

基于 DFT 变换的强鲁棒性水印算法*

张晓丹

(吉首大学 数学与计算机科学学院,湖南 吉首 416000)

摘要:数字水印技术已经成为解决数字多媒体中版权问题和内容认证的主要工具,是学术界的研究热点之一。本文在研究 DFT(离散傅立叶变换)及 HVS(人类视觉系统)模型在数字水印系统中的应用基础上,提出了一种基于 HVS 和 DFT 域的鲁棒性水印算法。该算法在原始图像的高频 DFT 系数中嵌入水印信息,将原始图像块及水印图像块分别按照方差大小进行排序,并按照方差的顺序将水印图像块嵌入到原始图像块中。最后对该算法做了大量仿真实验,用 StirMark 模拟了图像可能遭受的各种攻击,仿真结果表明该算法具有较好的鲁棒性和不可见性。

关键词:数字水印;水印攻击;HVS;DFT;鲁棒性;不可见性

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1672-6693(2010)06-0064-05

数字水印技术是通过特定的算法将版权信息嵌入到多媒体数据中,且不影响原媒体的使用,同时能通过专用的检测器提取嵌入的信息,从而实现版权保护、篡改检测等应用。鲁棒性水印作为数字水印的一个重要分支,一直以来都是水印算法研究的热点。本文从提高水印的不可见性和鲁棒性出发,提出了一种基于 HVS 和 DFT 域的水印算法,并通过试验证明该算法具有较好鲁棒性和不可见性。

1 DFT 理论基础

离散傅立叶变换是数字信号处理技术中常用的线性变换技术之一,也是图像压缩中常用的变换编码方法之一^[1-2]。数字水印在遭受 RST(Rotation、scaling and translation) 变换后会失去同步,从而无法正确提取的问题一直是水印算法研究领域的难点。文献[3]提供了这样一种思路:在具有 RST 不变性的变换域嵌入水印,即便图像遭受了 RST 变换,在变换域中依然能检测到水印。傅立叶变换(DFT)有以下特点:具有 RST 不变性的变换域;利用人类视觉特性中的相位敏感度高^[3-4]。因此在宿主图像的 DFT 域中嵌入水印是鲁棒性数字水印算法很好的一种选择。假定图像是定义在整数笛卡尔坐标网格上的实值函数,其中, $0 \leq x \leq n_1 - 1$, $0 \leq y \leq n_2 - 1$, 那么图像 $f(x, y)$ 的二维的离散傅立叶变换定义如公式(1)^[5]。

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{n_1-1} \sum_{y=0}^{n_2-1} f(x, y) \exp\left(-\frac{2j\pi ux}{n_1} - \frac{2j\pi vy}{n_2}\right) \quad (1)$$

其相应的反变换公式为

$$f(x, y) = \frac{1}{n_1 n_2} \sum_{u=0}^{n_1-1} \sum_{v=0}^{n_2-1} F(u, v) \exp\left(-\frac{2j\pi ux}{n_1} - \frac{2j\pi vy}{n_2}\right) \quad (2)$$

2 HVS 在数字水印系统中的应用

人眼对图像信息的处理并不是逐点进行,而是抽取空间、频率或色彩的特征进行编码^[6]。视觉感知特点与统计意义上的信息分布并不一致,即统计上需要更多信息量才能表达的特征对视觉感知可能并不重要,从感知的角度来讲,无须详细表征这部分特征。文献[6]中提出了一种人眼视觉系统模型(HVS),并给出了视觉系统的频率响应函数如(3)式

$$H(\omega) = (a + b * \omega) \exp(-\omega) \quad (3)$$

其中 ω 为视角正对的径向频率,单位为周/度 $(^\circ)$, a, b, c 为决定 HVS 曲线形状的常数,当 $\omega_{\max} = 3$ 周/度 $(^\circ)$ 时, HVS 曲线的形状定义为(4)式

$$H(\omega) = (0.2 + 0.45 * \omega) \exp(-0.18c\omega) \quad (4)$$

直接将视觉函数与 DFT 相结合,提出适应 DFT 变换的视觉频率矫正函数如(5)式

* 收稿日期 2010-04-02 修回日期 2010-07-05

资助项目:吉首大学校级科研资助(No. 07JDZC016)

作者简介:张晓丹,男,讲师,硕士,研究方向为计算机应用技术。

$$|A(\omega)| = \left(\frac{1}{4} + (\ln(2\pi\omega/\alpha) + (4\pi^2\omega^2/\alpha^2 + 1)^{1/2})^2/\pi^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

其中 $\alpha = 11.636^\circ - 1$, 这样视觉系统的频率响应函数如(6)式

$$H(\omega) = H(\omega)|A(\omega)| = \begin{cases} 0.05 \exp(\omega^{0.556}) & \omega < 7 \\ \exp(-9|\lg\omega - \lg 9|^{23}) & \omega > 7 \end{cases} \quad (6)$$

科学研究表明:人眼对 $8 < \omega < 12$ 之间的区域最敏感,对此区域对应的图像的像素即使做很小改动,也会引起人眼的注意^[7]。另一方面,根据 JPEG 有损压缩原理:一般将 DFT 变换的高频系数变为零,然后在将剩下 DFT 系数进行 Huffman 编码或其他编码,来完成图像的压缩。所以如果在原始图像的高频 DFT 系数中嵌入水印信息,很有可能在 JPEG 有损压缩时擦除水印信息^[7-8]。在 $12 < \omega < 20$ 之间为中频区域,在对应的 DFT 变换中频系数中嵌入水印信息既能够保证水印信息的鲁棒性又能够满足其不可见性^[9]。

本文根据 HVS 特点,将宿主图像块及水印图像块分别按照方差大小进行排序,并按照方差的顺序将水印图像块嵌入宿主图像块中。这意味着纹理复杂的宿主图像块,嵌入的水印图像块也纹理复杂;纹理简单的宿主图像块嵌入的水印图像块也纹理简单。在嵌入水印信息的时候,所有的图像块嵌入的水印强度相同。

3 基于 HVS 和 DFT 变换的图像水印算法

3.1 嵌入水印前的图像预处理过程

假设宿主图像和水印图像分别为 $X(i, j)$ ($0 \leq i \leq c, 0 \leq j \leq d$), $Q(I, j)$ ($0 \leq I \leq e, 0 \leq j \leq f$), 要求 $c \geq 2e, d \geq 2f$, 利用密钥 K 生成服从标准正态分布 $N(0, 1)$ 的 $(1/e * f)$ 的伪随机序列 S , 将 S 从小到大排列成 S' , 然后将二值水印图像 Q 按行排列成一维序列 $(1/e * f)$, 记为 G , 根据一维序列 G 中 0 的个数 A_1 和 1 的个数 A_2 , 作为随机序列的分界线。分界线以左为 A_1 个较小的随机数, 分界线以右为 A_2 个较大的随机数。当 G 的像素值为 1, 则取排序后的随机序列 S 分界线以右的数值排在相应的位置; 当 G 的像素值为 0, 则取排序后的随机序列 S' 分界线以左的数值排在相应的位置, 最后将 G 按行排列成 $e * f$, 得到 G' , 该方法增强了水印的鲁棒性和检测算法的可靠性。同时, 密钥的使用加强了安全性。水印预处理流程图见图 1。

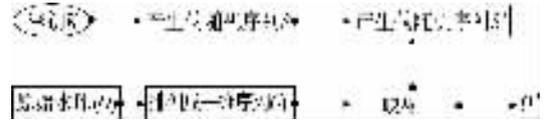


图 1 水印预处理流程图

3.2 水印嵌入算法

在图像 DFT 域的低频系数上嵌入水印信号, 会降低水印图像的质量, 并且容易被肉眼所察觉; 而在高频分量上嵌入的水印信号又很容易被 JPEG 压缩、低通滤波等常用图像处理操作所破坏, 鲁棒性较差^[9]。因此, 本算法选择在标记为可以嵌入水印信息的图像子块 DFT 域的中频系数上嵌入水印信号。水印嵌入算法的流程如下。

步骤 1 载体图像分块。将大小为 M, N 原始载体图像 $H(x, y)$ 分成互不覆盖的子块, 块的大小为 $blocksize \times blocksize$, 记为公式(7)。

$$X_m = H_m(x', y') \quad (7)$$

其中 $m = 1, \dots, (M/blocksize) \times (N/blocksize)$, $0 \leq x', y' \leq blocksize$ 。

然后, 计算每个图像块的方差, 并按方差进行排序。方差越大, 纹理就越复杂, 在嵌入强度固定的情况下, 嵌入其中的水印图像块纹理就越复杂。

步骤 2 按 3.1 节所述, 将水印图像进行预处理, 并根据载体图像的块数, 将大小为 e, f 水印图像 $W(x, y)$ 分成互不覆盖的子块, 块的大小为 $(e \times blocksize/m) \times (f \times blocksize/n)$, 记为(8)式。

$$Y_m = W_m(x', y') \quad (8)$$

然后, 计算每个图像块的方差, 并按方差进行排序。

步骤 3 将载体图像块逐一进行 DFT 变换, 记为(9)式。

$$Y_m = DFT(X_m) = F_m(u, v) \quad (9)$$

其中 $F_m(u, v)$ 为第 m 个图像块 DFT 变换后空间频率 (u, v) 处的大小。提取中频系数(这里选择中频系数 $10 < Z < 30$), 按照(10)式, 将相应方差顺序的水印块嵌入其中。

$$Z' = \begin{cases} z + \alpha Q30 & Z > 10 \end{cases} \quad (10)$$

上式中 Z 为嵌入水印前的 DFT 中频系数, Z' 为嵌入水印后的 DFT 中频系数, α 为强度因子, Q 为水印信息。

步骤 4 对各子块进行 DFT 反变换, 得到嵌入水印后的图像 $H'(x, y)$ 。

步骤 5 利用峰值信噪比公式(11)计算水印嵌入的透明度。其中 $f(i, j)$ 和 $\bar{f}(i, j)$ 分别是原始图像和修改后的图像在点 (i, j) 的灰度值。

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{255^2}{\left(\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} (\bar{f}(i, j) - f(i, j))^2 \right) / M_1 M_2} \right) \quad (11)$$

3.3 水印提取检测算法

水印检测和提取是水印算法中的关键部分,是水印嵌入的逆过程。本文提出以统计检测为主,水印提取为辅的检测方案。将待测图像中水印加载位置中的信息与原始水印信息进行相关性检测,设定阈值为 T ,将待测图像中水印加载位置中的信息与原始水印信息的相似程度 C 与 T 比较,如果 $C \geq T$,则表示存在水印,如果 $C < T$,则表示水印不存在。统计检测原理说明如下: $X(n) = X(n) + \alpha W(n)$,其中 $X(n)$ 表示嵌入水印的图像, $X(n)$ 表示宿主图像, α 是强度因子, $W(n)$ 是水印图像。已知用来验证的数字水印 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 为一符合标准正态分布的伪随机序列,则待检测图像与水印的线性相关表示为(12)式。

$$Z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X'_i, q_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i q_i + \alpha W_i q_i) \quad (12)$$

X_i 是宿主图像中水印加载位置上的像素。 Q 和 W 都是服从标准正态分布的随机向量,可以认为 Q, W, X 互相独立。根据中心极限定理(12)式服从标准正态分布可表示为(13)式。

$$E(Z) = E\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X'_i, q_i)\right) = E\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i q_i + \alpha W_i q_i)\right) = E(X)E(Q) + \alpha E(W)E(Q) \quad (13)$$

嵌入水印的图像在经受各种图像处理后会遭到损伤,中频分量也会相应受损。但 Z 仍可以认为符合正态分布,因此阈值的定义不变。根据实验,设阈值 $TZ = 0.25 * E(Z) = 0.25 * \alpha$,当 $Z > TZ$ 时,认为检测到水印,否则认为水印不存在。如果水印检测结果为存在水印,则可把水印提取出来。提取过程则为嵌入算法的逆过程,水印提取过程如下。

步骤 1 原始宿主载体图像分成互不覆盖的子块,块的大小为 $blocksize \times blocksize$,并将这些子块按照方差的大小排序。

步骤 2 将含水印图像也分成互不覆盖的子

块,块的大小也为 $blocksize \times blocksize$ 。

步骤 3 原始宿主载体图像块和相应方差顺序的含水印图像块均进行 DFT 变换,并提取水印嵌入位置的中频系数。

步骤 4 利用公式(14)

$$W_b(i) = \frac{(Y_r - Y'_r)}{\beta} \quad (14)$$

计算出嵌入含水印图像中的二值序列。其中 Y'_r 为含水印图像块的水印嵌入位置的中频系数, Y_r 为对应方差顺序的原始宿主图像块的水印嵌入位置的中频系数, β 为嵌入强度。 $W_b(i)$ 为嵌入水印图像块中的二值序列。

步骤 5 将二值序列按照水印预处理的逆过程推导出水印图像。

步骤 6 利用相似度公式(15)计算提取的水印和原始水印的相似度。

$$NC = \frac{\sum_i \sum_j W(i, j) \times W'(i, j)}{\sum_i \sum_j W(i, j) \times W(i, j)} \quad (15)$$

4 算法仿真结果

本算法采用 512×512 的 lena 图像作为宿主图像,用 Matlab 编程测试算法的鲁棒性。

4.1 水印嵌入和提取实验

嵌入一个由密钥 K 生成的伪随机水印信号,序列发生器的种子为 k (取任意值),此处取值为 50,序列长度取值为 25,嵌入水印前后的图像如图 2 所示。从视觉效果上看,人眼很难分辨出两者的差别,笔者认为可以从视觉上该水印信息是不可见的。



图 2(a) 原始图象 图 2(b) 嵌入水印后的图象

水印检测时标记为可以嵌入水印的子块个数为 18,检测正确的子块个数为 15,实际上,只要有一个检测正确就可以判定水印存在。其中一个检测正确的图像子块的相似度曲线见图 3,纵轴表示相似度,横轴表示伪随机序列发生器的种子值,实验中测试了 200 个不同的种子,说明检测器可以准确判断水印的存在。

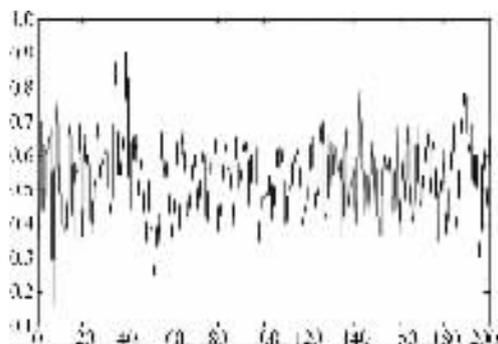


图3 水印相似度曲线

4.2 水印攻击测试

用 StirMark 对含水印图像进行攻击测试,攻击方式包括旋转(Rotation)、缩放(Scaling)、JPEG 压缩(JPEG Compression)、剪切(Shearing)、高斯噪声(Gaussian Noise)、中值滤波等(Mid-value filter)。图4是部分图像处理的结果。图中(a)是 JPEG 压缩处理的结果,压缩比为 60%;图(b)是图像添加均值为 0,方差等于 6.5 的高斯随机噪声的结果;图(c)是图像逆时针旋转 8°后的结果。



图4 StirMark 攻击结果

提取上述各种攻击后图像的水印,提取结果见表1。表中各列分别表示:攻击的种类,其中中值滤波给出了滤波窗口的大小,高斯噪声给出了噪声的均值和方差,JPEG 压缩给出了压缩比,旋转攻击给出了旋转角度,缩放攻击给出了缩放比例,本节算法能正确提取水印的块数(Right)与图像分割的块数(Total),峰值信噪比,即嵌入水印后引入的图像改变程度,峰值信噪比(PSNR)的计算公式为(11)式;最后一列是图像遭受攻击后的水印检测结果。

由表1中数据可以看出,本算法对于各种类型的攻击,都能准确地检测到水印的存在,实验证明该算法有较强的鲁棒性。

5 结论

本文在研究 DFT 及 HVS 模型在数字水印系统中的应用的基础上,提出了一种基于 HVS 和 DFT

表1 StirMark 攻击结果提取表

攻击类型	Right/Total	PSNR	水印检测结果
JPEG20	16/17	47.23	YES
JPEG60	9/18	51.12	YES
Scaling70%	17/19	24.47	YES
Scaling90%	19/25	29.43	YES
Rotation5	10/20	26.33	YES
Rotation3	16/22	31.47	YES
Shearing30%	17/20	56.23	YES
Shearing70%	13/20	49.48	YES
GaussianNoise(0 0 2)	16/27	23.15	YES
GaussianNoise(0 0 3)	23/31	25.66	YES
Mid-value Filter(2x2)	17/22	27.18	YES
Mid-value Filter(4X4)	21/29	37.86	YES

域的鲁棒性水印算法,并通过实验证明该算法具备较好的可见性和鲁棒性。由于水印是采用统计的方法来检测的,因此嵌入水印时既要保证图像的像素达到一定的数量又要使水印的嵌入达到“不可见”的标准。所以,如何增大嵌入水印信息量而又不影响视觉效果是今后水印算法研究的一个重要方向。

参考文献:

- [1] 黄继武,谭铁牛. 图像隐形水印综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(5): 645-655.
- [2] Van Schyndel R G, Tirkel A, Osborne C F. A digital watermarking[J]. First IEEE International Image Processing Conference 2004(2): 86-90.
- [3] Cox I J, Miller M L. The first 50 years of electronic watermarking[J]. Journal of Applied Signal Processing 2002(2): 126-132.
- [4] Wong P W, Memon N. Secrete and public key image watermarking schemes for image authentication and ownership verification, IEEE trans[J]. On Image Processing 2001, 10(10): 1593-1601.
- [5] 华先胜,石青云. 易损数字水印若干问题的研究[J]. 中国图像图形学报, 2001(11): 1089-1095.
- [6] 陈明奇,钮心忻,杨义先. 数字水印的研究进展和应用[J]. 通信学报, 2001(5): 71-79.
- [7] 肖亮,韦志辉,吴慧中. 一种利用人眼视觉掩盖的小波域数字水印[J]. 通信学报, 2002, 23(3): 100-106.
- [8] 陈明奇,钮心忻. 数字水印的研究进展和应用[J]. 通信学报, 2001, 22(5): 71-79.
- [9] 王炳锡,陈琦. 数字水印技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003.

Research on Watermarking Algorithm of Strong Robustness Based on DFT

ZHANG Xiao-dan

(Mathematics and Computer Science College , Ji Shou University , Ji 'shou Hunan 416000 , China)

Abstract : Digital watermarking technology has been a solution in the digital multimedia content copyright issues and the principal instrument of certification , which is the focus of academic research. In this paper , firstly , DFT and HVS were introduced , which have widely used in digital watermarking system , and a robust watermarking algorithm based on HVS and DFT was proposed. The algorithm add the watermark image in the middle frequency region of DFT coefficients with fixed intensity and the watermark image was embedded into the host image block with the order of variance. Finally a lot of stimulation experiments were programmed by Matlab. Stirmark to simulate various attacks to watermarked image. The simulation results show that the proposed algorithm has good robustness and invisibility.

Key words : digital watermarking ; watermark attack ; human visual system ; discrete fourier transform. ;robustness ;invisiblenss

(责任编辑 游中胜)