

一种基于小波变换的自适应图像水印算法

李 娜¹, 郑晓势¹, 李士锋²

(1. 山东省计算中心, 济南 250014; 2. 山东移动通信规划设计研究院有限公司, 济南 250021)

摘 要: 在离散小波变换的基础上, 提出了一种自适应的新数字水印算法, 将伪随机二值序列作为水印嵌入灰度图像中, 在检测端需要原始宿主图像。该算法具有以下特点: 在水印嵌入时利用了小波变换域系数的均值, 可广泛地适用于各种灰度图像; 针对每幅图像, 都可调节水印的嵌入深度, 找到隐形性和鲁棒性的最佳折中。实验结果表明, 该算法既实现了水印的隐形性, 又对常见的图像处理操作具有很强的鲁棒性。

关键词: 数字水印; 离散小波变换; 鲁棒性; 宿主图像

An Adaptive Image Watermark Algorithm Based on Wavelet Transform

LI Na¹, ZHENG Xiaoshi¹, LI Shifeng²

(1. Shandong Computer Science Center, Jinan 250014; 2. Shandong Mobile Communication Planning & Designing Academy Co. Ltd, Jinan 250021)

【Abstract】 An adaptive image watermark algorithm based on wavelet transform is proposed. It adds pseudorandom sequence onto gray image and the host image is required for detecting the watermark. The algorithm has two characteristics: it is adapted to various gray images owing to using the mean value of selected coefficients; The appropriately embedded depth can be found for every gray image. Experiment results show that the proposed algorithm is invisible and robust against common image processing.

【Key words】 Digital watermark; Discrete wavelet transform; Robust; Host image

随着网络通信技术的发展, 大量数字信息以非法途径传播, 版权保护问题已引起多方关注。数字水印技术作为解决这一难题的有效手段, 成为领域内的研究热点^[1,2]。1997年Cox等人^[3]提出水印应该放在对视觉最重要的分量上(对应于频域中的低频系数), 此观点得到了大部分学者的赞同。近年来, 图像数字水印的研究取得了很大进展^[4-6]。

通常数字水印技术应该具备以下两条最基本的性质: 隐形性和鲁棒性。本文提出了一种基于离散小波变换的自适应图像水印新算法, 本算法在三级小波变换的 HL 子图中嵌入水印, 同时实现了水印的隐形性和鲁棒性; 算法中利用小波系数的均值, 实现了广泛适用性。同时针对不同的宿主图像, 还可以确定最佳的水印嵌入深度范围。

1 离散小波变换

小波变换是对信号逐步进行多尺度的细化, 随着尺度由大到小的变化, 从各尺度上由粗到精聚焦信号的各个细节^[7]。

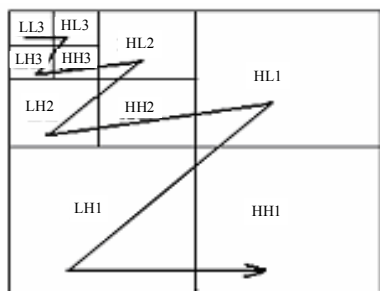


图1 离散小波分解示意图

对输入图像3次小波分解, 按能量集中程度由大到小排序, 如图1(带箭头的折线)。既要考虑隐形性又要尽量提高

鲁棒性, 折中的办法是在中低频系数中嵌入水印。又因为人眼对水平方向要比垂直方向敏感, 本算法最终选取三级小波分解 HL 区域作为水印嵌入的位置。

2 水印嵌入与提取算法

2.1 水印的嵌入算法

水印的嵌入算法分为以下4个步骤:

(1)对原始图像进行三级小波分解, 选取HL₃区作为水印嵌入的部分。

在小波分解时, 小波基的选取很重要, 选取不当会造成算法实现困难甚至实现不了后果。文献[8]指出, Daubechies9/7与7/5, 最适合于数字水印算法。本算法最终选取 Daubechies9/7 小波基。

(2)生成伪随机二值序列 $w(i)$ 作为水印, 取值为0或1。

(3)一般来说, 在LL低频区嵌入以公式 $F'(u, v) = F(u, v)(1 + \alpha w)$ 为佳, 但在HL高频区域使用该公式很容易引起小波重构时系数范围越界^[7]。因此采用下面的公式:

$$F'(u, v) = F(u, v) + \alpha w \quad (1)$$

其中 $F(u, v)$ 为宿主图像的小波系数, α 为拉伸因子。为了使算法对不同的灰度图像有广泛的适用性, 取 $\alpha = \beta |m|$, 其中 m 为要嵌入水印部分的所有系数的均值, β 为修正因子, 代表

基金项目: 山东省中青年科学家奖励基金资助项目(2004BS01005)

作者简介: 李 娜(1981-), 女, 硕士, 主研方向: 信息安全, 数字水印技术, 数字图像处理等; 郑晓势, 副研究员; 李士锋, 工程师

收稿日期: 2005-10-27

E-mail: lina@keylab.net

嵌入深度。

(4)最后对嵌入水印后的图像进行小波重建,形成小波处理后的水印图像。

2.2 水印的提取算法

水印提取算法是嵌入算法的逆过程,需要原始图像。具体步骤如下:

对待检测图像进行3级小波分解,得到其在HL区的小波系数 F' ,适当设置一个阈值 T ,将 F' 与宿主图像在HL₃区的小波系数 F 进行比较。若 $|F - F'| \div \alpha < T$,则该待检测水印值取1,否则,取0。

这样,就得到待检测水印序列 w' (若被剪切,则补0),结合原始水印序列 w ,在概率论假设检验理论的基础上,利用下面的公式计算相似度:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N w(i)w'(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [w'(i)]^2}} \quad (2)$$

其中 N 表示水印序列的长度。预设一合适门限值 ρ^* ,若计算所得系数 ρ 大于 ρ^* ,则判定被检测图像含有水印。

一般取 $\rho^*=5$,由于误判概率是服从高斯分布的随机变量,因此误判概率只有 $\frac{1}{2\pi} \int_5^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \approx 1 \times 10^{-5}$,足以满足判定需求。

2.3 本算法的特点

相较于其他的小波域数字水印算法,本文提出的算法有两个特点:(1)由于拉伸因子 α 的选择建立在小波系数均值 m 的基础上,因此算法具有自适应性,可广泛适用于不同的灰度图像。(2)调节修正因子 β ,可以调节水印嵌入的深度,从而寻求隐形性和稳健性的最佳折中。

3 抗攻击实验结果

为了评价图像质量,定义峰值信噪比:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\frac{1}{N \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [f(i,j) - f'(i,j)]^2} \quad (3)$$

其中 N 为图像尺寸, $f(i,j), f'(i,j)$ 分别为原图像和待检测图像。PSNR值越大,说明待检测图像与原图像相比,其质量越好。PSNR 48dB代表图像质量极好,根本感觉不出干扰;PSNR值在35dB~48dB之间属于良好,在29dB~35dB之间属于可以接受的范围,临界点是25dB,低于临界值,说明图像已产生令人讨厌的明显干扰。

本文选用标准Lena图像等4幅图像作为原始宿主图像,对于其它图像有类似结果。算法中取 $\beta=10, T=0.5$ 。水印嵌入前后对比效果,如下面4组图像所示(图2~图5)。

从这组图中可以看出,本文提出的水印算法对选取的4幅图像均有很好的嵌入效果。实验可知,其他的灰度图像也有类似效果。其中主要原因就是,拉伸因子 α 的选择建立在小波系数均值 m 的基础上,因此算法具有自适应性。同时,各水印图像经人眼看来和原图几乎没有差别,并且它们的PSNR值均大于35dB,说明算法成功实现了水印嵌入的隐形性。如果针对个别的宿主图像,想进一步增强隐形性(如PSNR提高到48dB以上),则需要调节修正因子 β ,降低水印的嵌入深度。

实验中选取了4种图像处理操作(加入高斯噪声、维纳滤波、60倍率的小波压缩、32×32的块剪切),对4幅水印图

像进行了攻击,结果如表1。



(a)原始Lena图像 (b)添加水印后(PSNR=55.35dB)

图2 Lena图像



(a)原始Clock图像 (b)添加水印后(PSNR=59.01dB)

图3 Clock图像



(a)原始遥感图像 (b)添加水印后(PSNR=44.70dB)

图4 遥感图像



(a)原始Table图像 (b)添加水印后(PSNR=39.08dB)

图5 Table图像

表1 攻击后的各水印图像的PSNR值和相关系数 ρ 对比

各个图像	Lena 图像		Clock 图像		遥感图像		Table 图像	
	PSNR (dB)	($\times 10^3$)	PSNR (dB)	($\times 10^3$)	PSNR (dB)	($\times 10^3$)	PSNR (dB)	($\times 10^3$)
各种攻击								
加入高斯噪声	23.71	1.97	24.23	1.40	24.00	3.13	24.09	11.1
维纳滤波	29.65	1.97	32.57	1.71	21.86	2.45	29.68	10.4
60倍小波压缩	24.19	1.94	26.71	1.65	18.17	2.92	24.63	12.1
32×32块剪切	28.72	1.47	18.80	0.85	23.55	1.87	25.27	10.9

分析表1,在受到攻击以后,各PSNR值下降明显,有的甚至降到临界点25dB以下,说明图像质量遭到破坏,但各相关系数 ρ 基本都在 10^3 数量级(只有Clock图剪切后例外),远大于判别门限 $\rho^*=5$,即算法具有很强的鲁棒性。另外, ρ 值不仅跟攻击(类型、强弱等)有关,还和宿主图像自身有关。如Table图像 ρ 值均在 10^4 数量级,抗攻击效果最好。而Clock图像的抗剪切能力很差,被剪切时, ρ 值下降到 10^2 数量级。

文献[9]中的水印算法与本文类似,将二者实验结果作比较列表(表2)。可以看出,文献[9]不抵御小波压缩,但抗剪切性较好。整体上,本算法经各种攻击后值较大,且变化

较小(图6),综合鲁棒性更好,这也得益于通过小波系数的均值确定拉伸因子。

表2 本文算法和文献[9]算法实验结果对比

	水印图像			加入高斯加噪		维纳滤波		60倍小波压缩		剪切32×32块	
	PSNR(dB)	PSNR(dB)	($\times 10^3$)	PSNR(dB)	($\times 10^3$)	PSNR(dB)	($\times 10^3$)	PSNR(dB)	($\times 10^3$)	PSNR(dB)	($\times 10^3$)
本文算法	55.35	23.71	1.97	29.65	1.97	24.19	1.94	28.72	1.47		
文献[9]	51.78	23.65	1.04	29.62	1.56	24.19	-0.77	28.70	3.24		

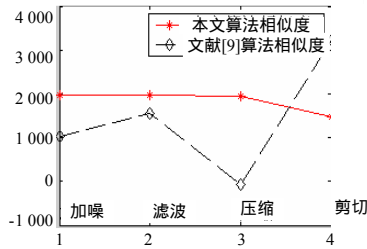


图6 相似度 ρ 值比较曲线

4 水印嵌入深度分析

4.1 减小水印深度

在标准Lena图像的算法中,逐渐减小 β 值,也即减小水印嵌入的深度。 β 值越小,越利于水印的隐形,图像质量不再需要关注,将鲁棒性指标各 ρ 值列表(表3)。

表3 逐渐减小 β 值后的各相关系数 ρ 对比

$\beta\rho$	10 ($\times 10^3$)	5 ($\times 10^3$)	1	0.5	0.1	0.05	0.03	0.02	0.01
加噪	1.97	1.04	224	108	23.0	11.6	7.01	4.70	2.35
滤波	1.97	0.91	209	113	22.1	11.0	6.65	4.55	2.23
压缩60倍	1.94	1.02	220	113	22.7	11.2	6.75	4.61	2.25
剪切	1.47	0.24	13.7	8.49	1.84	-	-	-	-

随着 β 减小, ρ 也减小,除剪切操作以外,其他攻击阈值 $\rho^*=5$ 都出现在 $\beta=0.02\sim 0.03$ 之间。但剪切操作破坏水印提取的同步性,和其他3种攻击有很大区别,其 ρ 值下降迅速。对其他3幅图像做相同实验发现,结果和Lena图像类似,只是阈值 $\rho^*=5$ 出现时 β 值的范围稍有差别。

基于以上分析, β 值下限的选取应保证 ρ 值在 2×10^2 以上(已远大于阈值 $\rho^*=5$)。

4.2 增大水印深度

在4幅实验图像的算法中逐渐增大 β 值,即增大水印的嵌入深度, β 值越大,越利于水印的鲁棒性。此时需要关注水印的隐形性。计算各水印图像的质量指标PSNR值列表(表4)。

随着 β 的增大,PSNR值逐渐下降,图像逐渐出现斑点和模糊现象。对同一个 β 值,不同图像的PSNR值差别较大。因此在调节水印嵌入深度的时候需要针对每幅图像精确进行。 β 值上限的选取应保证PSNR值大于35dB(图像质量良好的最低值)。

表4 逐渐增大 β 值后各PSNR值的对比

PSNR(dB)	$\beta=10$	$\beta=20$	$\beta=30$	$\beta=40$
Lena图像	55.35	49.82	46.05	43.27
Clock图像	59.01	52.91	49.38	47.30
遥感图像	44.70	39.14	34.94	32.67
Table图像	39.08	32.62	29.25	26.99

综合各表分析,如果不讨论剪切操作,4幅图像的最佳折中范围的交集很大。但受到剪切攻击时,需要针对每个图像的不同情况寻求最佳折中点。例如,攻击中包含剪切时,LENA图像的最佳折中范围在 $\beta=10\sim 20$ 之间。

5 结论

本文提出了一种基于离散小波变换的自适应图像水印新算法,在三级小波变换的HL子图中嵌入水印,算法既实现了水印的隐形性,又对常见的图像处理操作都具有很强的鲁棒性。由于嵌入的水印是伪随机二值序列,可方便地推广成二值图像嵌入灰度图像的自适应算法。分析实验结果得出3点结论:(1)鲁棒性指标相关系数 ρ 值的大小,除了和攻击有关外,受宿主图像自身特性影响也很大。(2)剪切操作对鲁棒性破坏较大。如果不讨论剪切操作,所有图像的隐形性和鲁棒性的最佳折中范围均较大。但若受到剪切攻击时,需针对每个图像调解 β 值寻求最佳折中范围,甚至折中点。(3)折中范围的上下门限值,也跟图像本身特点有关。具体来说, ρ 值的大小和折中的门限值,跟什么特性(如频谱特征、纹理特征等)有关,关系如何,哪些图像更适合于嵌入水印,这些问题还有待下一步的研究。

参考文献

- 1 Lu C S, Liao H Y M. Multipurpose Watermarking for Image Authentication and Protection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(10): 1579-1592.
- 2 Cox I J, Miller M L. Watermarking Application and Their Properties[C]. Proc. of Int'l Conf. on Information Technology: Coding and Computing, 2000: 27-29.
- 3 Cox I J, Kilian J, Leighton T, et al. Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.
- 4 Zeng W, Liu B. A Statistical Watermark Detection Technique Without Using Original Images for Resolving Rightful Ownerships of Digital Images[J]. IEEE Trans. Image Processing, 1999, 8(11): 1534-1548.
- 5 Hernandez J R, Amado M, Gonzalez F P. DCT-domain Watermarking Techniques for Still Images: Detector Performance Analysis and a New Structure[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2000, 9(1): 55-68.
- 6 Hernandez J R, Gonzalez F P. Statistical Analysis of Watermarking Schemes for Copyright Protection of Images[J]. Proc. of the IEEE, 1999, 87(7): 1142-1166.
- 7 黄达人, 刘九芬, 黄继武. 小波变换域图像水印嵌入对策和算法[J]. 软件学报, 2002, 13(7): 1290-1297.
- 8 刘九芬, 黄达人, 胡军全. 数字水印中的双正交小波基[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 41(4): 1-5.
- 9 孔祥维, 刘雨. 一种自适应数字图象水印算法[C]. 第二届信息隐藏研讨会论文集, 北京, 2000-06: 57-59.