

基于小波变换的数字水印及版权保护¹

马社祥 刘贵忠 曾召华

(西安交通大学信息与通信工程研究所 西安 710049)

摘 要 数字水印技术是近年来关于版权保护方面研究的一个新课题。通常的水印是指嵌入在图像中的隐蔽的信息,作为数字图像的标签。通过复杂的水印嵌入方法可以防止非授权拷贝或对图像的其他攻击性操作。本文提出了基于块的小波变换下水印的嵌入和提取方法,使每一个水印像素隐藏在相应的图像块的中低频小波系数之中。利用本文的水印技术可以较好地解决版权争议等问题。理论分析和实验结果均证明了本文提出的方法是有效的和可行的。

关键词 数字水印,版权保护,小波变换,伪随机化
中图分类号 TP391

1 引 言

随着计算机软硬件业、多媒体技术和全球互联网的迅速发展,越来越多的数字媒体(图像、声音、图形和文字等)在以合法的形式传播的同时,也有大量以非法途径(主要是盗版)广泛传播。对数字媒体版权所有者来说,版权保护的要求迫在眉睫。目前,主要的盗版威胁来自如下三个方面:(1)不明身份(或假身份)的用户提出的购买;(2)电子出版物在网络传送过程中有可能被截获或盗窃;(3)用户在购买文件之后进行非法复制和传播。其中第一种情况可通过身份认证来加以保护,第二种情况通过信道加密来解决。盗版最为严重的是第三种情况,仅靠传统密码学领域的知识不能很好地解决这一问题。这就提出了不同于传统密码学研究对象的新问题。在这种情况下,近年来出现的新的版权保护技术——数字水印,就越来越引起人们的关注。

数字水印是镶嵌在数据之中的数据。由于图像比较直观,所以目前大多数数字水印是在图像上进行嵌入的二值图像。从应用要求来看,数字水印必须具有如下特性^[1-6]:(1)隐蔽性 水印的存在不应明显干扰被保护数据,同时是不可视的(即不被他人所发现);(2)不可删除性 盗版者无法用统计等方法检测并删除;(3)稳健性 通常的有损数据压缩等图像处理操作不会破坏水印;(4)确定性 水印所携带的信息能够被唯一地鉴别。除上述之外,水印的嵌入过程还要复杂。本文利用小波变换,在小波域中嵌入数字水印。这种方法能够较好地解决版权纠纷问题,从而实现版权保护。本文第 2 节和第 3 节描述水印的嵌入和提取过程,第 4 节讨论版权保护方面的问题,实验结果和结论分别在第 5 节和第 6 节给出。

2 水印的嵌入

大多数自然图像的能量都集中在低频。为了隐蔽地嵌入数字水印,水印不应嵌在图像的低频,除非嵌入的水印强度较小不至于破坏图像的视觉效果和水印的隐蔽性。另一方面,为了使对图像进行有损数据压缩而仍能保留水印,则水印的较重要信息不应该嵌入在图像的高频。因此,水印最好嵌入在图像的中频。

多分辨表示^[7]的分层结构提供了一个十分有用的图像分析工具。根据人类视觉系统(HVS)特性以及水印分散在图像中而不被发现的要求,我们将主图像分成大小相同的小块,对每一块

¹ 1999-10-25 收到, 2000-06-15 定稿

国家自然科学基金(69872030), 国家教育部优秀年轻教师基金(97 年度)和陕西省自然科学基金(98x08)部分资助课题

进行小波变换, 选出中低频小波系数嵌入水印。每一块的小波变换是按 Mallat 算法^[7] 分解成金字塔形层次结构, 如图 1 所示, 其中, LL_2 为低频, LH_2 , HL_2 和 HH_2 为中频, LH_1 , HL_1 和 HH_1 为高频。为了满足数字水印的要求, 水印应该嵌入在中低频分量之中。同时, 为了使水印具有更好的隐蔽性必须对水印进行伪随机化。

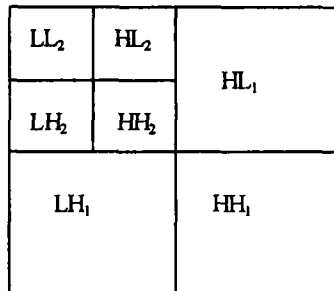


图 1 图像小波分解层次示意图

2.1 伪随机化数字水印

周期为 T 的二值序列是伪随机序列的条件是: (1) 在每一序列周期中, “+1” 的码元数目与 “-1” 的码元数目相同, 或相差极小; (2) 在每一序列周期中, 连续出现 “+1” 或 “-1” 的码元串 (游程) 的总数记为 u , 则长度为 1 的游程有 $u/2$ 个, 长度为 2 的游程有 $u/4$ 个, 长度为 3 的游程有 $u/8$ 个, \dots , 其中 “+1” 的游程和 “-1” 的游程数目大约各占一半; (3) 序列的 (周期) 自相关函数是二值的, 有 $R_x(j) = \begin{cases} T, & j = 0 \pmod{T} \\ \sigma, & 0 < j < T \pmod{T} \end{cases}$, 其中 $T \gg \sigma$ 。

二维数字水印伪随机化的简单方法是: 对二维水印序列从第一行开始逐行连接起来组成一维序列; 对该一维序列采用线性反馈移位寄存器法^[8] 产生一维伪随机序列; 最后对一维伪随机序列按与第一步相反的方式生成二维伪随机序列。例如, 若一个二维数字水印大小是 128×128 , 其对应的一维序列下标从 1 到 16383。经线性反馈移位寄存器产生一维伪随机序列的下标也是从 1 到 16383, 对每一元素, 若其下标为 k , 则按行坐标为 $((k + 127) \text{div } 128)$, 列坐标为 $((k - 1) \text{mod } 128) + 1$ 的映射可生成大小仍为 128×128 的二维伪随机序列。

2.2 中低频系数的选取

通过实验我们发现若将主图像直接进行小波分解而嵌入水印, 则容易被发现。为此我们将主图像分块使水印被分散地嵌入各个块中。块的大小取 4×4 个像素较为合理, 若主图像大小为 $N \times N$, 则块的个数为 $(N/4) \times (N/4)$ 。在每一块中只嵌入水印的一个像素, 则水印的大小为 $(N/4) \times (N/4)$ 个像素。小波变换时, 我们选用 Harr 小波。对每个 4×4 的图像块, 经两次小波变换分解成如图 1 所示的层次结构, 其中 LL_2 , LH_2 , HL_2 和 HH_2 各含一个元素。对于 LH_2 , HL_2 , HH_2 与 LL_2 相比幅度非常小, 与 LH_1 , HL_1 , HH_1 相比幅度稍大一些但不很悬殊。若水印强度较小 (例如, 不超过 2), 则将水印嵌入 LL_2 , LH_2 , HL_2 和 HH_2 中的任一个即可; 若水印强度大于 2 但不超过 10, 将水印嵌入 LH_2 , HL_2 或 HH_2 中, 则会明显地改变子带之间的相关性, 且容易被发现, 所以将水印嵌入 LL_2 中较为合适; 若水印强度太大, 可将水印强度进行分解, 分别嵌入在 LL_2 , LH_2 , HL_2 和 HH_2 的部分之中。本文的实验选 LL_2 嵌入水印, 即由图像的 $(N/4) \times (N/4)$ 个块的所有 LL_2 组成大小为 $(N/4) \times (N/4)$ 的子图作为嵌入水印的小波系数。

2.3 水印的嵌入过程

嵌入过程可按如下步骤进行:

第 1 步 对主图像 D 按大小为 4×4 分成 $(N/4) \times (N/4)$ 个块, 对于每一块作两次离散小波变换 (DWT);

第 2 步 选取每一块的低频小波系数 LL_2 组成一个子图像记为 M ;

第 3 步 将二值水印图像 W 伪随机化得到 W' ;

第 4 步 修改 M 为 $M + W'$ 使水印嵌入在低频小波系数之中, 记 $M' = M + W'$;

第 5 步 将 M' 中的每一个元素放回在各自所对应的块中, 再对每一块进行逆离散小波变换 (DWT⁻¹) 得到含水印的图像 D' , 记 $D' = D + W$ 。其过程如图 2 所示。

由于水印是被伪随机化且加载在低频, 所以图像中的水印是不可视的。同时, 由于数据压缩一般是压缩高频数据, 所以有损数据压缩不会损失掉水印。由于水印是在小波域中加载的, 所以在一般的信号处理和几何扭曲下有很好的稳健性, 且多次随机加载水印也不会覆盖原先加入的水印。由于水印的大小及其幅值相对于主图像都很小, 所以加入水印后不会明显地改变小波域中尺度之间的相似程度和相关性, 所以水印不易被探测出。加之可选用的小波又很多, 所以盗版者是很难攻击的。

3 水印的提取

提取数字水印需要原图像和加水印的图像, 其提取过程如下:

第 1 步 离散小波变换。将加水印的图像 D' 和原图像 D 都按大小为 4×4 分块作两次 DWT;

第 2 步 确定低频小波系数。依嵌入水印时所选取的低频小波系数坐标, 取出加水印的图像和原图像的低频小波系数分别为 \hat{M}' 和 M ;

第 3 步 提取二维伪随机数字水印, $\hat{W}' = \hat{M}' - M$;

第 4 步 逆伪随机化。将伪随机数字水印 W' 逆伪随机化则得到提取的数字水印 \hat{W} , 记 $\hat{W} = \hat{W}' - D$;

第 5 步 相似性度量。为了客观地评价提取的数字水印和原来的数字水印的相似程度, 定义如下量^[1,2]

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^{N/4} \sum_{j=1}^{N/4} W(i, j) \hat{W}(i, j)}{\sum_{i=1}^{N/4} \sum_{j=1}^{N/4} [W(i, j)]^2}$$

其中 $W(i, j)$ 为原数字水印, $\hat{W}(i, j)$ 为提取的数字水印, 水印的大小为 $(N/4) \times (N/4)$, 则 $0 \leq NC \leq 1$, NC 值越大相似性越好, 当 $NC=1$ 时, 提取的数字水印和原数字水印相同。因此, NC 值作为评价提取的数字水印和原来的数字水印的相似性的一个量度。数字水印的提取过程如图 3 所示。

4 版权保护

通过数字水印技术可以较为有效地控制盗版, 维护版权所有者的合法权益。对于一幅图像, 若怀疑其真伪, 可通过提取水印方法来验明。对于盗版者给予严惩, 使一般人不敢冒险去盗版。但有些盗版者不承认自己盗版, 而且他也加载了水印, 并称版权所有者为盗版, 这就会引起版权争议。传统的数字水印方法将无法裁决这一争议, 只能通过加强水印的强度, 使其达到加入两次水印就会明显地破坏原来的图像而防止盗版, 这样无疑会损害所加载水印图像的质量。根据本文所述的水印加载方法就很容易解决这一问题。

首先我们看二次水印对原水印的影响。若在图像 D 上按上述方法嵌入水印 W 得到含水印的图像 D' , 在 D' 上再二次嵌入水印 W_1 得到含二次水印的图像 D'' 。第二次嵌入水印的方法

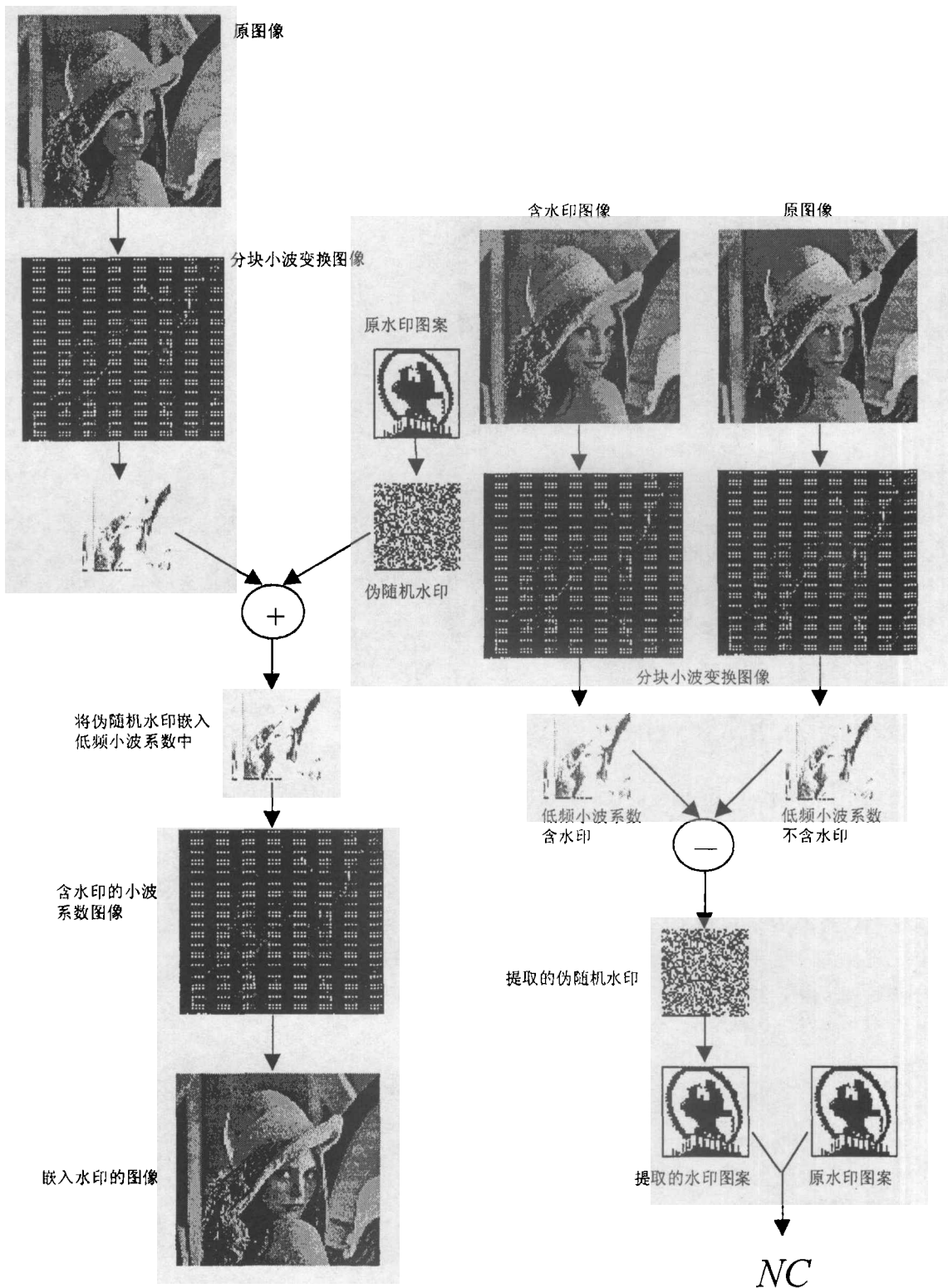


图 2 水印嵌入过程，其中 PSNR=85.5339dB

图 3 水印提取过程图

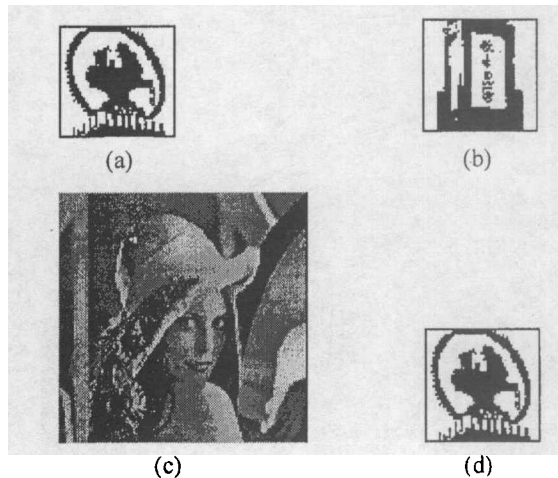


图4 嵌入二次水印后提取原水印
(a) 为一次水印图案, (b) 为二次水印图案, (c) 为含有水印 (a) 和 (b) 的图像, 信噪比 PSNR=65.5268dB, (d) 为在 (c) 中提取的一次水印图案, NC=1

可以很多, 所以一般不会影响第一次的水印, 即在 D'' 中也能提取水印 W 。若恰巧第二次嵌入水印和第一次嵌入水印的方法完全相同, 则二次水印的强度或大小要比一次水印小, 否则含二次水印的图像 D'' 就明显地被损坏而失去使用价值, 所以在 D'' 中仍能提取水印 W , 如图 4 所示。

关于版权争议问题, 假设版权所有者 A 在图像 D 上加载 A 的水印 W 得到含水印的图像 D' 并将其传播。盗版者 B 在得到 D' 后再加载 B 的水印 W_1 得到含二次水印的图像 D'' 将其传播, 并称 D'' 为 B 所有而 A 为盗版者。实际上, D'' 仍然归 A 所有。为了裁决这一争议, 仲裁机构需要有 A, B 的原图像 D, D' , 以及水印图案 W, W_1 和他们的提取方法。然后如下进行:

由于 A 的水印是按加性嵌入的, 所以, 按 A 的提取方法可在 D' 中提取 A 的水印 $W = D' - D$; 而在 D 和 D' 中均不含有 B 的水印 W_1 , 所以按 B 的提取方法在 D 中不可能提取 B 的水印 W_1 。若盗版者 B 的水印 W_1 和 W 相同且加载方法也相同, 但由于 $D - D' \neq W$, 所以在 D 中不能提取 W_1 。由此很容易断定版权归 A 所有, B 为盗版者。

若盗版者 B 在得到 D' 后加载 B 的水印 W_1 得到含二次水印的图像 D'' 作为 B 的原始图像, 再在 D'' 上用同样的方法加载水印 W_1 得到 D''' (即三次水印) 并将其传播。考虑到压缩等图像处理, 由于多次加载水印, 实际上 D''' 已损失了原图像的大部分信息而失去使用价值。所以一般不会发生这种情况。

5 实验及讨论

图 2 和图 3 分别给出了在 Lena 256×256 图像中嵌入水印和提取水印的过程。为了使含水印图像在一般的图像处理中不至于损失水印, 我们仍以 Lena 256×256 图像为例作如下实验。

5.1 有损压缩

图像的有损压缩是图像处理中最常见的一种操作, 一般的压缩不应丢失水印。图 5 所示的是用 EZW 算法^[9] 在不同压缩比下提取的水印。

5.2 图像的缺损

图像在传输或存储过程中可能会缺损部分信息, 在此情况下应尽可能保留水印信息, 即水印的稳健性要好。图 6 所示是含水印图像损失 1/4 的信息之后提取的水印。

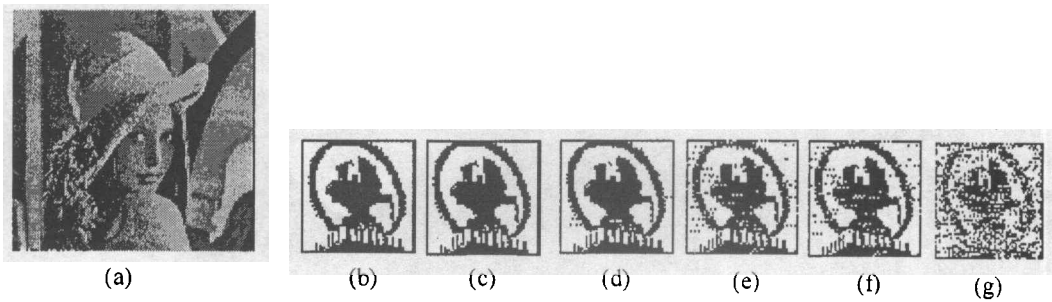


图 5 含水印图像在不同压缩比下的水印提取
 (a) 为含水印图像, $PSNR=77.4246\text{dB}$, (b) 为未经压缩提取的水印, $NC=1$,
 (c) 为压缩比是 5 及 $PSNR=43.5714$ 时提取的水印 $NC=1$,
 (d) 为压缩比是 6 及 $PSNR=40.3905$ 时提取的水印 $NC=0.9957$,
 (e) 为压缩比是 7 及 $PSNR=38.6502$ 时提取的水印 $NC=0.9524$,
 (f) 为压缩比是 8 及 $PSNR=34.7684$ 时提取的水印 $NC=0.9457$,
 (g) 为压缩比是 9 及 $PSNR=31.2752$ 时提取的水印 $NC=0.7737$

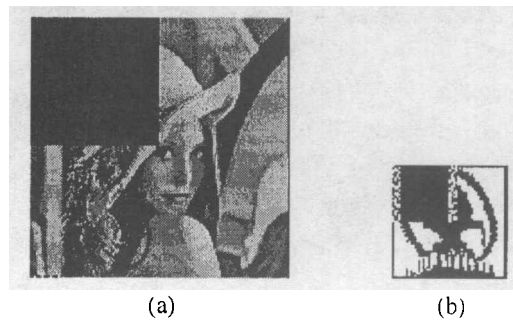


图 6 (a) 为含水印图像损失 $1/4$ 的信息, (b) 为提取的水印

如果我们知道图像缺损的可能性很大, 在嵌入水印时可将主图像分成 4 块, 将水印图案缩小为原来的 $1/4$, 在每一块中均按第 2 节方法加入水印, 这样含水印图像只要有 $1/4$ 部分就能提取水印, 如图 7 所示。

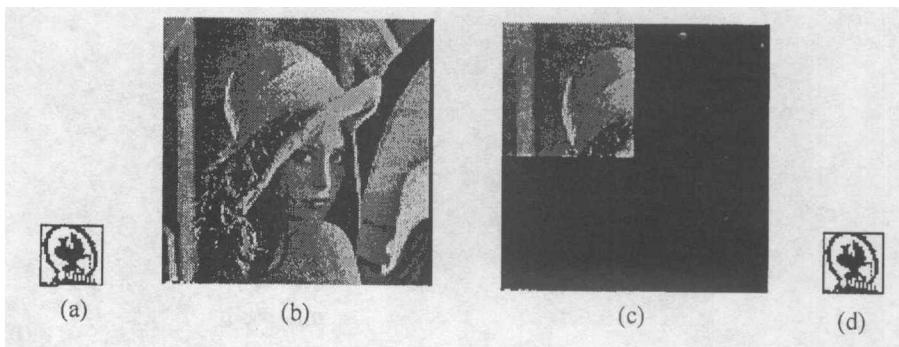


图 7 (a) 为原水印, (b) 为原图像分成 4 块而在每一块嵌入水印, $PSNR=85.5339\text{dB}$, (c) 为含水印图像只有 $1/4$ 的信息, (d) 为在 (c) 中提取的水印 $NC=1$

5.3 图像的抽取和内插

抽取和内插是图像缩放处理中最常用的操作，水印不应该在这种操作下丢失，而已有的水印嵌入方法无法满足这一要求^[1,2]。本文提出的水印嵌入方法能够较好地满足水印关于抽取和内插操作的稳健性要求。

若含水印图像是按行和列均为 2 : 1 进行了抽取，提取水印时相应地将原图像也按行和列为 2 : 1 抽取，对抽取后的这两个图像按块大小为 2×2 分别进行一次小波分解，由它们各自的 LL_1 组成 \hat{M}' 和 M ，伪随机水印就为 $\hat{W}' = \hat{M}' - M$ ，相应地有提取的水印 \hat{W} 。

若含水印图像是按行和列均为 4 : 1 进行了抽取，提取水印时相应地将原图像也按行和列为 4 : 1 抽取，抽取后的这两个图像就取为 \hat{M}' 和 M ，伪随机水印就为 $\hat{W}' = \hat{M}' - M$ ，相应地有提取的水印 \hat{W} ，如图 8 所示。

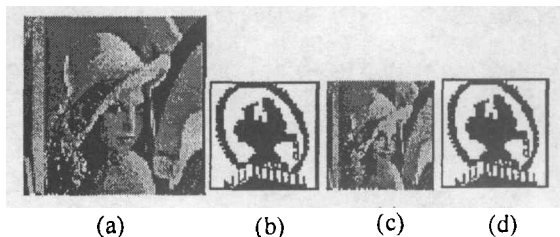


图 8 (a) 为含水印图像按行和列均为 2: 1 进行了抽取后的图像，(b) 为在 (a) 中提取的水印，NC=1，(c) 为含水印图像按行和列均为 4: 1 进行了抽取后的图像，(d) 为在 (c) 中提取的水印，NC=1

若含水印图像是按行和列均为 1 : 2 进行了内插，提取水印时相应地将原图像也按行和列为 1 : 2 内插，对内插后的这两个图像按块大小为 8×8 分别进行三次小波分解，由它们各自的 LL_3 组成 \hat{M}' 和 M ，伪随机水印就为 $\hat{W}' = \hat{M}' - M$ ，相应地有提取的水印 \hat{W} 。

若含水印图像是按行和列均为 1 : 4 进行了内插，提取水印时相应地将原图像也按行和列为 1 : 4 内插，对内插后的这两个图像按块大小为 16×16 分别进行四次小波分解，由它们各自的 LL_4 组成 \hat{M}' 和 M ，伪随机水印就为 $\hat{W}' = \hat{M}' - M$ ，相应地有提取的水印 \hat{W} ，如图 9 所示。

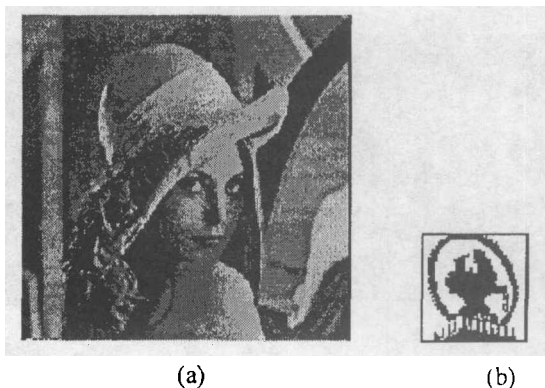


图 9 (a) 为含水印图像按行和列均为 1: 2 进行了内插后的图像，(b) 为在 (a) 中提取的水印，NC=1

6 结 论

本文提出了在图像中嵌入数字水印的方法, 其嵌入和提取过程是基于块的 DWT。通过数字水印技术可有效地防止盗版, 维护版权所有者的合法权益。理论分析和实验结果均证明了本文提出的水印嵌入方法是可行的和有效的。对通常的图像处理操作, 水印均具有一定的稳健性、隐蔽性和不可删除等特性。关于水印在图像不规则缩放等其它图像处理下的稳健性问题将是我們进一步研究的问题。

参 考 文 献

- [1] C. T. Hsu, J. L. Wu, Multiresolution watermarking for digital images, IEEE Trans. on Circuits and Systems II, 1998, CAS-II-45(8), 1097-1101.
- [2] C. T. Hsu, J. L. Wu, Hidden digital watermarks in images, IEEE Trans. on Image Processing, 1999, IP-8(1), 58-68.
- [3] I. J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton, T. Shamoon, Secure spread spectrum watermarking for multimedia, IEEE Trans. on Image Processing, 1997, IP-6(12), 1673-1686.
- [4] K. K. Wong, Adaptive watermarking, IEEE Trans. on Consumer Electronics, 1997, CE-43(4), 1003-1009.
- [5] 韦志强, 秦鹏, 欧阳宏彬, 基于小波域中视觉门限模型的数字水印技术, 东南大学学报, 1998, 28(1), 44-48.
- [6] 胡俊, 刘振华, 舒畅, 单向数字水印, 密码与信息, 1998, (2), 42-49.
- [7] 刘贵忠, 邸双亮, 小波分析及其应用, 西安, 西安电子科技大学出版社, 1992, 17-36.
- [8] 朱近康, 扩展频谱通信及其应用, 合肥, 中国科学技术大学出版社, 1993, 105-181.
- [9] J. M. Shapiro, Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients, IEEE Trans. on Signal Processing, 1993, SP-41(12), 3445-3462.

WAVELET-BASED DIGITAL WATERMARKS AND COPYRIGHT PROTECTION

Ma Shexiang Liu Guizhong Zeng Shaohua

(*Institute of Info. & Commun. Eng., Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

Abstract Digital watermarking is a new research topic about copyright protection in recent years. Watermarking is a technique for labeling digital picture by hiding secret information in the images. Sophisticated watermark embedding is a potential method to discourage unauthorized copying or attacking the images. This paper presents a technique of watermark embedding and extracting based on discrete wavelet transform of blocks in the image. Each pixel of a watermark is embedded in the wavelet coefficient of the middle and low frequency of a block in the images. Disputation about copyright can be settled down by using the watermark embedding technique presented in this paper. Both theoretical analysis and experimental results show that this technique is reasonable and satisfactory.

Key words Digital watermark, Copyright protection, Wavelet transform, Pseudorandom permutation

马社祥: 男, 1962 年生, 博士生, 主要研究方向为视频压缩, 图像处理和多媒体通信等。

刘贵忠: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为非平稳信号的表示和自适应信号处理等。

曾召华: 男, 1972 年生, 博士生, 主要研究方向为移动通信, 信号处理, 图像压缩编码等。