

基于参数自适应的 ISS 盲水印算法

李金龙 杨守义 穆晓敏

(郑州大学信息工程学院, 郑州 450052)

摘要 提出了一种基于改进的扩频(improved spread spectrum, ISS)技术的盲水印算法,针对 ISS 技术局部嵌入失真不可控制的缺点,结合人类视觉系统模型(HVS 模型)建立一个限失真的数学模型实现水印自适应最优嵌入。实验结果表明,提出的算法克服了 ISS 算法中局部失真大的问题,并且有比 ISS 算法更好的鲁棒性。水印图像在 JPEG 压缩、各种噪声、常见滤波的攻击下能够提取出水印信息,表现较强的鲁棒性。

关键词 数字水印 ISS 人类视觉系统

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)06-0991-06

A Blind ISS Watermarking Algorithm Based on Adaptive Parameters

LI Jin-long, YANG Shou-yi, MU Xiao-min

(College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)

Abstract In this paper, an ISS algorithm with adaptive parameters has been proposed. It takes into account the features of human visual system (HVS) and thus can limit the local distortion of the watermarked images. By doing this way, the watermarking scheme has better transparency and stronger robustness. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm overcomes big local distortion existed in ISS scheme, and is robust enough against many kinds of image processing such as JPEG compression, noise filtering.

Keywords digital watermarking, improved spread spectrum, HVS

1 引言

数字水印是信息隐藏技术的最重要的一个分支,也是目前国际学术界研究的一个前沿热门方向。它可为计算机网络上的数字媒体版权保护和来源认证等安全问题提供一个潜在的有效解决办法。发展一个好的水印算法(系统)至少应该满足透明性(transparency)和鲁棒性(robustness)的要求^[1]。在 SS(spread spectrum)通信中,信号占据了超过传送所必需的最小带宽的频带,传送过程中如果将其分散到任意单一频带上,则信号能量变得不可检测。接收端,随机分散且不可感知的信号被集中起来得到所期望的信号。从通信的角度,数字水印的嵌入和提取模

型可以看成是一个通信问题^[1,2],嵌入时水印是消息,宿主信号(载波)是信道,提取时,嵌入水印的宿主信号相对于水印消息是信道噪声。由于宿主信号比其他的干扰强得多,所以势必影响水印检测器的性能。文献[3]、[4]提出了一种基于 ISS(improved spread spectrum)调制技术,目的是消除宿主信号(载波)的干扰作用,相比于 SS 有更强的鲁棒性,同时检测统计量几乎不含宿主信号,所以有利于发展盲水印算法。但是 ISS 并不能保证水印嵌入失真像 SS 一样为常数,如果硬性规定 ISS 水印嵌入失真取与 SS 相同的平均失真,则在宿主信号的局部位置嵌入失真分布不均匀,使得某些局部产生的失真影响了视觉效果,对一个水印系统来说难于接受。

基于以上考虑,提出了一种基于参数自适应 ISS

基金项目:国家自然科学基金项目(60472044)

收稿日期:2005-11-08;改回日期:2006-02-18

第一作者简介:李金龙(1971~),男,郑州大学信息工程学院硕士研究生。主要研究方向为数字水印技术、信息隐藏技术。E-mail: jll1971@126.com

调制技术的分块 DCT 域盲水印算法。结合 HVS (human visual system)^[5-7] 的某些特征,限制每一选定 DCT 块失真水平在临界差异 (just noticeable difference, JND) 之下,一方面可以有效控制局部失真大的问题,达到比较理想的视觉效果,另一方面又可以在不影响视觉质量的前提下嵌入最大水印强度,提高水印系统抗攻击的鲁棒性。提出的算法具有以下特点:

(1) 结合 HVS 特征,可以嵌入最大允许的透明水印以提高抗攻击的鲁棒性;

(2) 采用 ISS 调制技术提高了检测的质量;

(3) 在分块 DCT 域进行水印的嵌入,考虑了宿主信号的局部频域特征,对 ISS 参数实现自适应优化,克服 ISS 的局部失真问题;

(4) 水印的嵌入和检测采用两级密码,增强系统的安全性。

实验在灰度图像中嵌入二值图像作为水印,实验结果表明算法在 JPEG 压缩、各种噪声、滤波,以及一些混合攻击下能够提取出水印信息,对攻击表现较强的鲁棒性。提出的算法有比 ISS 更好的视觉效果和更小的比特误码率 (BER)。

2 参数自适应的 ISS 技术

2.1 ISS 调制技术

设 X 是原信号经过合适的变换以后需要修改的系数所构成的矢量, X' 为修改以后的系数矢量, Y 是接收矢量 (在变换域), b 为所要嵌入的比特,取值 +1 或者 -1, W 是在某一密钥控制下产生的伪随机噪声 (pseudo-noise, PN) 扩频序列,均值为 0,取值 $\pm \sigma_w$ 。矢量 X, X', Y, W 的长度均为 N , 文献[3]、[4] 采用了 ISS 调制技术的线性形式:

$$X' = X + (\alpha b - \lambda \mu(x)) W \quad (1)$$

式中, α, λ 控制了水印嵌入时的失真水平和检测端载波由于攻击失真的消除程度,显然当 $\lambda = 0$ 时为 SS 技术。 $\mu(x)$ 为矢量 X 在矢量 W 上的投影 $\mu(x)$

$$= \frac{\langle X, W \rangle}{\langle W, W \rangle}, \langle \cdot, \cdot \rangle \text{ 表示内积, 定义为}$$

$$\langle X, W \rangle = \sum_{i=1}^N x_i w_i \quad (2)$$

$$\|X\| = \langle X, X \rangle$$

x_i, w_i 分别为矢量 X, W 的第 i ($1 \leq i \leq N$) 个分量。信道视为加性噪声模型:

$$Y = X' + n \quad (3)$$

检测时先计算下面的统计量, 然后进行符号判决:

$$r = \frac{\langle Y, W \rangle}{\langle W, W \rangle} = \alpha b + (1 - \lambda) \mu(x) + \mu(n) \quad (4)$$

$$\hat{b} = \text{sign}(r) \quad (5)$$

$\mu(n) = \frac{\langle n, W \rangle}{\langle W, W \rangle}$ 为攻击噪声矢量 n 在矢量 W 上的投影。由式(4)中可以看出当 $\lambda = 1$ 时, 宿主信号的影响将完全消除, 但是当 $\lambda = 1$ 时, 式(4)右边的第 3 项攻击噪声 $\mu(n)$ 存在, 所以不是最优的 λ 。因此 ISS 调制技术关键是 α, λ 的确定。文献[3]、[4] 是通过固定嵌入失真和信道在一定的攻击下有最好的鲁棒性相结合来确定 α, λ 参数的。

假定原信号 X 和信道攻击噪声 n 相互独立且服从正态分布, 即 $X \sim N(0, \sigma_x^2)$, $n \sim N(0, \sigma_n^2)$ 。嵌入失真 $D = \|X' - X\|$, 则可求出其均值为

$$\begin{aligned} E[D] &= E[\|X' - X\|] = E[\alpha b - \lambda \mu(x)]^2 \sigma_w^2 \\ &= \left(\alpha^2 + \frac{\lambda^2 \sigma_x^2}{N \sigma_w^2} \right) \sigma_w^2 \end{aligned} \quad (6)$$

设与 SS 的失真相等, 也就是说 $E[D] = \sigma_w^2$, 故有:

$$\alpha = \sqrt{\frac{N \cdot \sigma_w^2 - \lambda^2 \sigma_x^2}{N \sigma_w^2}} \quad (7)$$

确定最优 λ 是假定信道在受到一定的攻击以后仍然有最小的 BER。为了估计 BER, 需要计算统计量 r 的均值 m_r 和方差 σ_r^2 。由式(4)可得:

$$\begin{aligned} m_r &= \alpha b \\ \sigma_r^2 &= \frac{\sigma_n^2 - (1 - \lambda)^2 \sigma_x^2}{N \sigma_w^2} \end{aligned} \quad (8)$$

于是其 BER 可按下式计算:

$$\begin{aligned} p &= pr\{r < 0 \mid b = 1\} \\ &= \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{m_r}{\sigma_r \sqrt{2}}\right) \\ &= \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{N \cdot \sigma_w^2 - \lambda^2 \sigma_x^2}{\sigma_n^2 + (1 - \lambda)^2 \sigma_x^2}}\right) \\ &= \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\frac{N \sigma_w^2}{\sigma_x^2} - \lambda^2}{\frac{\sigma_n^2}{\sigma_x^2} + (1 - \lambda)^2}}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

$pr\{r > 0 \mid b = -1\}$ 的计算方法与式(9)相同。 $\text{erfc}(\cdot)$ 是误差补函数。很显然在一定的攻击噪声

下, p 是 λ 的函数, 定义 $\frac{\partial p}{\partial \lambda} = 0$ 求得最优的 λ 为

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{1}{2} (A - B) \quad (10)$$

其中

$$A = 1 + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_x^2} + \frac{N\sigma_w^2}{\sigma_x^2}$$

$$B = \sqrt{\left(1 + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_x^2} + \frac{N\sigma_w^2}{\sigma_x^2}\right)^2 - 4 \frac{N\sigma_w^2}{\sigma_x^2}}$$

λ_{opt} 取决于嵌入水印和原信号的强度比 $\frac{N\sigma_w^2}{\sigma_x^2}$ 以及信道/攻击的信噪比 SNR (即 $\frac{\sigma_x^2}{\sigma_n^2}$)。从式(9)可以看出,

在一定的信道/攻击信噪比 SNR 下, $\frac{N\sigma_w^2}{\sigma_x^2}$ 越大, BER 越小, 所以为了保证比较小的 BER, 可以增大 N 或者增大扩频序列的取值 σ_w , N 的大小受到宿主信号和水印容量的制约, 其值是有限的, 增大 σ_w 成了一种好的选择。由此产生两个问题: 一是 σ_w 增大到什么值的时候比较合适? σ_w 越大 BER 越小, 但是分析式(6)就知道嵌入失真也越大, 所以一个合适的 σ_w 在 ISS 中的确定有难度; 二是 ISS 的局部失真如何控制? 由于文献[3]、[4]提出的 ISS 调制技术是从平均失真入手来计算参数的 (见式(6)、(7)), 势必会导致局部失真不均衡, 即使取到合适的 σ_w , 也会在嵌入水印的图像中出现影响人的视觉的局部失真。基于以上考虑, 本文提出了局部参数自适应的 ISS 调制技术。

2.2 局部参数自适应的 ISS 调制技术

不失一般性, 设 $X = \{X_{i,j}, 1 \leq i \leq M, 1 < j < N\}$ 为原数据经过 DCT 块变换以后所选择出来的需要进行修改的系数矩阵, 下标 i 对应第 i 块, 共 M 块, 下标 j 对应第 i 块的第 j 个变换系数, 每块选择 N 个系数, 以下相同。 $X' = \{X'_{i,j}, 1 \leq i \leq M, 1 < j < N\}$ 为经过修改以后的系数矩阵, $Y = \{Y_{i,j}, 1 \leq i \leq M, 1 < j < N\}$ 为接收到的数据经过 DCT 块变换以后选择出来的系数矩阵, 嵌入的是二值水印信息 $b = \{b_i, 1 \leq i \leq M, b_i = \pm 1\}$, 共 M 个信息位, 每个信息位采用一个随机密钥控制产生的长度为 N 的 PN 序列进行扩频, 用 $W = \{W_i, 1 \leq i \leq M\}$ 表示扩频序列矩阵, 其中 W_i 均值为 0, 取值 $+\sigma_w, -\sigma_w$, 长度为 N 。

水印嵌入采用文献[3]、[4]的线性形式:

$$X'_{i,j} = X_{i,j} + (\alpha_i b_i - \lambda_i \mu(X_{i,j})) W_i \quad (11)$$

$\mu(X_{i,j})$ 是矢量 X 在 W 上的投影, 参照 2.1 节。信道视为加性噪声模型:

$$Y_{i,j} = X'_{i,j} + n_i \quad (12)$$

式中, n_i 长度为 N 。检测时先计算统计量, 然后进行

逐位符号判决:

$$r_i = \frac{\langle Y_{i,j}, W_i \rangle}{\langle W_i, W_i \rangle} = \alpha_i b_i + (1 - \lambda_i) \mu(X_{i,j}) + \mu(n_i) \quad (13)$$

$$\hat{b}_i = \text{sign}(r_i) \quad (14)$$

$\mu(n_i)$ 的定义与 2.1 节的相同。式(11)~(14)的 α_i, λ_i 结合人类视觉系统 (HVS) 特征, 局部自适应寻求最优值。假定原信号变换系数 $X_{i,j}$ 和攻击噪声 n_i 相互独立且服从标准正态分布, 也就是说: $X_{i,j} \sim N(0, \sigma_{xi}^2), n_i \sim N(0, \sigma_{ni}^2)$ 。

HVS 模型属于人的生理模型, 它不仅应用于多媒体数据压缩系统, 同样也可以应用于数字水印系统。从图像处理的角度看, 水印的嵌入过程可看作为在强背景 (原始图像) 下叠加一个弱信号 (水印), 研究发现只要弱信号 (水印) 低于 HVS 的对比度门限 (contrast sensitivity threshold), 人的知觉就无法感知到该信号的存在。针对 ISS 调制技术对宿主信号的局部失真不能控制的缺点, 结合 HVS 模型, 在水印嵌入时对每一个局部的嵌入失真确定一个上界, 建立一个限失真水印嵌入模型。

这里采用 Watson 在分块 DCT 域基于图像的 HVS 模型^[2,6] 作为分析的基本模型。该模型考虑了 HVS 的频率灵敏度 (frequency sensitivity)、亮度灵敏度 (luminance sensitivity)、对比度灵敏度 (contrast sensitivity) 3 个不同的方面。每一个 DCT 系数的频率灵敏度 ($F_{u,v,k}$)、亮度掩蔽 ($L_{u,v,k}$)、对比度掩蔽 ($C_{u,v,k}$) 满足^[5-7]:

$$C_{u,v,k} = \max[L_{u,v,k}, |X_{u,v,k}|^{\beta_{u,v}} (L_{u,v,k})^{1-\beta_{u,v}}] \quad (15)$$

$$L_{u,v,k} = F_{u,v,k} \left(\frac{X_{0,0,k}}{X_{0,0}} \right)^{\alpha_{u,v}} \quad (16)$$

其中, $X_{0,0,k}$ 为亮度块 k 的 DC 分量, $X_{0,0} = \frac{1}{8B} \sum_{i=1}^8 X_{0,0,k}$ 对应原始图像亮度块的均值, B 为原始图像亮度总块数, $X_{u,v,k}$ 为图像第 k 亮度块 (u, v) 位置上的 DCT 系数, $\alpha_{u,v}, \beta_{u,v}$ 分别控制亮度敏感性和对比度敏感性的强度, 一般取 $\alpha_{u,v} = 0.649$ 和 $\beta_{u,v} = 0.7$ 。

建立嵌入限失真模型的步骤如下:

(1) 对原始图像进行分块 DCT 变换, 选择适宜的 DCT 系数构成系数矩阵 $X = \{X_{i,j}, 1 \leq i \leq M, 1 < j < N\}$ 嵌入 M 位二值水印信息, 然后利用 HVS 模型得到每一个 DCT 系数的对比度掩蔽 $C_{u,v,k}$ 。为便于说明, 这里假设每一块的 N 个 DCT 系数 $X_{i,j}$ 所对应的对比度掩蔽用 $C_{i,j} | 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 表示。

(2) 确定嵌入失真的上界。如果对第 i 块的 N

个对比度掩蔽取 $\min(C_{i,j})$ 为嵌入失真上界, 水印嵌入失真小、透明性好但是鲁棒性下降; 如果取第 i 块的 N 个对比度掩蔽 $\max(C_{i,j})$ 为上界, 会导致可感知的失真变大。当 $\frac{\max(C_{i,j})}{\min(C_{i,j})}$ 大于某一阈值时可以认为该块是不均匀块, 嵌入失真上界可取稍大些, 并且嵌入水印时很少对全部的变换系数进行修改。综合以上观点, 采用如下的经验公式确定嵌入失真上界:

$$T_i = (\max(C_{i,j}))^\tau (\min(C_{i,j}))^{1-\tau} \quad (17)$$

式(17)的下标 i 表示第 i 块。 τ 为调整因子, 大小由实验的方式决定, $\tau=1$ 表示取该段最大对比度掩蔽为嵌入失真上界, $\tau=0$ 为取该段最小对比度掩蔽为嵌入失真上界。 τ 取值应该在 0 和 1 之间。图 1 是 τ 取不同值时, 图像的峰值信噪比 PSNR 和 BER 的变化情况。

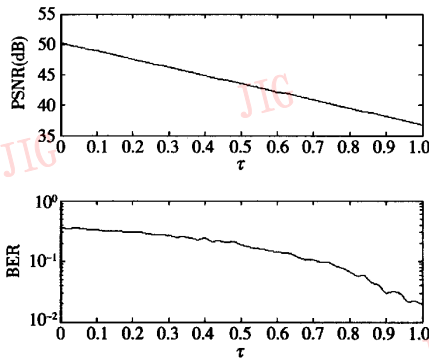


图 1 不同调整因子 τ 下的 PSNR 和 BER

Fig. 1 The PSNR and BER of different adjusted factors τ

由图 1(a)可以看出随着 τ 值增大, PSNR 减少, 表现为不可见性变差, 图 1(b)随着 τ 增大 BER 减少, 也就是说鲁棒性增强。实际应用中应根据需要综合考虑 PSNR 和 BER, 以选取合适的 τ 值。

(3) 建立限失真模型。为了建立限失真模型, 先引入均方误差 (MSE):

$$e_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (X'_{i,j} - X_{i,j})^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

e_i 表示第 i 块水印嵌入时所造成的 MSE。将式(11)代入式(18)得:

$$e_i = \sqrt{\left(\alpha_i^2 + \frac{\lambda_i^2 \sigma_{xi}^2}{N \sigma_{wi}^2} \right) \sigma_{wi}^2} \quad (19)$$

当 $e_i \leq T_i$, 根据 HVS 特性, 视觉上是透明的。取等号为嵌入时的最大可失真极限, 则参数 α_i 满足:

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{NT_i^2 - \lambda_i^2 \sigma_{xi}^2}{N \sigma_{wi}^2}} \quad (20)$$

对比式(8)、(9), 可以得到 BER 的表达式:

$$\begin{aligned} p_i &= pr\{r_i < 0 \mid b_i = 1\} \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{m_{ri}}{\sigma_{ri}\sqrt{2}}\right) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{\sigma_{ni}^2 + (1 - \lambda_i^2)^2 \sigma_{xi}^2}}\right) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{\frac{NT_i^2 - \lambda_i^2 \sigma_{xi}^2}{\sigma_{xi}^2} + (1 - \lambda_i^2)^2}}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

$pr\{r_i > 0 \mid b_i = -1\}$ 计算方法相同, 结果与上式相等。从而得到每一块最优的 λ_i 为

$$\lambda_{opt,i} = \frac{1}{2}(A_i - B_i) \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} A_i &= 1 + \frac{\sigma_{ni}^2}{\sigma_{xi}^2} + \frac{NT_i^2}{\sigma_{xi}^2} \\ B_i &= \sqrt{\left(1 + \frac{\sigma_{ni}^2}{\sigma_{xi}^2} + \frac{NT_i^2}{\sigma_{xi}^2}\right)^2 - 4 \frac{N \sigma_{wi}^2}{\sigma_{xi}^2}} \end{aligned}$$

由式(21)可见, 在信道/攻击的 SNR (即 $\frac{\sigma_x^2}{\sigma_n^2}$) 为

定值的时候, BER 也保持不变。限失真模型给出的是每块嵌入失真的上界, 当嵌入失真控制在该上界之内的时候能够保证视觉上不会受到影响, 如果取该上界作为最大的嵌入失真, 则可以使得水印在受到攻击的时候表现最强的鲁棒性, 并且由于该调制方法结合 HVS 特征局部自适应使得水印的局部嵌入失真可控的, 弥补了 ISS 的缺陷。

3 水印方案

3.1 水印的嵌入过程

设原始灰度图像和二值水印图像分别为 OI 和 WI 。 $OI = \{o_i(i, j), 1 \leq i, j \leq L\}$, $o_i(i, j)$ 表示原始图像第 i 行第 j 列的灰度值。 $WI = \{w_i(i, j), 1 \leq i, j \leq K\}$, $w_i(i, j)$ 取值 +1 和 -1。 L 和 K 表示原始图像和二值水印图像的大小, 采用 8×8 分块 DCT, 所以需要满足 $K \leq L/8$ 。水印的嵌入过程如下:

(1) 随机置乱和 PN 序列的生成

为了加强水印算法的鲁棒性和安全性, 采用双密钥控制, 用密钥 $Key1$ 产生一个伪随机序列对二值水印图像进行随机置乱, 确保图像部分受到破坏后,

仍然能够全部或者部分地恢复二值水印图像。密钥 Key_2 产生长度为 N 的 PN 扩频序列,均值为 0,取值 $+\sigma_w$ 和 $-\sigma_w$ 。

(2) 图像变换

将原始图像 OI 分解成 $\left(\frac{L}{8}\right) \times \left(\frac{L}{8}\right)$ 个 8×8 的方块 $OI_{m,n,k} (1 \leq m, n \leq 8)$ 。再进行 2 维 8×8 分块 DCT 变换得到 $OI_{u,v,k}$, 选择 $K \times K$ 块并且在每一块上选择其中的 N 个中频系数生成嵌入水印系数矩阵 X 。同时将二值水印图像 WI 变成向量形式 $W = \{w_i, 1 \leq i \leq K \times K\}$ 。选择中频系数是因为人眼对中频分量不敏感,同时又集中了图像比较重要的信息。

(3) 数据嵌入

采用式(11)对选取的中频系数进行修改, α_i, λ_i 由式(20)、(22)和 HVS 掩蔽模型自适应决定。将修改后的中频系数放回原来的位置再进行分块 DCT 逆变换,得到 OI' ,即为加载水印之后的图像。

3.2 水印检测和提取

水印的检测或提取是水印嵌入的逆过程,我们执行的是一种盲检测算法,具体过程是:

对可能受到攻击的水印图像进行 8×8 分块 DCT 变换,选择每一块的 N 个中频系数,构成向量 $Y_i, 1 \leq i \leq N$ 。密钥 Key_2 产生 N 长的 PN 序列 W ,按式(13)计算统计量 r_i 。

(1) 检测水印 如果只需要判断水印的有无,对每一块的统计量进行绝对值求和 $\sum |r_i|$,大于某一阈值则可认为水印存在。

(2) 提取水印 按式(14)对统计量 r_i 逐位判决后,再采用密钥 Key_1 进行反置乱,可以直接提取出二值水印图像。

4 实验结果与分析

实验中应用所提出的算法在大小 512×512 的标准 Lena 灰度图像中嵌入一幅 64×64 的二值水印图像,提出的算法和 ISS 算法都是先进行 8×8 DCT 变换,然后在每个 DCT 块中选择 22 个中频系数嵌入一比特信息,两种算法嵌入水印后的 PSNR 均为 38.001dB。嵌入水印后的效果如图 2 所示。分析后发现本文算法在水印嵌入后的视觉的效果上明显好于 ISS 算法。

图 3 对本文算法和 ISS 算法在不同的峰值信噪比 PSNR 下的 BER 进行了比较。由图 3 可以发现本



(a) 原图像 (b) 提出算法的水印图像 (c) ISS 算法的水印图像

图 2 水印图像效果比较

Fig. 2 The effect comparing of watermarked image

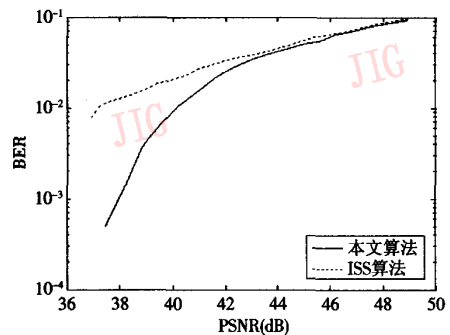


图 3 两种算法在不同 PSNR 下的 BER

Fig. 3 The BER of the two algorithm in different PSNR

文算法和 ISS 算法在峰值信噪比 PSNR 大于 44dB 时,本文算法的 BER 略好于 ISS 算法,当峰值信噪比在 44dB 以下时,本文算法在同一个 PSNR 下有比 ISS 算法更小的 BER,且随着 PSNR 的减少,本文算法有比 ISS 算法更优的 BER,比如在相同的 BER (10^{-2}) 下,本文算法的峰值信噪比 PSNR 增加了 3dB。所以本文算法在相同的 PSNR 下有比 ISS 算法更强的鲁棒性。

图 4 进一步对两种算法在相同的 PSNR 下进行了抗 JPEG 压缩比较。两种算法都能够抵抗一定程度的 JPEG 压缩攻击,当 $QF > 40\%$ 时,BER 小于 10^{-1} ,能够提取出水印图像,当 $QF > 55\%$ 时,本文算法的 BER 明显好于 ISS 算法。

图 5 对本文算法的水印图像在受到各种噪声攻击时的 BER 进行了分析。从图中可看出,高斯白噪声和局部均值为 0 的高斯白噪声对水印的鲁棒性影响比较大,BER 在 10^{-1} 左右,抗椒盐噪声、乘性噪声攻击的效果好,BER 在 10^{-2} 左右,提出的水印图像清晰。抗乘性噪声效果最好。

图 6 对两种算法在几种攻击下的水印进行了检测。实验结果表明,本文算法提取的水印效果好于 ISS 算法,表现出更强的抗攻击鲁棒性。

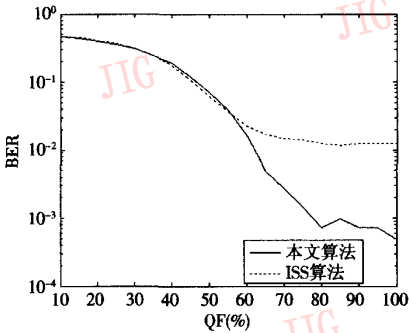


图 4 两种算法在不同 JPEG 压缩比下的 BER
Fig. 4 The BER of the two algorithm in different JPEG compressing

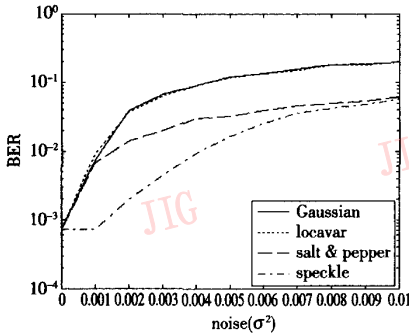


图 5 提出算法在多种噪声攻击下的 BER
Fig. 5 The BER of the proposed algorithm in noise attacking

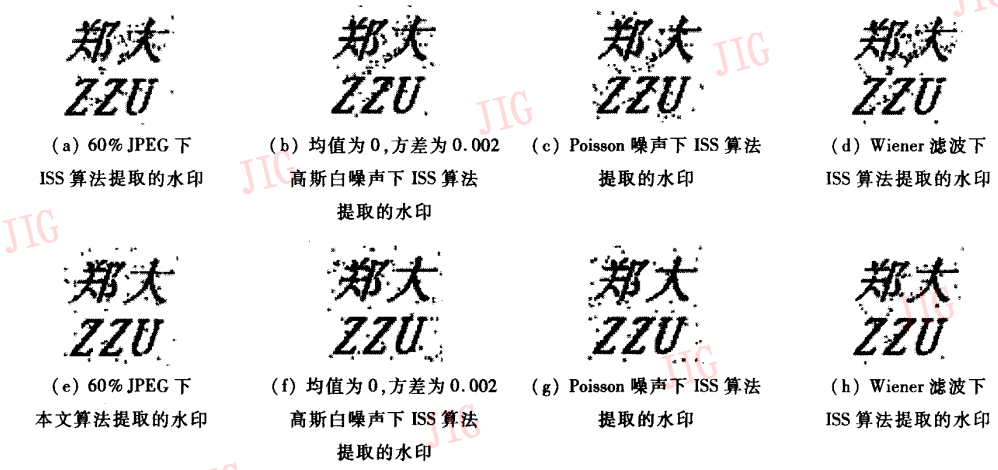


图 6 几种攻击下的水印检测
Fig. 6 The watermark detection after several attacking

5 结 论

本文算法根据图像块的视觉特性自适应地调整 ISS 的嵌入系数,既保证了水印的不可见性,又能最大限度地增强水印的鲁棒性;既吸收了 ISS 调制的优点,又克服了 ISS 的局部失真大且不好控制的缺点。实验结果表明,该算法对各类常见的图像处理操作具有良好的稳健性。

参考文献 (References)

1 Cox I J, Miller M L, Bloom J A. Digital Watermarking[M]. USA: Morgan Kaufman Press, 2002.
2 Cox I J, Kilian J, Leighton T, et al. Secure spread spectrum watermarking for images, audio and video[A]. In: ICIP '96, IEEE Proceeding on International Conference on Image Processing[C]. Lausanne, Switzerland, 1996, (3): 243 ~ 246.

3 Malvar H S, Florencio D A F. Improved spread spectrum: a new modulation technique for robust watermarking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(4): 898 ~ 905.
4 Malvar H S, Florencio D A F. An improved spread spectrum for robust watermarking[A]. In: IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. Orlando, FLORIDA, USA, 2002, (4): 3301 ~ 04.
5 Watson A B. DCT quantization matrices visually optimized for individual images[A]. In: Proceedings of SPIE on Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV[C]. San Jose, California, USA: SPIE Press, 1993, 1913(14): 202 ~ 216.
6 Kim S W, Suthakaran S. An entropy masking model for multimedia content watermarking[A]. In: IEEE Proceedings of The 37th Hawaii International Conference on System Sciences, 2004[C]. Big Island, Hawaii, USA, 2004, Track 7.
7 Watson A B, Taylor M, Borthwick R. Image quality and entropy masking[A]. In: Proceedings of SPIE on Human Vision, Visual Processing, and Digital Display VIII[C], San Jose, California, USA, 1997, 3016: 2 ~ 12.