

基于混叠 DCT 频域灰度级盲水印多重嵌入算法

马 强¹⁾ 付艳茹²⁾

¹⁾(浙江警官职业学院安防系,杭州 310018) ²⁾(浙江警官职业学院基础部,杭州 310018)

摘 要 基于扩展频谱通信技术,对宿主图像的频域进行 2 维 DCT 变换,采用保持图像亮度的 JND (just noticeable distortion) 门限值和多数字基底对宿主图像 DCT 频域进行选块,对中频分量的 DCT 交流系数分组嵌入水印比特,以随机二值序列对高低频分量的 DCT 系数的水印比特嵌入进行控制,使多个数字盲水印信号载波传输于混叠的 DCT 频带。该算法可预估水印嵌入量,提取水印无需宿主图像和水印图像,仿真测试实例表明,该算法能有效抵抗滤波、加噪、剪切、JPEG 有损压缩,具有较强的顽健性和鲁棒性。

关键词 数字盲水印 扩展频谱 DCT 频域 交流系数 多数字基底 JND 门限

中图分类号: TP391;O235 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)08-1081-07

Multiple Embedded Algorithm with Grey-level Blind Watermarking in DCT Frequency Domain Based on Aliasing Spectrum

MA Qiang¹⁾, FU Yan-ru²⁾

¹⁾(Department of Safety Precaution, Zhejiang Officer Vocational Collage, Hangzhou 310018)

²⁾(Department of Basic Science, Zhejiang Officer Vocational Collage, Hangzhou 310018)

Abstract Based on spread spectrum communications, the approach concerns mainly a series of techniques: the substitution of DCT of 2D in frequency domain of the owner image, the use of selection-and-group tactics conducted by means of JND threshold of gray-image and the multiple-based work underlying DCT frequency domain of the owner image, the classification of embedded watermarking with AC of intermediate frequency, the performance at random on AC of high-low frequency that embedded, and the realization of digital blind watermarking of multiple gray watermarking in order to transmit it by the mode of carrier wave. This algorithm evaluates the capacity of the digital watermarking and extracts the digital watermarking without the original watermark and the owner image. The experimental results proves that the algorithm is of good robustness and renitency for the procedures, like filtering, adding noise, clipping, JPEG compression.

Keywords digital blind watermarking, spread spectrum, DCT frequency domain, AC, Multiple-based, JND threshold.

1 引 言

数字水印是在图像像素级别上隐藏了预定的不可见标识信息,它是实现作者数字版权保护的有效方法。良好的数字水印算法,应在确保水印不可见的前提下,水印信号的嵌入强度高,载体图像的顽健性和鲁棒性好,抵抗攻击的能力强,提取水印既不依赖原始水印也不依赖宿主图像,即实现盲水印操作,具备良好的抗干扰性能。

目前,一般的数字水印多嵌入在时(空)域、DCT 变换域^[1,2]、DFT 变换域、DWT 变换域(小波)^[3]等,而诸如图像分块^[4]、纹理与视觉掩蔽^[5]、水印置乱和压缩^[6,7]、嵌入盲水印^[7]等新的水印算法不断见诸报道,有的还引入了神经网络、多数字基底等软计算方法,试图嵌入更多的水印信息^[8-10]。从实用性上说,水印技术至今尚缺乏统一标准,许多水印算法还难以通过和抵抗剑桥大学 StirMark 软件的测试与攻击,因此,一个良好的数字水印算法总体上仍是从多角度研究图像载体数据的特性,力求在水印的顽健

收稿日期:2005-07-20; 改回日期:2005-09-19

第一作者简介:马强(1962 -),男,副教授。北京邮电大学通信软件专业硕士研究生。主要从事数据库、语音和图像识别技术的研究。

E-mail: maqiang@zjy.com.cn.

性、鲁棒性、隐藏性等诸多方面寻找平衡,除追求水印的最大嵌入量外,水印的可测性及水印的代换能力也影响着水印算法的工程转化。

本文构造一种水印算法,该算法将扩展宿主图像频谱和 2 维 DCT 频域相结合,利用 JND (just noticeable distortion) 门限和多数字基底对 DCT 选块分组,将混叠频带中多个盲水印(不局限于中频分量)调制为载波信号传输,较好地兼顾了隐藏性、鲁棒性、安全性和可测性。

2 DCT 频域的扩展频谱通信

因 JPEG 压缩源于 2 维 DCT 变换的量化,故对任意的 $n \times n$ 宿主图像 W ,单纯地在 2 维 DCT 变换域嵌入水印,一般都是考虑如何抵抗 JPEG 压缩。Cox 早期曾给出过 DCT 域的一种扩频水印算法,但嵌入的数字水印 $X = \{x_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 独立选取于正态分布区间 $N(0, 1)$ 内,复杂度有限。因 2 维 DCT 变换的图像能量过于集中在图像的左上部,故一般都是试图将水印嵌入在中频分量上,但水印信

息的嵌入量不高,易受敌手的攻击(如剪切、滤波、位移、重采样等)。若将水印按某种策略叠加到 DCT 频域的扩展频谱,适当调制后,以混叠方式传输于通信信道,将极大地增加接收端破解的难度。

设信号源为原始的 $n \times n$ 宿主图像 W ,嵌入的水印为 $m \times m$ 图像 W' ($n > m$),则频谱扩展通信模型如图 1 所示。在图 1 所示的工作模型中,原始的宿主图像 W 由信道 C 经数据调制变成具有带宽为 B_1 的基带信号;用扩频发生器产生的伪随机码(如 PN 码、M 序列码、GOLD 序列码)对基带信号进行带宽为 B_2 的频谱扩展调制,其中 $B_2 \gg B_1$,扩频增益为 $G = B_2/B_1$ 。按水印的私有(或托管、公有)密钥 Key,将水印数据调制为载波信号 S ,并有选择地叠加到所扩展的全部 DCT 频域以混叠的方式传输。如果接收端对信号扩频解调以检测和提取水印,必须按事先的伪随机编码对信道上传输的数字信号进行匹配滤波,才能使其汇聚成较高的信噪比得以输出,否则,不匹配的滤波和解码,将形成对数字水印信息的干扰和攻击,从而在信道中引入失真噪声 N_1 ,并影响到宿主图像 W 的全部 2 维 DCT 频域,使宿主图像大幅度降质,失去利用的价值。

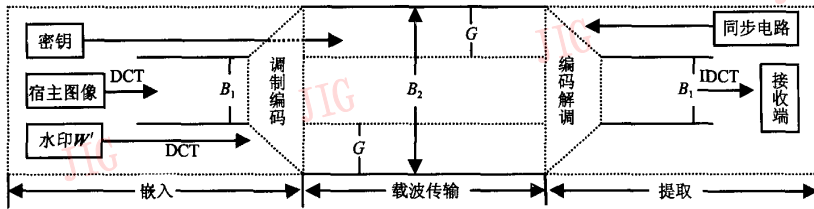


图 1 DCT 域频谱扩展通信模型

Fig. 1 Spread spectrum communications on DCT frequency domain

对宿主图像 W 的 2 维 DCT 频域进行频谱的扩展,可由申农(Shannon)公式表达信道的带宽 B_1 、信噪比 S/N_1 、信道传输率 C 三者的关系:

$$C = B_1 \times \log_2(1 + S/N_1) \quad (1)$$

在存在噪声干扰的 2 维 DCT 频域中,作为载波信号 S 的水印信息弱于宿主图像 W ,但混叠传输受到攻击时,激增的噪声干扰信号 N_1 远强于水印信息 S 。由微分近似公式知:当 $|x| \ll 1$ 时,存在 $\ln(1 + x) \approx x$ 。故有近似式:

$$\log_2(1 + S/N_1) = \frac{\ln(1 + S/N_1)}{\ln 2} \approx \frac{S}{N_1 \ln 2} = \frac{1.44 \times S}{N_1} \quad (2)$$

由式(1)、(2)推知近似成立:

$$\frac{C}{B_1} \approx \frac{1.44 \times S}{N_1} \quad (3)$$

对传输信道给定的信噪比 S/N_1 ,如果加大宿主图像 W 的传输信息带宽 B_1 ,便可以增加信道传输的信息率 C ,而当信道中的噪声 N_1 远大于附加的载波信号 S 时,表明信道中出现了干扰信号,此时先扩展载波信号 S 的频谱,然后再将扩频后的频谱信号转换为原始所占带宽,使信噪比 S/N_1 的峰值得以加大。

因此,在 2 维 DCT 频域进行频谱的扩展通信,需要对经数字采集后的宿主图像 W 的频域附加一定量的频谱信号。首先,要保证叠加后的原始宿主图像 W 的信号强于水印信号,使宿主图像 W 在有限带宽 B_1 的传输中保持较大的平均噪声功率,实现对水印标识进行有效遮蔽;另外,要加大扩频增益,

以力求在混叠的频带中尽可能增加嵌入的水印量,使得依原水印算法能进行正确的滤波和还原,保证在检测和提取水印标识时,无需宿主图像 W 和水印图像 W' 参与验证。

3 多数字基底

由于视觉对空间频率所独具的不同敏感性,当宿主图像 W 经 2 维 DCT 变换分解后,直流分量和交流分量的中频集中了宿主图像 W 的大部分能量,使得对宿主图像低频的噪声敏感性高于中频及高频,故常规的做法是不改变低频的交直流系数。虽然 BMP 位图格式下,于中高频部分嵌入数字水印,视觉的影响不大,但在 JPEG 压缩下,高频部分的影响变得增大了,故数字水印的嵌入位置往往考虑在中频。但单纯在中频进行变换,不但水印的嵌入位置过于明显,而且水印量嵌入也不足。为在宿主图像中嵌入多个水印,引入多数字基方法。有关多数字基整数的概念在文献[9]中提出,本文则进行了必要的扩展。

定义 1 设 $A = a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_2a_1a_0$ 为 n 位 r 进制整数,其中 r 及各位数字 $a_i (i=0,1,\dots,n-1)$ 为十进制整数,且满足 $0 \leq a_i \leq r-1$,则称 $A = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \times r^i$ 为以 r 为基底的单数字基整数,其展开式为常规的 r 进制表示:

$$a_0 + a_1 \times r^1 + a_2 \times r^2 + \cdots + a_{n-2} \times r^{n-2} + a_{n-1} \times r^{n-1}$$

定义 2 设 $A = a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_2a_1a_0$ 为 n 位十进制整数,如果存在十进制整数 $r_i (i=1,2,\dots,n-2)$ 使 A 的各位十进制数字 a_i 满足 $0 \leq a_i \leq r_i - 1$,且可表示为

$$A = a_{n-1} \times (r_{n-2} \times r_{n-3} \times \cdots \times r_0) + a_{n-2} \times (r_{n-3} \times r_{n-4} \times \cdots \times r_0) + \cdots + a_2 \times (r_1 \times r_0) + a_1 \times r_0 + a_0$$

则称 $A = a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_2a_1a_0$ 是以 $\{r_i\}_{i=0,1,2,\dots,n-2}$ 为多数字基底的整数。

性质 1 设多数字基整数 $A = a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_2a_1a_0$ 以 $\{r_i\}_{i=0,1,2,\dots,n-2}$ 为多数字基底,记 A 能表示二值信息的位数为 m ,则 m 和 $\{r_i\}_{i=0,1,2,\dots,n-2}$ 存在关系式

$$m \leq \left[\log_2 \left(\prod_{i=0}^{n-2} r_i \right) \right] \quad (4)$$

显然,多数字基整数实际上是对二进制整数和十进制整数的一种推广,其映射关系可以较好地描述多个水印的嵌入^[10]。

性质 2 任意整数 $A = a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_2a_1a_0$ 都可以与多数字基底 $\{r_i\}_{i=1,2,\dots,n-2}$ 相互转化,即

$$a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_2a_1a_0 = ((\cdots((a_{n-1} \times r_{n-2} + a_{n-2}) \times r_{n-3} + a_{n-3}) \cdots + a_2) \times r_1 + a_1) \times r_0 + a_0 \quad (5)$$

实际上,对指定的多数字基底 $\{r_i\}_{i=1,2,\dots,n-2}$,当 $a_i = r_i - 1$ 时,式(5)的转化结果是该多数字基底表示的最大整数,且对于不超过该最大值的任意整数,均可以由该多数字基底表示。

例如:对十进制整数 $A = (128)_{10}$,取多数字基底 $\{r_i\}_{i=0,1,2,\dots,n-2} = \{3,5,7,8\}$,即 $r_1 = 3, r_2 = 5, r_3 = 7, r_4 = 8$,因 a_i 满足 $0 \leq a_i \leq r_i - 1$,则由前面的定义 2 及式(5)可推得

$$A = (128)_{10} = a_3 \times (7 \times 5 \times 3) + a_2 \times (5 \times 3) + a_1 \times 3 + a_0$$

由此可确定出 $a_3 = 1, a_2 = 1, a_1 = 2, a_0 = 2$ 。表明在多数字基底 $\{r_i\}_{i=0,1,2,\dots,n-2} = \{3,5,7,8\}$ 下,十进制整数 128 和多数字基整数 1122 相对应,反之亦然。此外,取 $a_i = r_i - 1$,则该多数字基底所能表示的最大整数为 839,则对 $A \leq 839$ 的任意整数,均可以由多数字基底 $\{r_i\}_{i=0,1,2,\dots,n-2} = \{3,5,7,8\}$ 表示。

4 多重数字盲水印的嵌入及检测

4.1 DCT 块系数求解及调制预处理

为实现 2 维 DCT 域的扩展频谱通信,输入端的宿主图像 W 在传输前先进行频域的 2 维 DCT 变换预处理,即求解 DCT 变换阵的交直流系数,目的是分离出 DCT 相应的高频、中频和低频 3 个分量,以进行调制和编码,送入信道扩频,而频谱的增益部分为水印信号所占用。

设宿主图像 W 为 $n \times n$ 的灰度图像,且宿主图像 W 的 DCT 时域为 $f(x, y)$,频域为 $f(u, v)$;嵌入的 2 个水印为 $m \times m$ 的灰度图像 W' 和 $m_1 \times m_1$ 的灰度图像 W'' ,且 $n > m, n > m_1$;嵌入水印后的图像为 W''' ,为在宿主图像 W 中叠加和嵌入数字水印图像 W' 和 W'' ,先对宿主图像 W 的频域进行下列 $n \times n$ 的 2 维 DCT 变换

$$C(u, v) = a(u) \cdot a(v) \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) \cdot \cos \left[\frac{(2x+1)u\pi}{2n} \right] \cdot \cos \left[\frac{(2y+1)v\pi}{2n} \right] \quad (6)$$

其中 $u, v = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 。

当依水印算法正确检测所嵌入的数字水印时,

对嵌入水印后的图像 W^m 进行下列 $n \times n$ 的 2 维 IDCT 反变换,以重构原始的宿主图像 W

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(u) \cdot a(v) \cdot C(u, v) \cdot \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right] \cdot \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right] \quad (7)$$

其中 $x, y = 1, 2, \dots, n-1$ 。特别地,当 $u = v = 1, 2, \dots, n-1$ 时,有 $a(u) = a(v) = \sqrt{(2/n)}$; 当 $u = v = 0$ 时,有 $a(u) = a(v) = \sqrt{(1/n)}$ 。一般当 $i = j = 0$ 时,直流系数 DC 取 $C(i, j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{x=0}^n \sum_{y=0}^n f(x, y)$; 当 $0 < i + j < n^2$ 时,交流系数 AC 取 $C(i, j)$ 。

4.2 数字盲水印的嵌入

(1) 对宿主图像 W 进行 $n \times n$ 的 2 维 DCT 频域独立分块。记 $W_j = f_j(x, y)$ 为宿主图像 W 的 n 阶频域子图,则 $W = \bigcup_{j=0}^{n^2-1} W_j = \bigcup_{j=0}^{n^2-1} f_j(x, y)$ 。对 DCT 子图 W_j 进行 2 维 DCT 变换后,得交(直)流系数为 $C_j(u, v) = \text{DCT}\{W_j | W_j = f_j(x, y), 0 \leq x, y \leq n\}$, 其中, $j = 0, 1, 2, \dots, n^2 - 1, 0 \leq x \leq n, 0 \leq y \leq n$ 。

(2) 将 DCT 频域 r 个子图 $W_j = f_j(x, y)$ 的水平垂直像素的亮度值分别加 1 与减 1,以保持子图 W_j 的平均亮度,约束图像降质,得到与 $W_j = f_j(x, y)$ 相关的二值映像序列 $\{\tau_j\}$ 。记 T_j 为子图 W_j 的灰度均值, $F(T_j) = 1/T_j^\alpha$ 为修正因子,实验系数 α 满足 $0.6 \leq \alpha \leq 0.7$, 对 $j = 0, 1, 2, \dots, n^2 - 1$, 取子图 W_j 的 JND 门限值

$$JND(W_j) = \frac{1}{n^2} \sum_{(x,y) \in W_j} F(T_j) \cdot \frac{|f(x, y) - T_j|}{T_j} \quad (8)$$

(3) 对 $j = 0, 1, 2, \dots, n^2 - 1$, 选择 DCT 频域的中频分量,对子块 $W_j = f_j(x, y)$ 的交流系数 $C_j(u, v) = \text{DCT}\{W_j | W_j = f_j(x, y), 0 \leq x, y \leq N\}$ 重新排序。设全部 $C_j(u, v)$ 已分为 g 组 (g 为某一整数), 每组有 h 个 DCT 交流系数,第 k 组第 i 个交流系数为 $C_{i,j}^k(u, v)$, 则由式(8)可知,第 k 组 $C_{i,j}^k(u, v)$ 的门限值取为 $r_{i,k} = [JND(C_{i,j}^k(u, v))]$, $0 \leq k \leq g - 1, 0 \leq j \leq n^2 - 1, 0 \leq i \leq h - 1$ 。其中, $C_{i,j}^k(u, v)$ 由于子图 W_j 全部交流系数 $C_j(u, v)$ 的第 k 个分组得到,由式(8)及指定的 j , 子图 W_j 的门限值 $r_{i,k}$ 是固定的。

(4) 对 $m \times m$ 水印图像 W^m ($n > m$) 同样处理,得到 g_1 组 DCT 频域交流系数, 每组有 h_1 个 (g_1, h_1 为适当整数), 第 k_1 组第 i_1 个 DCT 频域交流系数为 $\bar{C}_{i_1, j_1}^{k_1}(u, v)$, $0 \leq j_1 \leq m^2 - 1, k_1 < g_1 < g, h_1 < h$ 。以宿

主图像 W 的 DCT 频域子图 W_j 第 k 组 $C_{i,j}^k(u, v)$ 取整门限值 $r_{i,k}$ ($i = 0, 1, 2, \dots, h - 1$) 为多数字基底, 记该基底能表达的最大整数为 p , 将水印图像 W^m 满足 $\bar{C}_{i_1, j_1}^{k_1}(u, v) \leq p$ 的系数表示为多数字基整数 E_j , 各位数字为 $e_j^0, e_j^1, \dots, e_j^{h^2-2}, e_j^{h^2-1}$, 即

$$\bar{C}_{i_1, j_1}^{k_1}(u, v) = e_j^{h^2-1} \cdot e_j^{h^2-2} \dots e_j^1 \cdot e_j^0$$

(5) 将水印图像 W^m 多数字基整数 E_j 的各位数字 e_j^k 作为比特修改值分散嵌入到 DCT 频域交流系数 $C_{i,j}^k(u, v)$ 中, 确定水印加载的强度。即对第 k 组第 i 个交流系数 $C_{i,j}^k(u, v)$ 加载强度为 e_j^k 的水印

$$\bar{C}_{i,j}^k(u, v) = C_{i,j}^k(u, v) + C_{i,j}^k(u, v) \times \tau_j \times e_j^k \quad (9)$$

其中约束因子 τ_j 取自上面算法步骤 2 中与 $C_{i,j}^k(u, v)$ 分组相关的二值映像序列 $\{\tau_j\}$ 。

(6) 在二值映像序列 $\{\tau_j\}$ 产生的伪随机序列中, 选择作为密钥的随机种子 Key , 依此产生的随机数选取 DCT 频域的子图 W_i 和 W_j , 扫描高频及低频分量的交流系数。对指定的 JPEG 量化因子系数 Tag , 根据 τ_j 的极性, 决定是否对高低频分量的交流系数进行修改, 即当 $\tau_j = 1$ 且 $C_{i,j}^k(u, v) \in W_i$ 时

$$\bar{C}_{i,j}^k(u, v) = C_{i,j}^k(u, v) / Tag + 0.5 \quad (10)$$

(7) 若 $j < n^2 - 1$ 及 $k < g - 1$, 则增步长后相应移位操作, 重复算法步骤 5、6, 将水印图像 W^m 的比特嵌入操作遍历宿主图像 W 的 DCT 频域各分组子图交流系数 $C_{i,j}^k(u, v)$ 。

(8) 因 $g_1 < g$ 及 $h_1 < h$ 时的宿主图像 W 尚有 $g \times h - g_1 \times h_1$ 个 DCT 频域分组的交流系数未嵌入水印比特, 可对另幅 $m_1 \times m_1$ 水印图像 W^m ($n > m_1$), 重复算法步骤 4~7, 将水印图像 W^m 的比特信息嵌入到剩余的交流系数 $C_{i,j}^k(u, v)$ 中。

(9) 对改后交流系数 $C_{i,j}^k(u, v)$ 进行 Zig_Zag 排列, 对其施加 2 维 IDCT 反变换, 由频域 $f(u, v)$ 得嵌入水印后的图像 W^m 。

4.3 数字盲水印的嵌入量估计

因 $n \times n$ 灰度宿主图像 W 的 DCT 频域独立分为 g 组 (每组 h 个交流系数), 第 j 个原 DCT 块的任意第 k 组的第 i 个交流系数 $C_{i,j}^k(u, v)$ 是以按门限值 $JND(C_{i,j}^k(u, v))$ 为多数字基底进行修改的, 所以可对水印比特信息嵌入量间接地进行估值判定。按二进制和多数字基方法及相应性质, 可由估值式(4)预估多数字基整数所能表达的二进制信息量, 并按不同组别统计出算法中的水印嵌入量。在不计高低频交流分量被修改的条件下, 由多数字基的性质及

式(4)知,多数字基底 $r_{i,k} = [JND(C_{i,j}^k(u,v))]$ 至少可以表示 $\prod_{i=0}^{h-1} r_{i,k} (1 \leq k \leq g-1)$ 个不同的信息,而水印图像 W' 和 W'' 对 DCT 块第 k 组的中频交流分量 $C_{i,j}^k(u,v)$ 所嵌入的水印比特信息量 $\leq \log_2(\prod_{i=0}^{h-1} r_{i,k})$, 因此,全部 DCT 块分组共嵌入数字水印的比特信息量为 $\sum_{k=0}^{g-1} (\log_2(\prod_{i=0}^{h-1} r_{i,k}))$ 。

4.4 数字盲水印的检测

(1) 独立分割待测的 $n \times n$ 灰度图像 W''' 为 $W''' = \bigcup_{j=0}^{N^2-1} \bar{W}_j = \bigcup_{j=0}^{N^2-1} \bar{f}_j(x,y)$, 计算 2 维 DCT 变换后的 DCT 频域各交(直)流系数 $\bar{C}_j(u,v)$, 其中 $j=0, 1, 2, \dots, n^2-1$ 。

(2) 取系数 $\alpha=0.65$, 对 $j=0, 1, 2, \dots, n^2-1$, 计算 W''' 频域子图 \bar{W}_j 的灰度均值 \bar{T}_j 和修正值 $\bar{F}(T'_j)$, 求得二值序列 $\{\bar{\tau}_j\}$ 和各分组的 DCT 中频分量门限值 $\bar{\tau}_{i,k} = [JND(\bar{C}_{i,j}^k(u,v))]$ 。

(3) 对 $j=0, 1, 2, \dots, n^2-1$, 将图像 W''' 的第 k 组门限值作为中频分量 $\bar{C}_{i,j}^k(u,v)$ 的多数字基底, 即 $\bar{r}_{i,k} = [JND(\bar{C}_{i,j}^k(u,v))]$ 。由多数字基整数的定义和式(5), 求出多数字基整数 \bar{E}_j 的各位数字 $E_j^0, E_j^1, \dots, E_j^{k^2-2}, E_j^{k^2-1}$, 并化为十进制整数 \bar{D}_j 。

(4) 若 JPEG 量化值为 Null, 则由 $\bar{D}_j, \bar{\tau}_j$ 结合式(9)直接计算水印图像 W' 的 DCT 中频系数; 否则, 抽取品质因子 Tag, 指定阈值 $\lambda=0.5$, 判断 $\bar{\tau}_j = \pm 1$ 的极性, 由式(10)计算相应的高低频系数。

(5) 在阈值 λ 约束下, 对水印图像 W' 的交流系数 $C_{i,j}^k(u,v)$ 进行 Zig_Zag 排列, 并由 2 维 IDCT 反变换, 重构水印图像 W' 。

(6) 对分组情形(即 $g_1 < g$), 重复本节前述算法步骤 3~5, 可重构水印图像 W'' 。

5 实验结果及分析

仿真实验取 256 级 512×512 灰度 Lena 位图为宿主图像, 水印取 256 级 128×128 灰度 Barbara 和 256 级 128×128 灰度 Camera 图像, 水印相似性由归一化相关进行判定。仿真实验的 DCT 块数取 $n=8$, Barbara 和 Camera 的水印数据以载波信号混叠的方式叠加到 DCT 频域。两个水印嵌入后, 测得的峰值信噪比 PSNR 为 39.12, 水印的隐藏效果良好。虽然

受 DCT 块量化效应的影响, DCT 块的边缘灰度级有所变化, 但受 JND 门限的调整, 对照图 2(a) 和图 2(c), 嵌入水印前后的视觉失真变化并不明显。

在 BMP 位图格式下, 对嵌入双水印的载体图像(图 2(c))提取的水印分别为图 3(a)、图 3(b), 水印图像清晰, 相似度为 $NC=1$ 。实验结果表明本文算法有效地改进了 DCT 能量过于集中图像左上部的缺点, 说明重构是正常的。下面是利用 StirMark 对图 2(c) 进行仿真攻击测试的部分实验数据, 这里主要对峰值信噪比 PSNR 测定值进行讨论。



图 2 宿主图像和原始水印及载体图像
Fig. 2 Owner image and original watermark and carrier image

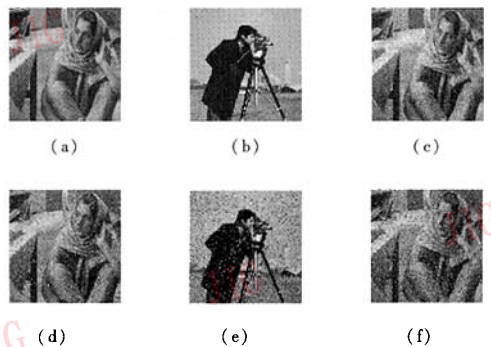


图 3 StirMark 攻击后提取的水印图像
Fig. 3 Extracts watermarking image after attacked by StirMark

(1) 压缩 对载体图像图 2(c) 进行有损压缩仿真攻击, 取不同的 JPEG 量化因子 Tag, 测得相应

的峰值信噪比 PSNR, 如表 1 所示。

表 1 取不同量化因子的 JPEG 压缩

Tab.1 JPEG compression with various quantization factor

JPEG	PSNR	NC	双水印提取
80	31.47	0.835 1	-
70	30.83	0.767 2	图 3(a)、(b)
40	28.63	0.620 3	-
30	27.04	0.572 4	-

当压缩的 JPEG 量化因子为 $Tag = 70$ 时, 嵌入水印后的图像为图 4(a), 提取两个水印时, 求得相似度为 $NC = 0.767$, 峰值信噪比为 $PSNR = 30.83\text{dB}$, 而当 JPEG 量化因子取 $Tag = 30$ 时, 测得的峰值信噪比为 $PSNR = 27.04\text{dB}$, 略高于文献[11]中 DCT 块分类法中平均 25.5dB 的相应数据, 但依本文算法在检测和提取双水印时, 水印的相似度 NC 低于文献[10]中给出的小波域嵌入法的实验值(约 $NC > 0.7$), 反映出 DCT 与 DWT 在抵抗 JPEG2000 压缩时二种算法的各自特点和相异性。

(2) 加噪 对载体图像(图 2(c))分别加入强度为 $\beta = 1\% \sim 10\%$ 的高斯白噪声(图 4(b))和椒盐噪声(图 4(c))进行测试, 实验结果如表 2 所示。结果表明, 当噪声强度均为 5% 时, 测得的峰值信噪比分别为 $PSNR = 28.87\text{dB}$ 和 $PSNR = 27.46\text{dB}$, 其相似度分别为 $NC = 0.903$ 和 $NC = 0.917$, 所提取的两个水印分别为图 3(c)和图 3(d)。与文献[2]的单水印嵌入相比, 本文算法在混叠 DCT 频域中嵌入双水印后, $PSNR$ 测定值平均大于 27dB , 说明抗噪能力较强, 接近文献[10]中小波域相应的 $PSNR$ 测定值。

表 2 加噪实验结果

Tab.2 results of experiment adding noise

高斯噪声				椒盐噪声			
含噪率 (%)	PSNR (dB)	NC	提水印	含噪率 (%)	PSNR (dB)	NC	提水印
10	27.03	0.761 7	-	10	26.72	0.816 5	-
5	28.87	0.903 0	图 3(c)	5	27.46	0.917 0	图 3(d)
3	29.41	0.969 9	-	3	28.79	0.953 0	-
1	30.28	0.985 2	-	1	30.03	0.976 9	-

(3) 剪切 对载体图像进行不同位置和大小局部剪切, 得到残余图像(图 4(d))。由于本文算

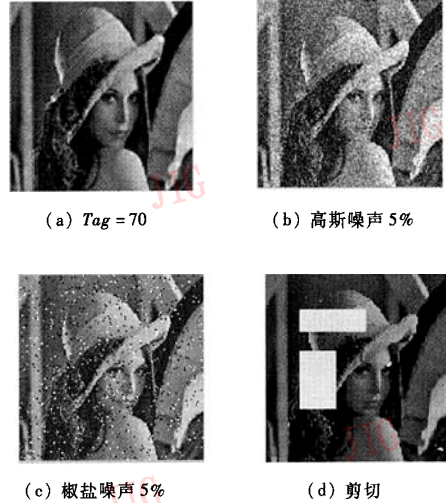


图 4 受 StirMark 攻击后的载体图像

Fig.4 Carrier image attacked by StirMark

法对双水印进行了 DCT 块分组, 并采用了扩频混叠传输, 使水印的嵌入位置更加分散。实验结果表现出了较强的抗干扰能力。对残余图像进行双水印提取的操作, 测得峰值信噪比为 $PSNR = 12.54\text{dB}$, 相似度为 $NC = 0.863$, 所提取的两个水印分别为图 3(e)和图 3(f)。虽然载体图像受到了剪切攻击, 但提取的两个水印仍可被正确识别出来。

(4) 滤波 对载体图像(图 2(c))进行中值滤波处理后, 载体图像的质量虽然有所下降, 但提取出的双水印其质量仍较好。此时, 测得峰值信噪比 $PSNR = 30.29\text{dB}$, 相似度 $NC = 0.895$ 。文献[7]中相应的峰值信噪比测定值为 $PSNR = 30.12\text{dB}$, 相似度测定值为 $NC = 0.891 0$, 本文实验结果相对略为占优。此外, 本文还对载体图像(图 2(c))进行了平均滤波的攻击测试, 相似度虽下降到 $NC = 0.724$, 但测得的峰值信噪比仍可达到 $PSNR = 21.08\text{dB}$, 好于文献[11]中块分类法的平均滤波 $PSNR = 16.919\text{dB}$, 这主要是扩展混叠的 DCT 频带及由 JND 灰度门限控制选块后, 有效地平衡了 DCT 高中低各种频率的能量, 增强了 $PSNR$ 值。

6 结论

采用 JND 门限和多数字基底对 DCT 选块分组, 经 DCT 域频谱扩展编码并混叠加载, 使多重水印的嵌入位置更隐蔽, 较好地抑制了 DCT 块量化效

应。StirMark 攻击实验结果表明,经 JPEG 压缩、滤波、加噪、剪切后,多个灰度级盲水印的提取不依赖原始水印和宿主图像,顽健性和鲁棒性明显增强。

参考文献 (References)

- 1 Watson A B. DCT quantization matrices optimized for individual images[J]. *Human Vision, Visual Processing and Digital Display*, 1993, SPIE-1913:202 ~ 216
- 2 Wang Han-wei, Chen Xiang-dong. A block-based adaptive watermarking technique in DCT-domain[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2002, 3(5):22 ~ 26. [王焕伟,陈向东. 一种基于块的DCT域数字图象自适应水印技术[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2002, 3(5):22 ~ 26.]
- 3 Kundur D, Hatzinakos D. Digital watermarking using multiresolution wavelet decomposition[A]. In: *Proceedings of IEE ICASSP[C]*, Washington, Seattle, VSA, 2969 ~ 2972.
- 4 Wang Chun-sheng, Cheng Yi-min, Wang Yi-xiao. An adaptive digital watermarking algorithm based on the classification of image blocks[J]. *Journal of Computer Engineering and Applications*, 2002, 38(21):106 ~ 109. [汪春生,程义民,王以孝. 一种基于块分类的自适应数字水印算法[J]. 计算机工程与应用学报, 2002, 38(21):106 ~ 109.]
- 5 Liu Bing, Liang Yong, Li Hai-yan. Watermarking for image based on visual masking[J]. *Journal of Yunnan University*, 1999, 21(5):399 ~ 402. [刘兵,梁勇,李海燕. 基于空间视觉掩蔽效应的图象数字水印频域技术[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1999, 21(5):399 ~ 402.]
- 6 Lumini A, Miao D. Blind watermarking system for digital images in the wavelet domain[A]. In: *Proceedings 12th International Symposium Electronic Imaging Security and Watermarking of Multimedia Contents II[C]*, San Jose, California, USA, 2000:524 ~ 535.
- 7 Wo Yan, Han Guo-qiang, Zhang Bo. Gray-level adaptive blind watermarking based on human visual perception[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2003, 24(9):132 ~ 141. [沃焱,韩国强,张波. 基于视觉特性的灰度级自适应盲水印算法[J]. 通信学报, 2003, 24(9):132 ~ 141.]
- 8 Zhang Jun, Wang Neng-chao. Neural network based watermarking for image authentication[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, 15(3):307 ~ 312. [张军,王能超. 用于图象认证的基于神经网络的水印技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(3):307 ~ 312.]
- 9 Wu Da-chun, TSAI Wen-hsiang. Data hiding in image via multiple-base number conversion and lossy compression[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1998, 44(4):1406 ~ 1412.
- 10 Xiao Liang, Wu Hui-zhong, Wei Zhi-hui. Multiple digital watermarks embedding in wavelet domain with multiple-based number[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, 15(2):200 ~ 204. [肖亮,吴慧中,韦志辉. 用多数字基整数实现小波域多重数字水印嵌入[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(2):200 ~ 204.]
- 11 Liu Jin-hong, Yao Wei, Zhang Wei. An image watermarking algorithm with high robustness[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(10):1228 ~ 1233. [刘金虹,姚维,章玮等. 高稳健图像水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(10):1228 ~ 1233.]