

基于图像内容的脊波变换域数字水印模型和算法研究¹

肖 亮 韦志辉* 吴慧中

(南京理工大学计算机科学与技术系 南京 210094)

*(南京理工大学应用数学系 南京 219904)

摘 要: 在研究人类视觉 (HVS) 特性的基础上提出了一种在脊波变换域基于图像内容的数字水印模型。在此模型中, 嵌入数字水印的强度归结于数字图像脊波系数的视觉掩盖效应, 文中建立了脊波变换域人眼临界可见误差模型。图像的水印检测被归结为 Neymann-Pearson 准则下的统计模型, 该模型被用来估算水印检测的最优阈值。作为算例, 将临界可见误差模型结合扩展谱技术, 提出了一种新颖的图像自适应水印算法, 并给出了相应的实验结果。实验表明算法性能大幅度提高。

关键词: 脊波变换, 数字水印, 临界可见误差模型, Neymann-Pearson 准则

中图分类号: TN911.72, TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)09-1440-09

Research of Image Content Based Digital Watermarking Model and Algorithm in Ridgelet Transform Domain

Xiao Liang Wei Zhi-hui* Wu Hui-zhong

(Dept of Computer Science, Nanjing Univ. of Science & Tech., Nanjing 210094, China)

*(Dept of Applied Mathematics, Nanjing Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210094, China)

Abstract In this paper, an image content based perceptual watermarking model using ridgelet transform is presented. It provides a new visual model, which can exactly evaluate the Just Noticeable Distortion (JND) tolerance of human visual system. The watermarking algorithm is designed to address the issue of how to improve the robustness and the security of the embedded watermark according to the image content. In order to improve the robustness and transparency, the watermark bits are inserted in the visual significant ridgelet coefficients without exceeding the maximum strength of JND. With the spread spectrum technique and the secret key protection, the security of the embedded watermark is also guaranteed very well. Through analyzing the statistical property of the watermarked image, a threshold selection method based on Neymann-Pearson principle is presented and then the embedded watermark can be blindly detected by correlation coefficients between the original image and the watermark sequence. Experiments show that the proposed method can achieve a better tradeoff between the robustness and transparency.

Key words Ridgelet transform, Digital watermark, Just noticeable distortion computing model, Neymann-Pearson principle

1 引言

计算机网络技术的迅猛发展和信息媒体的数字化, 使得在网络环境中对数字产品的版权保护、秘密通信、真伪鉴别等成为一个迫在眉睫的问题。数字水印为网络环境下多媒体的版权保护提供了一个有效的解决方案。数字水印的概念最初是在 1993 年提出的, 根据其应用目的不同, 可分为鲁棒性水印和脆弱性水印两大分支^[1,2]。本文主要研究用于静止图像版权保护的鲁棒性

¹ 2003-04-14 收到, 2003-09-10 改回

国家部级基金 (51404040101BQ02)、江苏省自然科学基金 (BK-99069) 资助项目

水印, 任何一个鲁棒性水印方案都必须在水印的不可见性、抵抗攻击的鲁棒性和水印的容量三者之间寻求最佳的结合点。因此根据图像内容, 建立恰当的视觉生理模型, 自适应地确定水印强度和水印长度的图像水印算法成为研究热点^[1,3,4]。

目前图像水印技术根据嵌入方式不同可以大致分为: 空间域方法(水印直接嵌入图像像素的灰度值上)和变换域(先将图像做某种数学变换, 然后将水印嵌入变换系数)方法, 其中变换域方法绝大多数使用了酉变换^[4], 如 Fourier 变换^[5]、离散余弦变换^[6-8]、小波变换^[9,10]等。从目前来看, 变换域方法正变得日益普遍: 一方面变换域方法通常对图像压缩、常用的图像滤波以及噪声均有一定的鲁棒性, 而且水印的变换域算法更适合结合当前的图像和视频压缩标准(如 JPEG, MPEG 等); 另一方面变换域方法更易于结合图像的局部统计特性和人类视觉系统特性, 以提高水印的鲁棒性和不可见性。

本文基于脊波变换, 根据人类视觉系统特性, 建立了脊波域人眼临界可见误差(Just Noticeable Distortion, JND)模型, 首次提出了基于图像内容的脊波域数字水印模型。由于本文水印方案根据图像内容自适应确定水印序列的长度, 并根据脊波域人眼 JND 自适应地确定水印嵌入的强度, 确保了水印的不可见性。由于将水印嵌入图像中视觉上最重要的脊波系数, 并利用扩展谱技术将水印分散到所有频谱, 因此水印具有良好的鲁棒性。在水印检测时可脱离原始参考图像。

2 脊波变换域临界可见误差模型

2.1 脊波变换的基本原理

引入脊波变换之前, 首先引入小波变换的概念。设 $f(x)$ 为 R^2 中的可积函数, 则该函数的连续小波变换(CWT)可表示为

$$\text{CWT}_f(a_1, a_2, b_1, b_2) = \int_{R^2} \psi_{a_1, a_2, b_1, b_2}(x) f(x) dx \quad (1)$$

其中二维小波 $\psi_{a_1, a_2, b_1, b_2}(x)$ 定义为一维小波函数 $\psi_{a, b}(x) = a^{-1/2} \psi((x - b)/a)$ 的张量积:

$$\psi_{a_1, a_2, b_1, b_2}(x) = \psi_{a_1, b_1}(x) \psi_{a_2, b_2}(x) \quad (2)$$

为了克服小波变换在表征图像的线或者曲线奇异性等图像重要特征的不足, 1999 年, Candes 和 Donoho 提出了一种新的数学变换, 称为脊波变换(Ridgelet transform)^[11]。 R^2 中的可积函数 $f(x)$ 的连续脊波变换(CRT)定义为

$$\text{CRT}_f(a, b, \theta) = \int_{R^2} \psi_{a, b, \theta}(x) f(x) dx \quad (3)$$

其中 $\psi_{a, b, \theta}(x)$ 为脊波函数, 由一维小波函数 $\psi(x)$ 定义为

$$\psi_{a, b, \theta}(x) = a^{-1/2} \psi[(x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta - b)/a] \quad (4)$$

由以上定义易知脊波变换与小波变换类似, 但是脊波函数采用表示直线的参数 (b, θ) , 而小波函数采用表示点的参数 (b_1, b_2) 。因此小波变换可以逐点刻画点(零维)的奇异性, 但是无法刻画图像中线的奇异性(一维或更高维奇异性), 这一性质直接影响了小波变换在表示图像边缘等几何结构方面的有效性。而脊波函数的横截面是一条类似小波的曲线, 脊波沿着脊线是一条直线, 正是这样的几何结构使得脊波变换可以有效地处理图像中直线状和超平面状的奇异性。

由于在二维空间中,点和线可以通过 Radon 变换联系起来,因此可以通过 Radon 变换将小波变换和脊波变换的关系表达出来。记函数 $f(x)$ 的 Radon 变换为

$$R_f(\theta, t) = \int_{R^2} f(x) \delta(x_1 \cos \theta + x_2 \sin \theta - t) dx \quad (5)$$

则脊波变换可以表示为该函数 Radon 变换切片上的一维小波变换

$$\text{CRT}_f(a, b, \theta) = \int_{R^2} \psi_{a,b}(x) R_f(\theta, t) dt \quad (6)$$

简言之,脊波变换的主要思想是用 Radon 变换将不同方向的线奇异性映射为点的奇异性,然后用一维小波变换来刻画点的奇异性,从而能有效表示图像中线或者曲线奇异性等图像重要特征。另一方面,脊波变换在保留小波变换空/频局部性等重要性质的同时,其多通道分解比小波变换更加匹配人类视觉系统的多通道结构。图 1 所示为脊波变换实现的多通道频域分割图,其径向频率分解的带宽是倍频程的,而方向带宽随径向频率的增加而减半。根据生理和心理学的实验研究:视觉皮层细胞的响应在频域成带通特性,人的大脑具有将独立的视觉机制聚合起来的能力,而各视觉机制对频域之某一部分敏感,而空间频率带宽大约为 1-2 个倍频程,方向带宽随空间频率在 40-60° 之间变化^[8]。因此利用脊波变换可以充分挖掘人类视觉的特性,建立更符合 HVS 的 JND 模型。

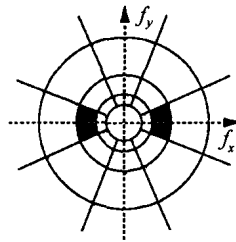


图 1 脊波频带划分

2.2 临界可见误差模型

水印算法必须满足两个基本要求:(1)水印的不可见性;(2)抵抗攻击的鲁棒性。为满足这两个要求,必须合理选择水印的隐藏区域,必须根据图像内容提高水印嵌入的强度,因此有必要精确计算频域系数所能容忍的最大噪声能力。由于每一图像的整体特性不可能完全相同,而且其局部特性也随空间位置发生变化。简言之,图像的频率信息和能量的分布不一样,导致了频域系数所能容忍的最大噪声能力的差异。从视觉掩盖的角度,水印嵌入可以看作是强背景条件下叠加一个弱信号,当该信号的光强增大时,人眼最初感觉不到,直到人眼感觉到的强度时,这一强度称作 JND。当嵌入水印的强度处于 JND 范围之内,水印的不可见性和鲁棒性达到最佳的折衷。根据人类视觉系统特性,对静止图像 JND 必须考虑如下三种特性^[6,8,9]:

(1) 频率敏感性:是指人眼对不同频率变化的敏感程度,如对低频部分的噪声十分敏感,而对高频部分的噪声不敏感。

(2) 照度掩盖效应:是指恒定背景下对噪声的检测阈值,图像背景越亮,临界可见误差越大。

(3) 对比度掩盖效应:是指某一信号存在的情况下对另一信号的检测阈值,当这两个信号具有相同的空间频率、方向和位置相同时,对比度掩盖效应大。

综合以上三大视觉特性,建立估算脊波变换域人眼 JND 模型。图 2 为建立脊波变换域 JND 模型的过程图。

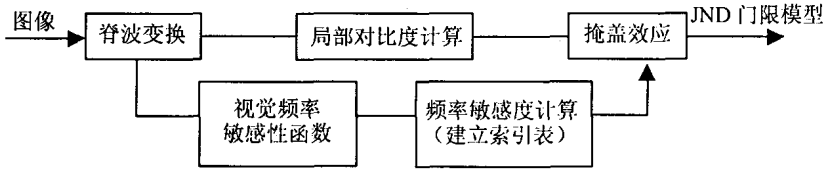


图 2 小脊变换域 JND 模型

首先将图像经离散正交脊波变换分解后的脊波系数,按频率和方向两个参数表示为 $I(\omega, \theta)$, 之后进行分块,组合成脊波子带表示 $I_k^m = \{I_k^m(i, j)\}$; 对应关系为 $I(\omega, \theta) = I_k^m(i, j)$, 其中 $\omega = \sum_{s=0}^m 2^s + i, \theta = k\pi/2^m + j$. 本文采用对图像有限 Random 变换^[11]后的系数进行四层小波分解,因此, $m = 0, 1, 2, 3, 4, k = 0, \dots, 2^m - 1$, 而脊波子带 I_k^m 包含的角度范围为 $(k\pi/2^m, (k+1)\pi/2^m)$ 度、频率范围为 $(2^{m-1}, 2^m)$ 的图像信息. 图像分解后的脊波子带结构如图 3 所示.

I_0^0							
I_1^0				I_1^1			
I_2^0		I_2^1		I_2^2		I_2^3	
I_3^0	I_3^1	I_3^2	I_3^3	I_3^4	I_3^5	I_3^6	I_3^7
I_4^0	I_4^1	I_4^2	I_4^3	I_4^4	I_4^5	I_4^6	I_4^7
I_4^8	I_4^9	I_4^{10}	I_4^{11}	I_4^{12}	I_4^{13}	I_4^{14}	I_4^{15}

图 3 小脊变换四层分解图

首先考虑频率敏感性的影响, 每个子带图像 I_m^k 的频率敏感度 T_m^k 由具有方向的视觉频率敏感性函数 $MTF(\omega, \theta)$ 在其相应角度和频率范围的平均值的倒数来计算. 令 $\Omega_m^k = (2^{m-1}, 2^m) \times (k\pi/2^m, (k+1)\pi/2^m)$, 则

$$T_m^k = \frac{\iint_{\Omega_m^k} \omega d\omega d\theta}{\iint_{\Omega_m^k} MTF(\omega, \theta) \omega d\omega d\theta} \tag{6}$$

其中 $MTF(\omega, \theta)$ 采取简化的 Daly 模型^[12]

$$MTF(\omega, \theta) = \min \left[S \left(\frac{1.24\omega}{1.5(0.15 \cos(4\theta) + 0.85)} \right), S(\omega) \right] \tag{7}$$

而

$$S(\omega) = 0.72((3.23(25\omega^2)^{-0.3})^5 + 1)^{-0.2} \omega e^{-0.33\omega} \sqrt{1 + 0.06e^{0.33\omega}} \tag{8}$$

为了降低水印算法的计算复杂性, 图像脊波系数的频率敏感度可以预先计算, 在水印嵌入时通过查表求得.

表 1 采用式 (7) 计算的各子带图像的频率敏感度

m	k															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1														
2	1.0	1.1	1.1	1.0												
3	1.8	2.1	2.5	2.9	2.9	2.5	2.1	1.9								
4	6.7	7.1	7.9	9.3	11.4	14.2	17.2	19.4	19.4	17.3	14.3	11.5	9.3	7.9	7.1	6.7

然后根据 Weber 定律^[13], 定义脊波变换域对比度为

$$C_m^k(i, j) = |I_m^k(i, j)| / \left\{ I_0^0 \left(\left\lfloor \frac{i}{2m} \right\rfloor + 1, j \right) \right\}, \quad m \geq 1 \quad (9)$$

这里 $|I_m^k(i, j)|$ 表示 I_m^k 块中 i 行 j 列的脊波系数的绝对值。

最后由图像对比度掩盖效应模型^[12]对脊波系数的频率敏感度进行提升, 得到脊波变换域 JND 模型

$$\text{JND}(I_m^k(i, j)) = T_m^k \cdot \left(1 + \left(0.0153 \left(392.498 \cdot \left| \frac{C_m^k(i, j)}{T_m^k} \right| \right)^{0.7} \right)^4 \right)^{1/4} \quad (10)$$

从式 (10) 可知本文建立的 JND 模型较好地挖掘了 HVS 的频率敏感性和对比度掩盖效应, 给出了图像在不同频率和方向的脊波系数可容忍的最大噪声的能力。由于脊波系数的频率敏感度可通过查表 1 求得, 计算复杂性并不高。将 JND 模型与调整因子 $\alpha(0.45 \sim 0.65)$ 相乘, 并与水印强度联系起来, 得到水印嵌入的强度加权因子:

$$w(I_m^k(i, j)) = \alpha \cdot \text{JND}(I_m^k(i, j)) \quad (11)$$

3 数字水印方案

3.1 数字水印嵌入算法

水印信息序列 X 的生成有多种方法, 本文采用经典的扩展谱技术生成水印信息序列的方法^[14]。首先将标记数字产品版权信息的作者签名, 将其 ASCII 码转换为二进制序列 (0, 1 序列), 然后将 0 映射为 -1 , 1 映射为 1 。这样, 待嵌入数字产品的信息比特流可记为二值双向序列 $a_j, a_j \in \{-1, 1\}$ 。利用一个称为片率 (Chip-rate, Cr) 的足够大的因子 Cr, 将信息流 a_j 映射到一个较宽的带宽上, 得到扩展谱序列 $b_i = a_j, j \cdot \text{Cr} \leq i \leq (j+1) \cdot \text{Cr}$, 最后通过由密钥 K 生成的伪随机噪声序列 $p_i, p_i \in \{-1, 1\}$ 进行调制, 得到水印信息序列 $x_i = b_i \cdot p_i$ 。设 $x_i \in \{-1, 1\}$ 按嵌入脊波变换域中的顺序标记为 $x_m^k(i, j)$, 则脊波变换域中数字水印嵌入算法为

$$\bar{I}_m^k(i, j) = I_m^k(i, j) + w(I_m^k(i, j)) \cdot x_m^k(i, j) \quad (12)$$

利用扩展谱技术生成的水印分布在各个频域系数中, 加入每个频域系数的信号能量很小且不可随意检测。图像压缩或其它攻击手段可能将信号能量从某一频谱移走, 但由于水印能量分散于所有频谱中, 故其他的水印信息还是能保留下来。另外, 从上述水印生成与嵌入算法可知, 水印序列长度为片率长度与信息比特流 a_j 的长度之乘积:

$$\text{Length}(X) = \text{Cr} \times \text{Length}(a) \quad (13)$$

3.2 数字水印检测算法

假设待检测的可疑图像 \tilde{I} , 经相同的脊波变换, 得到相同的视觉分块 \tilde{I}_m^k , 分别计算各块与原始水印序列的相关系数:

$$\rho = \frac{1}{MN} \sum_m \sum_k \tilde{I}_m^k(i, j) \cdot x_m^k(i, j) \quad (14)$$

其中 M, N 为图像的行数和列数。本文根据 Neymann-Pearson 准则^[4]来计算检测阈值 T_ρ ，若 $\rho > T_\rho$ 时，则判定水印存在，若 $\rho \leq T_\rho$ ，则判定水印不存在。该检测算法不需要原始图像，但需要知道作者的签名、片率大小和密钥 K ，以生成和原始水印完全相同的水印序列。

3.3 数字水印统计分析

检测阈值 T_ρ 的精确计算关系到水印检测漏警概率和虚警概率问题。在实际应用中，水印检测只给出水印存在与否的二值决策。任意给定一可疑的待测图像 \tilde{I} ，及数字水印序列 X ，检测时存在如下两种假设：Hp.0: 图像中不含水印（图像中不含有水印或者含有其他类型的水印）；Hp.1: 图像中含有水印 X 。从而虚警概率 P_F 可定义为 Hp.0 下检测到水印 X 概率，在 Hp.1 未检测到水印 X 的概率定义为漏警概率 P_M 。令 Hp.0 和 Hp.1 下的先验概率分别为 $P(0)$ 和 $P(1)$ ，则误检概率为

$$P_E = P_F \cdot P(0) + P_M \cdot P(1) = P(\rho > T_\rho|0)P(0) + P(\rho < T_\rho|1)P(1) \quad (15)$$

对静止图像水印检测而言，由于事先未知水印存在与否，即先验概率未知，根据 Neymann-Pearson 准则，人们希望在给定虚警概率的情况下，其漏警概率最小。这样检测阈值 T_ρ 可由给定的虚警概率求得。

下面计算虚警概率 $P_F = P(\rho > T_\rho|0)$ 。由于数字水印序列 X 为采用扩展谱方法产生的伪随机序列，假设其方差 $\sigma_x^2 = 1$ ，数学期望为 $E[x_m^k(i, j)]$ 。由中心极限定理，可假设相关系数 ρ 为服从高斯分布的随机变量，则可计算随机变量 ρ 在 Hp.0 和 Hp.1 下的均值和方差分别为

$$\begin{aligned} \mu_{\rho 0} &= 0; \quad \mu_{\rho 1} = \frac{1}{MN} \sum_m \sum_k \sum_{(i,j) \in I_m^k} w(I_m^k(i, j)) \cdot E(x_m^k(i, j)) \\ \sigma_{\rho 0}^2 &= \frac{\sigma_x^2}{(MN)^2} \sum_m \sum_k \sum_{(i,j) \in I_m^k} E(I_m^k(i, j)^2) \\ \sigma_{\rho 1}^2 &= \frac{\sigma_x^2}{(MN)^2} \sum_m \sum_k \sum_{(i,j) \in I_m^k} \{E(I_m^k(i, j)^2) + \sigma_x^2 \cdot w(I_m^k(i, j))^2 E[(x_m^k(i, j))^2]\} \\ &= \frac{1}{(MN)^2} \sum_m \sum_k \sum_{(i,j) \in \tilde{I}_m^k} E[(\tilde{I}_m^k(i, j))^2] \end{aligned}$$

进一步，如果利用嵌入水印图像的脊波系数进行后验估计，则

$$\sigma_{\rho 1}^2 \approx \frac{1}{(MN)^2} \sum_m \sum_k \sum_{(i,j) \in \tilde{I}_m^k} (\tilde{I}_m^k(i, j))^2 \quad (16)$$

给定虚警概率 $P_F = P(\rho > T_\rho|0) = (1/2)\text{erfc}(T_\rho/\sqrt{2\sigma_{\rho 1}^2}) = 10^{-8}$ 。从而检测阈值 T_ρ 定为

$$T_\rho = 3.97\sqrt{2\sigma_{\rho 1}^2} \quad (17)$$

4 实验结果

本文从水印的不可见性、鲁棒性和水印容量 3 个方面对算法进行综合验证。采用峰值信噪比 PSNR 作为图像质量的客观评价指标，并利用国际上流行的水印攻击软件 Stirmark 对水印的鲁棒性进行评估，水印容量由峰值信噪比几乎相同的情况下嵌入的水印序列长度来衡量。

图 4(a) 从上到下为测试原始图像 Lenna, Panda 和 Peppers 3 组灰度图像, 大小均为 256×256 ; 图 4(b) 为嵌入水印后图像, 图 4(c) 为二者的差异图像 (为观察方便, 亮度增强 30 倍). 从主观视觉效果无法察觉嵌入水印后图像 (图 4(b)) 与原始图像 (图 4(a)) 之间的区别. 从二者像素域灰度增强差异图 (图 4(c)) 可见, 水印信息集中在灰度变化复杂的区域, 这充分说明了水印嵌入的图像自适应性. 表 2 说明了对不同细节的图像, 纹理丰富的图像嵌入水印的长度和 PSNR 均较大.



图 4 嵌入水印后的图像与原始图像的比较结果

表 2 不同细节图像中嵌入水印序列强度和 PSNR

图像名	作者签名比特数	片率大小	水印序列长度	PSNR (dB)
Lenna	256	184	47104	38.74
Panda	256	212	54272	39.12
Peppers	256	128	32768	36.78

用攻击软件 Stirmark 对嵌入水印后的图像进行一系列的攻击: 如加入 10% 的高斯噪声、中值滤波、图像的剪裁和 JPEG 压缩等, 水印对常见的图像处理 and 几何失真均有较强的鲁棒性. 实验中, 由用户随机输入 1000 个密钥, 产生 1000 个不同的水印, 而第 500 个水印为原始水印 (图 7(c) 中第 100 个水印为原始水印). 图 5 中曲线为 1000 个水印与原始水印的相关性输出图, 横坐标为 1000 个水印, 纵坐标为其相关系数; 其中 5(a) 和 5(b) 分别为对水印图像加入 10% 高斯噪声和 3×3 中值滤波时的检测结果, 它们都在第 500 个水印处产生的明显的峰值, 这说明水印信息存在. 图 6 为算法对不同质量因子 JPEG 压缩后的 PSNR、相关系数和检测阈值的变化曲线. 实验中还对 Stirmark 中微小扭曲的几何攻击 (适当地选取强度, 对图像行、列进行微小扭曲和抖动, 通常不影响图像的视觉效果) 进行验证. 图 7 表明本文所提出的水印算法具有较强

的抵抗几何攻击的能力，这是因为脊波变换比小波变换等其它时频分析方法具有更好的方向局部性：微小扭曲和抖动引起的方向改变，只会产生某一方向的脊波子带系数的变化，不会影响其他脊波子带系数；因此，脊波变换域中数字水印算法比大多数扩展谱水印算法对微小扭曲的几何攻击有更强的鲁棒性。

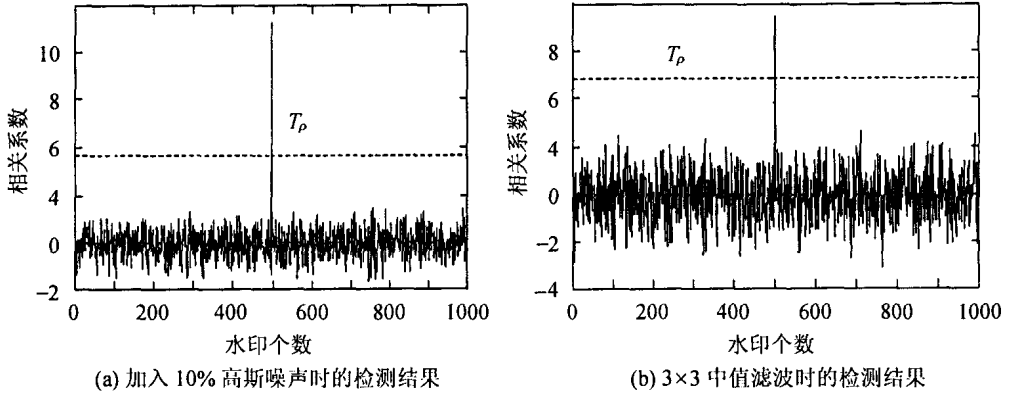


图 5 对高斯噪声和中值滤波的实验结果

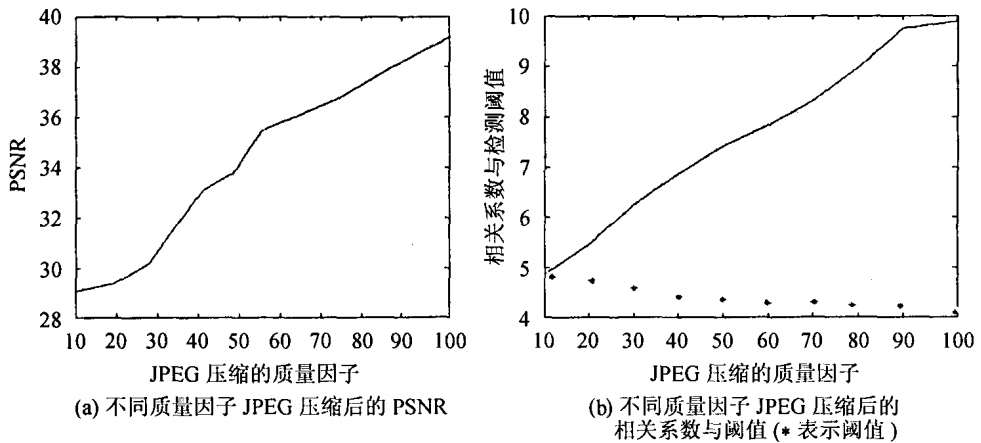


图 6 对 JPEG 压缩的实验结果

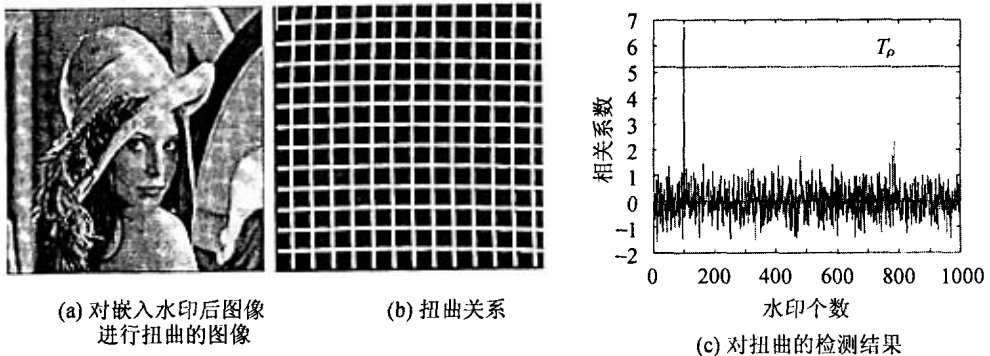


图 7 对微小扭曲的几何攻击的实验结果

5 结论

本文首次建立了脊波变换域的人眼临界可见误差模型,并将该模型与水印的强度联系起来,自适应地确定水印在不同方向和不同频率脊波系数的嵌入强度,从而有效地保证了水印的不可见性和鲁棒性。通过密钥保护和扩展谱技术,提高了水印的安全性。此外,本文推导了根据水印图像统计特性计算检测阈值的方法,该方法对不需要原始图像的水印检测具有一定的普遍意义。由于人类视觉系统的复杂性,尚待进一步研究脊波域 JND 精确模型,例如考虑纹理掩盖等复杂因素的影响。同时,数字水印的攻击方法^[15]甚多,研究本文水印算法对表达攻击和解释攻击的鲁棒性以及相应的技术保护手段,都将是下一步值得研究的课题。

参 考 文 献

- [1] Cox I J, Miller M L. A review of watermarking and the importance of perceptual modeling. In Proceedings of SPIE, Human Vision & Electronic Imaging II, 1997, Santa Barbara, 3016: 92-99.
- [2] 章毓晋. 中国图像工程及当前的几个热点. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(6): 1-12.
- [3] Podilchuk C I, Zeng W. Image-adaptive watermarking using visual models. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 1998, 16(4): 525-539.
- [4] 刘瑞祯, 王蕴红, 谭铁牛. 基于图像内容的数字水印模型. 中国图像图形学学报, 2001, 6(6): 558-562.
- [5] Ruanaidh O, Csurka G. A Bayesian approach to spread spectrum watermark detection and secure copyright protection for digital image libraries. In Proceedings of CVPR99, Fort Collins, Colorado, 1999, 1: 207-212.
- [6] 黄继武, YUN Q. SHI, 程卫东. DCT 域图像水印, 嵌入对策和算法. 电子学报, 2000, 28(4): 57-60.
- [7] 宿富林, 马国强, 吴江. 一种对图像剪切具有鲁棒性的数字水印算法. 电子与信息学报, 2003, 25(3): 295-299.
- [8] 钟桦, 焦李成. 基于自适应频带选择的数字水印技术. 电子与信息学报, 2003, 25(3): 289-294.
- [9] Wei Zhi-hui, et al.. Perceptual digital watermark of images using wavelet transform. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 1998, 44(4): 1267-1272.
- [10] 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. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(2): 200-204.
- [11] Candes E J, Donoho D L. Ridgelets: A key to higher-dimensional intermittency. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 1999: 2495-2509.
- [12] Daly S. The visible differences predictor: An algorithm for the assessment of image fidelity. Proc. SPIE, Human Vision, Visual Processing, and Digital Display III, 1992, Vol.1666: 2-15.
- [13] Vassilev A. Contrast sensitivity near borders significance of test stimulus: Form, size, and duration. *Vision Research*, 1973, 13(11): 719-730.
- [14] Cox I J, Kilian J, Leighton F, Samoon T T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, IP-6(12): 1673-1687.
- [15] 陈明奇, 钮心怡, 杨义先. 数字水印的攻击方法. 电子与信息学报, 2001, 23(7): 705-711.

肖亮: 男, 1976年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为数字图像处理、数字水印技术等方面的研究。

韦志辉: 男, 1963年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为小波分析、数字信号处理。

吴慧中: 女, 1942年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为虚拟现实与系统仿真, 计算机图形图像理论。