

一种基于关系和量化的强鲁棒性盲水印算法

丁志中 梁秋娟

(合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘要 盲水印提取时不需要参考原始载体图像, 在信息隐藏、版权保护等方面具有更广泛的应用前景。提出的盲水印算法在分块离散余弦变换 (DCT) 和离散小波变换 (DWT) 的基础上, 利用关系双方 DCT 系数和 DWT 系数在受到攻击时具有相同变化趋势的特点, 采用关系嵌入和量化嵌入的自适应选择嵌入策略, 较大幅度地提高了盲水印提取的鲁棒性。同时在量化嵌入中采用抖动调制, 实现了水印透明性和鲁棒性调节的便捷性。大量仿真实验结果表明该算法对噪声干扰、低通滤波、JPEG 压缩、对比度增强等攻击有很好的鲁棒性和透明性。

关键词 数字水印 盲水印 关系嵌入 量化嵌入 离散余弦变换 离散小波变换

中图分类号: TP309 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)01-0031-06

A Blind Watermarking Algorithm with Strong Robustness Based on Relationship and Quantization

DING Zhizhong LIANG Qiujuan

(Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract Blind watermark extraction can be fulfilled without referring to the original host image. Therefore it has much prospective applications in the fields of information hiding and copyright protection. Based on blocking Discrete Cosine Transform (DCT) and blocking Discrete Wavelet Transform (DWT), the proposed blind watermarking algorithm uses an embedding strategy of adaptively selecting either relationship embedding or quantization embedding. The relationship embedding comes from the observation that both the magnitudes of coefficients concerned in the relationship usually have the same change trend when the image is attacked. This strategy remarkably improves the robustness of watermark extraction. In addition, dither modulation is used in quantization embedding by which the tradeoff between transparency and robustness of watermarking can be easily adjusted. Simulation results show that the algorithm is fairly robust against the attacks such as noise, filtering, compression, and contrast enhancement, and it maintains satisfying transparency.

Keywords digital watermarking blind watermarking relationship embedding quantization embedding DCT, DWT

0 引言

随着网络及多媒体技术的飞速发展和日益普及, 人们可以很容易地获得图像、音频、视频等数字产品及其拷贝, 因此这类产品的版权保护问题引起人们的广泛关注。数字水印为解决这一问题提供了

一个新的解决途径。它将具有特定意义的、与数字产品内容相关或不相关的标记(水印)内嵌、隐藏在多媒体宿主中, 用以证明原创者对其作品的所有权。

依据水印提取时是否需要原始图像, 数字水印可分为非盲水印和盲水印。盲水印提取时不需要原始图像, 比非盲水印有更广的应用场合, 具有更强的

收稿日期: 2009-02-26 改回日期: 2009-04-25

第一作者简介: 丁志中(1961—)。男, 副教授。2007年于中国科学技术大学获信号与信息处理专业博士学位。研究方向为信号与信息处理、通信与信息系统等。E-mail: zzding@mail.hf.ah.cn

实用性。本文提出的是一种具有强鲁棒性的盲水印算法。盲水印算法常用的嵌入方式有关系嵌入^[1-3]、量化嵌入^[4-5]等。关系嵌入在原始关系与要嵌入的水印位一致时,不需修改嵌入域系数,有利于水印的透明性;量化嵌入要修改嵌入域相应位置的系数,但可以通过量化步长将量化误差控制在一定范围内,方便水印透明性和鲁棒性的调节。但大多关系嵌入的关系是基于同一变换域的,如文献[1]和文献[3]是离散余弦变换域(DCT)的,文献[2]是离散小波变换域(DWT)的。这种关系在遭受攻击时稳定性差,抗攻击能力有限。本文算法在关系嵌入时,其关系是基于同一图像块对应的两个变换域:小波变换域和余弦变换域。比较位置的系数分别为DCT域的直流系数和二层DWT变换域的第2个低频系数,二者都对应着空域图像的能量特征,受到攻击时有同步变化的趋势,关系稳定性强,因此抗攻击能力强。由于本文所选关系的特点,改变关系的一方,另一方也随之改变。因此当原始关系与待嵌入水印位不一致时,通过修改关系来嵌入水印存在难度,且水印的透明性和鲁棒性不易折中。此时通过量化关系一方的小波域低频系数来嵌入水印。综上所述,本文算法的基本思想为当关系与待嵌入水印位一致时,采用关系嵌入,不需修改相应变换域系数,有利于水印的透明性,同时关系的稳定性又有利于水印的鲁棒性;当关系与待嵌入的水印位不一致时,采用量化嵌入,避开了改变关系的难度和缺点,便于水印透明性和鲁棒性的调节。

1 算法思想

1.1 水印产生

考虑到视觉的直观性,选择有意义的二值图像作为水印。为了增强水印的安全性和鲁棒性,对原始二值图像进行置乱处理。

图像置乱技术是指将一幅图像像素的空间位置依据某一规律重新排列,将原始图像变换成视觉上杂乱无章的新图像,实际上它破坏了相邻像素之间的相关性。使用置乱技术对水印进行预处理,可以提高水印信息的安全性,并能分散错误比特,增强水印的视觉效果和抵抗几何剪切等恶意攻击的能力^[6]。采用 m 序列置乱。

设二值图像 M 的大小为 $P \times Q$,其中 P 和 Q 分别为图像的长和宽。首先将二值水印图像按列扫描

成1维序列:

$$W = \{W(k), 1 \leq k \leq P \times Q\} \quad (1)$$

设选择的 m 序列为 $X = \{X_i, 1 \leq i \leq P \times Q\}$,用它对式(1)表示的水印序列 W 进行伪随机排序,得到置乱后水印序列 W_p

$$W_p = \{W_p(k) = W(k')\} \quad (2)$$

式中, $1 \leq k, k' \leq P \times Q$ 。在 m 序列 X 的控制下,序列 W 中第 k' 个元素移动到第 k 个位置上。最后将 W_p 恢复为 $P \times Q$ 大小的2维图像,得到置乱水印图像 M' 。

1.2 水印嵌入策略

水印嵌入部分是整个水印算法的关键,决定着算法的透明性、鲁棒性等性能。本文提出的水印嵌入策略是基于图像分块的,每 8×8 图像块嵌入一位水印。水印嵌入过程同时用到了DWT变换和DCT变换。嵌入方式由关系嵌入和量化嵌入组合而成。当关系与待嵌入水印位一致时,采用关系嵌入;不一致时,采用量化嵌入。同时用一个二值标志矩阵来表明各位水印采用的嵌入方式,此标志矩阵可作为水印提取时的密钥。

1.2.1 关系嵌入和量化嵌入方式的选择

首先将宿主图像分成 8×8 小块,然后分别对每一小块进行DCT变换和二层DWT变换。接着确定关系的双方为DCT变换后的直流系数和DWT变换后的第2个低频系数,以前者为参考值,用后者与参考值比较大小,将比较的逻辑结果即关系用字符 C 表示,可以约定数字1代表参考值大,数字0代表参考值小,即

$$C = \begin{cases} 1 & d \geq l \\ 0 & d < l \end{cases} \quad (3)$$

式中, d 表示一个 8×8 图像块经DCT变换后的直流系数, l 表示同一 8×8 块经二层DWT变换后的第2个低频系数。我们知道,DCT变换和DWT变换都具有能量集中的能力,变换后DCT的直流系数和DWT的低频系数数值通常较大,承载着空域图像的能量特征,当图像受到攻击时有相同的变化趋势,如同时变大或变小,因此这两者之间的关系具有很好的稳定性,抗攻击能力强。

将 C 与待嵌入的水印位 t 比较。如果 $C = t$ 说明该块对应的关系与水印位一致,此时采用关系嵌入方式嵌入该水印位 t 。由于此种情况下的水印嵌入不需对变换域系数作任何修改,因此不会引起宿

主图像的失真,有利于水印的透明性;又由于关系的稳定性,嵌入的水印具有很好的鲁棒性。

如果 $C \neq t$ 说明该块对应的关系与水印比特不一致。由于关系基于同一图像块的 DCT 直流系数和 DWT 的低频系数,改变二者中的一个,另一个将随之改变,因此改变关系有一定的难度,或者以引入较大失真为代价,水印的透明性难以满足。此时,我们摒弃关系嵌入方法,采用量化关系一方的小波域低频系数来嵌入水印。这样既避免了改变关系的难度和缺点,又可利用量化步长方便地调节水印的透明性和鲁棒性。

此外,为了提取水印时知道各位水印采用的嵌入方式,产生一个标志矩阵作为水印提取时的密钥。该标志矩阵是由 0 1 组成的二值矩阵,设为 $flag$ 。约定 0 表示关系嵌入,1 表示量化嵌入。则有

$$flag(i, j) = \begin{cases} 0 & C = t \\ 1 & C \neq t \end{cases} \quad (4)$$

式中, $1 \leq i \leq P$; $1 \leq j \leq Q$, $flag(i, j)$ 表示水印位 $M'(i, j)$ 的嵌入方式。

1.2.2 量化嵌入

由于待量化系数的定义域是实数,所以量化嵌入为常用的双极性抖动调制^[4]。将实数划分成两类区间,设为 A 和 B 。 A 类区间的中点坐标绝对值是量化步长的奇数倍, B 类区间的中点坐标绝对值是量化步长的偶数倍,区间长度均为量化步长。约定 A 类区间用数字 1 表示, B 类区间用 0 表示。若待嵌入水印位为 1,则将待量化系数量化到距该系数最近的 A 类区间中点;若待嵌入水印位为 0 则将待量化系数量化到距该系数最近的 B 类区间中点。提取水印时,若系数位于 A 类区间提取水印位 1,位于 B 类区间提取水印位 0。

设量化步长为 Δ 计算待量化系数 l 对 Δ 的商,则商 $q = \lfloor \frac{l}{\Delta} \rfloor$; 量化公式如下:

$$l' = \begin{cases} q \cdot \Delta + \Delta & q \% 2 = 0 \text{ 且 } t = 1 \text{ 或} \\ & q \% 2 = 1 \text{ 且 } t = 0 \\ q \cdot \Delta & q \% 2 = 0 \text{ 且 } t = 0 \text{ 或} \\ & q \% 2 = 1 \text{ 且 } t = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, l' 表示量化后的系数。

由式 (5) 知量化后的系数总是位于某一区间的中点。当 l' 的改变幅度在 $[2k - \Delta/2, 2k + \Delta/2]$, $k \in \mathbf{Z}$ 时,改变后的系数仍然位于原先类型区间,不会导致提取水印位的错误。量化引入的失真在

$[Q, \Delta]$ 区间。因此,量化步长 Δ 决定着水印的鲁棒性和透明性,可以通过它调节水印的透明性和鲁棒性,以达到二者的折中。

1.3 水印提取

水印提取与水印嵌入密切相关,通常需要依据水印嵌入的具体方法来确定水印提取的方法。与前面水印嵌入对应,本算法的水印提取也包括关系提取和量化提取两种方式。

先将欲提取水印的载体图像进行 8×8 分块,对每块分别作 DCT 变换和二层 DWT 变换。然后,根据提取密钥标志矩阵 $flag$ 确定当前欲提取的水印位采用的嵌入方式,并据此决定采用的提取方式。

当 $flag(i, j) = 0$ 时,说明当前水印采用的是关系嵌入,则采用关系提取:若 DCT 变换后的直流系数 d 大于等于 DWT 变换后的第 2 个低频系数 l 提取水印位为 1,反之为 0 公式如下:

$$M_a(i, j) = \begin{cases} 0 & d < l \\ 1 & d \geq l \end{cases} \quad (6)$$

式中, $M_a(i, j)$ 是提取出的位于 (i, j) 处的水印。

当 $flag(i, j) = 1$ 时,说明当前水印采用的是量化嵌入,则采用量化提取:若 DWT 变换后的第 2 个低频系数 l 位于量化步长 Δ 的 A 类区间,提取的水印位为 1,反之为 0。公式如下:

$$M_a(i, j) = \begin{cases} 0 & q \% 2 = 0 \text{ 且 } r \leq \Delta/2 \text{ 或} \\ & q \% 2 = 1 \text{ 且 } r > \Delta/2 \\ 1 & q \% 2 = 0 \text{ 且 } r > \Delta/2 \text{ 或} \\ & q \% 2 = 1 \text{ 且 } r \leq \Delta/2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, q 为 l 对 Δ 的整数商, r 为 l 对 Δ 的余数。

所有水印位提取完后,得到提取的置乱水印图像 M_a 。利用水印产生过程中所用 m 序列 X , 将 M_a 反置乱,恢复各位水印的原先顺序,得到水印图像 M'_a 。

2 仿真实验及结果

宿主图像选用 512×512 的标准测试图像 Lena (参见图 1(a)), 水印选用 64×64 有意义二值图像 (参见图 1(b))。实验中小波基选用双正交 Harr 小波基,二层分解,量化步长为 18。为兼顾版面和清晰度,宿主图像和水印图像未按比例缩小(应该注意到,宿主图像的大比例缩小显示,使得有些图像变化难以从本文插图中观察到)。

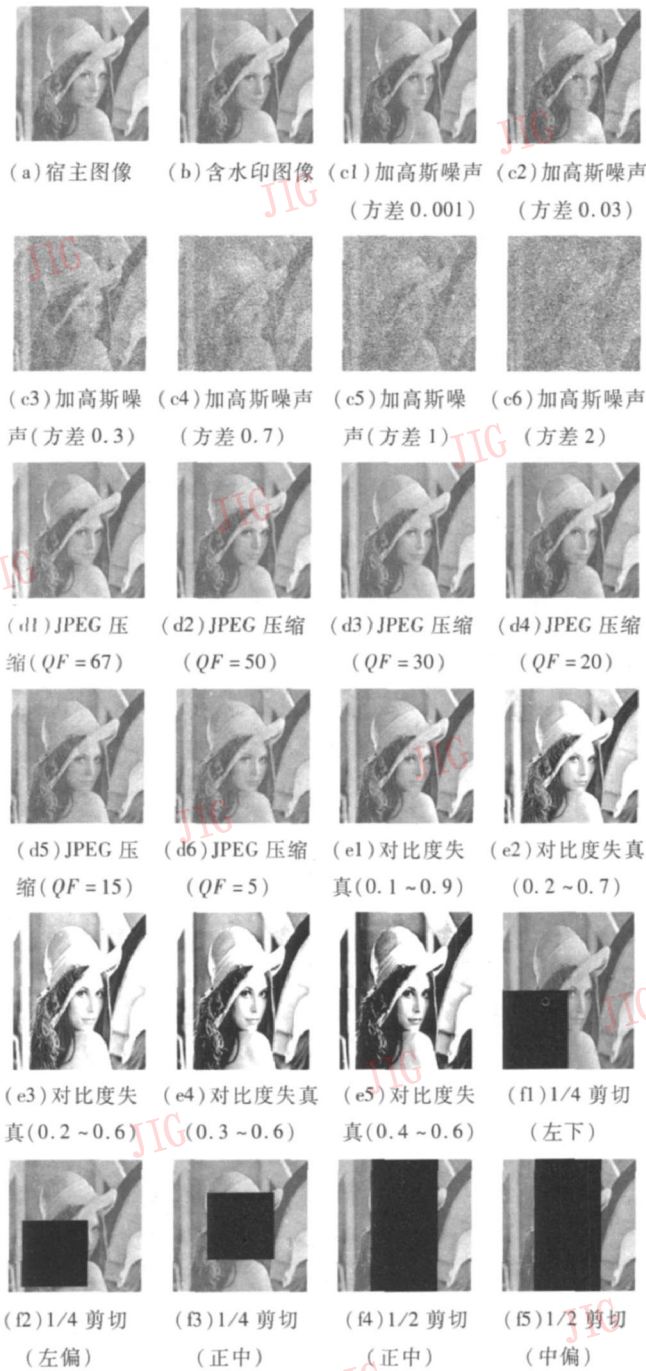


图 1 宿主图像、含水印后图像、遭攻击的含水印图像
 Fig. 1 Host image, watermarked images and attacked watermarked images

2.1 性能评价

水印的嵌入相当于宿主图像中引入“噪声”，这一噪声的大小影响到水印嵌入的透明性。除视觉主观评价外，通常采用峰值信噪比 *PSNR* 来客观度量嵌入水印后图像的质量，定义如下：

$$PSNR = 10 \log \frac{255^2}{\frac{1}{N \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I'(i,j) - I(i,j))^2}$$

(8)

式中， I' 表示嵌入水印后的宿主图像， I 表示原始宿主图像， N 为图像长。*PSNR* 值越大说明水印的透明性越好，含水印图像视觉质量越高。

对于所提取水印的质量，除用人眼观察做主观评价外，还常用归一化相似度 *NC* 进行度量。对二值水印，*NC* 可定义为

$$NC = \frac{\sum_i \sum_j M'_a(i,j)M(i,j)}{\sum_i \sum_j M(i,j)M(i,j)}$$

(9)

式中， $M(i,j)$ 表示原始水印图像。*NC* 取值范围为 $0 \leq NC \leq 1$ ，*NC* 值越大，提取水印的质量越好，当 $NC = 1$ 时提取水印与原始水印相同。*NC* 值也可以用于水印的检测。

2.2 实验结果

2.2.1 透明性

嵌入水印后宿主图像的 *PSNR* 为 54.8768 dB，原始宿主图像和嵌入水印后的宿主图像如图 1(a) 和图 1(b) 所示，不管是从主观视觉上还是从客观度量上，都说明水印有良好的透明性。

2.2.2 鲁棒性

1) 抗噪声实验

图 1(c1) ~ (c6) 是受高斯噪声污染后的含水印图像。图 2(c1) ~ (c6) 是从中提取的水印。从表 1 可以看出：当噪声方差在大范围内变化时，提取出的水印 *NC* 值相近。从图 1 和图 2 可以看出即使图像受到非常严重的噪声污染 (如方差为 2)，提取的水印视觉上仍然可以辨认。

2) 抗 JPEG 压缩实验

图 1(d1) ~ (d6) 是经 JPEG 压缩后的含水印图像。图 2(d1) ~ (d6) 是从中提取的水印。从表 2 及图 1、图 2 可以看出，当品质因子大于 67 时，水印可以完整无误地提取；即使压缩品质因子为 5，载体图像的质量已严重下降时，提取的水印仍然清晰可辨。

3) 抗滤波实验

本文算法对高斯低通滤波、均值滤波、中值滤波等攻击也有很好的鲁棒性。高斯滤波的矩阵维数取 $3 \times 3 \sim 30 \times 30$ 实验结果如表 3 和表 4 所示。

当矩阵维数为偶数方阵时，*NC* 值为 0.9727，为奇数方阵时 *NC* 值为 0.9961；对于均值滤波，当矩阵维数为 9×9 时，提取的水印仍可辨认； 3×3 中值滤波的 *NC* 值为 0.9976。对应提取的水印位于图 2(g1) ~ (g7)。

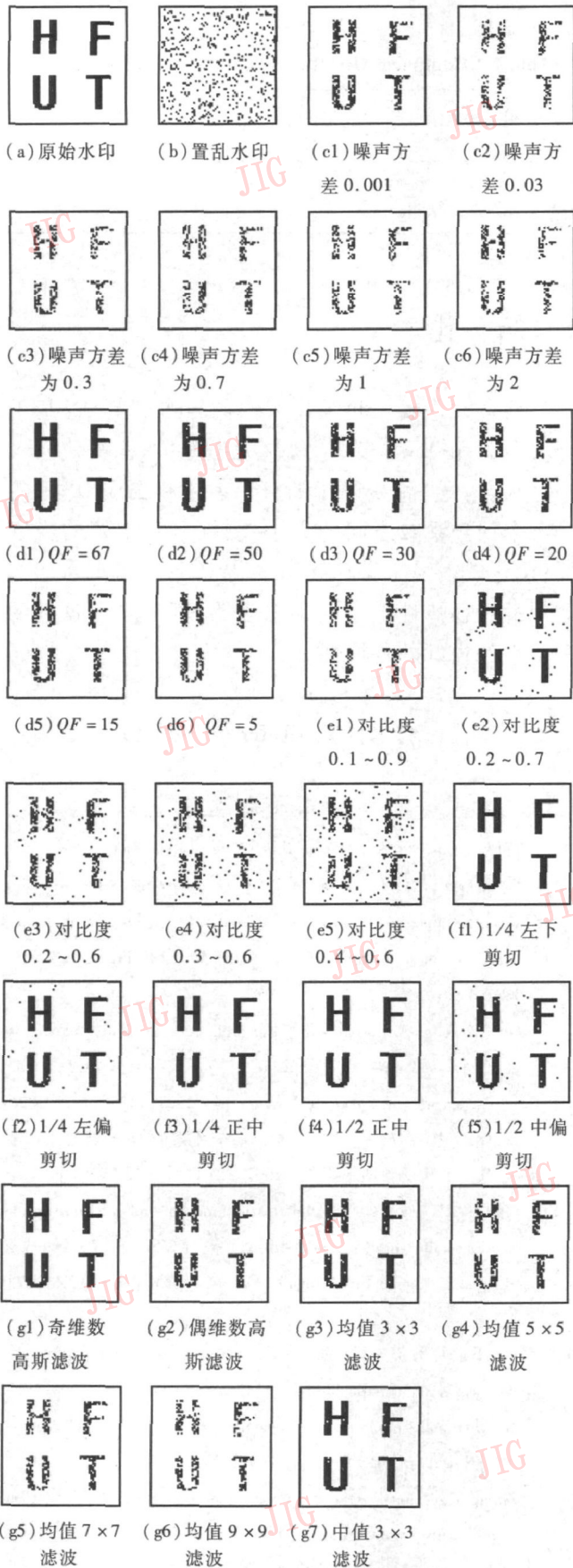


图 2 原始水印、置乱水印和遭受攻击后提取的水印

Fig 2 Original watermark, scrambled watermark and extracted watermarks

表 1 高斯噪声攻击下提取水印的归一化相似度

Tab 1 The NC of extracted watermarks with attack of Gaussian noise

NC	噪声方差					
	0.001	0.03	0.3	0.7	1	2
NC	0.9663	0.9385	0.9395	0.9387	0.9375	0.9382

表 2 JPEG 压缩攻击下提取水印的归一化相似度

Tab 2 The NC of extracted watermarks with attack of JPEG compression

NC	品质因子					
	67~100	50	30	20	15	5
NC	1	0.9961	0.9802	0.9663	0.9580	0.9529

表 3 高斯滤波攻击下提取水印的归一化相似度

Tab 3 The NC of extracted watermarks with attack of Gaussian filter

NC	方阵维数					
	3×3	15×15	25×25	4×4	20×20	30×30
NC	0.9961	0.9961	0.9961	0.9727	0.9727	0.9727

表 4 均值、中值滤波攻击下提取水印的归一化相似度

Tab 4 The NC of extracted watermarks with attacks of average filter and middle filter

NC	抗均值滤波				抗中值滤波
	3×3	5×5	7×7	9×9	3×3
NC	0.9907	0.9675	0.9543	0.9453	0.9976

4) 抗对比度失真实验

图 1 的 (e1) ~ (e5) 是对比度增强后的含水印图像, 图 2 的 (e1) ~ (e5) 是对应的水印提取结果。由图 1, 图 2 和表 5 可以看到, 算法对于对比度失真有较好的鲁棒性。

表 5 对比度失真攻击下提取水印的归一化相似度

Tab 5 The NC of extracted watermarks with attack of contrast distortion

NC	对比度					
	0~1	0.1~0.9	0.2~0.7	0.2~0.6	0.3~0.6	0.4~0.6
NC	1	0.9448	0.9858	0.9495	0.9363	0.9290

5) 抗剪切实验

由于采用了置乱技术, 改变了水印图像相邻像素之间的相关性, 分散了含水印图像受到几何剪切攻击时的错误比特, 从而提高了水印的视觉效果。另外, 由于本文算法基于 8×8 分块, 及关系提取和量化提取的判断策略, 当剪切部分用 0 像素代替时, 若剪切位置没有破坏原先划分的每个 8×8 小块, 仍

可正确提取相应水印位,反之,会导致一些水印位的错误提取,这可从图 1,图 2和表 6看出。

表 6 剪切攻击下提取水印的归一化相似度

Tab 6 The NC of extracted watermark with attack of cropping

NC	剪切位置				
	左下 1/4	左偏 1/4	正中 1/4	中 1/2	中偏 1/2
1	0.994 4	0.998 8	1	0.990 5	

2.2.3 实验结果分析

由图 2(a)可以看出本文实验所用水印图像的前景像素为黑色,背景像素为白色。从 2.2.2 的鲁棒性实验提取的水印(图 2)可以看到:除对比度和部分剪切实验结果外,其余攻击实验提取的水印背景像素几乎没有错误,前景像素随着攻击强度的不同产生不同程度的错误,且当攻击强度达到一定程度后,再继续增加攻击强度,对水印提取结果的影响不大。由 1.2 论述知在水印嵌入策略中,算法优先考虑关系嵌入。算法所选关系是表征图像块能量的 DCT 变换的直流系数和 DWT 变换的第 2 个低频系数之间的大小关系。由于采用二层小波分解, DWT 低频系数共有 4 个,它们一起代表对应图像块的绝大部分能量,而 DCT 变换的直流系数自身就承载了图像块绝大部分能量,所以当从 DWT 的低频系数中选择一个与 DCT 的直流系数比较时,绝大部分比较结果用数字 1 表示。这样一来,白色像素大多采用关系嵌入,而黑色像素采用量化嵌入。由于关系的稳定性,白色像素抗攻击能力很强。量化嵌入的抖动调制使得只要系数落在相应类别的任一区间,就可正确提取水印位,所以攻击强度的增强导致的黑色像素误提取比例能维持在一定水平。背景像素的高度正确,提高了水印的视觉效果,同时也使水印的 NC 值较大。

从表 1~表 6 还可以看出水印的 NC 值有时并不随攻击强度的增加而降低,这也是抖动调制的原因。

表 7 给出了本文算法与文献 [3] 算法对应攻击的结果。文献 [3] 的算法是基于关系的 DCT 域的盲水印算法,关系双方为 8×8 块 DCT 变换后的直流系数和中频系数,提取时需要直流缩放系数(中频系数与直流系数的比值)做密钥。

表 7 算法比较

Tab 7 Compare with the algorithm of reference [3]

	剪切	中值	JPEG 压缩品质因子	
	1/4	3×3	90	70
文献 [3] 算法	0.84	0.46	0.94	0.88
本文算法	0.994 4	0.997 6	1	1

3 结 论

结合关系嵌入和量化嵌入的盲水印算法,基于分块 DCT 和 DWT 变换,每块大小为 8×8 每块嵌入一位水印。关系为 DCT 的直流系数和二层 DWT 的第 2 个低频系数之间的大小关系,具有很好的稳定性;量化嵌入采用抖动调制,可以方便地调节水印的透明性和鲁棒性。实验结果表明,算法具有良好的透明性和很好的鲁棒性。

参考文献 (References)

- [1] Hsu C T, Wu J L. Hidden digital watermarks in images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(1): 58-68.
- [2] Hong I, Kim I, Han S S. A blind watermarking technique using wavelet transform [C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2001). KOREA: IEEE Press, 2001, 3: 1946-1950.
- [3] Du Gao-feng, Wang Hu-rqin, Bai Mei. A blind watermarking algorithm based on the relationship of coefficients in DCT domain [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(11): 2026-2030. [杜高峰,王慧琴,白梅.基于关系的 DCT 域盲水印算法 [J].中国图象图形学报, 2007, 12(11): 2026-2030.]
- [4] Chen B, Womell G W. Digital watermarking and information embedding using diatherm modulation [C] // IEEE Second Workshop on Multimedia Signal Processing. New York: IEEE Press, 1998: 273-278.
- [5] Kundur D, Hatzinakos D. Digital watermarking using multiresolution wavelet decomposition [C] // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. New York: IEEE Press, 1998: 2969-2972.
- [6] Zhang Hua-xiong, Qiu Pei-liang. Application of shuffling techniques with watermarking [J]. Journal of Circuits and Systems, 2001, 6(3): 32-36. [张华熊,仇佩亮.置乱技术在数字水印中的应用 [J].电路与系统学报, 2001, 6(3): 32-36.]