

基于小波系数块能量分析的自适应数字水印算法

朱兴力, 张家树

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

(cinlybei@yahoo.com.cn)

摘要:为增强水印的鲁棒性,提出一种基于小波变换的改进数字水印算法。该算法将宿主三级小波变换后的第三级细节子图分别分割成互不重叠的系数块,进而对各块能量进行统计分析以确定更适于水印嵌入的块,最后结合人类视觉系统的掩蔽特性,在所选块的最大系数上实现水印的自适应嵌入。理论分析与仿真结果表明应用本算法实现的水印具有更好的鲁棒性和不可见性。

关键词:数字水印;小波变换;块能量;视觉掩盖

中图分类号:TP309.7 **文献标识码:**A

Adaptive digital watermarking algorithm based on energy analysis of wavelet coefficients block

ZHU Xing-li, ZHANG Jia-shu

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: To enhance the robustness of watermark, an improved digital watermarking algorithm based on wavelet transform was proposed. The third level detail sub-images decomposed the original image using three levels DWT (Discrete Wavelet Transform) were divided into non-overlap blocks. Then the blocks, which were more adaptable to embed watermark, were selected by block energy analysis. At the end, combining with the properties of human visual system, the watermark was adaptively embedded into the largest coefficients which belonged to the selected blocks. Theoretical analysis and experiment results show that the watermark generated with the proposed algorithm is imperceptible and more robust.

Key words: digital watermarking; wavelet transform; block energy; visual masking

0 引言

鲁棒隐形水印作为数字产品版权保护新技术,需要满足两个最基本的要求:不可见性和鲁棒性。围绕这两个要求,国内外学者进行了广泛深入的研究并提出了许多算法,这些算法大致可分为:空间域法^[1]和变换域法^[2~5]。由于在变换域中嵌入的水印信号能量可以分布到空间域的所有像素上,更有利于保证水印的不可见性;另外,人类视觉系统(Human Visual System, HVS)的视觉特性在变换域可以更方便地结合到水印嵌入过程中,从而有利于水印鲁棒性和不可见性的提高,因此基于变换域的数字水印技术倍受人们关注。

在变换域,水印的嵌入位置和嵌入强度直接影响到水印的鲁棒性。为了很好地保证水印的鲁棒性,文献[3]认为水印应当嵌入到视觉系统感觉上最重要的分量上。为此,文献[5]在对标准 Lena 图像三级小波分解后的各个子图系数幅值进行统计分析的基础上,指出人类视觉系统感觉上最重要的分量是第三级细节子图中的大系数,进而将水印嵌入到这三个子图的分块最大系数上,较好地实现了水印不可见性和鲁棒性的统一。然而,是否分块最大系数均适合水印嵌入,或者子图中哪些块更适合于水印的嵌入,这需作进一步研究。

为此,本文进一步对宿主图像的小波系数分块能量及对应块中绝对值最大系数进行统计分析,结果表明,对角子图以及另外两个子图中的部分块并不适合水印的嵌入。在此基础上,提出一种基于小波系数块能量分析的自适应数字水印算

法。该算法只对第三级细节子图 HL3 和 LH3 进行分块,然后选取这两个子图相同位置上能量较大的块,并将水印嵌入到这些块中绝对值最大的小波系数上。在水印嵌入过程中,结合人类视觉系统的视觉掩盖特性自适应地调整嵌入的水印强度,从而进一步提高水印算法的鲁棒性。

1 基于块能量分析的自适应水印算法

1.1 块能量及块最大系数的统计分析

图像经一级小波分解后,将形成一个低频(近似)子图 LL1 和三个中高频(细节)子图 HL1、LH1 和 HH1;对 LL1 进行再分解,将会形成金字塔式的分解结构,图 1 为图像三级小波分解示意图。

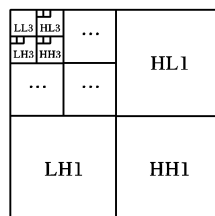


图 1 图像的三级小波分解及子图分块

虽然在图像三级小波分解后,人类视觉系统感觉上最重要的分量是第三级细节子图中的大系数^[5],将水印信息嵌入到这三个子图的分块大系数上能较好地实现水印不可见性和鲁棒性的统一。然而,小波分解后的第三级细节子图是否都适合水印的嵌入,或者子图中哪些块更适合于水印的嵌入。为了回答这

些问题,可采用对各子图的分块能量及其绝对值最大系数进行统计来确定更适合水印嵌入的子图或分块。其中,块能量的计算公式如下:

收稿日期:2005-10-08;修订日期:2005-12-15 基金项目:四川省青年基金资助项目(03ZQ026-033)

作者简介:朱兴力(1980-),男,四川西昌人,硕士研究生,主要研究方向:数字水印技术; 张家树(1965-),男,四川西充人,教授,博士生导师,主要研究方向:混沌信息工程学、现代信号与智能信息处理、通信理论与电子对抗技术。

$$E_{block} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{block}^2(i, j) \quad (1)$$

m, n 是块的大小; C_{block} 是各个块中的小波系数值; E_{block} 表示块能量。

首先对 512×512 的 Lena 图像进行三级小波分解, 并将第三级细节子图 HL3、LH3 和 HH3 分别分割成互不重叠的 4×4 系数块 (如图 1), 然后按 (1) 式计算各分块的能量 (取 $m = n = 4$), 图 2 为三子图相同位置上的块能量及对应块中绝对值最大系数的统计结果 (图中仅是从各个子图上随机选取的部分块)。

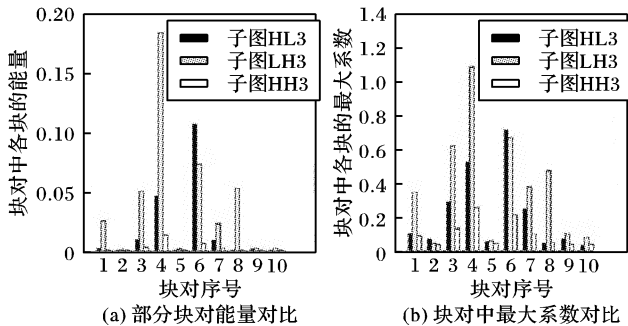


图2 三子图相同位置上的块能量及对应块绝对值最大的系数对比

对照图 2(a) 和 (b), 子图 HH3 中各块的能量及块中最大系数跟 HL3 和 LH3 中相同位置上的块能量和最大系数相比都普遍偏小; 另外从小波分解子图的重要性考虑, 在相同分辨率下, HH 的重要性最低, 不仅很容易在有损数据压缩中丢失, 而且低通滤波与噪声干扰等常见的操作对其也会造成较大的影响, 因而在水印嵌入过程中, 应将子图 HH3 排除在外。再分析 HL3 和 LH3 中相同位置上的块能量及对应块中绝对值最大系数的统计特性, 图 2(a) 显示出两个子图中均有部分块的能量很小, 这说明其中的系数幅值普遍较小, 从图 2(b) 也可看出对应块中最大系数偏小; 根据近年来兴起的基于小波多分辨率分解的图像压缩算法思想 (如文献 [6] 中所提出的嵌入式小波零树压缩编码方法), 这些块的系数很可能在图像压缩中被确定为视觉不重要系数而去除, 因而在进行水印嵌入时, 这些块也应当被排除在外。

1.2 基于块能量分析的水印算法描述

根据第 1.1 节的统计分析结果, 并结合 Weber 定律^[7] 选加的水印信号能量跟背景信号的幅值成正比, 本文提出一种基于小波系数块能量分析的自适应数字水印算法。即只选取子图 HL3 和 LH3 相同位置上能量较大的块, 然后将水印嵌入到所选块中绝对值最大的小波系数上; 同时, 为了在保证水印不可见的前提下, 尽可能地增强水印的局部嵌入强度, 以进一步提高水印的鲁棒性, 在嵌入时充分考虑了人类视觉系统的视觉掩盖特性, 使水印嵌入自适应于宿主图像。设宿主图像的大小为 $2^M \times 2^M$, 算法的实现步骤如下:

(1) 以高斯序列作为水印信号具有更好的鲁棒性^[3], 因而本文选用具有正态分布 $N(0, 1)$, 长为 L 的实数随机序列 W 作为水印信号。

$$L = \frac{2^{M-3} \times 2^{M-3}}{4 \times 4} = 2^{M-5} \times 2^{M-5}$$

$$W = \{w_i | i = 1, 2, \dots, L\}$$

(2) 对宿主图像进行三级小波分解, 并将第三级细节子图 (HL3、LH3) 分别分割成互不重叠、大小为 4×4 的系数块。

(3) 选取两个子图相同位置上能量较大的块, 并组织成水印嵌入块 $B_i, i = 1, 2, \dots, L$;

(4) 从 B_i 块中查找出绝对值最大的系数, 并记下其在相应块中的位置。

$$C_{\max}(x_i, y_i) = \max\{B_i\}$$

(5) 采用式 (2) 在绝对值最大的系数上进行水印的嵌入:

$$C'_{\max}(x_i, y_i) = C_{\max}(x_i, y_i) + \alpha \times [|C_{\max}(x_i, y_i)| + \beta \times C_{LL}(x^i, y^i)] \times w_i \quad (2)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, L, C_{LL}(x^i, y^i)$ 是能量较大块中绝对值最大的小波系数 $C_{\max}(x_i, y_i)$ 所对应的低频子图分量, 代表相应位置图像的背景亮度, α 和 β 则分别是水印嵌入强度的整体和局部控制因子, 对它们的详细讨论可参看文献 [5]。式 (2) 表明嵌入的水印强度与背景亮度及纹理强弱成正比, 符合人类视觉系统的视觉掩盖特性, 从而较好地实现了水印嵌入强度自适应于原始宿主图像。

(6) 对嵌入水印的细节子图和其他子图进行三级小波重构得到最终的水印图像。

1.3 水印的提取与检测

采用假设检验来对水印进行检测:

$$H_0: I^* = I + N \quad (\text{无水印})$$

$$H_1: I^* = I + W^* + N \quad (\text{有水印})$$

I 和 I^* 分别代表原始图像和待检测水印图像, W^* 为待提取的水印序列, N 为噪声。正确的假设通过计算 W^* 跟原始水印 W 之间的相关性得到。详细的水印检测步骤可参考文献 [5]。

检测到的水印 W^* 与原始水印 W 间的归一化相关系数定义为^[3,4]:

$$NC(W, W^*) = \frac{\sum_{i=1}^L w(i) w^*(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^L w^2(i)} \sqrt{\sum_{i=1}^L w^{*2}(i)}} \quad (4)$$

若 $NC(W, W^*) > Th$, 则判定被测试图像中含有水印 W , 否则没有水印 W 。对于阈值 Th 的确定, 应当同时考虑虚警概率和漏警概率。其值增大, 虚警概率减小而漏警概率增大; 反之则虚警概率增大而漏警概率减小。由于采用归一化相似度对算法实现的水印性能进行客观评估, 因此水印长度不同不会影响最终的实验比较。

2 仿真结果分析

为验证本文方法的有效性, 以下对水印的鲁棒性和不可见性进行了实验仿真, 并在相同的条件下, 将其与文献 [5] 进行了比较。在实验比较中用了多种不同的图像进行测试, 但限于篇幅, 这里只给出了大小为 512×512 、像素值介于 $[0, 1]$ 之间的 Lena 宿主图像的比较结果, 如图 3 ~ 图 5 和表 1 所示。

与文献 [5] 类似, 采用服从正态分布 $N(0, 1)$ 的实数序列作为水印, 并以归一化相似度 (NC) 对算法实现的水印性能进行评估; 另外, 对水印图像的质量除了采用主观评估外, 还以峰值信噪比 (PSNR) 对其进行客观评价。PSNR 的计算如下:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left[\frac{M \times N \times \max(I)^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I - I^*)^2} \right] \quad (5)$$

I 表示原始宿主图像, I^* 表示水印图像, M, N 为图像的大小, $\max(\cdot)$ 求最大值。

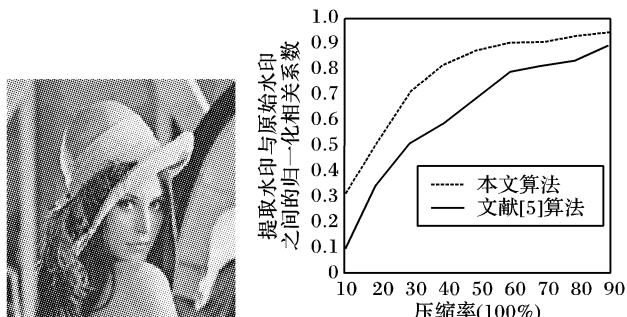
图 3(b) 显示了通过本文算法实现的水印图像, 跟原始图

像图 3(a) 相比, 人眼难以区别两幅图像之间的不同, 说明本文算法实现的水印是主观不可见的, 此时水印图像的 $PSNR = 52.224$, 提取水印跟原始水印间的 $NC = 1$ 。图 4 显示了本文算法所实现水印对 JPEG 压缩的鲁棒性。图 4(a) 给出了水印图像经压缩率为 10% 的 JPEG 压缩后的重建图像, 其已明显失真, 此时的 $PSNR = 30.036$, 可是提取的水印跟原始水印之间的 NC 值为 0.4459。这表明在通常允许的失真范围内, 本文算法仍然能够可靠的检测出水印的存在。从图 4(b) 给出的抗 JPEG 压缩能力比较还可知: 随着压缩率的减小 NC 值均逐渐降低, 但是在相同的压缩率下, 本文算法的 NC 值远远高于文献[5], 说明本文算法实现的水印具有更好的抗 JPEG 压缩能力, 这跟第 2.1 节分析的结果一致。



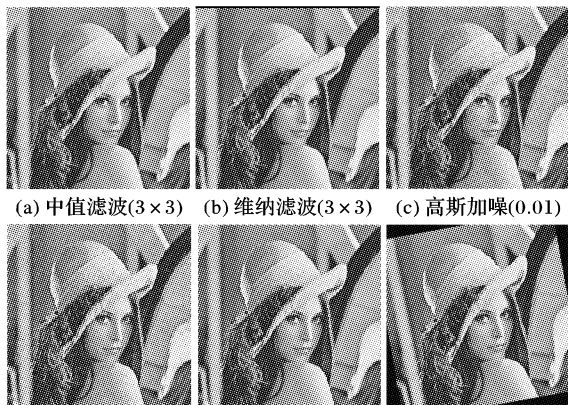
(a) 原始图像 (b) 水印图像

图 3 水印不可见性测试



(a) JPEG 压缩(10%) (b) JPEG 压缩性能比较

图 4 水印抗 JPEG 压缩的鲁棒性测试



(d) 椒盐加噪(0.02) (e) 比例缩放(25%) (f) 图像旋转(10°)

图 5 对常见的图像处理及几何操作的鲁棒性测试组图

图 5(a) ~ 图 5(f) 分别是对水印图像进行各种攻击得到的组图。其中, 对图像的旋转攻击使得图像坐标信息受到严重破坏, 按文献[8]的方式, 在水印提取之前, 先对遭受旋转攻击的水印图像进行旋转恢复后再提取水印。表 1 记录了水印图像遭受各种攻击后的 $PSNR$ 值和提取水印跟原始水印之间的 NC 值。从图 5 和表 1 中 $PSNR$ 一栏可以看到, 水印图像遭受各种攻击后, 主观质量明显退化, 并且在相同攻击下, 本文算法和文献[5]的算法所实现的水印图像质量退化相近; 但是, 从对应的 NC 值来看, 本文算法具有更高的 NC 值。从

表 1 的最后两行还可以看到, 本文算法较文献[5]的算法所实现水印对常见的几何操作具有更好的鲁棒性。

表 1 对水印图像进行各种攻击的性能测试比较

| 攻击类型 | PSNR/dB | | NC | |
|-------------------|---------|---------|--------|---------|
| | 本文算法 | 文献[5]算法 | 本文算法 | 文献[5]算法 |
| JPEG 压缩 10% | 30.036 | 30.03 | 0.4459 | 0.2735 |
| 中值滤波 3×3 | 35.03 | 35.002 | 0.8185 | 0.6668 |
| 中值滤波 5×5 | 30.875 | 30.871 | 0.3858 | 0.2231 |
| 维纳滤波 3×3 | 37.182 | 37.128 | 0.8823 | 0.7435 |
| 维纳滤波 5×5 | 34.245 | 34.221 | 0.5378 | 0.3703 |
| 高斯加噪(0, 0.01) | 19.689 | 19.686 | 0.2903 | 0.2442 |
| 椒盐加噪(0.02) | 22.063 | 22.121 | 0.3199 | 0.2801 |
| 比例缩放(25%) | 32.387 | 32.372 | 0.7179 | 0.5098 |
| 10° 旋转 | 17.065 | 17.065 | 0.2375 | 0.1938 |

以上的实验比较结果, 充分说明本文算法实现的水印在不可见的前提下, 对常见图像处理和几何操作具有更好的鲁棒性。

3 结语

本文在对宿主图像小波系数的分块能量及对应块中绝对值最大系数进行统计分析的基础上, 提出一种基于小波系数块能量分析的自适应数字水印算法以提高水印的鲁棒性。通过对宿主图像三级小波分解后的第三级细节子图分块, 并进行块能量及对应块中绝对值最大系数的进一步统计分析后, 摒弃子图 HL3 和 LH3 相同位置上能量较小的块及对角子图 HH3, 即只选取子图 HL3 和 LH3 相同位置上能量较大的块, 进而将水印嵌入所选块中绝对值最大的小波系数上, 在一定程度上提高了水印的鲁棒性; 另外, 在确定水印嵌入强度时, 充分利用人类视觉系统的掩盖特性, 在满足水印不可见的前提下, 合理分配水印信号的能量, 增强局部嵌入水印分量的强度, 从而进一步提高了水印的鲁棒性。理论分析和实验比较一致, 充分证明了本文算法实现的水印对常见的图像处理和几何操作具有更好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] NIKOLAIDIS N, PITAS I. Robust image watermarking in the spatial domain[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 385 - 403.
- [2] PODILCHUK C, ZENG W. Image-adaptive watermarking using visual models[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4): 525 - 539.
- [3] COX IJ, KILLIAN J, LEIGHTON FT, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(12): 1673 - 1687.
- [4] 张家树, 田蕾. 一种新的基于密钥的混沌数字水印方法[J]. 通信学报, 2004, 25(8): 96 - 101.
- [5] 练秋生, 卢耀斌, 王成儒, 等. 基于小波分析的自适应数字水印算法[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(6): 617 - 619.
- [6] SHAPIRO JM. Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3445 - 3462.
- [7] GONZALEZ C, WINTZ P. Digital Image Processing[M]. 2nd Edition. Addison-Wesley Publishing Co/IEEE Press, 1987.
- [8] ZHAO D, CHEN G, LIU W. A chaos-based robust wavelet-domain watermarking algorithm[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, (22): 47 - 54.