

基于人类视觉的混沌阵列在图像上的水印算法

孙锁锋, 温 泉, 王树勋

(吉林大学通信工程学院, 吉林长春 130025)

摘 要: 本文提出了一种新的使用混沌阵列, 基于 HVS 视觉掩盖自适应的公开图像水印算法, 利用四阶累积量定义了视觉掩盖中的噪声敏感度. 该方法将混沌阵列作为水印嵌入到图像子块的 DCT 次低频系数中去, 然后根据噪声敏感度进行视觉掩盖. 实验结果表明, 在噪声敏感度的作用下, 视觉掩盖实现了自适应地调整水印嵌入强度; 在无原始数据的情况下, 通过使用密钥能够清晰地检测出水印的存在; 在常见的信号失真和几何失真下 (有损压缩, 剪切等), 水印具有很好的稳健性.

关键词: 数字水印; 混沌阵列; 视觉掩盖; 噪声敏感度; 四阶累积量

中图分类号: TN919.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 01-0149-05

Based HVS Chaotic Array Image Watermarking Algorithm

SUN Tan-feng, WEN Quan, WANG Shu-xun

(Communication Engineering College, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China)

Abstract: In this paper, we present a novel HVS-based visual masking and self-adaptive image public watermarking using chaotic array, and define a new noisesensitivity using fourth-order cumulant in visual masking. In this algorithm, chaotic array is embedded to the sub-low frequency coefficients of the block-DCT, then visual masking is made according to the noisesensitivity. Under the affect of noisesensitivity, Visual masking accomplish self-adaptive controllable intensity of watermark. Without original image, we can remarkably detect the existence of watermark by public key. With common signal distortion or geometric distortion (such as lossy compress, cropping etc.), watermark can achieve better robust.

Key words: digital watermark; chaotic array; visual masking; noisesensitivity; fourth-order cumulant

1 引言

在近些年来, 由于数字多媒体信息通过互联网的广泛传播, 针对版权保护的多媒体信息保护机制成为全世界关注的热点问题, 而且已经成为一种迫切的需求. 这种保护机制的目的是防止受版权保护的多媒体内容被非法使用者获取、处理和传播.

传统的信息保护手段已经不能满足目前数字媒体的版权保护^[1,2]. 因此, 以数字水印 (隐藏版权信息) 理论为核心的技术应运而生. 所谓的数字水印技术就是将序列号、身份识别码、文本、图像标志、音频和视频等信息嵌入到多媒体数据中, 以起到版权保护、秘密通信^[3]、数据文件真伪鉴别和产品标志等作用. 水印算法中最重要的两个问题就是数字水印的可感知性和稳健性^[4]. 二者的关系是相互依存, 而又相互矛盾的.

2 混沌阵列的产生

本文中, 提出使用混沌动力系统来产生基于混沌的实数水印阵列, 因为混沌阵列既具有可控的低通特性又具有很好的相关特性. 例如, Tent, Logistic 方程等产生的序列.

混沌序列的主要优点: 通过改变混沌系统参数及初始值可以得到数量巨大的序列, 并且序列长度是任意的; 混沌序列没有周期, 类似于一个随机过程, 因此具有很好的保密性; 混沌序列的产生和复制很方便, 只要给出一个混沌迭代公式和一个初值, 就能产生一个混沌序列.

以上优点是其它序列所没有的. 我们可以将水印的初始值作为序列的密钥, 在检测水印存在时可以利用密钥重新得

到水印序列, 而且密钥的管理也较为简单、安全. 因此非常适合作为公共水印算法的水印序列.

下面简单介绍本方法中应用的 Tent-Map 混沌系统^[11].

Tent-Map 映射定义为

$$x_{k+1} = \begin{cases} x_k / a & 0 < x_k < a \\ (1 - x_k) / (1 - a) & a \leq x_k < 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $0 < a < 1$; Tent-Map 序列的统计特性参考文献 [11].

本算法中应用的混沌阵列可以通过两个混沌序列进行向量相乘得到:

$$w_{p,q}(i,j) = w_p(i) \times w_q(j) \quad (2)$$

其中 $w_p(i)$ 为列向量, $w_q(j)$ 为行向量.

3 水印的嵌入

水印的嵌入可分为三个部分: 混沌水印阵列产生; 水印的嵌入; 视觉掩盖.

3.1 混沌水印的产生

利用 Tent 方程产生两个长度相同的但初始条件不同的混沌轨迹. 由于混沌轨迹敏感地依赖于初始条件, 所以即使初值有很小的差异, 也会得到完全不同的轨迹. 为了便于嵌入图像, 给混沌轨迹设置阈值 T_c (本文中设置为 0.5), 使得轨迹二值化, 得到混沌序列. 序列长度分别取原图的高和宽的一半. 利用公式 (2) 两个不同的混沌序列进行向量相乘得到混沌阵列, 即为水印阵列.

3.2 水印的嵌入

为了实现水印的不易感知性和稳健性, 我们采用折衷的

方案,即嵌入水印在次低频系数上^[5,6].其优点既克服了低频嵌入的块效应又克服了高频嵌入水印稳健性差.

为了提高水印嵌入的不易感知效果,在本算法嵌入准则采用的是乘法准则,公式如下:

$$I_D = I_D + \alpha I_D \times w \quad (3)$$

其中, I_D 表示 DCT 变换后的系数阵; I_D 表示嵌入水印后的 DCT 系数阵; w 表示水印阵列; α 表示水印嵌入强度系数.

3.3 基于 HVS 的自适应的视觉掩盖

在图像编码领域,人类视觉系统(HVS)具有三种不同的特性^[8,9]:频率敏感度(FS),亮度敏感度(LS)和对比度掩盖(CM).三者之间既联系又不同.

图像自适应(IA),就是通过调整图像的局部信息,来实现水印的不易感知和稳健性.图像的局部信息被存储在 JND 矩阵中. IA 可以通过两种方法实现:一种是产生 JND 矩阵,当图像系数值大于 JND 系数时,可以嵌入水印信息,反之,不嵌入;另一种就是我们可以根据 JND 值调整嵌入水印的强度,使之不易感知.

视觉掩盖一般来说,背景变化越大,纹理越复杂,掩盖门限值就越大;反之,门限值越小.在门限值大的区域可以嵌入较强的水印,而在门限值小的区域,可以嵌入的水印相对较弱一些.由此看来,图像基于自适应嵌入的水印具有更好的视觉掩盖效果^[5,6,10].

视觉掩盖的公式如下:

$$\tilde{I} = I(x, y)(1 - \alpha(x, y)) + I(x, y)\alpha(x, y) \quad (4)$$

其中, \tilde{I} 表示视觉掩盖后的图像; $\alpha(x, y)$ 是噪声敏感度系数(权系数), $\alpha(x, y)$ 矩阵也就是前面提到的 JND 或 NVF 矩阵.

$\alpha(x, y)$ 是根据 HVS 特性计算而得到噪声敏感度系数. 噪声敏感度较小区域, $\alpha(x, y) \rightarrow 1, \tilde{I} \rightarrow I$, 也就是水印最强; $\alpha(x, y) \rightarrow 0, \tilde{I} \rightarrow 0$, 也就是水印最弱. 噪声敏感度系数可以动态调节水印的嵌入强度,保证图像质量的同时,加强了水印嵌入强度的随机性,使攻击难以去除水印,实现图像水印自适应调节.

目前为止,无论是 JND 函数,还是 NVF 函数^[8],它们都不能够提供准确的测量噪声感知的方法.例如,在文[5]中,选用的是样本方差定义噪声敏感度;在文[6]中,利用计算像素点 r 阶中心矩来定义噪声敏感度.但这种定义的方法使得在边缘区域出现较强的水印.我们针对这个问题利用高阶统计特性进行了进一步的研究.

在本文中,利用四阶累积量来对噪声敏感系数进行定义.因为四阶累积量能够得到比方差更多的信息.

定义一个零均值实信号 $x(t)$ 和它的概率密度函数 $p(x)$. Kurtosis^[12] $K[p(x)]$ 是信号规范的四阶累积量.

$$K[p(x)] = \frac{\text{Cum}_4(x)}{[E(x^2)]^2} = \frac{E(x^4) - 3[E(x^2)]^2}{[E(x^2)]^2} \quad (5)$$

$\text{Cum}_4(\cdot)$ 表示信号的四阶累积量.

如果信号是非零均值信号,如:

$$K[p(x)] = \frac{\text{Cum}_4(x)}{[E(x^2)]^2} = \frac{E(x^4) - 3[E(x^2)]^2}{[E(x^2)]^2} + \frac{12[E(x^2)]^2}{[E(x^2)]^2} - \frac{4E(x)E(x^3) + 6E(x)^4}{[E(x^2)]^2} \quad (6)$$

借鉴上式,由于图像信号的均值非零,我们对噪声敏感度的定义如下:

$$(i, j) = \frac{C_{I_{u,v},4} / E(I_{u,v}^2)^2}{N^2} \quad (7)$$

其中, $C_{I_{u,v},4} = \text{Cum}_4(I_{u,v} - \mu)$ (8)

$I_{u,v}$ 表示 $N \times N$ 块内的坐标为 (u, v) 的点值; $C_{I_{u,v},4}$ 是以点 (u, v) 为中心的 $N \times N$ 块的各像素的四阶累积量值; μ 表示块均值; $\text{Cum}_4(\cdot)$ 表示块像素的四阶累积量; $E(I_{u,v}^2)$ 表示块像素点的二阶矩; (i, j) 表示原图中的点 $I(i, j)$ 所对应的的敏感度系数; N^2 表示块的像素数.

(x, y) 矩阵的系数表示对应的图像点对噪声的敏感程度:在图像的纹理和边缘复杂区域对应着 (x, y) 系数的较大值,相反,平滑区域对应的 (x, y) 系数较小.这也说明了不同区域对噪声敏感度的敏感程度不同.同时为实现水印的自适应嵌入和视觉掩盖提供很好的条件.

综上所述,在本算法中一共有两个系数控制水印的嵌入:水印嵌入强度和视觉掩盖系数.二者的关系即矛盾又统一,前者决定水印的稳健性,而后者决定水印的感知性.二者的相互结合才能产生出更加完美的结果.

从公式(9)中可以看出二者对水印的贡献,即将公式(3)代入公式(4)中:

$$\tilde{I} = \alpha I \quad (9)$$

或公式(12):

$$\tilde{I} = I + (\alpha - 1) \times I \quad (10)$$

其中, α 代表 $(1 + \alpha \times w)$.

公式(9)和(10)是不同的表达方法.从两个公式中可以看出水印的嵌入同时受到两个系数的控制,是一对矛盾的组合.

4 水印的检测

通常所说的水印检测可以分为两大类^[7]:源检测(私有水印)和盲检测(公有水印).前者是指在水印检测时必须有原始信息参与,否则无法检测;后者是指检测过程无需原始信息,只需拥有水印的产生的密钥,即可检测水印的存在性.

源检测的示意图如图1所示.

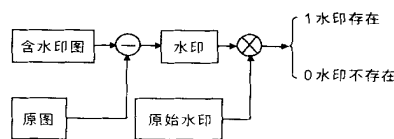


图1 源检测示意图

盲检测的示意图如图2所示.

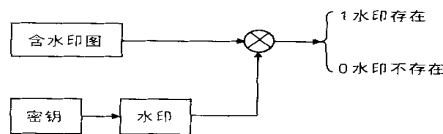


图2 盲检测示意图

水印检测公式如下:

$$= \frac{\sum_{i,j} \hat{w}(i,j) \times w(i,j)}{\sum_{i,j} \hat{w}^2(i,j)} \quad (11)$$

式中 I_D 表示检测图的 DCT 变换系数; I_D 表示原图的 DCT 变换系数; $w(i, j)$ 表示有密钥产生水印阵列; \hat{w} 表示提取的水印阵列; \hat{w} 表示提取水印和原始水印之间的相似度. 如果有源信息, 我们可以直接提取水印 w . 如果没有源信息, 公式 (9) 中的 \hat{w} 是由检测图的 DCT 变换后, 由水印嵌入位置重组而成的. 然后再进行相关检测. 源检测适用于私有水印, 盲检测适用于公共水印.

下面给出本算法完整的水印嵌入的实验步骤:

首先, 给定水印的初始条件产生混沌序列, 进而得到混沌阵列, 即水印阵列 w ;

然后, 进行图像 $I(x, y)$ 得分块 DCT 变换. 每个 DCT 变换块进行 Zigzag 排序, 找到次低频位置进行水印嵌入, 即利用公式 (3) 按位置进行矩阵运算, 嵌入水印后的 DCT 矩阵进行反 DCT 变换, 得到含水印图像 $I(x, y)$;

最后, 对图像利用公式 (4) 进行视觉掩盖计算, 得到最终的图像 \tilde{I} .

盲水印检测的实验步骤:

对检测图像进行 DCT 变换, 提取次低频位置上的系数组成矩阵 \hat{w} ;

利用水印的密钥产生再次产生水印阵列 w , 并与得到的次低频系数阵进行相关检测;

给出阈值 T_w , 判断水印的存在性.

5 实验结果和讨论

为测试本算法的性能, 本文产生 1000 个二维混沌阵列 X_m 来检测水印检测器对被测图像的响应, 其中 X_{500} 为嵌入图像的水印. 被测图像为 256×256 的 Lena 图像. 混沌序列的初值设为 0.2, 门限 T_c 为 0.5, 长度为 128; 水印嵌入强度 0.2.

水印检测阈值 T_w 的选取也是一个关键的问题. 在文 [5、6] 中给出的实验都是固定阈值 ($T_w = 1$) 进行检测, 因此检测结果的冗余度很大. 即使在水印明显存在的情况下, 也无法证明其存在性. 因此在本实验中为了更好的说明的水印存在性, 从概率统计角度, 给出动态检测阈值. 在本算法中将采用 '4 原则' 给出动态阈值, 具有更精确的检测结果, 将在下面的实验中给出讨论. 以下实验结果均由 MATLAB 仿真而得.

实验 对不同定义下的噪声敏感度性能进行比较测试

在文 [5、6] 算法中, 分别提出了利用样本方差和 r 阶中心矩作为噪声敏感度的定义. 在本算法中, 通过从一阶到四阶的不同中心矩, 以及四阶累积量定义下的噪声敏感度, 在相同情况下进行实验, 曲线如图 3 所示. 说明了随着中心矩阶数的增加, 水印检测效果增

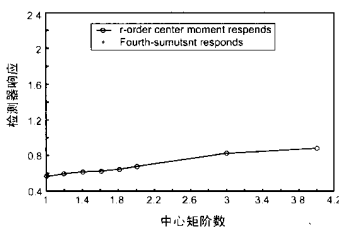


图 3 基于四阶累积量的噪声敏感度性能比较

强, 但并不十分显著; 但本算法的水印检测结果却十分显著, 达到了 2.14. 很好地说明了本算法中所定义的敏感度公式在检测水印存在性方面具有显著的优越性. 还说明了基于四阶累积量定义的噪声敏感度更好地反映出了水印嵌入强度和图像内容之间的关系.

实验 在无失真的情况下, 水印的嵌入与检测的实验

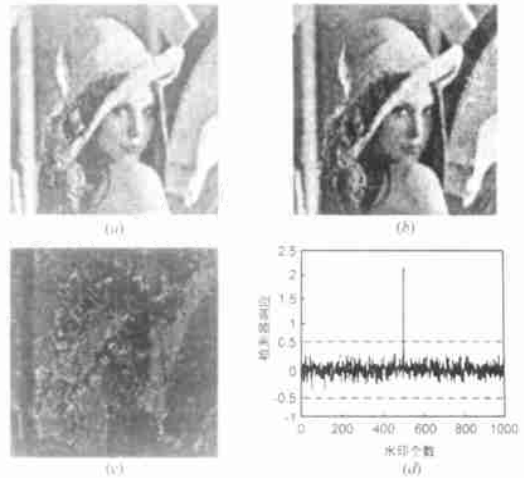


图 4 (a) Lena 原图; (b) 嵌入水印的图 $PSNR = 35.51$; (c) Lena 嵌入水印前后的 8 倍差图; (d) 水印检测值 $= 2.15$, 检测阈值为 0.5969

在无失真情况下, 图 4(a) 表示 lena 原图, (b) 图表示嵌入混沌阵列的 lena 图. 二者比较结果, 人眼无法感知水印的存在, 具有很好的信息隐藏效果. 相应的图 4(d) 表示水印检测器对含水印图的检测结果, 自相关检测峰值清晰可见. 本算法可以清晰地检测出水印的存在.

为了显示两幅图之间的不同, 用倍差图来说明. 如图 4(c) 所示, 我们可以看到两幅图之间的差别是显而易见的, 但人眼却难以直接分辨两幅之间的不同. 此外, 可以看出在纹理和边缘复杂区域图像差别较大, 反之则较小, 较好的达到了视觉掩盖的目的. 为了进一步说明图像之间的相似性, 我们引入图像相似度的相关系数来评价相似性. 为了使本算法与 Cox 算法具有可比性, 嵌入系数采用 $= 0.2$. 本算法的相似度 $e_c = 0.9977$ (与 Cox 方法的 $e_c = 0.9957$ 接近). 这也说明了本算法在相同强度的水印下, 具有更好的相似性, 即信息隐蔽性好.

实验 对抗压缩性能进行实验

图 5 表示不同压缩质量的水印检测结果和相应的 PSNR 值. 它们的总体趋势是随着压缩质量的增加而增加. 当压缩达到 10% 左右时, PSNR 明显陡降. 说明图像质量下降加速.

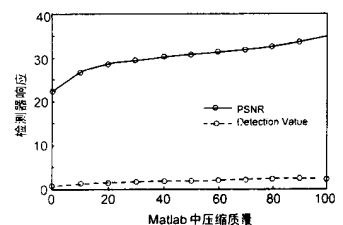


图 5 水印抗压性能图

从图 5 和图 6 中可以得到以下结论:

本方法的抗压性能较高, 在压缩比达到约 25:1 (6%) 时, 水印仍可检测;

如图 6(a), 图像的质量下降了 10dB, 它的商用价值已明显下降. 可见本方法的抗压缩已经达到预期要求. 进一步的抗压缩能力已经不需要了.

如图 6(b) 所示, 在压缩参数为 6% 时, 动态阈值可以清晰地判断水印的存在, 而固定阈值只能达到 10%. 当图像压缩参数为 5% 时 (如图 6(c)), 动态阈值不可判断水印存在, 而且出现了很多的伪峰值, 淹没了真正的峰值. 说明本算法的动态阈值检测效果优于固定阈值的效果, 具有较高的检测精度.

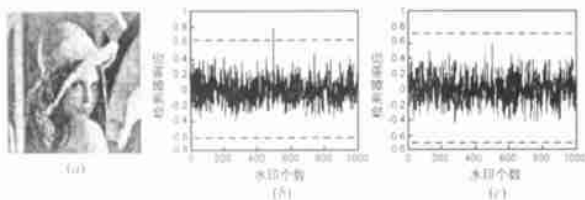


图 6 (a) matlab 压缩率为 6% 时, lena 图像;

(b) 水印检测结果 $\rho = 0.7936$, 检测阈值为 0.6344;

(c) matlab 压缩率为 5% 时, $\rho = 0.59$, 检测阈值为 0.6994

实验 对抗噪声能力进行实验

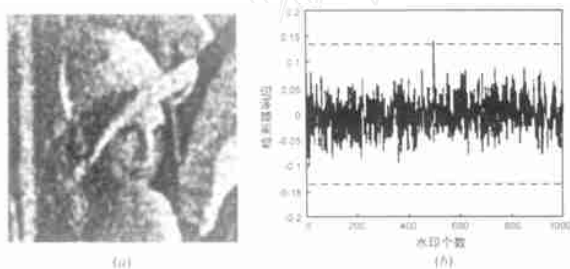


图 7 (a) 加均值为 0, 方差为 0.07 高斯噪声的图; (b) 水印检测结果为 $\rho = 0.1406$, $PSNR = 11.9416$, 检测阈值为 0.1349

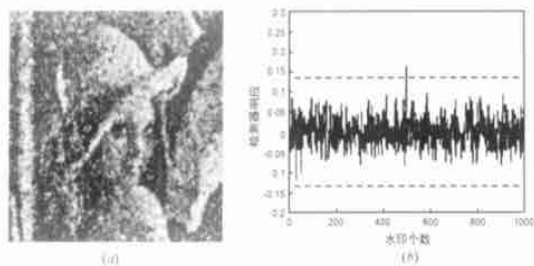


图 8 (a) 加密度为 0.17 椒盐噪声的图; (b) 水印检测结果为 $\rho = 0.1440$, $PSNR = 16.5941$, 检测阈值为 0.1314

通过三种常见的不同噪声的嵌入, 从检测结果中我们可以清晰的分辨水印信号. 但是由于水印本身也类似于噪声, 叠加噪声后会削弱水印的强度. 检测值会整体减小.

如图 7-9 的加噪声图像和检测结果可以说明: 在一定噪声的影响下, 水印仍可以检测出来. 但是当噪声足够大时, 图像质量明显下降, 同时水印也将无法检测. 我们将根据实际的应用来考虑水印对噪声的抗干扰性.

实验 对水印抗抖动处理的实验

图像的抖动处理, 就是二值化图像处理, 这一过程中信息大量的丢失. 因此, 水印的检测也极为困难. 从图 10, 我们可

以看到经过抖动处理后的 lena 图像的峰值信噪比很小, 相应的水印含量也非常少了. 但是检测的水印峰值明显高于其它的峰值. 因此, 可以判断水印的存在.

实验 对抗几何失真的能力进行实验

抗剪切实验

将含水印图像平均划分为四份, 含水印图像进行剪切测试时, 将剪切图与原图相嵌, 进行水印检测.

如表 1 所示, 当剪切比达到 25% 时, 检测阈值为 0.5263, 水印仍可检测, 而在文 [5][6] 方法中则无法检测. 因此, 该算法剪切率可以达到 25% 左右. 而且实验结

表 1 水印抗剪切性能表

剪切尺寸 (%)	PSNR	水印检测值
75	36.59	1.67
50	38.57	1.16
25	42.60	0.55

果还表明: 图像剪切的越小, 水印的含量越小, 检测值越小.

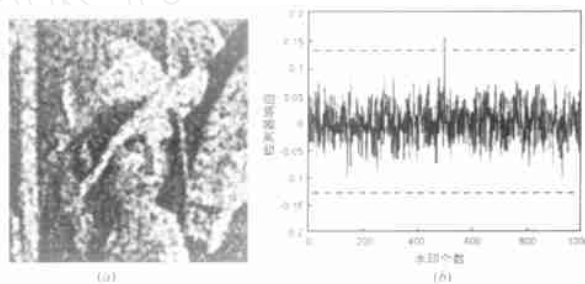


图 9 (a) 加均值为 0, 方差为 0.39 的乘性噪声的图; (b) 水印检测结果为 $\rho = 0.1535$, $PSNR = 11.1732$, 检测阈值为 0.1296

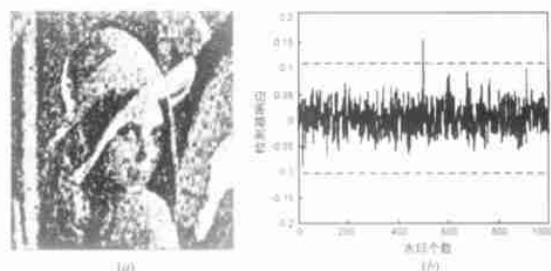


图 10 (a) lena 的抖动图像; (b) 水印检测结果为 $\rho = 0.15$, $PSNR = 7.05$, 检测阈值为 0.1055

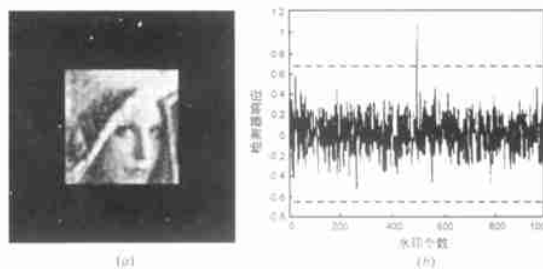


图 11 (a) 含水印图的 25% 剪切; (b) 剪切结果的检测值 $\rho = 1.07$, $PSNR = 8.44$, 检测阈值为 0.6534

如图 11 所示, 如果剪切图像区域为图像的主要内容区域, 相同比例剪切的检测峰值更为明显. 这也说明, 嵌入到图像内容中的水印含量大于非内容区域的水印含量.

抗图像比例缩放实验

我们首先对图像进行比例缩小,由 256×256 缩小到原图 50%,再按比例放大到 256×256 . 这一过程属于有损过程,图像和水印信息都有不同程度的损失. 从图 12(a)中,我们可以看到图像质量明显下降. 过小的图像比例压缩将导致信息的丢失,恢复原大小后将会出现明显的块效应,商用价值下降.

图 12(b)中的检测结果中水印清晰可判. 当比例缩放到 25%时,图像失真率较大,块效应更为明显,误检率较高.

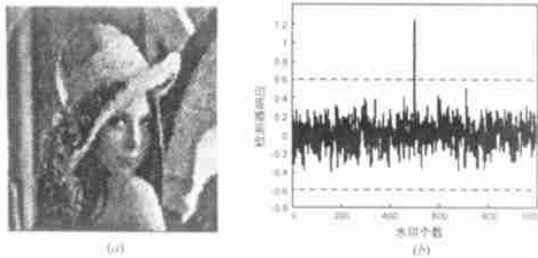


图 12 (a) 比例缩放 50%后的 lena 图; (b) 比例缩放后的水印检测值 $= 1.24$, $PSNR = 27.29$, 检测阈值为 0.5954

表 2

Method	Result	Marked	PSNR
JPG 90 %	2.18	Y	34.17
JPG 50 %	1.87	Y	30.97
JPG 10 %	1.15	Y	26.86
M. F. 3 \times 3	1.67	Y	27.41
G. F. 3 \times 3	2.60	Y	28.99
Sharpen 3 \times 3	1.01	Y	18.76
FMLR	1.78	Y	29.14

为了对本算法的性能进行说明,采用了国际通用的检验水印鲁棒性的软件 StirMark V3.2,对本算法进行测试,结果如表 2 所示.

以上所有实验结果表明即使水印图像经过比较严重(但仍具有一定商用价值的)的失真,本算法仍能够正确的证明水印的存在性. 并且本方法给出的动态阈值选择方法优于固定阈值方法,能够更加准确地证明水印的存在.

6 结论

本文提出了一个新的基于人类视觉的混沌阵列水印算法. 将混沌阵列水印嵌入到图像的次低频位置,然后进行视觉动态掩盖,利用动态阈值检测原则对水印图像进行水印检测,达到了预期的实验目的. 本文通过大量的实验数据说明,本算法中定义的基于四阶累积量的噪声敏感度的性能优于 r 阶中心矩所定义的噪声敏感度;混沌阵列具有极好的自相关性能,具有很好的信息安全保护功能. 实现了基于图像内容的、公共静图水印算法.

本算法已经具有抵抗一些常见的失真的稳健性,但尚有一些亟待解决的问题. 我们下一步的工作方向如下:

混沌阵列性能分析和混沌信息编码的研究;

基于高阶累积量定义的噪声敏感度的性能研究,以及与视觉掩盖效果之间的内在联系;

谐波恢复模型与水印检测模型的相融合的研究;

关于动态阈值选取原则的进一步研究;

其它嵌入域(DWT)的视觉掩盖算法研究;

多水印的嵌入与检测;

用 DSP 系统对水印算法结构进行硬件实现的研究.

参考文献:

- [1] I J Cox, M L Miller, J A Bloom. Watermarking Applications and Their Properties [A]. Proceedings of the International Conference on Information Technology: Coding and Computing ITCC2000 [C]. 2000. 6 - 10.
- [2] Mitchell D Swanson, Mei Kobayashi, Ahmed H. Tewfik. Multi-media data-embedding and watermarking technologies [J]. In Proceedings of the IEEE, June 1998, 8(6): 1064 - 1087.
- [3] Fabien A P Petitcolas, Ross J Anderson, Markus G Kuhn. Information hiding-a survey [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1062 - 1078.
- [4] I J Cox, M L Miller. A review of watermarking and the importance of perceptual modeling [J]. Proc. SPIE Conf. on Human Vision and Electronic Imaging II, February 1997, 3016: 92 - 99.
- [5] A Piva, M Barni, F Bartolini, V Cappellini. DCT-based watermark recovering without resorting to the uncorrupted original image [A]. Proceedings of 4th IEEE International Conference on Image Processing ICIP '97 [C]. Santa Barbara, CA, USA: ICIP, 1997.
- [6] Zhong wei. Image watermarking using Legendre array [J]. Journal of china institute of communications, 2001, 22(1): 1 - 6.
- [7] I J Cox, M L Miller, A L Mc Kellips. Watermarking as Communications with Side Information [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1127 - 1141.
- [8] R B Wolfgang, C I Podilchuk, E J Delp. Perceptual watermarks for digital images and video [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1108 - 1126.
- [9] J F Delaigle, C De Vleeschouwer, B Macq. Watermarking algorithm based on a human visual model [J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 319 - 336.
- [10] Neil F Johnson. An Introduction to Watermark Recovery from Images [A]. by SANS Intrusion Detection and Response (ID '99) [C]. San Diego, CA, : ID, 1999.
- [11] 王树禾. 微分方程模型与混沌[M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [12] 张严. 基于高阶累积量的谐波信号参考估计问题研究 [D]. 吉林: 吉林工业大学, 1998.

作者简介:



孙锁锋 男, 1975 年生于吉林长春, 2000 年毕业于吉林工业大学机械电子工程系, 获工学硕士学位, 现于吉林大学通信工程学院攻读博士学位, 目前已发表文章 4 篇, 研究方向为信号处理、信息安全以及信息隐藏等领域. e-mail: tanfengs@yahoo.com.cn