

一种自适应图象水印算法¹⁾

黄继武

(中国汕头大学电子工程系 广东 515063)

SHI Yun Q

(Dept. of ECE, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA)

摘要 数字水印作为数字媒体版权保护的有效办法,近年来在国际上引起了人们极大的兴趣与注意.提出了一个利用块分类的自适应图象水印算法.为了实现自适应,将原始图象分块并设计了一个基于视觉掩蔽特性的分类器.根据分类的结果,不同强度的水印分量被嵌入到不同图象块的 DCT 低频系数中.实验结果表明,应用所提出的算法实现的水印对常见图象处理和噪声干扰具有很好的稳健性.

关键词 图象水印,数字水印,版权保护,视觉掩蔽,块分类.

AN ADAPTIVE IMAGE WATERMARKING ALGORITHM

HUANG Jiwu

(Dept. of Electronic Engineering, Shantou University, Shantou 515063)

SHI Yun Q

(Dept. of ECE, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA)

Abstract As an effect method to provide copyright protection for digital media, digital watermarking has drawn extensive attention recently. This paper proposes an adaptive image watermarking based on block classification. The algorithm splits the original image into blocks and classifies these blocks based on visual masking. Watermark components with different strength are inserted into some DCT coefficients according to the classification. The experimental results demonstrate that the watermarks generated with the proposed algorithm are invisible and robust against noise and commonly used image processing techniques.

Key words Image watermarking, digital watermarking, copyright protection, visual masking, block classification.

1) 广东省自然科学基金资助项目(项目号:980442).

收稿日期 1998-04-13 收到修改稿日期 1999-03-08

1 引言

随着数字媒体(数字图象、数字视频、数字音频等)的广泛应用,其版权保护成为一个迫切需要解决的问题.传统的加密系统在数据传输过程中虽有保护作用,但数据一旦被接收并解密,其保护作用也随着消失.因此只能满足有限的要求^[1,2].

数字水印(digital watermarking)是解决版权保护问题的有效补充办法^[3,4].它通过在原始数据中嵌入秘密信息——水印(watermarks)来证实该数据的所有权归属.主要应用于^[5]:1)非法拷贝媒体数据的检测;2)媒体所有权的认定;3)媒体的防拷贝保护;4)原版媒体的真伪鉴别.对数字图象而言,水印分隐形(invisible)和可见(visible)两种.本文探讨数字图象隐形水印问题.

设 F 和 W 分别代表原始图象和水印,则嵌入水印的图象 F' 可表示为

$$F' = \epsilon(F, W),$$

其中 $\epsilon()$ 为编码函数.给出待测试图象 F^* ,可抽取待证实的可能水印

$$W^* = D(F^*, F),$$

$D()$ 为译码函数.若相关函数 $\rho(W^*, W)$ 满足

$$\rho(W^*, W) \geq T,$$

则判定水印存在;否则水印不存在.

水印算法的实现可分为两类:空域的方法^[6]和变换域(DCT, DFT 和 DWT)的方法.从综合性能分析,变换域的方法更加优越一些,目前占据了主要地位.未来的趋势也当以变换域的方法为主流. DCT(Discrete Cosine Transform)域的方法^[3,7]计算量较小,且与国际数据压缩标准(JPEG, MPEG, H261/263)兼容,便于在压缩域(compressed domain)中实现,目前用得最多. DFT(Discrete Fourier Transform)域的方法^[8]有利于实现水印的仿射变换(图象几何变换和传输过程中常见畸变的数学模型)不变性,且可利用相位信息嵌入水印(根据 Hayes^[9]的结论:从图象的可理解性角度,相位信息比振幅信息更重要.与利用振幅信息相比具有更多的优点),但 DFT 与国际压缩标准不兼容,因而限制了其应用. DWT(Discrete Wavelet Transform)域的方法^[10]由于 WT 良好的空间-频率分解特性和即将成为新一代静止图象压缩标准(JPEG2000)以及未来运动图象压缩标准的潜在可能性,有十分好的前景.

不可见性(invisibility)和稳健性(robustness)是对图象隐形水印最基本的要求.一般说来,稳健性是要求水印对如下攻击有较强的抵抗能力:

- 常见图象处理,如压缩编码(特别是对 JPEG)、低通滤波、图象增强、次抽样、几何变换、A/D 和 D/A 等.
- 噪声干扰和几何失真.

不可见性和稳健性是互相矛盾的因素.在一些水印算法^[11,12]中,水印被嵌入(embedding)图象某些象素的 LSB(Least Significant Bits)中,以保证不可见性.然而由于 LSB 中的数据最有可能在常见图象处理过程(如压缩编码和低通滤波等)中被丢掉,因而稳健性差.有些算法^[3]提出水印应放在感觉上重要的地方,以具有足够的稳健性.当然,感觉上重要的数据的改变对不可见性影响较大,需要小心进行.还有的则进行了折衷^[7].实质上,水

印的不可见性和稳健性除了跟所放置的位置有关外,还跟嵌入的水印强度有关.对水印嵌入要求的命题应是:在保证不可见性的前提下,在合适的位置(频域或空域)嵌入尽可能高强度的水印信号.解决这一问题的有效途径之一是充分利用视觉系统的视觉特性,实现自适应.

本文提出了一个利用块分类的 DCT 域自适应水印算法.首先,原始图象被分为 8×8 块.利用视觉系统 HVS(Human Vision System)的照度掩蔽特性(luminance masking)和纹理掩蔽特性(texture masking),我们设计了一个空域块分类器把图象块分为三类.然后,对所有图象块进行 DCT.在 DCT 域,根据块分类的结果,不同强度的水印分量被嵌入到不同图象块的部分 DCT 低频系数中.实验结果表明,所提出的水印算法对常见图象处理和噪声干扰具有很好的稳健性.

本文第二节介绍基于视觉系统掩蔽特性的图象块分类方法.第三节描述了水印嵌入和检测过程.实验结果和结论在第四节给出.

2 基于 HVS 的自适应图象水印算法

水印编码可看为在强背景(原始图象)下迭加一个弱信号(水印).只要迭加的信号低于对比度门限(contrast sensitivity threshold),视觉系统就无法感觉到信号的存在.根据 HVS 的对比度特性,该门限值受背景照度、背景纹理复杂性和信号频率的影响.背景越亮,纹理越复杂(或有边缘存在),门限就越高^[13,14].这现象称为照度掩蔽和纹理掩蔽.视觉掩蔽特性暗示,具有不同局部性质的区域,在保证不可见性的前提下,可允许迭加的信号不同.为此,我们把图象块分为三类,以便迭加不同强度的水印分量.第1类(R_1)平均灰度较低(暗),且灰度变化比较平滑,HVS 对其中象素值的改变较为敏感,迭加的水印分量的强度应最弱;第3类(R_3)平均灰度较高,且纹理复杂(或存在边缘),HVS 对其中象素值的改变敏感性最弱,迭加的水印分量的强度应最强;余下的为第2类(R_2).

设背景照度为 I ,根据 Weber 定律^[15],在均匀背景下,人眼刚好可以识别的物体照度为 $I + \Delta I$, ΔI 满足

$$\Delta I \approx 0.02 \cdot I. \quad (1)$$

视觉领域的进一步研究表明 $\Delta I \sim I$ 的关系更接近指数关系.参考文献[16]提出了更准确的对比度敏感度函数(CSF, Contrast Sensitivity Function)

$$\Delta I = I_0 \cdot \max\{1, (I/I_0)^\alpha\}, \quad (2)$$

其中 I_0 为当 $I=0$ 时的对比度门限, α 为常数(0.6~0.7).

对图象 $f(x, y)$ 中大小为 $n \times n$ 的块 B_k ,根据上式,我们定义了如下衡量块均匀度的参数

$$d(B_k) = \frac{1}{n^2} \sum_{(x,y) \in B_k} w(m_k) \cdot \frac{|f(x,y) - m_k|}{m_k}, \quad (3)$$

其中 m_k 为 B_k 的灰度均值.上式的物理意义是:决定物体照度可见度的应该是对比度而非照度绝对差.由于 $\Delta I \sim I$ 关系的非线性,加权系数 $w(m_k)$ 作为修正因子. $w(m_k)$ 根据(2)式确定

$$w(m_k) = (1/m_k)^\alpha.$$

当 $d(B_k)$ 较小时, B_k 被认为比较均匀;反之, $d(B_k)$ 较大时, B_k 被认为包含纹理和边缘. 作者曾在基于分割的图象编码算法中利用 $d(B_k)$ 作为块均匀度的测量标准^[17], 其结果优于利用块方差作为标准的情况.

块分类器可描述如下:

如果 $m_k < T_1$ 且 $d(B_k) < T_2$, 则 $B_k \in R_1$.

如果 $m_k > T_3$ 且 $d(B_k) > T_4$, 则 $B_k \in R_3$.

若上述两种情况均不满足, $B_k \in R_2$.

其中, $T_1 \sim T_4$ 为门限, 可由实验确定.

3 水印编码与译码

水印编码过程由如下三个步骤组成: 1) 图象分块 DCT; 2) 水印产生和嵌入; 3) DCT 反变换.

原始图象被分割为互不覆盖的图象块 $f_k(x', y')$, $0 \leq x', y' < 8, k = 0, 1, \dots, K-1$. 对 $f_k(x', y')$ 进行 DCT 变换, 得到 $F_k(u', v')$.

水印 W 为具有正态分布 $N(0, 1)$ 、长度为 L 的实数随机序列, 即 $W = \{x_i, 0 \leq i \leq L\}$, $L = l \cdot K$, l 为每图象块嵌入的水印子序列长度. 理论分析和实验^[3, 18]证明, 由 Gaussian 随机序列构成的水印具有最好的稳健性(需要注意的是, 当水印长度较长时, 必须注意 Gaussian 序列个别样值幅度有可能过大, 必须给以限制).

水印分量采用如下办法嵌入图象块的 DCT 系数中.

$$F'_k(u', v') = \begin{cases} F_k(u', v') + \beta \cdot x_i, & l \cdot k \leq i < l(k+1), \quad (u', v') \in S_k, \\ F_k(u', v'), & \text{otherwise.} \end{cases}$$

其中 S_k 具有 l 个元素, 选自 $F_k(u', v')$ 的低频分量. β 为拉伸因子, 根据块的类别而改变. β 可由实验确定. 对应 $R_1 \sim R_3$, 本文取 β 分别为 2, 6, 9. 分析和实验表明, 其值对不同图象具有较好的适应性.

我们仅利用 l 个 DCT 低频系数来嵌入水印. 这是因为:

- 低频系数集中了信号大部分能量, 对信号较为重要. 水印嵌入于此具有足够的稳健性.

- 通常低频系数具有较大的值, 水印信号嵌入后对图象影响较小, 有利保证不可见性.

- 直流系数代表了块的平均亮度, 对直流系数的改变容易导致块效应(block effects).

l 不宜取得太大, 因为改变太多的交流系数或者对不可见性不利(强度不变), 或者影响稳健性(强度降低). 本文取 $l = 3$, 即水印分量被嵌入 $F_k(0, 1)$, $F_k(1, 0)$ 和 $F_k(1, 1)$ 中.

最后, 对 DCT 域中调整后的图象块进行 DCT 反变换, 得到包含水印的图象为

$$f'(x, y) = \bigcup_{k=0}^{K-1} \text{IDCT}\{F'_k(u', v')\}.$$

水印检测基于相关检测技术. 待测试图象 $f^*(x, y)$ 与原始图象的差值为

$$e(x, y) = f^*(x, y) - f(x, y) = \bigcup_{k=0}^{K-1} e_k(x', y'), \quad 0 \leq x', y' < 8.$$

对 $e_k(x', y')$ 进行 DCT 变换, 可抽取待测试序列

$$E_k(u', v') = \text{DCT}\{e_k(x', y')\}, \quad 0 \leq u', v' < 8,$$

$$W_k^* = \{x_i^*, l \cdot k \leq i < l(k + 1)\} = E_k(u', v) |_{(u', v) \in S_k},$$

$$W^* = \{x_i^*, 0 \leq i < L\} = \bigcup_{k=0}^{K-1} W_k^*.$$

如果 $f^*(x, y)$ 中含有水印, 则 W^* 应与 W 足够相似. W^* 与 W 的相似度采用下式计算,

$$\rho(W^*, W) = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} x_i^* \cdot x_i}{\sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (x_i^*)^2}}$$

若 $\rho(W^*, W) > T_5$, 可以判定被测图象中有水印 W 存在; 否则, 没有水印 W . T_5 的选择要同时考虑虚警概率和漏警概率. T_5 减小, 漏警概率降低而虚警概率提高; T_5 增大, 则虚警概率降低而漏警概率提高. 根据^[3], 若 W^* 与 W 不相关, $\rho(W^*, W) > T_5$ 的概率等于具有 Gaussian 分布的随机变量超过其均值 T_5 倍方差的概率. 所以, T_5 被设定为 5.

4 实验结果和结论

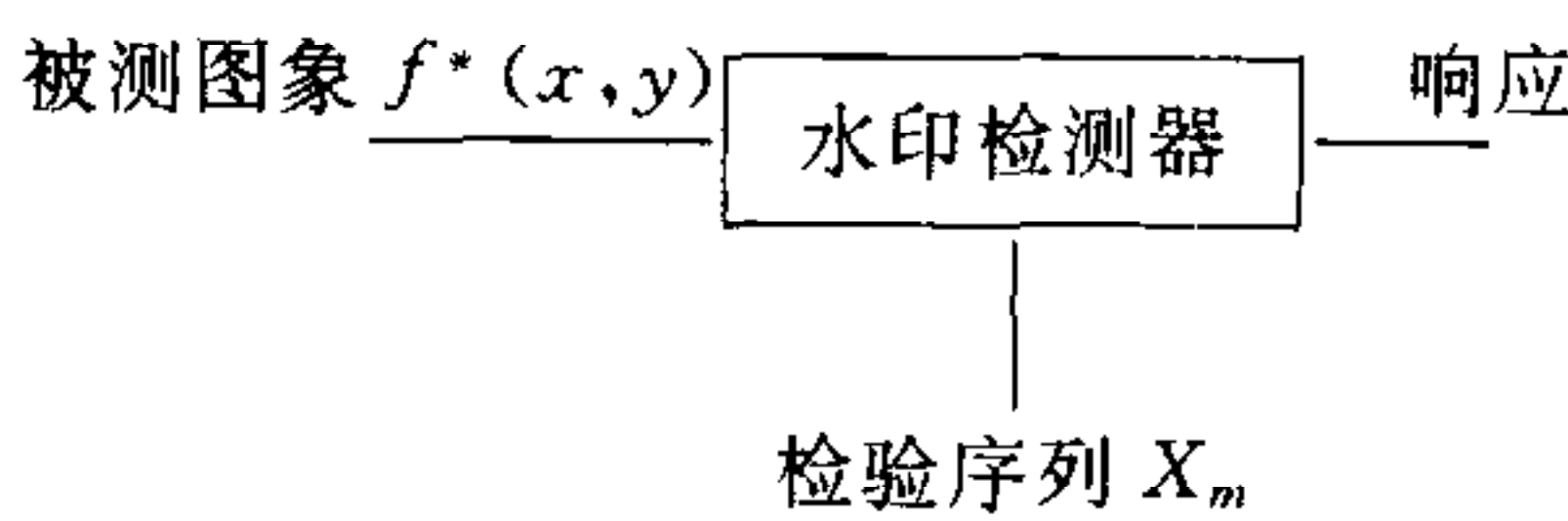


图1 实验方案

为了测试本文算法的性能, 我们产生了 10000 个具有正态分布 $N(0, 1)$ 的随机实数序列 X_m 用来检验水印检测器对被测图象的响应, 其中 X_{5000} 为嵌入图象的水印. 测试过程如图 1 所示, 对每个被测图象, X_m 从 X_1 顺序改变直到 X_{10000} . 实验结

果如图 2~4 所示, 所有图象均为 256×256 .

图 2 证实了应用所提出算法实现的水印的不可见性. (a) 为原始的“Lena”图象, (b) 为嵌入水印后的图象. 从视觉效果的角度, 即使与原始图象放在一起进行比较, 也很难感觉到水印的存在. 图 3 证实了水印抗压缩编码的稳健性. 我们看到, 含有水印的图象即使由于压缩编码产生了很大失真 ($PSNR = 27$ dB), 水印仍可被可靠地检测出来. 这表明, 对于通常所允许的失真范围的压缩编码, 水印能可靠地存在. 图 4 则证实了水印抗噪声干扰的稳健性. (a) 和 (b) 分别为含有水印的图象受加性正态噪声干扰后的结果和检测器的响应. 尽管图象质量已经很差 ($PSNR = 19.6$ dB), 检测器的响应仍足够强. 我们也测试了所实现水印抗低通滤波和次抽样的稳健性. 对含有水印的图象分别进行 5×5 均值滤波、水平和垂



(a) 原始的“Lena”图象.

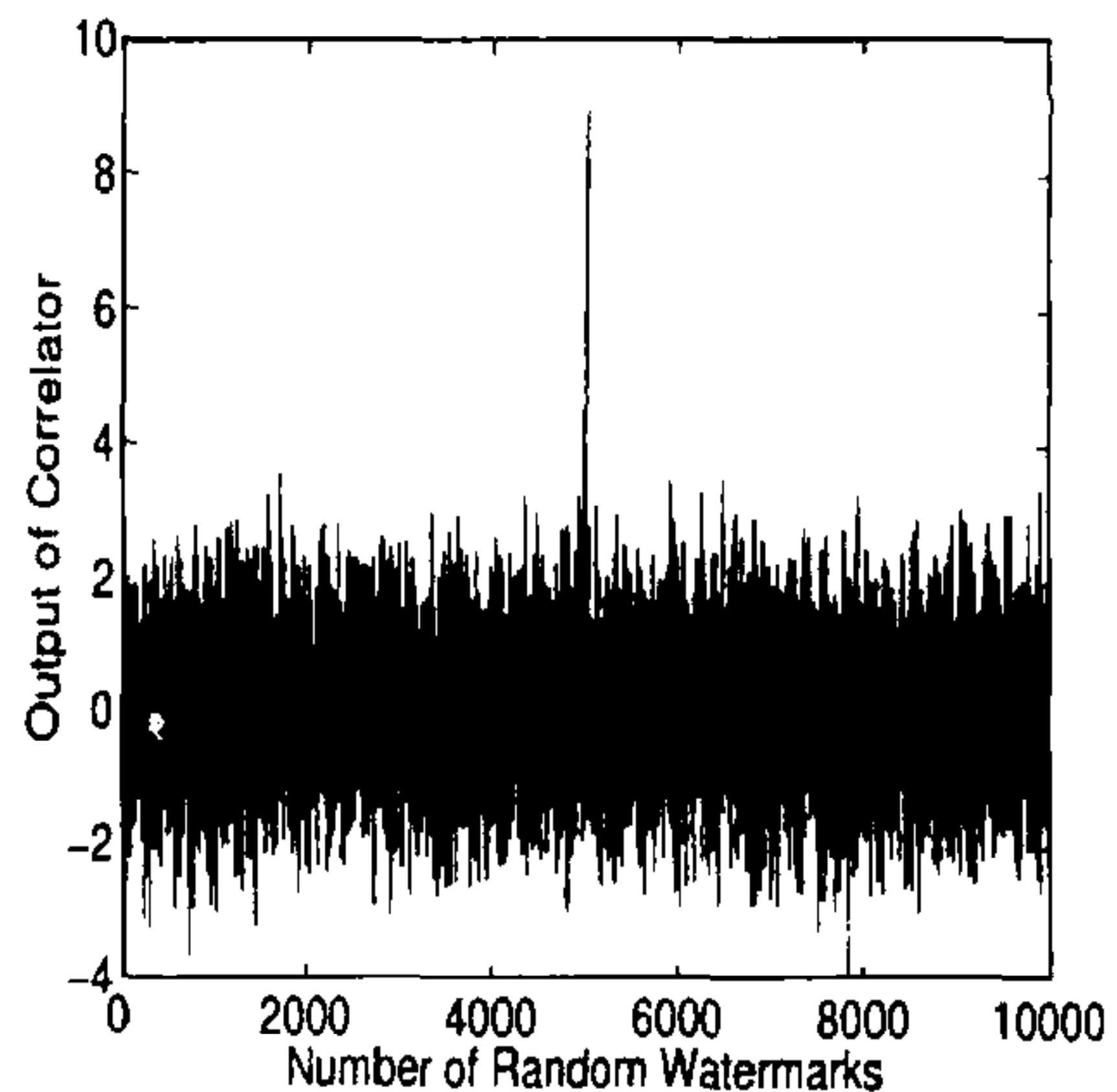
(b) 嵌入水印的图象.

图2 水印的不可见性效果

直方向2:1抽样,检测器的响应为9和24,均高于判决门限,证实了水印的稳健性.



(a)图2(b)经 JPEG 压缩后的重建图象.

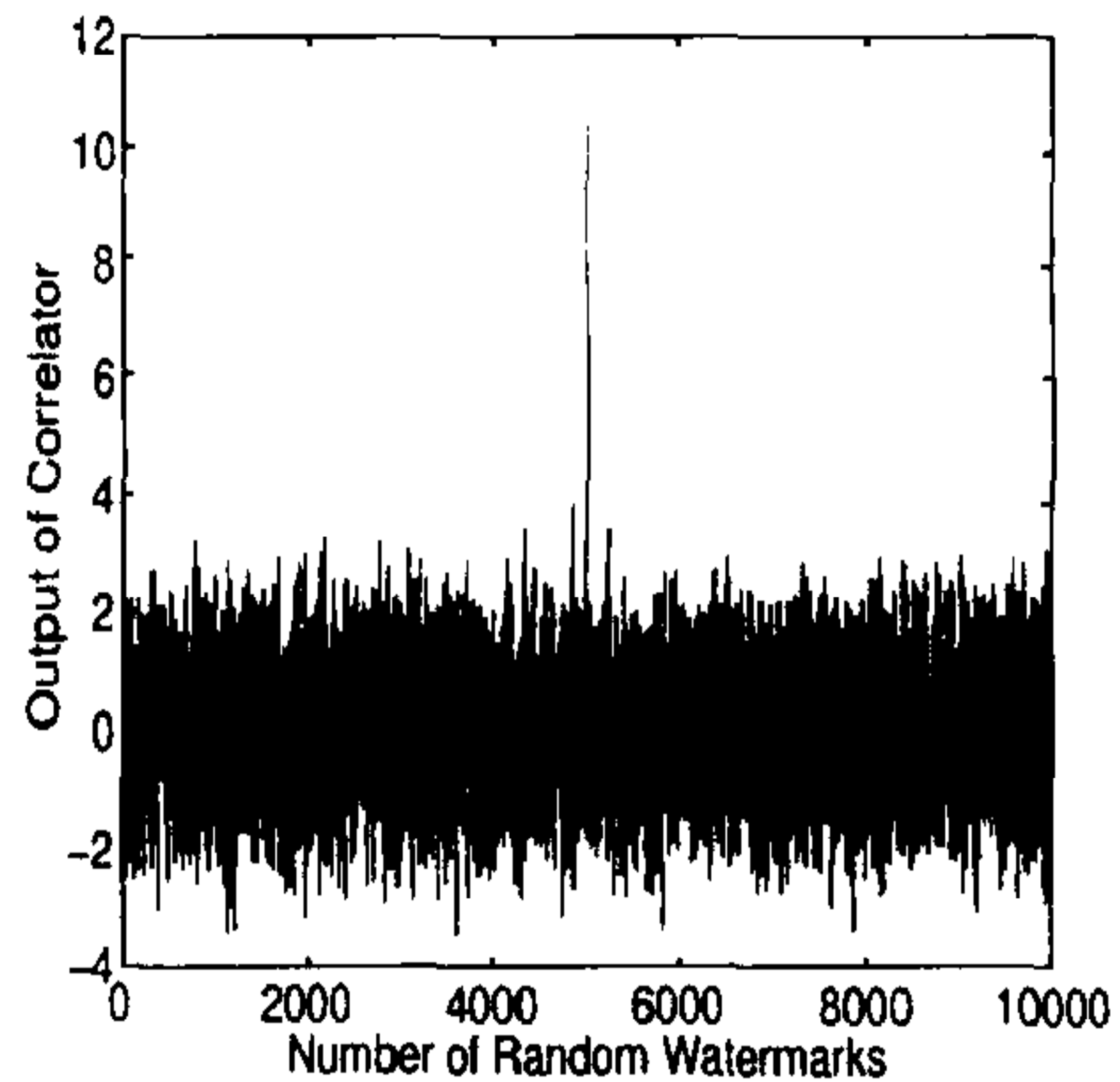


(b)检测器对(a)的响应.

图3 水印抗压缩编码的稳健性



(a)图2(b)受正态噪声干扰的结果.



(b)检测器对(a)的响应.

图4 水印抗噪声的稳健性

对图象增强、 A/D 和 D/A 的情况,尽管我们未进行测试,但由于水印嵌入图象信号能量比较集中的低频分量,可以预计,水印在这几种情况下将会有较好的稳健性.然而,因算法在 DCT 域实现,尚未能解决旋转不变性问题.

本文将视觉掩蔽特性应用于图象隐形水印编码中,提出了一个基于块分类的自适应图象水印算法,所实现的水印具有如下优点:

- 抗常见图象处理和噪声干扰的稳健性非常好.
- 在 DCT 域中实现,与国际压缩标准兼容,可应用于压缩域中.
- 计算简单,易于实现.

本文的主要贡献在于:

• 将 HVS 特性应用到水印算法中.目前的水印算法应用 HVS 特性的还较少.由于不可见性与 HVS 特性紧密相关,基于 HVS 特征的水印算法将是图象水印技术未来重要的研究方向之一.

由于采用自适应,所实现的水印在稳健性能上比目前较典型的方法有明显的提高.

参 考 文 献

- 1 Macq M, Quisquater J-J. Cryptology for digital TV broadcasting. *Proceedings of the IEEE*, 1995, **83**(6):944—957
- 2 Zhao J, Koch E. In business today and tomorrow. *Communications of the ACM*, 1998, **41**(7):67—72
- 3 Cox I J, Killian J, Leighton F T, Shamoon T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1997, **6**(12):1673—1687
- 4 Yeung M M. Digital watermarking. Editorial for *Communications of the ACM*, 1998, **41**(7):31—33
- 5 Swanson M D, Kobayashi M, Tewfik A H. Multimedia data embedding and watermarking technologies. *Proceedings of the IEEE*, 1998, **86**(6):1064—1087
- 6 Nikolaidis N, Pitas I. Robust image watermarking in the spatial domain. *Signal Processing*, 1998, **66**(3):385—403
- 7 Barni M, Bartolini F, Cappellini V, Piva A. A DCT-domain system for robust image watermarking. *Signal Processing*, 1998, **66**(3):357—372
- 8 Ruanaidh J K O, Pun T. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarks. *Signal Processing*, 1998, **66**(3):303—317
- 9 Hayes M H. The reconstruction of a multidimensional sequence from the phase or magnitude of the FFT. *IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing*, 1992, **40**(4):140—154
- 10 Xia X, Boncelet C G, Arce G R. Wavelet transform based watermark for digital images. *Optics Express*, 1998, **3**(12):497—511
- 11 Van Schyndel R G, Tirkel A Z, Osborne C F. A digital watermark. In: Proc. of 1994 IEEE Int. Conf. On Image Processing, Piscataway, New Jersey: IEEE Press, **2**:86—89
- 12 Fleet D J. Embedding invisible information in color images. In: Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. On Image Processing, Piscataway, New Jersey: IEEE Press, **1**:532—535
- 13 Watson A B. DCT quantization matrices visually optimized for individual images. In: Proc. of SPIE: Human Vision, Visual Processing and Digital Display IV, Washington: SPIE, 1993, **1913**:202—216
- 14 Jayant N, Johnston J, Safranek R. Signal compression based on model of human perception. *Proceedings of the IEEE*, 1993, **81**(10):1385—1421
- 15 Ganzalez R C, Wintz P. Digital image processing. 2nd Edition, New York: Addison-Wesley Publishing Co., 1987
- 16 Watson A B. Efficiency of a model human image code. *J. Opt. Soc. Am*, 1987, **4**(12):2401—2415
- 17 Huang Jiwu, Shi Y Q. An adaptive image watermarking scheme based on visual masking. *IEE Electronic Letters*, 1998, **34**(8):748—750
- 18 Huang Jiwu, Shi Yun Q. Segmentation-based hybrid coding using luminance masking. *IEE Electronics Letters*, 1998, **34**(8):750—751

黄继武 工学博士, 汕头大学电子工程系教授. 主要研究方向为图象处理、图象压缩编码、图象水印技术. 发表论文30多篇.

SHI Yun Q. 博士, 美国新泽西理工学院电气与计算机工程系副教授. 主要研究方向为数字水印、图象处理、视频编码、多维系统和信号处理、图象序列分析和模式识别等. 出版著作2部, 发表论文数十篇.