HVS的刚刚可分辨门限<sup>[10]</sup>(Just Noticeable Difference, JND)有关,而且与水印本身的一些特性有关.实验还证明,采用与图象内容有关的水印,其鲁棒性明显好于采用事先给定水印(如文字图象、随机信号序列和高斯噪声水印)的鲁棒性。

## 1 具体的水印过程

### 1.1 基于图象内容的水印的产生

与图象内容有关的,可以作为水印的特征有很多,在本文实验中是将原始图象的边缘作为水印,这是因为边缘是图象最基本的特征,它不仅是图象分割所依赖的最重要特性,也是纹理特征的重要信息源,同时由于边缘具有能勾画出区域的形状、能被局部定义以及能传递大部分图象信息等许多优点,因此在本文实验中将图象的边缘作为水印.图象边缘的提取是采用传统的Sobel边缘算子来实现的<sup>[10]</sup>。

获取基于图象内容的水印时,采用的原始图象是 $256 \times 256$ pixels的Lena图象,如图1(a)所示.利用Sobel边缘算子提取出来的边缘如图1(b)所示.在处理边缘的过程中,采用0.4作为阈值,进行阈值处理之后的边缘图象如图1(c)所示.为了增加水印的鲁棒性,在进行水印嵌入之前,先进行伪随机排列,伪随机排列后的边缘如图1(d)所示.嵌入的水印是 $64 \times 64$ pixels大小的Lena图象的边缘图象。

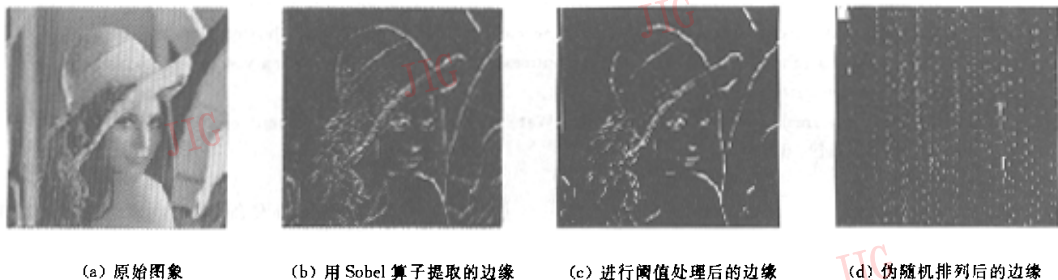


图1

### 1.2 水印的嵌入过程

通过对HVS的研究发现:人眼对低频部分的噪声相对敏感,而对高频部分的噪声则相对差一些.为

了使水印不易被觉察,应该将信号嵌入到较高的频段.但是由于图象的大部分能量集中在低频范围,而嵌入到高频段的水印又很容易在量化的过程中丢失,

因此要想提高水印的鲁棒性，应该结合 HVS 的特性，在鲁棒性和不可视性之间作最优选择。

在本文的方法中，为了提高水印的鲁棒性，使水印不仅嵌入到高频分量中，也嵌入到低频分量中，而且还进行了两级水印嵌入，即首先嵌入经过分块处理后的水印，然后嵌入整个水印。因为嵌入的分块水印对于剪切的鲁棒性比较好，而整体水印则对滤波、噪声等鲁棒性比较好。这样就可以嵌入尽可能多的水印能量，且不影响图象的视觉质量，以便增加水印的鲁棒性。水印嵌入的具体过程如下：

(1) 对分块后的原始图象进行小波变换 之所以要进行分块处理是因为作整体变换时，水印对剪切操作的鲁棒性比较差。实验中采用的小波基是 db2 小波，进行图象小波变换时，要进行 4 层小波分解。D<sub>2<sup>j</sup></sub><sup>1</sup>, D<sub>2<sup>j</sup></sub><sup>2</sup>, D<sub>2<sup>j</sup></sub><sup>3</sup> 表示 2<sup>j</sup> 尺度上的细节信号，A<sub>2<sup>j</sup></sub><sup>d</sup>(f) 表示 2<sup>j</sup> 尺度上低频分量(d)的逼近信号，小波分解滤波器为 {h, g}，其中

$$h = \left\{ \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right\}$$

$$g = \left\{ \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, -\frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, -\frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right\}$$

则分块后的图象的分解公式为：

$$A_{2^j}^d(f)(m, n) = \sum_{k \in Z} \sum_{l \in Z} A_{2^{j+1}}^d(f)(k, l)h(k-2m)h(l-2n) \quad (1)$$

$$D_{2^j}^1(f)(m, n) = \sum_{k \in Z} \sum_{l \in Z} A_{2^{j+1}}^d(f)(k, l)g(k-2m)h(l-2n) \quad (2)$$

$$D_{2^j}^2(f)(m, n) = \sum_{k \in Z} \sum_{l \in Z} A_{2^{j+1}}^d(f)(k, l)h(k-2m)g(l-2n) \quad (3)$$

$$D_{2^j}^3(f)(m, n) = \sum_{k \in Z} \sum_{l \in Z} A_{2^{j+1}}^d(f)(k, l)g(k-2m)g(l-2n) \quad (4)$$

Z 表示图象小波分解的有效范围，j 表示分解层次。

(2) 进行分块水印的嵌入，先将水印分块后进行扩展，然后既将水印嵌入到原始图象的低频分量中，也嵌入到高频分量中。但在低频和高频小波系数中，嵌入的强度不同，具体强度值由 HVS 的特性 JND 来确定。

(3) 对于整个的水印信号采用与第 2 步相同的嵌入方法进行嵌入。

(4) 进行小波重构，得到嵌入水印后的图象。重构时，采用与分解时相同的 db2 小波，重构时的滤波器为：

$$h = \left\{ \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right\}$$

$$g = \left\{ -\frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, -\frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, -\frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right\}$$

图象重构的算法如下：

$$\tilde{A}_{2^{j-1}}^d(f)(m, n) = 4 \times \left[ \begin{aligned} &\sum_{k \in Z} \sum_{l \in Z} \tilde{A}_{2^j}^d(f)(k, l)h(m-2k)h(n-2l) + \\ &\sum_{k \in Z} \sum_{l \in Z} \tilde{D}_{2^j}^1(f)(k, l)h(m-2k)g(n-2l) + \\ &\sum_{k \in Z} \sum_{l \in Z} \tilde{D}_{2^j}^2(f)(k, l)g(m-2k)h(n-2l) - \\ &\sum_{k \in Z} \sum_{l \in Z} \tilde{D}_{2^j}^3(f)(k, l)g(m-2k)g(n-2l) \end{aligned} \right] \quad (5)$$

其中， $\tilde{D}_{2^j}^1, \tilde{D}_{2^j}^2, \tilde{D}_{2^j}^3$  表示嵌入水印后图象，在 2<sup>j</sup> 尺度上的细节信号， $\tilde{A}_{2^j}^d(f)$  表示嵌入水印后图象在 2<sup>j</sup> 尺度上低频分量的逼近信号，k, l 分别为二维图象在 2<sup>j</sup> 分解层上小波分解系数的取值范围，k, l ∈ [0, z-1]，z 为图象在 2<sup>j</sup> 分解层上分解系数的个数。在实验中，采用峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratios, PSNR) 对嵌入水印后的图象  $\tilde{x}_{i,j}$  与原始图象  $x_{i,j}$  的差别做出定量描述。PSNR<sup>[11]</sup> 的定义为

$$PSNR = 10 \log(x_{max}^2 / (256^{-1} 256^{-1} \sum_{i=1}^{256} \sum_{j=1}^{256} (x_{i,j} - \tilde{x}_{i,j})^2)) \quad (6)$$

图 1(a) 嵌入水印后的图象如图 2 所示。



图 2 图 1(a) 嵌入水印后的图象

### 1.3 水印的检测过程

在水印的检测过程中，要用到原始图象以及一些与嵌入过程相关的信息。具体的检测步骤如下：

(1) 将待检测的图象进行分块、扩展后进行小波变换，同时将原始图象也进行分块、扩展后进行相同的小波变换。

(2) 根据与水印嵌入过程中相关的信息，提取出分块处理之后的水印；合并后，再进行伪随机排列恢复，从而得到提取出来的水印；

(3) 与第 2 步相似，提取整个的水印信号；

(4) 将提取出来的水印与原始的水印进行定量的比较。

采用归一化互相关函数<sup>[12]</sup> (Normalized Cross-Correlation, NC) 来描述。根据 NC 的值，并且通过均衡检测概率和错误报警概率来判断所检测的图象

中是否含有给定的水印. 原始水印  $w$  与提取出的水印  $\tilde{w}$  之间的归一化互相关函数  $NC$  定义为:

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^{256} \sum_{j=1}^{256} w_i \tilde{w}_{i,j}}{\sum_{i=1}^{256} \sum_{j=1}^{256} (w_{i,j})^2} \quad (7)$$

#### 1.4 基于图象内容的水印与事先给定水印的比较

在相同的条件下, 对于基于图象内容的水印与事先给定的文字、随机信号序列和高斯噪声的水印

作了比较, 相同条件是指原始图象、水印嵌入强度、水印大小以及水印嵌入的位置等都是相同的, 且对嵌入不同水印后的图象进行相同的处理, 如进行剪切(包括将嵌入水印后的图象剪切掉 1/4 之后用原始图象的相应部分补充, 以及将嵌入水印后的图象剪切掉 1/2 后, 用原始图象的相应部分补充)、图象增强和图象压缩等处理. 用于评价各种水印优劣的标准是  $PSNR$  和  $NC$  值.

表 1 嵌入几种不同水印后图象的  $PSNR$  的比较

单位: dB

水印类型	不处理	剪切 1/4	剪切 1/2	图象增强	压缩 4 倍	压缩 8 倍	中值滤波
基于内容水印	37.7725	38.5900	39.8603	36.2018	27.3770	25.3358	30.6633
文字水印	25.6210	26.5013	27.6435	25.5032	27.0517	25.3082	28.1933
随机信号序列水印	27.7985	28.8784	29.8726	27.6057	27.3513	25.3197	29.1286
高斯噪声水印	30.8664	31.7388	32.8921	30.4297	27.3655	25.3286	29.9414

表 2 嵌入几种不同水印后图象的  $NC$  的比较

单位: dB

水印类型	不处理	剪切 1/4	剪切 1/2	图象增强	压缩 4 倍	压缩 8 倍	中值滤波
基于内容水印	1.0000	1.0000	1.0000	0.9891	0.9998	0.9628	0.7532
文字水印	1.0000	1.0000	1.0000	0.9872	0.9900	0.9567	0.5912
随机信号序列水印	1.0000	1.0000	1.0000	0.9856	0.9825	0.9530	0.6864
高斯噪声水印	1.0000	1.0000	1.0000	0.9874	0.9898	0.9518	0.7173

由表 1、表 2 可见, 基于图象内容的水印在各种处理操作之后的  $PSNR$  与  $NC$  值均明显比事先给定的水印相应的  $PSNR$  和  $NC$  值都要高, 尤其是对剪切操作, 剪切掉 1/4 与剪切掉 1/2 嵌入水印信号的图象后提取得到的  $NC$ , 在保留 4 位小数的精度下都是 1, 由此可见, 基于图象内容的水印, 其鲁棒性明显好于其他水印.

#### 1.5 与现有其他方法的比较

文献[12]中的水印嵌入算法也是 DWT 域中的水印算法, 表 3 对文献[12]中的实验结果与本文的实验结果进行了比较, 由表 3 可见, 本文提出的水印技术对于压缩、增强等图象处理操作的鲁棒性明显比文献[12]中提出的算法要好.

表 3 文献[12]中的实验结果与本文中相应实验结果的比较

相应处理	压缩比 3.48	压缩比 4	压缩比 8.04	压缩比 8	图象增强
文献[12]中 $NC$ 值	0.777	—	0.561	—	0.925
本实验中 $NC$ 值	—	0.9998	—	0.9628	0.9891

## 2 水印嵌入的容量问题

在现有的基于人类视觉模型的水印技术中, 都

是认为水印嵌入的容量只与 JND 的值有关系, 而且认为, 如果将水印嵌入的容量定义在 JND 的值上, 就可以达到嵌入的最大值, 而通过实验发现, 实际上水印嵌入的最大容量不仅与 JND 值有关系, 而且与水印信号自身的一些特性也有关系.

通过文献[13]中提出的图象视觉模型可以计算 JND 值:

$$\log Y = \log 0.495 + 0.466(\log f - \log m_\theta) \quad (8)$$

其中,  $m_\theta$  为不同分解方向上的加权值, 即  $m_\theta (\theta \in \{LL, HL, LH, HH\})$ , 并且  $m_{LL} = 1.501$ ;  $m_{HL} = m_{LH} = 1$ ;  $m_{HH} = 0.534$ . 然后就可根据以上数据计算出的水印嵌入量进行水印嵌入.

在同一幅原始图象上, 对基于图象内容的水印和事先给定的文字、随机信号序列和高斯噪声的水印作了相同容量的嵌入实验, 结果发现, 随着嵌入强度的增加, 高斯噪声的水印技术最先出现视觉质量的下降, 而与图象内容相关的水印技术则最后出现视觉质量的下降. 从表 1 的实验数据中也可以看出, 即使在相同水印嵌入强度的情况下, 嵌入文字水印后的图象, 不论是经过剪切, 还是未经过剪切, 相对来说, 其  $PSNR$  值都较小, 而嵌入基于内容水印后图象的  $PSNR$  值, 相对来说, 则比较大, 从而说明相同图象对不同水印的最大可嵌入量并不相同, 相

比之下,基于内容的水印,其可嵌入量会大一些,而文字水印的嵌入量会小一些.由此可见,对于某些水印来说,取 JND 作为嵌入强度可能已经做到了最大强度的嵌入,而对于另外的水印则可能没有达到最大值或者已经超过了最大值.也就是说,对于不同的水印来说,其视觉容限并不是相同的,而实际的水印嵌入的容量不仅与 HVS 的 JND 有关,而且与水印自身的一些特性有关系,应该综合这些信息,尽可能地提高水印的鲁棒性.

### 3 结 论

根据原始图象的特征,从中提出一种基于图象内容的水印技术,这种水印技术由于水印的能量分布与原始图象的能量分布大体相同,因此水印的鲁棒性比较好,同时该技术针对每一幅图象特征不同,采用的水印各不相同,还有利于提高图象的保密性.该水印技术由于在水印信号的嵌入过程中进行了两级的水印嵌入,因而使得水印相对于剪切等操作鲁棒性很好.将基于图象内容的水印与事先给定的文字、随机信号序列和高斯噪声的水印作了比较,发现这种水印的抗攻击能力明显比事先给定的水印强,同时通过实验发现,水印嵌入的强度不仅与 JND 有关,而且与水印自身的特性有关,因此在利用人类视觉系统的特性进行水印信号的嵌入时,在考虑视觉特性的同时,应该相应地考虑水印本身的特性,以便实现大量的水印嵌入和最大限度地提高水印的鲁棒性.

### 参 考 文 献

- 1 Nikos Nikolaidis, Ioannis Pitsa. Copyright protection of images using robust digital signatures[J]. Proceedings of IEEE Int. Conf. On Acoustics Speech and Signal Processing, 1996, 4(5): 2168~2171.
- 2 Delaigle J F, Vleeschouwer C, Macq B. Watermarking algorithm based on a human visual model[J]. Signal proceeding, 1998, 66: 319~335.

- 3 黄继武, Shi Y Q., 姚若河. 基于块分类的自适应图象水印算法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(8): 640~643.
- 4 Ruanaidh J J K, Pun T. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking [J]. Signal processing, 1998, 66: 303~317.
- 5 牛夏牧, 陆哲明, 孙圣和. 基于多分辨率分解的数字水印技术[J]. 电子学报, 2000, 28(8): 1~4.
- 6 李华, 朱光喜, 朱耀庭. 基于视觉特性和小波分解的数字水印隐藏方法[J]. 通信学报, 2000, 21(6): 37~41.
- 7 Gaudart L, Crebassa J, Petrakian J P. Wavelet transform in human visual channels [J]. Applied Optics, 1993, 32(22): 4119~4126.
- 8 Podichuk C I, Zeng W J. Image-adaptive watermarking using visual models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1998, 16(4): 525~539.
- 9 Wolfgang R B, Podichuk C I, Delp E J. Perceptual watermarks for digital images and video[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1108~1126.
- 10 余英林. 数字图象处理与模式识别[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1990: 41~48.
- 11 Swanson M D, Zhu B, Tewfik A H. Multiresolution scene-based video watermarking using perceptual models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4): 540~550.
- 12 Hsu C T, Wu J L. Multiresolution watermarking for digital images [J]. IEEE Transactions on Circuit and System I: Analog and Digital Signal Processing, 1998, 45(8): 1097~1101.
- 13 Watson A B, Yang G Y, Solomon J A et al. Visibility of wavelet quantization noise[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 16(8): 1164~1174.



张 力 1973 年生, 华南理工大学电子与通信工程系博士研究生. 主要研究方向为图象数字水印技术.

韦 岗 1963 年生, 教授, 博士生导师, 国家自然科学基金委员会电子与信息学科评委, 中国电子学会通信学分会、电子线路与系统分会及信息论分会委员, 中国通信学会通信理论委员会委员. 主要研究方向为通信与信号处理、神经网络等.