

基于遗传算法的鲁棒数字水印技术

梁伟英, 刘剑鸣, 隋明森

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:提出了一种增强水印鲁棒性的算法,该算法采用多目标优化的遗传算法定义一种新的适应度函数,结合 Watson 视觉感知模型,调节水印在 DCT 变换域嵌入的强度。根据遗传算法得到的不同结果,不同强度的水印信息被嵌入到各个 DCT 块的视觉感知门限(JND)最大的几个中低频系数中。实验结果表明,在满足水印不可见性的同时,算法在噪声、滤波、旋转、压缩等图像处理条件下具有很好的鲁棒性。

关键词:数字水印; 鲁棒性; 遗传算法; 离散余弦变换(DCT); Watson 视觉感知模型

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7024(2008)13-3505-03

Robust watermarking technique based on genetic algorithm

LIANG Wei-ying, LIU Jian-ming, SUI Ming-sen

(College of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A robust watermarking technique is proposed. Based on genetic algorithm and Watson's perceptual model, a new adaptability function is defined, which can adjust the intensity of the watermarking in DCT blocks. Based on the different results of the genetic algorithm, different intensity of the watermarking are embedded in the locations of large JND in the low frequency of the DCT domain. Experimental results indicate that the proposed scheme can assure good imperceptibility for watermarked image and is robust to additive noise, filtering, rotation, compression and most attacks.

Key words: watermarking; robust; genetic algorithm; discrete cosine transform (DCT); Watson's perceptual model

0 引 言

数字水印技术作为在网络环境中实施有效的版权保护和信息安全手段成为数字化时代的研究热点^[1-3]。鲁棒性是对图像水印最基本的要求^[4],鲁棒性的优劣直接关系到水印技术应用的可靠性和稳健性^[5]。为了提高水印的鲁棒性,文章提出一种结合多目标优化的遗传算法和 Watson 视觉感知模型的 DCT 域水印方法。方法应用 Watson 视觉感知模型,在嵌入位置的选择上,根据图像的特征,在其 DCT 域中低频视觉感知门限(JND)最大的几个位置嵌入水印;在水印强度的选择上,结合遗传算法对每个 DCT 块嵌入水印信息的强度进行优化。旨在为水印找到更优的嵌入方法,在满足水印不可见性的基础上增强其鲁棒性。

1 基本知识

1.1 遗传算法

遗传算法(genetic algorithm, GA)^[6]最早是由美国 Michigan 大学的 John Holland 教授于 1975 年提出的,它是一种模仿自然界生物进化机制发展起来的随机全局搜索和优化方法。主要有编码、初始群体、适应度函数评价测试、选择、交叉和变异 6 个步骤。其中,适应度函数表明个体或解的优劣性,它的设

计和选择是算法好坏的关键。其算法的流程图如图 1 所示。

解决含多目标和多约束的优化问题称为多目标优化(multi-objective optimization)问题。文章采用遗传算法中的多目标优化的算法优化水印的嵌入强度,即由多个条件决定适应度函数的选择。具体设计方法由第 2.1 节提出。

1.2 Watson 感知模型

Watson 模型^[7]是一种建立在对应于 8×8 像素块的 DCT 域上的人类视觉感知模型。他考虑了以下几个人类视觉感知方面的内容:①频率敏感度,即人眼对不同频率分量的敏感度的反应;②亮度掩蔽,即人眼对不同亮度的敏感度的反应;③对比度掩蔽,即某一频率中能量引起该频率变化的可能性降低对人眼的影响。

通过 Watson 模型,可以估计原始图像提供的环境背景对嵌入水印的容纳程度,即可以计算得出感知系数 JND。对于图像中的第 k 个 8×8 的分块,有

$$J(i,j,k) = \max\{t_c(i,j), |C(i,j,k)|^w \times t_c(i,j)^{1-w}\} \quad (1)$$

式中 $t_c(i,j) = t(i,j) \cdot (C(0,0,k)/\bar{C}(0,0))^w$, $w=0.7$ 。 $t(i,j)$ ——1 ~ 8, 1 ~ 8 对应于 Watson 模型定义的频率敏感度表的一系列参数值, $C(0,0,k)$ ——第 k 块 8×8 分块的直流(DC)系数, $\bar{C}(0,0)$ ——整个图像中各块 DC 系数的平均值或一个代表图像预期强度

收稿日期:2007-07-29 **E-mail:** kiki19821209@163.com

作者简介:梁伟英(1982-),女,河北秦皇岛人,硕士研究生,研究方向为数字水印技术、网络安全;刘剑鸣(1961-),男,辽宁辽中人,硕士,副教授,研究方向为密码学、数字水印技术;隋明森(1983-),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为网络安全、图像处理技术。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

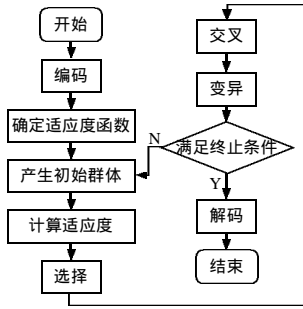


图1 遗传算法流程

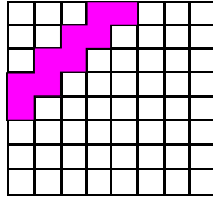


图2 水印嵌入位置

的常数 $\rho = 0.649$ 。

2 水印算法

2.1 水印位置选择和强度调制

算法首先选择 8×8 分块中如图2所示的9个DCT中低频的位置。为了增强鲁棒性,选择其中感知门限最大的4个位置嵌入水印。

假定一个图像嵌入区域由 K 个 DCT 块组成。对于每个嵌入的位置,每个像素的感知门限 JND 的值(量化后的值)定义为 $JND(c)$ 。DCT 块的原系数和调制后的系数分别定义为 c 和 c' ,则令

$$c' = c \pm a_c \cdot \text{sign}(c) \cdot JND(c) \quad (2)$$

式中 a_c ——位置 c 的嵌入强度调节因子。当水印信息 $w = 1$ 时,“ \pm ”为“+”;当 $w = 0$ 时,为“-”。

水印嵌入强度越大,其鲁棒性越好。由于受水印不可见性的约束 a_c 取值较小,一般在 $0 \sim 1.5$ 之间。我们采用遗传算法计算每个 DCT 块嵌入水印的最优强度。步骤如下:

(1)编码:令问题空间为 $[0, 1.5]$,选择种群大小为 100,迭代次数为 50 次。

(2)生成初始群体:随机生成在 $[0, 1.5]$ 范围内的大小为 100 的初始群体。

(3)适应度函数评价测试:

文章采用多目标优化的遗传算法。其适应度函数的确定要考虑水印鲁棒性和图像不可见性两个方面。

为了提高水印的鲁棒性,希望提高水印的嵌入强度。定义算法的优化鲁棒性的适应度函数为

$$f_1(x) = \sum_{c_i} \text{abs}(x \cdot JND(c_i)) \quad (3)$$

式中 $\text{abs}(\cdot)$ ——取绝对值函数 c_i ——嵌入位置的 DCT 系数, x ——嵌入强度 $JND(c_i)$ ——与 c_i 对应的 JND 值。

用峰值信噪比作为图像不可见性的衡量标准。将优化不可见性的适应度函数直接定义为

$$f_2(x) = \text{PSNR} = 10 \lg \frac{255 \times 255}{\frac{1}{M \times N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (I_{mn} - I'_{mn})^2} \quad (4)$$

式中 M, N ——原始图像像素矩阵的大小。

采用目标遗传算法的权重系数变换的方法,可得算法最终的适应度函数为

$$f(x) = \sum_{k=1}^2 w_k f_k(x) = \sum_{k=1}^2 \frac{f_k(x)}{f_k^{\max}(x) - f_k^{\min}(x)} \quad (5)$$

式中 $f_k^{\max}(x), f_k^{\min}(x)$ —— $f(x)$ 的最大值和最小值。

(4)选择:采用适应值比例选择方法。

(5)交叉:选择两点交叉的交叉方法,交叉概率为 0.6。

(6)变异:选择变异概率为 0.001。

(7)判断:如果迭代次数 $n < 50$,返回步骤(2);否则,结束。

2.2 水印的嵌入

设原始图像为 $I = \{x_{ij}, i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N\}$, x_{ij} 代表原始图像第 i 行、第 j 列像素点的灰度值。二值图像水印 $W = \{w_{ij}, i = 1, 2, \dots, P, j = 1, 2, \dots, Q\}$ 。

水印的嵌入算法分以下几个步骤进行:

步骤1(水印置乱) 图像置乱就是利用某种算法将一幅图像各像素的次序打乱,但像素的总个数不变,直方图不变。文章选择 Torus 自同构映射^[8]作为水印嵌入的预处理方法

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ r & r+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} \pmod{K} \quad (6)$$

式中 (x_{k+1}, y_{k+1}) ——对像素 (x_0, y_0) 应用 k 次自同构映射后的结果。 k 和 K ——自同构映射的次数和水印图像的像素数。

根据式(6)逐一对图像中的像素点坐标做变换,当遍布了图像所有像素点之后,便产生了置乱后的水印图像 W' 。

步骤2(分块和DCT变换) 将 I 分成互不重叠的 8×8 大小的分块 B_{mn} ,对 B_{mn} 进行 DCT 变换,形成 DCT 系数矩阵 C_{mn} ;同时将 W' 也分解成 2×2 的分块 W'' 。

步骤3(水印嵌入) 按照一个 DCT 块嵌入一个 W'' 分块的原则,在 JND 视觉门限最大的4个位置上,按如下公式嵌入水印数据 w 。其中, JND 的值由式(1)得 a_c 由上述遗传算法确定。

$$C_{mn}'(i,j) = \begin{cases} C_{mn}(i,j) + a_c \times \text{sign}(C_{mn}(i,j)) \times JND(C_{mn}(i,j)) & w = 1 \\ C_{mn}(i,j) - a_c \times \text{sign}(C_{mn}(i,j)) \times JND(C_{mn}(i,j)) & w = 0 \end{cases} \quad (7)$$

步骤4(反DCT变换) 对每一个嵌入水印的分块 DB_{mn} 做逆 DCT 变换,重新组合,得嵌入水印的图像。

2.3 水印的提取

水印的提取过程需要原始图像,是一种公开水印算法,提取过程如下:

步骤1(分块和DCT变化) 将嵌入水印的图像 I' 进行分块 DCT 变换,得到系数矩阵 C_{mn}' 。

步骤2(提取水印) 按下式在各 C_{mn}' 块嵌入水印的位置上提取水印信息 w'

$$w' = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{abs}(C_{mn}'(i,j)) > \text{abs}(C_{mn}(i,j)) \\ 0 & \text{if } \text{abs}(C_{mn}'(i,j)) < \text{abs}(C_{mn}(i,j)) \end{cases} \quad (8)$$

将水印信息按照嵌入顺序重新组合,形成提取出的水印图像 W_1' 。

步骤3(反置乱) 将得到的水印图像 W_1' 进行反置乱处理,得到水印图像 W_1 。

3 试验结果

本文以 256×256 大小的 256 灰度级的“Lena”标准图像为例,对算法进行了仿真实验,采用有“燕山大学”字样的 64×64 大小的二值图像作为水印图像,如图3所示,对水印的嵌入、提取和攻击进行测试实验。

实验中采用峰值信噪比(PSNR)和相似度(NC)两个指标作为评价标准。其中,峰值信噪比用来衡量嵌入水印的图像和原始图像之间的差别值,值越大不可见性越好;相似度 NC,用来衡量提取出的水印和原始水印的相似程度, $0 < NC \leq 1$,值越



图3 原始图像和水印图像



图4 嵌入水印后的图像和提取的水印

接近于1鲁棒性越好。图4给出了嵌入水印后的图像与提取的水印图像。从主观上看,原始图像与图嵌入水印的图像之间没有明显的差别,PSNR=38.1944dB,且水印相似度NC=1,可见该算法的不可见性很好。

为了检测算法的鲁棒性,对嵌入水印后的图像进行加噪、滤波、边缘锐化、直方图均衡、几何旋转和JPEG有损压缩等攻击试验,然后提取水印。试验结果如图5和表1所示。

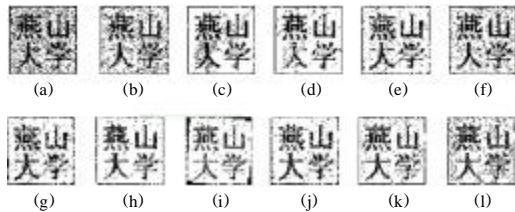


图5 各种攻击提取的水印图像(与表1对应)

表1 鲁棒性测试结果(与图5对应)

水印攻击	PSNR(dB)	NC
(a) (1,0.01) 高斯噪声	20.085 1	0.767 3
(b) 5%椒盐噪声	24.588 7	0.846 4
(c) (3×3) 均值滤波	27.883 4	0.922 7
(d) (3×3) 高斯滤波	26.102 6	0.946 5
(e) (3×3) 中值滤波	26.486 8	0.933 2
(f) 边缘锐化	21.267 9	0.886 3
(g) 直方图均衡	19.246 3	0.930 1
(h) 旋转 3%	16.433 0	0.979 7
(i) 旋转 10%	12.332 8	0.942 1
(j) 80%JPEG 压缩	36.337 3	0.949 9
(k) 50%JPEG 压缩	31.542 1	0.952 3
(l) 20%JPEG 压缩	26.422 2	0.892 1

根据实验数据可知,算法在均值滤波、高斯滤波、中值滤波、直方图均衡、较小角度(小于等于10%)的几何旋转和低压压缩比(大于等于50%)的JPEG压缩下NC值比较接近于1,鲁棒

性很好;在高斯噪声、椒盐噪声、边缘锐化和大比例(大于50%)的压缩下,NC值较小,但是,在主观视觉上也能很容易的辨别水印信息的内容。

4 结束语

文章提出了一种结合遗传算法提高水印鲁棒性的水印算法。该算法首先应用Torus自同构映射对水印图像实行置乱,选择视觉门限较大的DCT系数位置嵌入水印。然后结合遗传算法和Watson感知模型,估计水印嵌入的强度,将二值水印嵌入到图像的DCT域中。从试验结果可以看出,算法在保证水印有较好不可见性的同时,对常见图像处理操作具有较好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] NIU Xia-mu, LU Zhe-ming, SUN Sheng-he. Digital watermarking of still images with gray-level digital watermarking [J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2000,46(1):137-145.
- [2] Christos Bouras, Vaggelis Kapoulas, Ioannis Misedakis. Web page fragmentation for personalized portal construction [C]. IEEE International Conf on Information Technology Coding and Computing. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2004:332-336.
- [3] Bouras Christos, Kapoulas Vaggelis, Misedakis Ioannis. A web page fragmentation technique for personalized browsing [C]. Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing. Nicosia, Cyprus: ACM Press, 2004:1146-1147.
- [4] Wolfgang R B, Podilchuk C I, Delp E J. Perceptual watermarks for digital images and video[J].Proc IEEE,1999,87(7):1109-1126.
- [5] 袁占亭,张秋,余陈宁.数字水印的鲁棒性分析与研究[J].计算机工程与设计,2005,26(3):614-616.
- [6] 玄光男,程润伟.遗传算法与工程设计[M].北京:科学出版社,2000.
- [7] Wong Peter H W, Oscar C AU. A capacity estimation technique for JPEG-to-JPEG image watermarking [J]. IEEE Transactions on Circuits And Systems for Video Technology,2003,13(8):746-752.
- [8] 杨义先,钮心忻.数字水印理论与技术[M].北京:高等教育出版社,2006:105.

(上接第3481页)

秒为间隔向NAS发起呼叫,每次同时发起的呼叫数为被测端口数的10%,直至呼满,重复操作100次,统计认证操作正确率,同时本系统支持标准的Radius安全认证协议和扩展机制,可提供完备的记录和监控机制。因此本系统不仅可以用来对VoIP用户进行认证和计费,同时也可以利用它来监控网络的数据流量,分析网络的使用情况和性能。

参考文献:

- [1] RFC2865, Remote authentication dial in user service (RADIUS) [S].
- [2] RFC2866. RADIUS Accounting[S].

- [3] RFC1321, The MD5 message 2 digest algorithm[S].
- [4] 张敬伟,周娅,周德新.RADIUS在端口认证中的应用及其实现[J].计算机应用,2004,24(6):36-38.
- [5] 王保泉,赵艳红,陈发明.网络计费系统的设计与实现[J].南京工业大学学报,2004,26(5):68-71.
- [6] 李文印,周治国,张福春.网络计费系统数据采集技术研究[J].计算机工程与应用,2003,39(2):20-23.
- [7] 张书奎.基于Radius的VPN设计与实现[J].计算机工程,2003,29(9):124-126.
- [8] 张登银.VoIP技术分析与系统设计[M].北京:人民邮电出版社,2003:26-48.