

一种基于 DCT 域的灰度级盲水印嵌入优化算法

马 强^{1,2}, 付艳茹³

MA Qiang^{1,2}, FU Yan-ru³

1.浙江警官职业学院 安防系,杭州 310018

2.北京邮电大学 软件学院,北京 100876

3.浙江警官职业学院 基础部,杭州 310018

1.Department of Security and Protection,Zhejiang Officer Vocational College, Hangzhou 310018, China

2.School of Software, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

3.Department of Basic Science, Zhejiang Officer Vocational College, Hangzhou 310018, China

E-mail: maqiang@zjy.com.cn

MA Qiang, FU Yan-ru. Optimization arithmetic on gray-level blind watermarking embedding in DCT domain. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(18): 59-61.

Abstract: The goal of this work is to show an optimization arithmetic on gray-level blind watermarking with biggish resolution embedding in DCT domain based on the owner image. With visual frequency sensitivity, gray scale enhancement, Just Noticeable Distortion (JND) on gray-level image, this arithmetic selects DCT-block to compress watermarking image and make automorphic disorder, then embeds watermarking. This arithmetic has no use for the owner image when extracting watermarking, and embeds a great deal of watermarking. Experimental result proves that it is robust enough to resist JPEG compression, visual image has a higher fidelity, robustness and obstinacy.

Key word: DCT; gray-level image; blind watermarking; compress watermarking; automorphic disorder

摘 要:从改进的角度,提出一种基于宿主图像的 DCT 域嵌入较大分辨率灰度级数字盲水印的优化算法。该算法采用视觉频率、图像灰度增强和灰度图像门限值 JND 量化选取 DCT 子块系数,对嵌入宿主图像的较大分辨率 256 级灰度水印先行压缩和自同构置乱,再行嵌入宿主图像。该算法在水印提取时无需宿主图像和原始水印的参与,较大幅度地提高了水印的嵌入量。实验结果表明此算法抵抗压缩的能力强,视觉图像无明显降质,具有较强的鲁棒性和顽健性。

关键词: DCT; 灰度图像; 盲水印; 水印压缩; 同构置乱

文章编号:1002-8331(2007)18-0059-03 文献标识码:A 中图分类号:TP391

1 引言

以 DCT 变换域和 DWT 变换域构造的数字水印算法,其研究的基点是源于抵抗 JPEG 压缩和相应几何变换的能力。由于 DCT 变换本身对抵抗 JPEG 压缩所固有的鲁棒性以及良好的统计特征,使得相应的研究一直十分活跃,不断推出新的水印算法^[1-7]。Cox^[8]曾给出了一种 DCT 频域嵌入数字水印序列的算法,该算法具有较强的鲁棒性和抵抗 JPEG 压缩的能力,但因水印独立选取于高斯正态分布区间 $N(0,1)$ 的随机序列,故嵌入的水印量是不足的。牛夏牧^[9]等对此提出了一种改进算法,即先将 256 级灰度水印图像分解为二值图像,再将灰度水印图像嵌入到宿主图像中,从而增大了嵌入的水印量。该算法对灰度水印图像的转换处理是有效的,与 Cox 提出的算法相比,水印的顽健性大为增强,但该算法一是非盲水印嵌入,提取水印时尚需原始宿主图像参与,二是所嵌入的灰度水印图像没有压缩,对处理较大分辨率的灰度水印图像是比较困难的。

本文基于改进的角度,提出一种在宿主图像的 DCT 域嵌

入较大分辨率灰度级数字盲水印的优化算法。该算法采用视觉频率和灰度门限量化选取 DCT 子块,对嵌入宿主图像的较大分辨率灰度水印先行压缩和自同构置乱,在确保有效增强鲁棒性和顽健性的同时,较大幅度地提高水印嵌入量。

2 较大分辨率灰度水印的优化方法

基本想法是在 DCT 域对较大分辨率灰度水印图像进行优化处理,即利用视觉系统频率响应函数,由视觉感应径向频率对 DCT 子块系数进行分类,通过灰度和背景的照度来确定灰度门限值 JND(Just Noticeable Distortion),降低 DCT 的块量化效应,确定水印的加载强度,再进行同构的水印置乱及二值分解,并确定压缩策略。

2.1 由视觉感应径向频率对 DCT 分类

对 256 级灰度宿主图像 W 和 256 级灰度水印图像 W' 进行 DCT 域 8×8 子块分解,需要量化 DCT 各子块,确定水印的嵌入位置和量化步长,选取不同的水印嵌入强度。受 DCT 变换

在高频、中频、低频 3 个分量上固有特性的限制,将一幅 256 级灰度水印图像 W' 嵌入在 256 级灰度宿主图像 W 中,不同程度地会出现 DCT 块量化效应现象,且会因有损压缩而增强。由于水印嵌入量的分布与人的视觉感知不完全相同,人眼视觉感知的是图像的失真度变化而非水印嵌入的统计特征,它可用视觉系统的频率响应函数 $H(\omega)$ 及 HVS 曲线来刻画。在视觉感应中,对某个视觉角度的径向频率 ω ,其对应的视觉系统频率响应函数为 $H(\omega)=(a+b\omega)e^{-c\omega}$ (a, b, c 为常数),但 $H(\omega)$ 对 DFT 变换有较好的适应性,而 DCT 仅是 DFT 变换的一部分,故可将 $H(\omega)$ 修正为 $H'(\omega)=\lambda H(\omega)$,其修正系数 λ 按式(1)计算:

$$\lambda=(0.25+(\ln(\frac{2\pi\omega}{a}+(\frac{4\pi^2\omega^2}{a^2}+1)^{0.5}))^2/\pi^2)^{0.5} \quad (1)$$

灰度水印图像 W' 的每个 DCT 系数 $C'_{ij}(u, v)$ 所对应的视觉频率可按式(2)计算:

$$H'_{ij}(\omega)=(0.25+(\ln(\frac{2\pi\omega}{a}+(\frac{4\pi^2\omega^2}{a^2}+1)^{0.5}))^2)^{0.5}(a+b\omega)e^{-c\omega} \quad (2)$$

其中 $C'_{ij}(u, v)$ 视觉角度的径向频率 ω 值,可由 $C'_{ij}(u, v)$ 的径向距离与采样函数求出。

实验表明:当 $\omega < 8$ 时,对应的 $C'_{ij}(u, v)$ 是 DCT 低频系数;当 $\omega > 20$ 时,对应的 $C'_{ij}(u, v)$ 是 DCT 高频系数;当 $8 \leq \omega \leq 20$ 时,对应的 $C'_{ij}(u, v)$ 是 DCT 中频系数。由径向频率 ω 对 DCT 系数进行分类,便于量化和压缩。

2.2 确定灰度图像门限

根据宿主图像 W 各 DCT 子块的具体特性,可由灰度图像门限值来确定量化的步长和加载的水印强度。由于在灰度宿主图像 W 的 8×8 子块分解中,图像各区域及各子块之间图像的灰度、纹理和背景的照度是不同的,而人眼视觉感应对变换频繁和相对平缓的 DCT 子块区域的敏感程度不同,故对灰度和照度等变换频繁的 DCT 子块区域嵌入大量的水印,而对于变换相对平缓的 DCT 子块区域嵌入少量的水印,通过量化控制来降低 DCT 块的量化效应。结合视觉频率 $H'(\omega)$,本文定义灰度图像门限值 JND 为:

$$JND(M_{ij})=\frac{1}{n^2} \sum_{(x,y) \in M_{ij}} F(m_{ij}) \cdot \frac{|f(x,y)-m_{ij}|}{m_{ij}} \quad (3)$$

其中 M_{ij} 是分解的子块区域, $F(m_{ij})=1/m_{ij}^\alpha$ 为修正因子, α 为实验系数 ($0.6 \leq \alpha \leq 0.7$)。

2.3 灰度水印图像压缩

$M_1 \times M_2$ 的 256 级灰度水印图像 W' 不同于 $N(0,1)$ 内的随机序列或二值图像,信息量很大,如直接嵌入到 $N_1 \times N_2$ 的 256 级灰度宿主图像 W ($N_1 > M_1$ 且 $N_2 > M_2$) 中,图像降质明显。本文采用的压缩方法是对灰度水印图像 W' 进行 DCT 变换后,去掉高频分量的交流系数,只保留灰度水印图像 W' 的低频分量和中频分量的交流系数。该压缩方法相当于在稀疏型的 DCT 变换阵中,有序丢掉若干个(分布在行或列上)冗余的零元素,而对高低频分量处理所导致的图像降质,由灰度图像门限值 JND 及视觉系统频率调节的方法进行感应补偿。如此可兼顾人眼对低频分量敏感的视觉感应和灰度水印图像 W' 的解码还原,压缩比可以达到水印图像压缩的要求。

2.4 水印的同构置乱与二值分解

为将灰度水印图像 W' 进行黑白二值分解,以得到 DCT 系数(或视觉角度径向频率 ω)的二进制编码,本文采用 Torus 自同构变换对灰度水印图像 W' 进行随机置乱。设模 m 表示图像

的像素, k 为由实验自定的自同构映射的最小整周期,则 Torus 变换的数学定义为:

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k & k+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \bmod(m) \quad (4)$$

经 Torus 自同构变换,灰度水印图像 W' 的任意像素点 (x_n, y_n) 是某像素点 (x_0, y_0) 进行 n 次 Torus 自同构映射得到的,其像素的相对位置改变了,消除像素间的空间相关性,但具体颜色值未变。故采用 Torus 变换对灰度水印图像 W' 进行置换,将置乱灰度水印图像 W' ,产生一幅混乱的图像,隐蔽了水印。考虑到顽健性及水印置乱后的有效解码,对 W' 重复施加 Torus 自同构映射进行 3 次置乱。先将 $M_1 \times M_2$ 的 256 级灰度水印图像 W' 分割为 8×8 相互独立的子块,用 Torus 自同构映射对灰度水印图像 W' 进行 3 次置乱,得到置乱后的 3 个水印序列 W'_1 、 W'_2 、 W'_3 ,并将每个水印序列 W'_i 化为二进制数表示。由灰度水印图像 W' 的 8×8 子块可得 64 个 DCT 块系数,若将置乱后的 3 个水印序列 W'_1 、 W'_2 、 W'_3 分别用二进制数序列来表示,则每个水印序列 W'_i 的二进制位数的长度均为 6 位,即置乱后的水印序列为 W'_i ($i=1, 2, 3$),其相应二进制数表示的第 1 位到第 6 位分别为 $W'_{i,1}$ 、 $W'_{i,2}$ 、 $W'_{i,3}$ 、 $W'_{i,4}$ 、 $W'_{i,5}$ 、 $W'_{i,6}$ (图 1),整理后得到由 0、1 构成的二值序列 $\{W'_{ij}\}$ ($i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 6$),将其存储在二维数组 $\{W'(i, j)\}$ ($i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, 6$) 中。经 Torus 自同构映射及对置乱后水印序列的 6 位二进制进行编码,灰度水印图像 W' 的处理已间接地转化为黑白二值图像问题。

0	11	26	0	0	0	0	0	1
24	35	1	0	1	0	1	0	0
7	63	13	0	1	0	0	1	0
(a) W'_i			(b) $W'_{i,1}$			(c) $W'_{i,2}$		
0	1	1	0	0	0	0	1	1
1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	0
(d) $W'_{i,3}$			(e) $W'_{i,4}$			(f) $W'_{i,5}$		
						(g) $W'_{i,6}$		

图 1 水印序列 W'_i 的二进制分解表示

3 水印嵌入

步骤 1 将 $N_1 \times N_2$ 的 256 级灰度宿主图像分割为相互独立的 8×8 子块 M_{ij} ,其中 $i, j=1, 2, \dots, 8$ 。取 $u=0, 1, 2, \dots, N_1-1$ 及 $v=0, 1, 2, \dots, N_2-1$,对每个子块 M_{ij} 进行 DCT 变换,即

$$C(u, v)=a(u) \cdot a(v) \sum_{x=0}^{N_1-1} \sum_{y=0}^{N_2-1} f(x, y) \cdot \cos \left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N_1} \right] \cdot \cos \left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N_2} \right]$$

由此计算出宿主图像 W 的 DCT 系数 $C_{ij}(u, v)$:

$$C_{ij}(u, v)=DCT\{M_{ij} \mid M_{ij}=f_{ij}(x, y), 0 \leq x \leq N_1/8, 0 \leq y \leq N_2/8\}$$

并按 Zig_Zag 扫描排列。

步骤 2 对宿主图像 W 的 M_{ij} 子块,分别计算图像的灰度门限值 $JND(M_{ij})$;对各 $C_{ij}(u, v)$ 分别计算视觉频率 $H'_{ij}(\omega)$;对水印图像 W' 进行简式压缩,得到压缩后的 $M_1 \times M_2$ 灰度水印图像。

步骤 3 将压缩后 $M_1 \times M_2$ 的灰度水印图像 W'_0 分割为相互独立的 8×8 子块 W'_{ij} ,其中 $i, j=1, 2, \dots, 8$ 。对分割后的每个子块 W'_{ij} 进行 DCT 变换,计算每个 W'_{ij} 相应的交流系数

$$C'_{ij}(u, v)=DCT\{M'_{ij} \mid M'_{ij}=f'_{ij}(x, y), 0 \leq x \leq M_1/8, 0 \leq y \leq M_2/8\}$$

步骤 4 利用 Torus 变换对水印图像 W_0' 全部子块 M'_{ij} 的 DCT 系数 $C'_{ij}(u,v)$, 进行 3 次 Torus 置乱变换, 置乱后的 $C'_{ij}(u,v)$ 转换成水印序列 W'_1, W'_2, W'_3 , 并用 6 位二值序列表示为 $\{W'_{ij}\} (i=1,2,3; j=1,2, \dots, 5)$, 再存入二维数组 $\{W'(i,j)\} (i=1,2,3; j=1,2, \dots, 6)$ 中。

步骤 5 当 $0 \leq u \leq N_1-1$ 及 $0 \leq v \leq N_2-1$ 且 u, v 不同时为 0 时, 对 $i=1,2,3$ 及 $j=1,2, \dots, 6$, 修改视觉径向频率 $\omega < 20$ 所对应的 DCT 系数, 将经 Torus 置乱的水印二值序列数组 $\{W'(i,j)\}$ 嵌入到宿主图像 W 中。即若 $W'(i,j)=0$, 则令 $\bar{C}_{ij}(u,v) = \Delta(C_{ij}(u,v), H'_{ij}(\omega))$; 若 $W'(i,j)=1$, 则记量化函数为 $\Delta(\cdot)$, 且可令

$$\bar{C}_{ij}(u,v) = \Delta(C_{ij}(u,v), H'_{ij}(\omega)) + 0.5 \times W'(i,j) \times JND(M'_{ij})$$

步骤 6 对宿主图像 W 所有被修改的 DCT 系数 $\bar{C}_{ij}(u,v)$ 进行 IDCT 反变换, 即对 $x, y=1, 2, \dots, N-1, f(x,y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(u) \cdot$

$a(v) \cdot C(u,v) \cdot \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right] \cdot \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right]$ 得到嵌入水印后的图像 W'' 。

4 水印提取

步骤 1 对嵌入灰度水印的 $N_1 \times N_2$ 待测图像 W'' 分割为相互独立的 8×8 子块, 分别对各 DCT 子块 M''_{ij} 进行二维 DCT 变换, 计算出待检测图像 W'' 各 DCT 子块的 DCT 系数 $C''_{ij}(u,v)$ 、灰度门限值 $JND(M''_{ij})$ 和视觉频率 $H''_{ij}(\omega)$ 。

步骤 2 利用 $JND(M''_{ij})$ 和 $H''_{ij}(\omega)$ 对各 $C''_{ij}(u,v)$ 进行量化, 以构造置乱后的数组 $\{W''(i,j)\}$ 。即若量化值为奇数, 则说明已嵌入水印位, 令数组元素 $W''(i,j)=1$; 否则, 说明未嵌入水印位, 令数组元素 $W''(i,j)=0$ 。

步骤 3 对 $\{W''(i,j)\}$ 进行 Torus 反置乱自同构恢复, 按每组 5 位的行序排列为 3 组水印序列 $\{W''_{ij}\}$ 。分别计算 $\sum_{i=1}^3 W''_{ij}$, 若 $\sum_{i=1}^3 W''_{ij} > 1$, 则 $W'_j=1$, 否则 $W'_j=0$, 则得水印的黑白二值图像序列 $\{W'_j\} (j=1,2, \dots, 5)$ 。

步骤 4 按表达式 $\sum_{j=1}^5 2^j W'_j$ 进行展开, 将黑白二值的图像序列 $\{W'_j\} (j=1,2, \dots, 5)$ 化为十进制数, 得到水印图像 W' 的所有 DCT 系数, 对其进行 2 维 IDCT 反变换, 重构水印图像 W' 。

5 实验结果

基于 VC++ 和 MATLAB 环境进行仿真实验。取 DCT 子块数 $N=8$, 宿主图像取 256 级 512×512 灰度 Lena 位图 W (图 2(a)), 灰度水印取 256 级 128×128 灰度图像 W' (图 2(b))。先对水印图像 W' 进行一定比例的简式压缩预处理, 然后利用式 (2) 和式 (3) 分别调节 W' 的视觉系统频率和补偿 W' 的灰度门限 JND 值, 最后利用式 (4) 对 W' 进行 3 次 Torus 同构置换构造 6 位二值 bit 序列, 嵌入到 512×512 灰度 Lena 位图 W 中。水印的相似性按归一化相关量值进行判断。仿真实验表明, 与一般 DCT 域水印嵌入算法相比, 预处理后的灰度宿主图像可以有效地隐蔽 256 级灰度水印图像, DCT 块的边缘灰度级变化不显著, 提取的灰度水印比较清晰, 图像重构正常。

表 1 给出了一组在 BMP 位图格式下嵌入不同压缩比灰度



(a)Lena 原图 (b)原始水印 (c)5:1 压缩位图

图 2 原始图像及压缩位图

水印的实验数据。可以看出, 对灰度水印进行 5:1 的压缩后再行嵌入, 传统的 DCT 块的边缘灰度级变化并不明显, 对比较图 2(a) 和图 2(c), 视觉上难以发现嵌入前后的失真变化。对嵌入压缩灰度水印后的待测图像 (图 2(c)) 进行提取水印的操作, 压缩比为 5:1 时, 测得的峰值信噪比 PSNR 为 38.73 dB, 水印的相似度 NC 为 0.998, 提取的水印图像为图 3(a); 压缩比为 7:1 时, 峰值信噪比 PSNR 仍可达到 30.21 dB, 抗压缩能力较好。

表 1 灰度水印的压缩实验数据

压缩率	PSNR	NC	提取水印
5:1	38.73	0.998	图 3(a)
7:1	30.21	0.875	-
8:1	24.42	0.596	-
9:1	21.03	-0.417	-



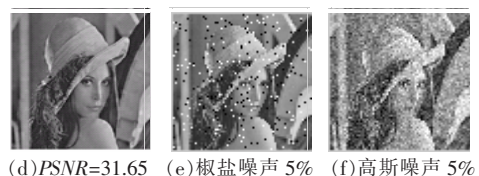
(a)NC=0.998 (b)NC=0.872 (c)NC=0.643 (d)NC=0.902 (e)NC=0.912

图 3 提取的水印图像

对嵌入压缩灰度水印的待测图像 (图 2(c)) 分别进行 TAG 为 30~50 的不同量化因子的 JPEG 压缩, 表 2 给出了一组相应的实验数据。当压缩率为 1.5 时, 取 JPEG 量化因子 80, 水印提取时测得峰值信噪比 PSNR 达到了 30.68 dB, 水印的相似度 NC 为 0.872, 提取的水印为图 3(b)。虽然 DCT 变换引起背景亮度和对比度的下降, 但经视觉频率补偿和 JND 灰度门限调整, 背景照度有所增强, 有效抑制了 DCT 块量化效应。当压缩率为 6:1 且 JPEG 量化因子为 30 时, 提取水印时的峰值信噪比 PSNR 达到 24.39 dB, 而水印 (图 3(c)) 的相似度达到 0.467。虽

表 2 待测图像的 JPEG 压缩实验数据

TAG	压缩率	PSNR	NC	提取水印
80	1.5:1	30.68	0.872	图 3(b)
70	3.5:1	28.21	0.713	-
50	5:1	26.47	0.643	-
30	6:1	24.39	0.467	图 3(c)



(d)PSNR=31.65 (e)椒盐噪声 5% (f)高斯噪声 5%

图 4 待测实验图像