

基于相息图和小波变换的数字水印

祁永坤¹ 彭翔¹ 关颖健¹ 高志² 孟祥锋¹ 秦琬¹

¹ 深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518060

² Clemson 大学生物医学工程系, 501-5 Rhodes Research Center, Clemson, SC 29634, USA

摘要 提出一种基于相息图和小波变换的数字水印方案。利用迭代相位恢复算法将水印图像编码为相息图,然后将经权重因子调制后的相息图嵌入到宿主图像的三层小波低频系数中,完成整个水印嵌入过程。在水印提取阶段,对宿主图像和含水印图像进行三层小波分解,将得到的低频系数对应相减提取出水印相息图,然后对此相息图进行傅里叶变换操作,取其振幅即可提取原始嵌入的水印图像。针对不同权重因子的水印系统,详细分析和讨论了所提出水印方案的隐蔽性和稳健性。计算机仿真结果验证了该数字水印方案的可行性。

关键词 信息隐藏;数字水印;相息图;相位恢复;小波变换

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0308

Digital Watermarking Based on Kinoform and Wavelet Transform

Qi Yongkun¹ Peng Xiang¹ Guan Yingjian¹ Bruce Z. Gao² Meng Xiangfeng¹ Qin Wan¹

¹ College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

² Department Biomedical Engineering, Clemson University, 501-5 Rhodes Research Center, Clemson, SC 29634 USA

Abstract A novel digital watermarking scheme based on the kinoform and discrete wavelet transform (DWT) is proposed. The watermark image to be hidden is first encoded into a kinoform by utilizing the iterative phase retrieval algorithm in a virtual lens system. The weighted kinoform is embedded into the low-frequency DWT coefficients (LL3) of the host image to accomplish the watermark embedding process. In the process of watermark extraction, the embedded kinoform can be extracted by subtracting the corresponding DWT coefficients of the host image, from that of the watermarked image. Then, the original hidden image can be retrieved by taking the real amplitude of Fourier transform (FT) information for the extracted kinoform. The robustness and imperceptibility of watermarked image with the different weighting factors are demonstrated and analyzed in detail. The feasibility of proposed approach have been verified by computer simulations.

Key words information hiding; digital watermarking; kinoform; phase retrieval; wavelet transform

1 引 言

数字水印通过在原始数据中嵌入秘密信息来证实多媒体数据的所有权。近年来,光学信息处理凭借其高并行性、高处理速度与多维度等固有优势,与数字水印技术结合形成了光学信息隐藏的研究方向^[1~3]。N. Takai 等首先提出全息数字水印技术^[4],由于全息图像本身的不可撕毁性,使得此技术具有很好的抗剪切能力。然而,由于该方法采用空域直接嵌入而不能抵抗压缩和低通滤波操作。为

此,H. T. Chang 等提出了改进算法^[5],使水印系统具有更好的隐蔽性和稳健性。此外,在基于全息的水印方案中^[4~6],解密图像一般都会伴有共轭像的干扰,降低了水印的嵌入容量和提取质量。相息图^[7,8]作为一种特殊的波前编码方法,能很好地解决共轭像的问题。相息图可由傅里叶变换(FT)产生,使得频域上的每一点都包含所有物点的信息,即使丢失部分相息图,仍可完整再现物体的全部信息。与复函数的隐藏图像相比,相息图能够减小需要隐

基金项目: 深圳市科技计划非共识技术创新项目和中国科学院微系统与信息技术研究所资助课题。

作者简介: 祁永坤(1984—),男,硕士研究生,从事信息安全、光学信息处理等方面的研究。

E-mail: kunqy@yahoo. cn

导师简介: 彭翔(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事三维数字成像与造型、光学信息安全等方面的研究。

E-mail: xpeng@szu. edu. cn (通信联系人)

藏的信息量。相息图包含的空间频率成分都用于单个像,因而不存在带宽浪费现象,也不必考虑分离共轭像的问题,因此在信息隐藏领域将具有很大的潜力^[8,9]。作为新一代压缩标准联合图像专家组(JPEG)2000的核心算法,小波变换成为研究的热点,在小波域中构造水印算法也已经被证明具有天然的抵抗压缩攻击能力^[10,11]。

本文提出一种基于相息图编码和小波变换结合的 数字水印方案,介绍水印嵌入和提取的工作原理,然后通过计算机模拟分析该方案对各种攻击的稳健性。

2 理论模型和计算方法

2.1 基于迭代相位恢复算法的相息图计算

文献[7]中定义了相息图的概念,并证明当一个物体为漫射体,其傅里叶系数的相位携带了物的绝大部分信息,因而振幅信息可忽略;且当制作相息图过程中若能使相位得到较好匹配,则能够从相息图中精确恢复原始物体。针对二维水印图像,可利用具有随机分布的初始相位来模拟漫射体,并应用迭代相位恢复算法计算得到纯相位分布的相息图,原理如图 1 所示^[12]。

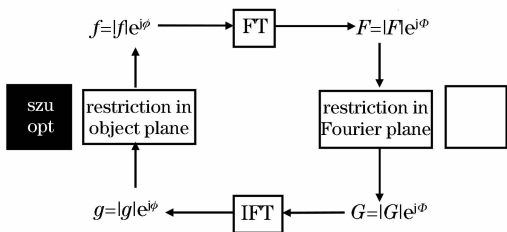


图 1 基于迭代相位恢复算法的计算相息图的流程图

Fig.1 Schematic diagram of computing kinoform by iterative phase retrieval algorithm

该算法在空域和频域同时植入两个约束,并在此约束下对水印图像 $|f|$ (f 本身是实函数)作多次循环傅里叶变换后得到该图像的纯相位分布 $e^{j\Phi(u,v)}$,若对其进行逆傅里叶(IFT)变换后取模,即可得到原始编码的水印图像。算法基本步骤如下:以随机初始相位分布和已知的振幅分布(水印图像)作为初始物面波前函数 $f_0(x,y)$ 。对于第 k 阶迭代,首先将物面波前函数进行傅里叶变换,获得频谱平面上的波前函数

$$F_k(u,v) = |F_k(u,v)| \exp[j\Phi_k(u,v)] = \text{FT}\{f_k(x,y)\}, \quad (1)$$

其次,引入频谱平面上的限制条件,即保持相位不变,但振幅全部置换为 1

$$G_k(u,v) = |G(u,v)| \exp[j\Phi_k(u,v)], \quad (2)$$

式中 $|G(u,v)| = 1$ 。

然后,将新的频谱平面上的波函数作逆傅里叶变换,获得物面上的波前函数

$$g_k(x,y) = |g_k(x,y)| \exp[j\phi_k(x,y)] = \text{FT}^{-1}\{G_k(u,v)\}, \quad (3)$$

再次引入物面上的限制条件,即保持相位不变,振幅置为水印图像,作为下一次迭代的物波函数

$$f_{k+1}(x,y) = |f(x,y)| \exp[j\Phi_{k+1}(x,y)] = |f(x,y)| \exp[j\Phi_k(x,y)], \quad (4)$$

而后返回(1)式进行下一次循环,这样反复进行迭代直至算法收敛到设定值或达到设定的迭代次数。 $g_k(x,y)$, $F_k(u,v)$ 分别是 $f(x,y)$, $G(u,v)$ 的逼近值,最后提取得到纯相位分布函数 $e^{j\Phi(u,v)}$ 。为描述 $|g|$ 逼近 $|f|$ 的程度,引入相关系数 $C^{[13]}$ 作为相位恢复算法的收敛性判断因子。(2)式中 $\Phi(u,v)$ 分布区间为 $[0 \sim 2\pi]$,对其进行量化生成相息图。量化阶数过低将会产生相位失配而使得恢复的图像与原始图像存在较大误差,当采用 64 阶量化时能够满足系统要求。此时,所得到相息图灰度分布区间为 1~64,将量化的水印相息图记为 I_{mark}

$$I_{\text{mark}} = \langle \Phi \rangle, \quad (5)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示量化操作符号。

2.2 水印信息的嵌入

综合考虑水印的稳健性和嵌入容量的平衡,将宿主图像进行三层小波分解变换并且提取第三层小波系数中的低频部分作为水印嵌入嵌入空间。采用 Mallat 算法对宿主图像进行小波分解^[14],图 2 给出了一个静态图像的小波变换的金字塔式多分辨率分解示意图,L 和 H 分别表示低通和高通滤波器,小波变换结果是原始信号在一系列倍频层划分的频带

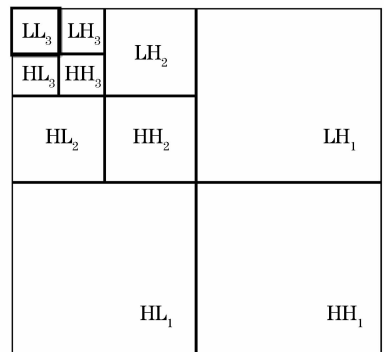


图 2 静态图像的三层小波分解

Fig.2 Three-level wavelet decomposition of still digital image

上的多个高频子带(LH,HL,HH)和一个低频子带(LL)。其中,LL表示经过两次低通滤波(先后作用于行和列)后包含原始图像的最低分辨率信息的低频系数,LH,HL和HH分别表示经过低通和高通滤波不同顺序组合(分别作用于行和列)得到的表示在不同方向上原始图像的高频信息。

首先选择集中了宿主图像大部分能量的小波低频系数作为嵌入区域^[15]。此外,为保证水印的隐蔽性应选择适当的权重因子。水印信息的嵌入流程如图3(a)所示。首先采用Mallat算法对宿主图像 I_{host} 进行二维小波分解变换

$$\omega_d(I_{\text{host}}) = X_3^{\text{LL}} + \sum_{i=1,2,3} X_i^{\{\text{LH,HL,HH}\}}, \quad (6)$$

式中 I_{host} 表示宿主图像, ω_d 为二维小波分解变换,

X_3^{LL} 表示三层小波逼近系数, $\sum_{i=1,2,3} X_i^{\{\text{LH,HL,HH}\}}$ 表示1,2,3级小波系数在(LH,HL,HH)三个方向上的求和。

其次,将水印相息图 I_{mark} 加权后嵌入到三层小波系数中去,嵌入过程可以表示为

$$Y_3^{\text{LL}} = \omega I_{\text{mark}} + X_3^{\text{LL}}. \quad (7)$$

最后对嵌入隐藏信息后的小波系数进行二维小波重构变换,得到含水印图像 I_{marked}

$$I_{\text{marked}} = \omega_i(Y_3^{\text{LL}} + \sum_{i=1,2,3} X_i^{\{\text{LH,HL,HH}\}}), \quad (8)$$

式中 ω_i 为二维小波重构变换。含水印图像 I_{marked} 可以通过网络或者其他方式传输给授权方,授权方按照一定的解密方法和步骤,可以提取出嵌入的隐藏信息。

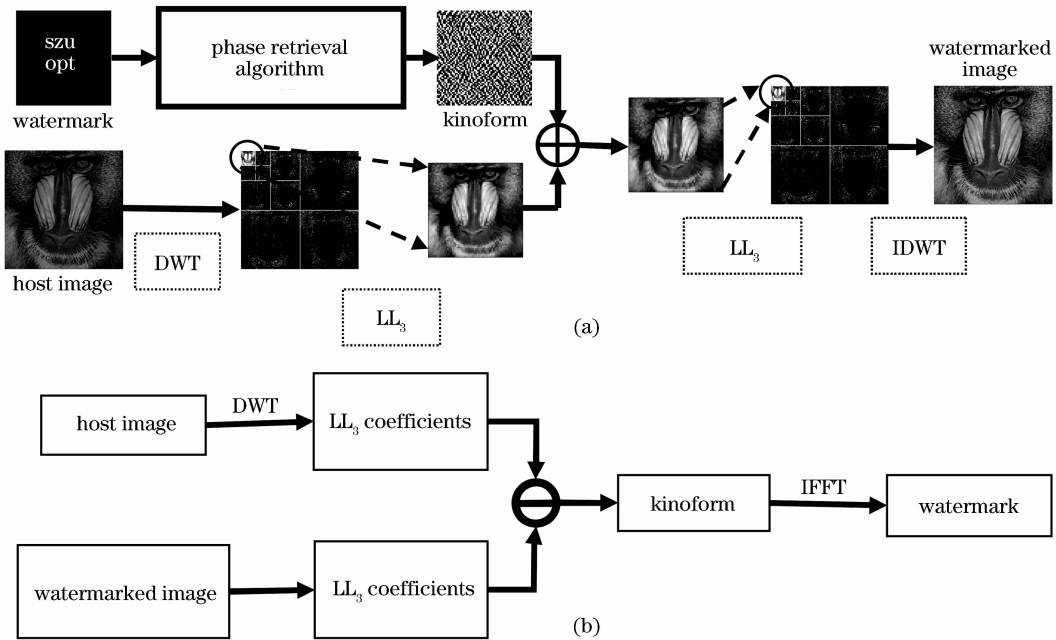


图3 水印信息嵌入(a)和提取(b)过程流程图

Fig. 3 Schematic diagram of watermarking embedding (a) and extraction (b) process

2.3 水印信息的提取与检测

水印信息的提取过程流程如图3(b)所示。首先对含水印图像进行三层小波分解

$$\omega_d(I_{\text{marked}}) = Y_3^{\text{LL}} + \sum_{i=1,2,3} Y_i^{\{\text{LH,HL,HH}\}}, \quad (9)$$

式中 Y_3^{LL} 为含水印图像的三层小波逼近系数。类似地,对原始宿主图像作三层小波分解,得到宿主图像的三层小波逼近系数 X_3^{LL} 。然后,将两个三层小波系数相减得到嵌入的水印相息图 Φ

$$\Phi = I_{\text{mark}} = (Y_3^{\text{LL}} - X_3^{\text{LL}})/\omega, \quad (10)$$

对相息图作逆傅里叶变换,取其振幅并二值化后,即可得到原始的二值水印图像 f

$$f = |F^{-1}[\exp(j\Phi)]|, \quad (11)$$

式中 $| \cdot |$ 表示取模操作符号。

3 数字模拟

3.1 系统参数与隐藏性能

为了验证上述水印方案的可行性及其性能,进行了计算机模拟实验。实验选择‘Haar’小波对宿主图像进行三层小波分解,采用灰度图像 baboon ($512 \times 512 \times 8$)作为宿主图像,如图4(a)所示;任意 logo 图像(64×64 ,二值)作为原始水印图像,如图4(b)所示。

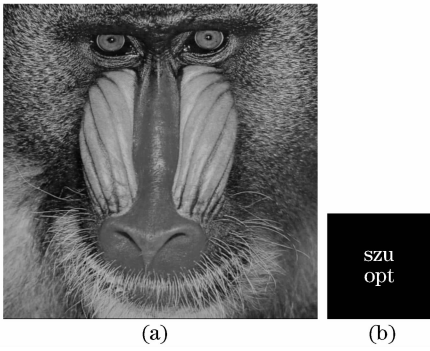


图 4 (a) 原始宿主图像; (b) 原始水印图像

Fig. 4 (a) Original host image;

(b) original watermark image

采用了峰值信噪比(PSNR)来评价含水印图像相对于宿主图像的品质下降程度,为

$$R_{\text{PSNR}} = 20 \lg \left[255 \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N [I(x,y) - I'(x,y)]^2} \right], \quad (12)$$

式中 M, N 分别为图像的行数和列数。

针对不同的权重因子,可以评价含水印图像的品质下降程度。水印系统的权重因子 ω 与含水印图像的峰值信噪比 R_{PSNR} 之间的关系曲线如图 5(a), 对应的权重因子 ω 与提取解密后的水印图像的相关系数 C 之间的关系曲线如图 5(b) 所示。可见, 在保证宿主图像良好品质的前提下, 水印系统的权

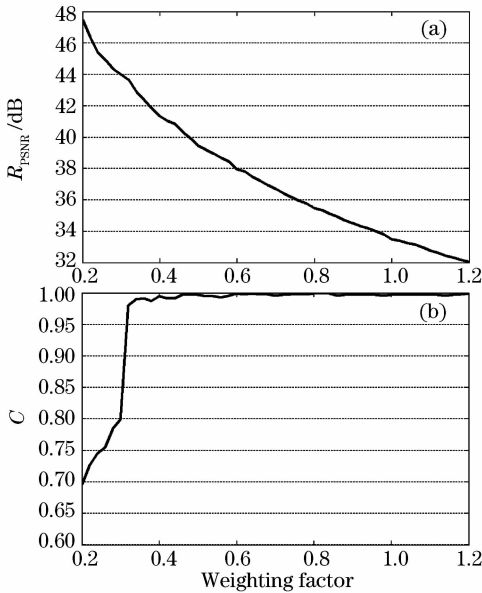


图 5 含水印图像的峰值信噪比 R_{PSNR} (a) 与提取水印

图像的相关系数 C (b) 与权重因子 ω 的关系曲线

Fig. 5 R_{PSNR} (a) of the watermarked images and C (b)

of the extracted watermark versus weighting factor ω

重因子 ω 有很大的选择区间, 并且都能较好地提取出嵌入的水印信息。针对不同攻击情况, 需从水印系统的隐蔽性和稳健性两个方面综合考虑, 选取一个折中的权重因子。

以水印系统的权重因子 ω 为 0.8 为例, 图 6(a) 表示嵌入隐藏信息后的含水印图像, 其峰值信噪比为 36.50 dB, 提取后的水印图像如图 6(b), 其相关系数 C (指提取的水印图像与原始嵌入的水印图像之间的相关系数) 达到了 1.0。从图 5, 图 6 可见, 上述水印系统具有良好的隐蔽性及可行性。

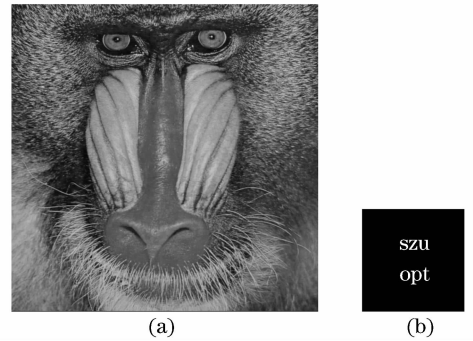


图 6 当权重因子 ω 为 0.8 时含水印图像(a)和提取出的水印图像(b)

Fig. 6 Watermarked image (a) and extracted watermark (b) with weighting factor of 0.8

3.2 系统的稳健性

仍以权重因子 $\omega=0.80$ 的水印系统为例, 分析和讨论该水印方案的稳健性。首先讨论该水印系统抗 JPEG 压缩攻击的能力。图 7 显示, 含水印图像的峰值信噪比与提取后水印图像的相关系数 C 都随着 JPEG 压缩因子的增大而增大, 且当压缩因子大于 50 时, 提取水印图像的相关系数 C 逐渐逼近于 1.0; 当压缩因子降至 20 时, 含水印图像的峰值信噪比低至 23.50, 提取水印图像的相关系数 C 亦高达 0.84。

其次, 验证该水印系统抗裁减攻击的能力。含水印图像的峰值信噪比、提取水印图像的相关系数 C 与剪切比例之间的关系曲线分别如图 8(a), (b) 所示。随着剪切比例的增大, 含水印图像的峰值信噪比与相关系数 C 均变小。当含水印图像被剪切 50% 时, 提取和恢复后的水印图像相关系数 C 高达 0.84; 当剪切量增大至 75% 时, 相关系数 C 亦达 0.74。

本文还验证了该水印系统抗加性椒盐噪声攻击的能力。为了充分利用相息图不可撕毁特性, 在水印系统中植入阈值判断函数, 在提取水印前对含水

印图像进行阈值判断并剔除坏点,以提高系统稳健性。在强度0~1.0的椒盐噪声攻击下含水印图像的峰值信噪比、提取后水印的相关系数 C 与椒盐噪声强度之间的关系曲线,分别如图 9(a),(b)所示。随

着噪声增大,含水印图像和提取后水印图像的质量均随之下降。受强度为0.80的椒盐噪声攻击后含水印图像几乎为噪声图像,峰值信噪比为5.00,提取和恢复出的水印图像的相关系数仍高达0.98。

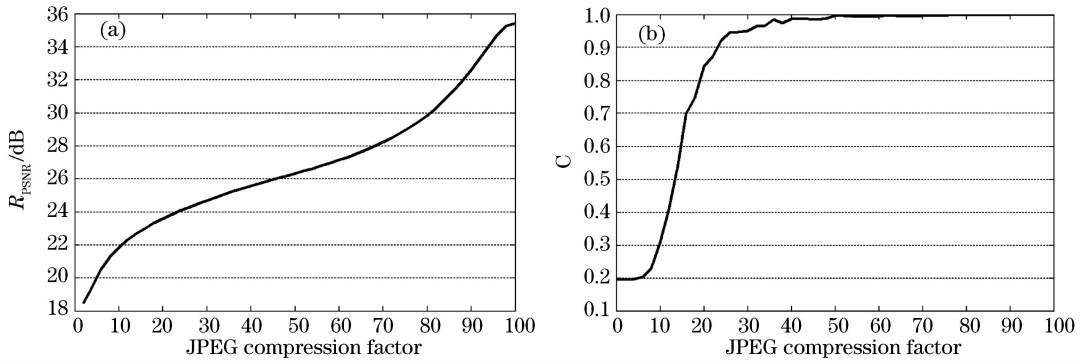


图 7 含水印图像的峰值信噪比 R_{PSNR} (a)与提取水印图像的相关系数 C (b)与 JPEG 压缩因子的关系曲线

Fig. 7 R_{PSNR} (a) of the watermarked images and C (b) of the extracted watermark versus JPEG compression factor

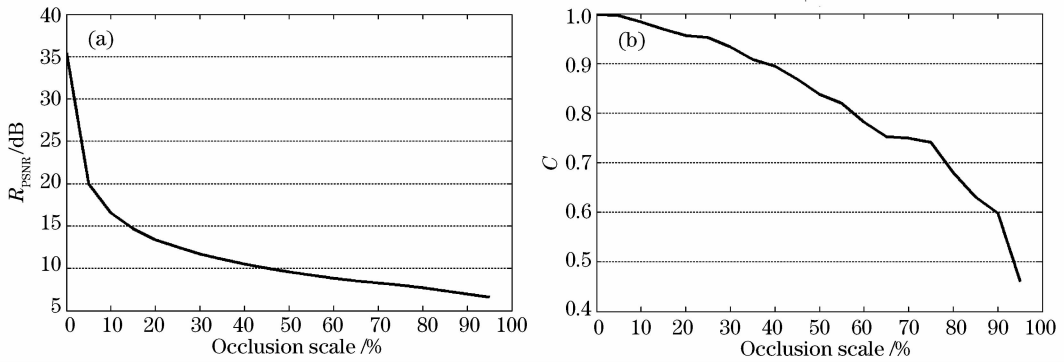


图 8 含水印图像的峰值信噪比 R_{PSNR} (a)与提取水印图像的相关系数 C (b)与剪切比例之间的关系曲线

Fig. 8 R_{PSNR} (a) of the watermarked images and C (b) of the extracted watermark versus occlusion scale

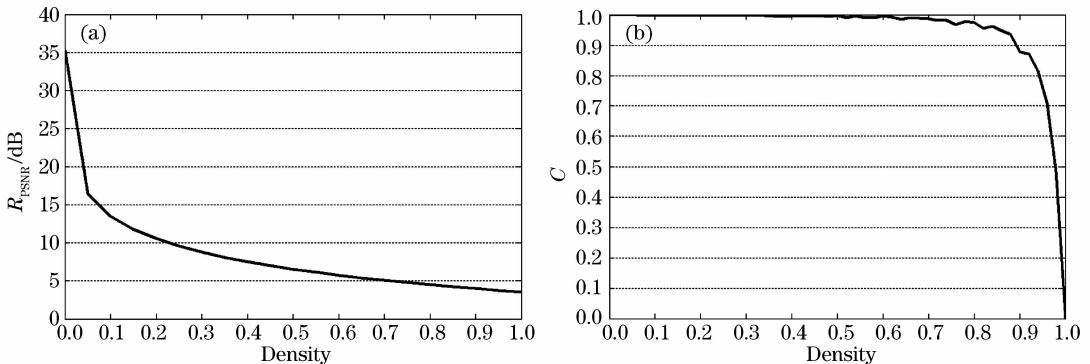


图 9 含水印图像的峰值信噪比 R_{PSNR} (a)与提取后水印图像的相关系数 C (b)与加性椒盐噪声强度之间的关系曲线

Fig. 9 R_{PSNR} (a) of the watermarked images and C (b) of the extracted watermark versus the density of additive salt and pepper noise

最后,分析了该水印系统抗缩放攻击的能力。表 1 给出了实验仿真结果,实验采用 Photoshop 软件双线性插值方法进行缩放操作。含水印图像缩小到原来了 1/2 时,提取水印的相关系数 C 为 0.95,

而含水印图像被放大至 2,4,6,8,甚至 16 倍时,提取后水印图像的质量几乎未受任何影响,相关系数均为 0.99,表明该水印系统具有很强的抗缩放攻击的能力。

表 1 含水印图像的 C 与缩放倍数之间的关系Table 1 C of the extracted watermarks versus scaled watermarked images

Scale of watermarked image	0.5	2	4	8	16
C	0.95	0.99	0.99	0.99	0.99

4 结 论

提出了一种基于相息技术与小波变换结合的数字水印方案,并给出该水印方案的实现过程。计算机仿真实验表明,所构造的水印方案具有良好的隐蔽性和稳健性,特别是具有很强的抵抗剪切、JPEG有损压缩、加性椒盐噪声、缩放等攻击的能力。

参 考 文 献

- Peng Xiang, Zhang Peng, Niu Hanben. Information hiding theory based on virtual optics and its implementation with parallel hardware [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5):623~627
彭翔,张鹏,牛憨笨. 虚拟光学信息隐藏理论及并行硬件实现[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5):623~627
- S. Kishk, B. Javidi. Watermarking of three-dimensional object by digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3):167~169
- Peng Xiang, Zhang Peng, Niu Hanben. 3D spatial digital watermarking system based on virtual optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11):1507~1510
彭翔,张鹏,牛憨笨. 基于虚拟光学的三维空间数字水印系统[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11):1507~1510
- N. Takai, Y. Mifune. Digital watermarking by a holographic technique [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(5):865~873
- H. T. Chang, C. L. Tsan. Image watermarking by use of digital holography embedded in the discrete-cosine-transform domain [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(29):6211~6219
- Yuchi Liang, Gu Jihua, Liu Wei *et al.*. An image digital watermark technique based on digital holography and discrete cosine transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):355~361
尉迟亮,顾济华,刘薇等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):355~361
- L. B. Lesem, P. M. Hirsch, J. A. Jorden *et al.*. The kinoform; a new wavefront reconstruction device [J]. *IBM J. Res. Dev.*, 1969, **13**(1):150~155
- Yu Zuliang, Jin Guofan. Computer-Generated Holography[M]. Beijing: Tsinghua Press, 1984. 59~68
虞祖良,金国藩. 计算机制全息图[M]. 北京:清华大学出版社, 1984. 59~68
- Yang Xiaoping, Zhai Hongchen, Wang Mingwei. Gray-image information hiding based on kinoform [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2):847~852
杨晓萍,翟宏琛,王明伟. 一种应用相息图对灰度图像信息进行隐藏的方法[J]. *物理学报*, 2008, **57**(2):847~852
- M. Corvi, G. Nicchiotti. Wavelet-based image watermarking for copyright protection [C]. in The 10th Scandinavian Conference on Image Analysis, 1997. 157~163
- D. Kundur, D. Hatzinakos. A robust digital image watermarking method using wavelet-based fusion [C]. in International Conference on Image Processing, 1997. 544~577
- R. Gerchberg, W. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, **35**(2):237~246
- Meng Xiangfeng, Cai Luzhong, Yang Xiulun *et al.*. Information security system by iterative multiple-phase retrieval and pixel random permutation [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **45**(14):2289~3297
- S. G. Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1989, **11**(7):674~693
- I. J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton. A secure, robust watermark for multimedia [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1997, **6**(12):1673~1687