

基于小波包变换和离散余弦变换的双水印算法

李新娥 王珂 崔艳秋

(吉林大学通信工程学院, 长春 130025)

摘要 为了使水印具有更强的鲁棒性和更广泛的适用性,提出了一种基于小波包变换(WPT)和离散余弦变换(DCT)的双水印算法。该算法是在WPT域和DCT域,结合人眼视觉特性(HVS)在宿主图像小波包分解的高低频带,选择不同的方法分别嵌入一个水印,由于双水印充分利用了小波包高低频域的不同抗攻击能力和DCT域的聚能、去相关能力,从而增强了算法的鲁棒性。仿真实验表明,该双水印算法不仅具有较强的鲁棒性和不可视性,并有一定的水印添加容量和更广泛的适用性。

关键词 数字水印 小波包变换 离散余弦变换 人眼视觉特性

中图分类号: TP309.7 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)01-0061-07

A WPT and DCT Based Bi-watermarking Algorithm

LI Xin-e, WANG Ke, CUI Yan-qiu

(College of Telecommunication Engineering, Jilin University, Changchun 130025)

Abstract A bi-watermarking algorithm basing on wavelet packet transform(WPT) and discrete cosine transform(DCT) is proposed in this paper. With the human visual system(HVS) in the domain of WPT and DCT, the algorithm adopts different methods to insert one watermark in the low frequency and high frequency of the host image wavelet packet decomposition(WPD) respectively. Experimental results show that the algorithm possesses the following advantages. Embedding the watermarks in the low and high frequency of the host image WPD improves the watermark resistance to different attacks. Considering the DCT energy compression ability and the ability of ridding correlation, the use of DCT in the lowest frequency band of the WPD enhances the watermark robustness and invisibility. Two watermarks embedded in the host image not only increase the watermark capacity, but also improve the serviceability of the algorithm.

Keywords digital watermark, wavelet packet transform, discrete cosine transform, human visual system

1 引言

目前,图像数字水印算法主要基于空域、变换域、压缩域、生理模型、抗几何攻击等多方面。比较常用的是基于离散余弦变换^[1-3]和离散小波变换^[4-7]的水印算法,这两种数字水印算法具有不同的特点,而具有良好时、频局部化特性的小波变换域水印算法则更是国内外学者的研究主流。

文献[1~3]算法的特点是充分利用了离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)的实变换特性、能量压缩能力和去相关能力,先将宿主图像的主

要信息集中到最少的低频系数上,然后在不同频段系数上嵌入水印。由于水印嵌入到低频系数上虽然鲁棒性好,但容易使图像产生较大的失真,而嵌入到高频系数上虽然不可视性好,但水印容易被压缩或低通滤波操作去掉,因此,一般算法都考虑把水印嵌入到中频系数上,即在鲁棒性和不可视性之间进行折中。

文献[4~7]算法的特点是利用小波分解的局部特性和多尺度分析的特性来对原始宿主图像的低频子带进行进一步分解,再结合人眼视觉(human visual system, HVS)特性把水印嵌入到不同层次的低频系数上。由于在低频系数嵌入水印不会提高噪

收稿日期:2005-09-19;改回日期:2005-11-24

第一作者简介:李新娥(1976~),女,工程师。1998年获吉林工业大学学士学位,现为吉林大学通信工程学院硕士研究生。主要研究方向为数字水印技术。E-mail: amylxe@sohu.com

声水平,而且对低通滤波、有损压缩等具有强的鲁棒性,但对 γ 校正、对比度及亮度调节等却比较敏感,同时由于在高频系数中嵌入水印对低通滤波和有损压缩的鲁棒性较弱,但对 γ 校正、对比度及亮度调节等却有很好的鲁棒性,所以,仅仅在小波域低频系数中嵌入水印具有以下局限:(1)由于水印嵌入位置只利用了小波分解的低频区,水印容量有限,因此目前的水印算法大多局限于小水印容量,否则不可视性差;(2)不能充分利用高频系数不同于低频系数的抗攻击能力来提高算法的鲁棒性;(3)水印算法在处理 Baboon、Flower、卫星遥感之类的纹理图像时,鲁棒性和不可视性不甚理想。

研究表明,人眼视觉特性有以下性质^[1,8]:(1)人眼对高频区以及对角方向的噪音不敏感;(2)人眼对中等灰度最为敏感,而对低灰度和高灰度不敏感;(3)人眼对图像平滑区的噪音敏感,而对纹理丰富区域的噪音不敏感;(4)文献[1]指出,根据 HVS 特性,水印信号应该嵌入到载体数据中的对人感知最重要的部分。

本文提出一种基于小波包变换和离散余弦变换的双水印算法。本文算法具有以下特点:(1)可以结合人眼视觉特性和小波高、低频水印两者的互补优点,以便选择合适的小波包高低频子带嵌入水印信息,这样不仅可以得到鲁棒性较高的水印,而且可在保证水印不可视性的前提下,提高水印的嵌入容量;(2)提出了基于 WPT (wavelet packet transform) 和 DCT 的复合水印算法,由于其在小波包低频子带嵌入水印时结合了 DCT 算法^[6],并充分利用了 WPT 多分辨率分析和 DCT 聚能、去相关能力,从而使得水印具有更好的抗攻击能力和安全性;(3)在小波包的高、低频域分别嵌入一个水印,以保证水印图像

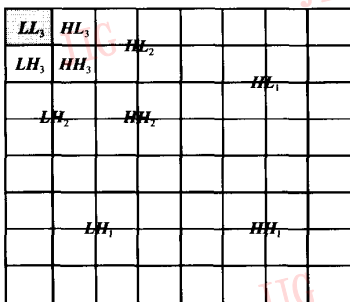
受到不同攻击后仍能从高频或低频子带中提取一个比较理想的水印,这样不仅增强了水印算法的鲁棒性,而且具有更好的适用性。

2 基于 WPT 和 DCT 的双水印算法

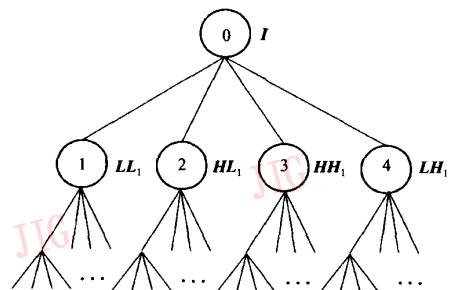
2.1 图像的小波包分解

通过一级小波变换,原始图像被分解为 4 个子带图像(见图 1,图 1(b)中所标注的数字 0,1,2,3,4 是相应各级子带图像在树中的结点值),即水平和垂直方向的低频子带图像 LL_1 ,水平方向的高频和垂直方向的高频子带图像 LH_1 ,水平方向的高频和垂直方向的低频子带图像 HL_1 ,水平和垂直方向的高频子带图像 HH_1 。若分别对 4 个子带图像再进行进一步小波分解,又可得到各自更低分辨率的 4 个子带图像。如此反复,可对数字图像进行多级小波包分解。图像的 L 级小波包分解图包括一个逼近子图(图 1(a)中阴影区)和若干细节子图(图 1(a)中非阴影区),其中细节子图是图像的高频区,代表图像的边缘及纹理部分,根据人眼视觉特性,在这些地方嵌入水印,人眼不易察觉,其虽可以提高水印的不可视性,但这样的水印容易在图像有损压缩等图像处理中产生信息的丢失;逼近子图是图像的低频部分,由于其集中了图像的大部分能量,因此在低频部分嵌入水印不易丢失,这虽可以提高水印算法的鲁棒性,但低频部分代表图像的平滑区域,这部分的改变极易影响图像质量。

所以,根据上述思想,结合小波包高低频域的不同特征,本文算法首先把细节子图再进一步划分出高频带区域和低频带区域;然后在细节子图的低频带区域的纹理区嵌入较多水印信息,而保持高频带



(a) 小波包分解示意图



(b) 小波包分解树型图

图 1 $L(L=3)$ 级小波包完全分解

Fig. 1 Three-level wavelet packet decomposition(WPD)

区域的小波系数不变,这样就可以提高高频部分的鲁棒性;最后对逼近子图做离散余弦变换,并利用 DCT 的聚能和去相关作用,使逼近子图的图像信息进一步集中到少数低频 DCT 系数中。根据文献[1]的思想,将水印信号嵌入到载体数据中的对人感知最重要的部分,也就是将较少水印信息叠加到 DCT 域幅值最大的前 K 个系数上(不包括直流分量),这部分通常为图像的低频分量。

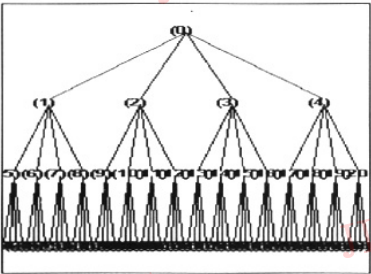
2.2 水印嵌入算法

设宿主图像为 256 级灰度图像 $I = \{g(i, j), 0 \leq i < M, 0 \leq j < N\}$, $g(i, j)$ 代表宿主图像第 i 行、第 j 列像素的灰度值。水印信号 $W = \{w_i, 0 \leq i < K\}$ 是由具有高斯正态分布 $N(0,1)$ 的随机实数序列构成。

21	22	25	26	37	38	41	42
24	23	28	27	40	39	44	43
33	34	29	30	49	50	45	46
36	35	32	31	52	51	48	47
69	70	73	74	53	54	57	58
72	71	76	75	56	55	60	59
81	82	77	78	65	66	61	62
84	83	80	79	68	67	64	63

(a) 小波包分解示意图

- (1) 水印序列生成
将由密钥 S 产生的高斯正态分布的伪随机实数序列作为水印 $W = \{w_i, 0 \leq i < K\}$ 。
- (2) 宿主图像的小波包分解
对宿主图像进行 3 级完全小波包分解,第 3 级分解图包括一个逼近子图和 63 个细节子图,图 2(a)中所标注的数字是相应子图在图 2(b)分解树型图中的结点值。
- (3) 子带选择
对宿主图像中由 3 层小波包完全分解得到的各细节子带进行有目的选择和“融合”,只保留逼近子带和高频子带的较低频带区域,即形成如图 3 所示的新的小波包分解示意图和小波包分解树型图。

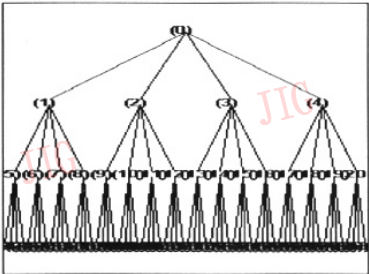


(b) 小波包分解树型图

图 2 宿主图像的小波包完全分解
Fig. 2 Three-level WPD tree of the host image

21	22	25	26	37	38		
24	23	28	27	40	39		
33	34	29	30				
36	35	32	31				
69	70			53	54		
72	71			56	55		

(a) 小波包分解示意图



(b) 小波包分解树型图

图 3 新的小波包分解
Fig. 3 Selected WPD sub-bands tree

(4) 逼近子带水印嵌入
嵌入水印时,首先对宿主图像的三级逼近子带小波包系数做 DCT 变换,然后在 DCT 域幅值最大的前 K 个系数 $X_i^{\max}$ ($0 \leq i < K$) 上嵌入整个水印序列(不包括直流分量),并保持其他 DCT 系数不变。嵌入公式如下:

$$\left. \begin{aligned} X &= DCT(\hat{X}) \\ X_i^{\max, w} &= X_i^{\max} (1 + \alpha W) \quad (0 \leq i < K) \\ Y &= \begin{cases} X_i^{\max, w} & (0 \leq i < K) \\ X & \text{其他} \end{cases} \\ \hat{Y} &= IDCT(Y) \end{aligned} \right\} (1)$$

$\hat{X}$ 代表宿主图像逼近子带的小波包系数, X 代表 $\hat{X}$ 的 DCT 变换系数, $X_i^{\max}$ ($0 \leq i < K$) 代表 K 个幅值最大的 DCT 系数, $X_i^{\max, w}$ ($0 \leq i < K$) 代表 K 个幅值最大的 DCT 系数嵌入水印后的值, Y 代表嵌入水印后的 DCT 系数, $\hat{Y}$ 代表嵌入水印后的逼近子带小波包系数, W 代表预处理的水印序列, α 是水印嵌入强度。逼近子带水印嵌入流程如图 4 所示。

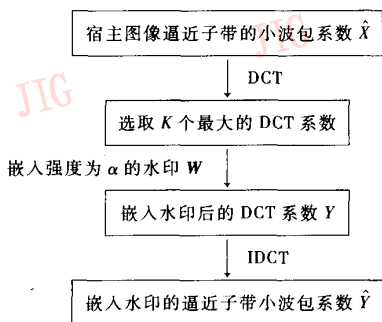


图 4 逼近子带水印嵌入流程

Fig. 4 Embedding flow in the approximate sub-band

(5) 细节子带水印嵌入

对宿主图像小波包多分辨率分解图的细节子带的低频带区域的纹理子块嵌入水印, 即首先对选择的各细节子带进行 $m \times n$ 子块划分, 然后根据各细节子带的边缘图确定该子块是否属于强纹理块(相对于给定阈值), 如果是纹理子块, 则结合 HVS 特性选择子块中幅值最大的系数嵌入一个水印值, 直到嵌入整个水印序列。嵌入公式如下:

$$X = \begin{cases} \hat{X} + \beta W & \text{低频带区域的纹理子块} \\ \hat{X} & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\hat{X}$ 代表宿主图像细节子带的小波包系数, X 代表嵌入水印后的细节子带系数, W 代表预处理的水印序列, β 是水印嵌入强度, 考虑到低频子带和高频子带对噪声的不同敏感程度, 与 α 相比, β 取值较大。细节子带水印嵌入流程如图 5 所示。

(6) 对嵌入水印序列后的宿主图像小波包系数做逆变换, 即得到加水印图像。

2.3 小波基的选择

宿主图像小波包分解所用的小波基对水印的嵌入结果有一定影响, 经过大量实验测试, 有关文献也验证了滤波器长度接近的 Daubechies 双正交小波是适合于数字水印算法的最佳双正交小波, 因此本文采用 Daubechies7/9 小波基, 从而达到了比较满意的结果。

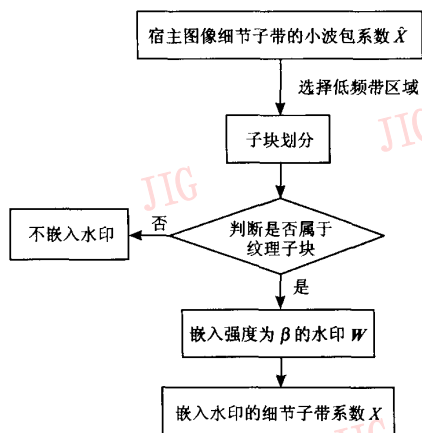


图 5 细节子带水印嵌入流程

Fig. 5 Embedding flow in the detail sub-bands

2.4 水印检测算法

对应于水印嵌入算法, 水印检测算法如下:

(1) 原始水印序列生成

用密钥 S 来重新产生高斯正态分布的伪随机实数序列 $W = \{w_i, 0 \leq i < K\}$ 。

(2) 子带选择

对宿主图像和加水印图像进行 3 级小波包分解, 并采用嵌入过程的子带选择方法, 即可得到各自的逼近子带 1 个和细节子带若干个。

(3) 逼近子带水印检测

进行水印检测时, 首先对宿主图像和加水印图像各自的逼近子带小波包系数进行 DCT 变换, 然后根据宿主图像 DCT 域幅值最大的前 K 个系数的位置来确定加水印图像的水印嵌入位置, 最后抽取水印测试序列 $D_1 = \{d_1(i), 0 \leq i < K\}$ 。通常采用相关度 ρ 来对抽取的水印序列和原始水印序列的相似性进行定量评价, 相关度 ρ 定义为

$$\rho = \text{sim}(W, D) = W \cdot D / \sqrt{D \cdot D} \quad (3)$$

其中, D 是待测试的水印序列, W 是嵌入的原始水印。用该式即可计算从逼近子带抽取的水印序列与原始水印序列的相关度 ρ_1 。

(4) 细节子带水印检测

首先根据宿主图像各细节子带的纹理特征来确定加水印图像的细节子带中水印的嵌入位置, 并抽取相应的水印测试序列 $D_2 = \{d_2(i), 0 \leq i < K\}$ 。然后用式(3)计算从细节子带抽取的水印序列与原始水印的相关度 ρ_2 。

(5) 令 $\rho = \max(\rho_1, \rho_2)$, 则可由 ρ 值来判断水印

的存在性。如果相关度 ρ 超过某一阈值 T , 那么就判定图像中存在此水印, 阈值 T 的选取为伪随机实数序列方差的 5 倍^[1], 即 $T=5$ 比较合适。

3 仿真实验

为了验证本文所给水印算法的有效性, 利用 baboon(512 × 512 × 8) 标准纹理图像进行了实验。实验中, 首先对宿主图像进行 3 级小波包分解, 其细节子带的图像子块大小 ($m \times n$) 为 2×2 , 然后伪随机产生 1000 组具有高斯正态分布 $N(0, 1)$ 的实数序列, 每组伪随机数为 1000 个, 即 $K=1000$, 再选择第 600 组作为嵌入宿主图像中的水印序列 W , 其逼

近子带的水印嵌入强度 $a=0.1$, 细节子带水印嵌入强度 $\beta=0.2$, 水印图像质量的客观评价指标采用峰值信噪比 (peak signal noise rate, PSNR)。

图 6(a) 是原始 baboon 灰度图像 (512 × 512 × 8), 图 6(b) 是嵌入第 600 组伪随机实数序列 W 后的加水印 baboon 图像。仿真实验表明, 采用本文算法后的加水印 baboon 图像的峰值信噪比为 42.24dB, 从主观视觉效果上评价, 其与原始图像非常一致, 这体现了本文算法的不可视性。图 6(c) 是从图 6(b) 低频子带检测到的水印响应结果, 相关度为 ρ_1 , 图 6(d) 是从图 6(b) 高频子带检测到的水印响应结果, 其相关度为 ρ_2 。

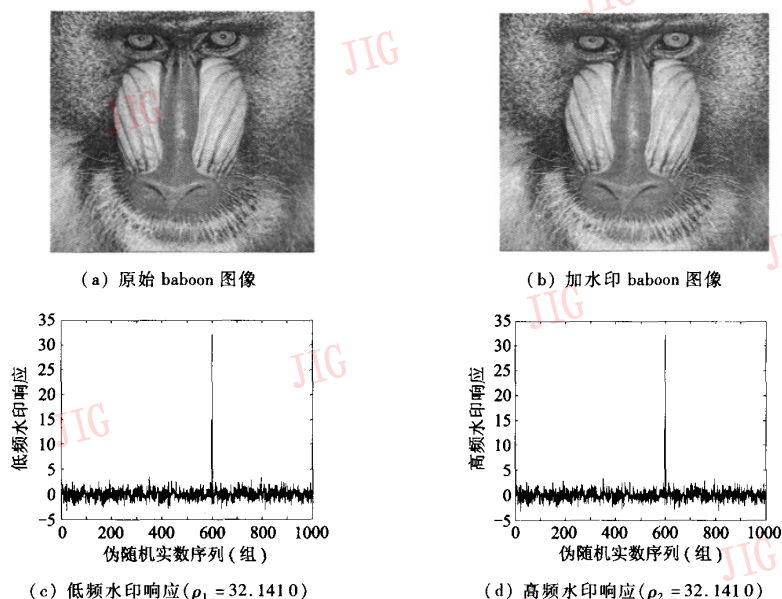


图 6 原始 baboon 图像及加水印 baboon 图像未受攻击时的水印响应结果

Fig. 6 Host image and watermark response (un-attacked)

通常对水印图像的攻击方式主要包括 JPEG 压缩、高斯滤波、中值滤波、加性白噪声、几何剪切、缩放失真、图像增强、联合攻击等。图 7 ~ 图 9 显示了水印图像抗噪声干扰、几何失真、联合攻击的鲁棒性, 图 7 ~ 图 9 的图 (a) 是受到攻击后的加水印图像, 图 (b) 是从图 (a) 的低频子带检测到的水印响应结果, 其相关度为 ρ_1 , 图 (c) 是从图 (a) 高频子带检测到的水印响应结果, 其相关度为 ρ_2 。尽管水印图像受到攻击后质量变得很差, 但水印仍能被检测到 ($\rho(600) > 5$)。

表 1 显示了本文算法对常见的图像处理与攻击的抵抗能力的详细实验结果。由表 1 可以看出, 由于分别嵌入到图像小波包域低频和高频的相同水印, 其抵抗各种攻击的能力有所不同, 低频水印抵抗 JPEG 压缩、低通滤波等攻击的能力强, 而高频水印则抵抗对比度调整等攻击的能力强, 所以本文算法利用高、低频水印抵抗不同攻击的互补优势从整体上增强了算法的鲁棒性, 这样既保证了加水印图像不管受到哪种形式的攻击后仍能从高频或低频子带中提取一个比较理想的水印 (根据 ρ 值确定), 也增

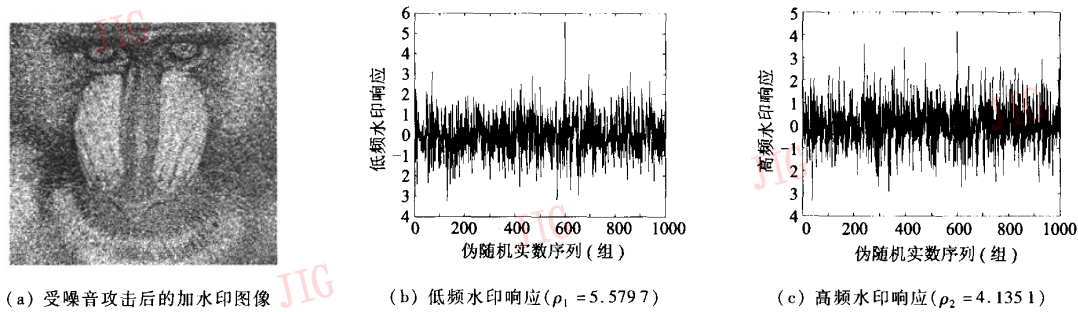


图 7 受高斯白噪音(方差 0.1)攻击后的加水印图像和水印响应结果
Fig. 7 Attacked watermarked image and watermark response(Gaussian white noise, variance 0.1)

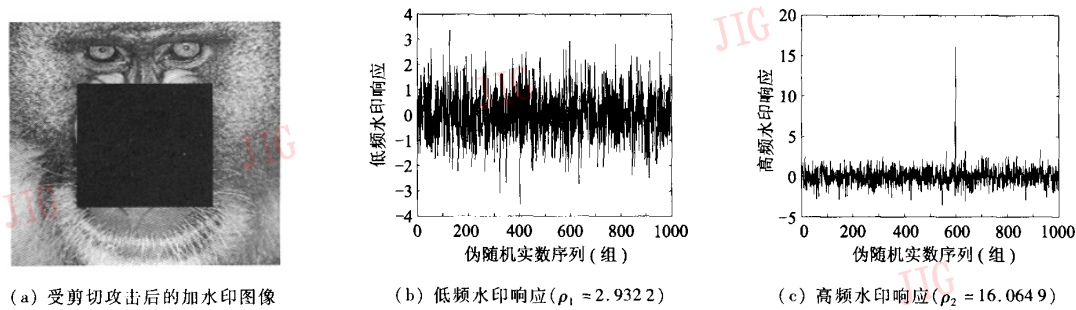


图 8 受中心剪切(1/4)攻击后的加水印图像和水印响应结果
Fig. 8 Attacked watermarked image and watermark response(center, cropping 1/4)

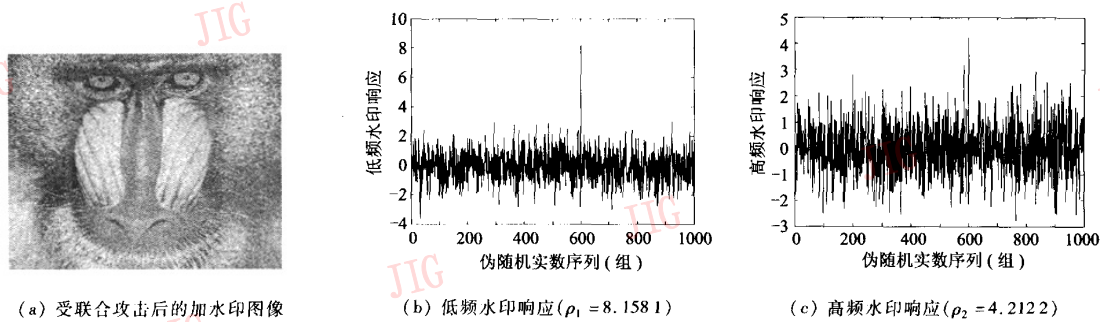


图 9 受联合攻击(高斯白噪音 + 缩放失真)后的加水印图像和水印响应结果
Fig. 9 Attacked watermarked image and watermark response(Gaussian white noise + resizing distortion)

强了水印算法的适用性。

4 结 论

本文算法结合了人眼视觉特性和两种优秀的数据变换算法(WPT和DCT),并利用了人眼视觉对噪声的掩蔽效应和小波包高低频域的不同抗攻击能力

以及DCT聚能、去相关能力,在小波包分解的高低频域选择合适的方法分别嵌入一个水印。该方法具有以下特点:①WPT结合DCT有助于增强小波包低频水印算法的抗攻击能力和安全性;②高、低频水印算法结合了人眼视觉特性,可使得水印具有良好的不可视性;③在小波包分解的高低频域嵌入的双水印保证了本文算法具有较大的水印添加容量。实验

表 1 水印对常见图像处理与攻击的抵抗能力(相关度)
Tab.1 Anti-attack abilities of the bi-watermarking technique

攻击方式	参数	相关度 ρ_1 (低频)	相关度 ρ_2 (高频)	$\rho = \max(\rho_1, \rho_2)$
JPEG 压缩	质量系数为 0.1	19.764 2	7.225 3	19.764 2
	质量系数为 0.2	27.167 9	9.259 6	27.167 9
	质量系数为 0.3	29.520 3	11.465 0	29.520 3
	质量系数为 0.4	30.669 6	13.631 4	30.669 6
	质量系数为 0.5	30.955 2	15.473 1	30.955 2
	质量系数为 0.6	31.302 0	16.787 4	31.302 0
	质量系数为 0.7	31.543 5	19.418 1	31.543 5
	质量系数为 0.8	31.772 3	22.608 4	31.772 3
	质量系数为 0.9	31.884 7	28.541 6	31.884 7
高斯滤波	3×3 滤波	27.968 7	4.269 4	27.968 7
中值滤波	2×2 滤波	17.346 9	3.550 8	17.346 9
	3×3 滤波	21.608 5	9.533 3	21.608 5
	4×4 滤波	9.041 7	2.855 7	9.041 7
高斯白噪音	方差为 0.01	19.752 9	11.457 1	19.752 9
	方差为 0.1	5.579 7	4.135 1	5.579 7
几何剪切	边缘剪切 1/8	1.651 9	13.996 9	13.996 9
	边缘剪切 1/4	0.946 7	6.617 9	6.617 9
	中心剪切 1/8	2.558 0	20.283 1	20.283 1
	中心剪切 1/4	2.932 2	16.064 9	16.064 9
缩放失真	缩小 1 倍/放大 2 倍	13.556 0	4.729 1	13.556 0
图像增强	锐化	16.806 0	8.349 0	16.806 0
	对比度增强	5.277 9	8.743 5	8.743 5
联合攻击	高斯白噪音(方差为 0.01)	8.158 1	4.212 2	8.158 1
	缩小 1 倍/放大 2 倍			

表明,因为本文算法不仅在抵抗针对高频或低频水印攻击时具有整体鲁棒性,而且在保证具有较大水印容量的前提下还具有良好的不可视性,所以具有更广泛的适用性。

参考文献 (References)

1 Cox I, Kilian J, Leighton T, *et al.* Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673 ~ 1687.

2 Barni M, Bartolini F, Cappellini V, *et al.* A DCT-domain system for robust image watermarking[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 357 ~ 372.

3 Yu Yan-zhong, Wang Xin-wei, Liu Jian-hua. A new algorithm for watermarking in DCT [J]. Computer Applications and Software, 2004, 21(1): 12 ~ 13. [余燕忠, 王新伟, 刘建华. DCT 域水印嵌入新策略和算法[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(1): 12 ~ 13.]

4 Barni M, Bartolini F, Piva A. Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(5): 783 ~ 791.

5 Meerwald P, Uhl A. A survey of wavelet-domain watermarking algorithms[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4314: 181 ~ 190.

6 Zhou Ya-xun, Ye Qing-wei, Xu Tie-feng. A new scheme of image watermarking based on wavelet and cosine transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12): 1693 ~ 1695. [周亚训, 叶庆卫, 徐铁峰. 基于小波和余弦变换组合的图像水印方案[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1693 ~ 1695.]

7 Huang Da-ren, Liu Jiu-fen, Huang Ji-wu. An embedding strategy and algorithm for image watermarking in DWT domain[J]. Journal of Software, 2002, 13(7): 1291 ~ 1297. [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): 1291 ~ 1297.]

8 Delaigle J, Vleechouwer C, Macq B. Watermarking algorithm based on a human visual model [J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 319 ~ 335.