

文章编号 1004-924X(2007)01-0131-07

加密同轴全息数字水印

孙刘杰^{1,2}, 庄松林^{1,2}

(1. 上海理工大学 出版印刷学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 光电学院, 上海 200093)

摘要: 在研究数字全息技术的基础上, 提出了一种新的加密的同轴全息数字水印方法。该方法包括加密和解密两个过程。加密过程首先将原始二值水印图像经过输入面和频谱面上分别放置随机相位模板进行调制加密, 生成加密的复数图像, 将其作为物光信息, 再与参考光信息叠加生成同轴全息图像, 然后将其作为水印嵌入到载体图像中; 解密过程是加密过程的逆过程, 水印重建不需要原始图像的参与, 属盲检测过程。在理论分析部分证明了该水印技术的有效性, 在仿真实验部分证明了该水印技术具有抗随机噪声干扰、剪切干扰、有损压缩和低通滤波等常见的干扰能力。文中还详细研究了全息数字水印的嵌入强度及对应恢复水印的效果。

关键词: 信息光学; 加密技术; 全息技术; 数字水印

中图分类号: O438.1; TP309.7 **文献标识码:** A

Digital watermarking of encrypted in-line holography

SUN Liu-jie^{1,2}, ZHUANG Song-lin^{1,2}

(1. *College of Printing and Publishing, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China;*
2. *College of Optics and Electronic Information Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: A new encrypted in-line holographic watermarking technique is proposed based on double-random phase encoding method, holography and digital watermarking. The proposed method includes two processes of encryption and decryption. In the encryption process, a digital watermark image is modulated by double-random phase encoding, and its in-line hologram is superposed on a content image. The watermark is recovered by means of holographic reconstruction and calculations in reverse order of encryption process without the information of the content image (blind detection). Analysis and computer simulation prove that the encrypted holographic watermark is valid, robust and secure. The watermark can be recovered from the watermarked images distorted by noise added, JPEG compression, part occluded and low pass filter. The conditions for superposing the hologram onto the content images are also investigated in detail

Key words: information optics; encryption; holography; digital watermark

1 引言

近年来,数字全息技术^[1,3-5,7-11]和数字水印技术^[1,2,5]的应用一直受到学者们的关注。N. Takai 和 Y. Mifune 在文献[1]中用物体的 Fourier 变换全息图像作为水印直接叠加到载体图像中,但是没有经过授权也可以读取图像中水印,安全性差,且不能抵抗低通滤波干扰。S. Kishk 和 B. Javidi 在文献[2]中提出了一种在图像中隐藏图像的方法,隐藏的图像经过双相位编码加密生成随机图像并嵌入到载体图像中,只有经过授权才能读取隐藏图像,具有高安全性,但嵌入强度高($\alpha = 50\%$)。

本文将加密技术、数字水印技术和数字全息技术结合^[1-11],形成了一种新的加密数字全息水印方法。该方法包括加密和解密两个过程,加密过程如下:将原始二值水印图像经过输入面和频谱面上分别放置随机相位模板进行调制加密,生成加密的复数图像,将其作为物光信息,与参考光叠加生成同轴全息图像,将其作为水印嵌入到载体图像中;解密过程是加密过程的逆过程。该加密水印只有通过解密模板才能恢复原始图像,安全性高,嵌入强度适中($\alpha = 5\% \sim 50\%$),具有较好的不可见性,且具有良好的抗低通滤波、剪切、叠加噪声和 JPEG 压缩等干扰能力。

2 加密数字全息及其水印技术

设待加密图像或数据为已归一化的 $f(x, y)$, 图像大小为 $M \times N$ 个像素; (x, y) 表示空域坐标, (ζ, η) 表示频域坐标; $\phi(x, y)$ 表示双随机相位的加密图像; $p(x, y)$ 和 $b(\zeta, \eta)$ 是均匀分布在 $[0, 1]$ 之间的两个独立白噪声随机图像。则双随机相位的加密图像为

$$\phi(x, y) = \{f(x, y) \exp [j2\pi p(x, y)]\} \otimes h(x, y), \quad (1)$$

其中 $h(x, y)$ 是 $B(\zeta, \eta) = \exp [j2\pi b(\zeta, \eta)]$ 的脉冲响应,符号 \otimes 代表卷积运算。理论证明^[2] $\phi(x, y)$ 是一个白噪声图像,其均值为 0, 方差为

$$\sigma_{\phi}^2 = \frac{1}{M \times N} \left[\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} |f(u, v)|^2 \right], \quad (2)$$

$\phi(x, y)$ 包含了振幅信息和相位信息,是一个复数图像,不能直接作为水印叠加在可视图像上,因此必须做特殊处理。数字全息技术能够同时记录物体相位信息和振幅信息。经数字全息技术记录 and 处理的数字全息图像可以直接作为水印叠加在可视图像上。

2.1 加密数字全息图像及其解密技术

设 $\phi(x, y)$ 为 $A(x, y) \exp [j\phi(x, y)]$, 同轴参考光的位相为 $\exp [j\phi_0]$, 则同轴全息图像为:

$$\begin{aligned} H(x, y) = & |A(x, y) \exp \{j[\phi(x, y) + \phi_0]\} + \exp (j\phi_0)|^2 = \\ & 1 + |A(x, y)|^2 + A(x, y) \exp [j\phi(x, y)] + \\ & A(x, y) \exp [-j\phi(x, y)], \end{aligned} \quad (3)$$

此全息图像含有 $A(x, y) \exp [j\phi(x, y)]$, 此项即为恢复原始图像的信息。另外的 $1 + |A(x, y)|^2 + A(x, y) \exp [-j\phi(x, y)]$ 项中的常数 1 可通过零频滤波去除, $|A(x, y)|^2$ 项可以通过计算其功率谱或零级滤波加以去除, $A(x, y) \exp [-j\phi(x, y)]$ 项增加了恢复图像的背景高斯白噪声的方差。

同轴全息图像 $H(x, y)$ 通过计算或滤波处理后,得到新的加密数字全息图像为

$$\begin{aligned} H'(x, y) = & A(x, y) \exp [j\phi(x, y)] + \\ & A(x, y) \exp [-j\phi(x, y)], \end{aligned} \quad (4)$$

加密图像的解密过程是加密过程的逆过程,即将加密图像 $H'(x, y)$ 进行傅里叶变换后乘以 $\exp [-j2\pi b(\zeta, \eta)]$, 再进行反傅里叶变换后乘以 $\exp [-j2\pi p(x, y)]$, 就可得到原始图像 $f(x, y)$, 在 $f(x, y)$ 的背景上叠加了高斯噪声信号 $f_1(x, y)$, 其表达式其中 $\hat{A}(\zeta, \eta)$ 表示 $A(x, y) \exp [-j\phi(x, y)]$ 的傅里叶变换。

$$f_1(x, y) = \text{IFT}\{\hat{A}(\zeta, \eta) \exp[-j2\pi b(\zeta, \eta)]\} \times \exp[-j2\pi p(x, y)], \quad (5)$$

2.2 加密数字全息水印技术

设 $C(x, y)$ 表示载体图像, $I(x, y)$ 表示含水印的载体图像, α 表示加权系数, 表示水印添加的强度, 则含水印的载体图像可用式(6)表示, $I(x, y)$ 是实值图像。

$$I(x, y) = \alpha H'(x, y) + C(x, y), \quad (6)$$

为了恢复原始图像信息, 首先将 $I(x, y)$ 进行傅里叶变换, 并乘以 $\exp[-j2\pi b(\zeta, \eta)]$, 再进行反傅里叶变换后乘以 $\exp[-j2\pi p(x, y)]$, 就可得到原始图像 $f(x, y)$, 在 $f(x, y)$ 的背景上叠加了高斯噪声信号 $f_2(x, y)$, 其表达式为

$$f_2(x, y) = \text{IFT}\{\alpha \hat{A}(\zeta, \eta) + \hat{C}(\zeta, \eta)\} \exp[-j2\pi b(\zeta, \eta)] \times \exp[-j2\pi p(x, y)], \quad (7)$$

其中 $\hat{C}(\zeta, \eta)$ 为载体图像 $C(x, y)$ 的傅里叶变换。对于大数 M 和 N , 高斯噪声信号 $f_2(x, y)$ 的方差可表示为^[2]

$$\sigma^2 = \frac{1}{M \times N} \left[\sum_{\zeta=0}^{M-1} \sum_{\eta=0}^{N-1} |\alpha \hat{A}(\zeta, \eta) + \hat{C}(\zeta, \eta)|^2 \right]. \quad (8)$$

3 仿真结果与分析

3.1 水印的嵌入及检测

仿真实验用原始图像如图 1(a) 所示, 图像大小为 512×512 pixel, 灰度等级为 256。水印图像



(a) 原始载体图像

(a) Original gray-level picture used as host image

USST

(b) 原始二值水印图像

(b) Original binary picture

图 1 仿真用原始载体图像和水印图像

Fig. 1 Original host image and watermark applied to simulation

是表示特征信息或版权信息的二值图像, 如图 1(b) 所示。水印嵌入强度系数 α (5% ~ 50%), 嵌入水印后的图像及对应的恢复图像如图 2 所示。加入水印前后的载体图像在视觉上无法区分, 体现了水印的不可见性。通过正确的相位模板解密, 可从嵌入水印后的图像中获得重建水印图像, 以此证明原始图像的版权。在水印重建过程中, 不需要原始图像的参与, 此重建过程是盲检测过程。图 2 中的 PSNR 采用式(9)的标准, 其中 $f(x, y)$ 和 $\tilde{f}(x, y)$ 分别表示为归一化的原始载体图像和嵌入水印后的载体图像。

PSNR(dB) =

$$10 \log_{10} \frac{MN}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - \tilde{f}(x, y)]^2}, \quad (9)$$

3.2 水印的鲁棒性测试

为了检验加密数字全息水印算法的鲁棒性, 对含水印图像进行了低通滤波、JPEG 有损压缩、剪切干扰和加性随机噪声干扰等常见的干扰处理。仿真时取水印嵌入强度系数 $\alpha = 25\%$, 仿真结果如下。

3.2.1 低通滤波

为了测试含水印的图像抗低通滤波性能, 对含水印图像进行了高斯滤波和巴特沃兹滤波, 滤波器阶数 $N = 2$, 截止频率 $D_0 = 50$ 。滤波后的图像及对应的恢复图像如图 3 所示。

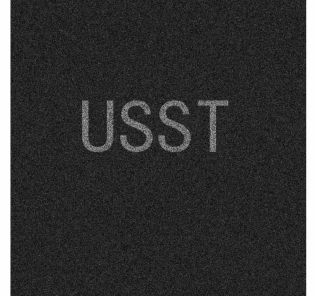
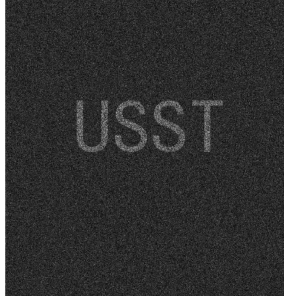
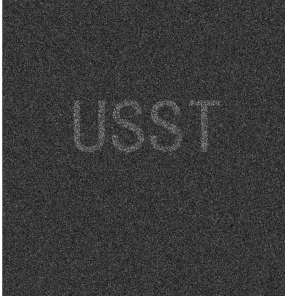
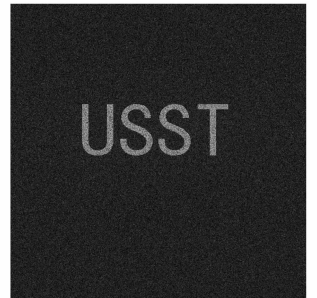
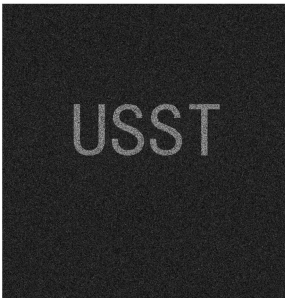
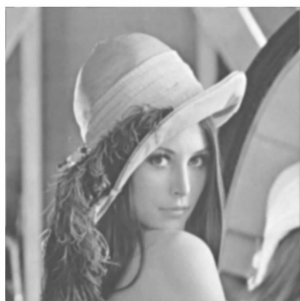
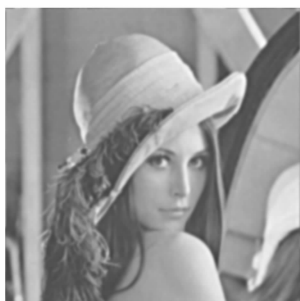
(a) $\alpha=0.05$ PSNR=45.72(b) $\alpha=0.10$ PSNR=39.70(c) $\alpha=0.20$ PSNR=33.68(d) $\alpha=0.30$ PSNR=30.16(e) $\alpha=0.40$ PSNR=27.66(f) $\alpha=0.50$ PSNR=25.72

图 2 含水印的载体图像和用正确密钥解密恢复的原始二值水印图像(α 为叠加强度,PSNR为峰值信噪比)
 Fig. 2 Superposed images(upper rows) and the images reconstructed from them(lower rows)using the correct key

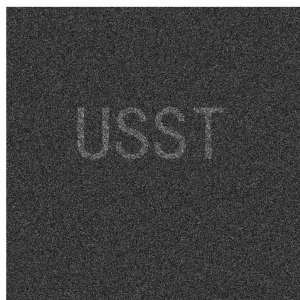


(a)高斯低通滤波
(a)Gaussian low pass filter

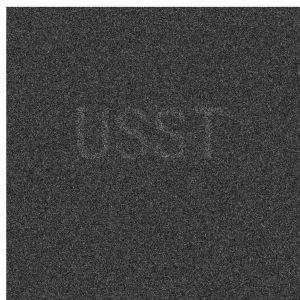


(b) 巴特沃兹低通滤波
(b)Butterworth low pass filter

图 3 经低通滤波后的载体图像及对应的恢复图像
Fig. 3 Superposed images(upper row) through low pass filter and recovered images(low row)



(a)75%质量 JPEG 压缩
(a)75%quality JPEG compression



(b)50%质量 JPEG 压缩
(b)50% quality JPEG compression

图 4 含水印的载体图像经过 JPEG 有损压缩后图像及其恢复水印图像

Fig. 4 Superposed images (upper row) through JPEG compression and recovered images (low row)

3.2.2 JPEG 有损压缩

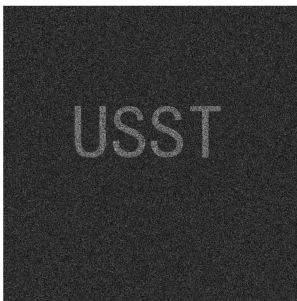
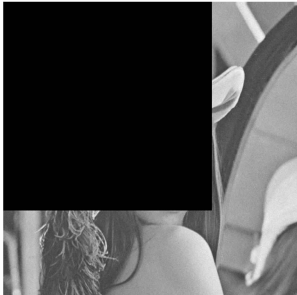
JPEG 图像压缩是一种常见的图像操作,为了

测试水印算法的抗 JPEG 压缩能力,对含水印图像进行了 75%和 50%质量的有损压缩,仿真结果

如图 4 所示。

3.2.3 剪切干扰和加性随机噪声干扰

为了检验加密数字全息水印算法的鲁棒性,对含水印图像还进行了剪切干扰和加性随机噪声干扰仿真。仿真结果如图 5 所示。图 5(a)是含水

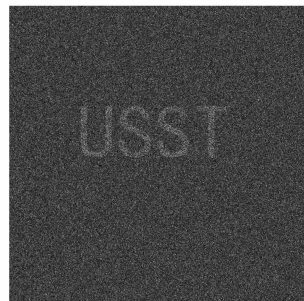


(a) 剪切图像
(a) Occluded image



(b) 涂鸦图像
(b) Scratched image

印图像经 50% 剪切生成的图像;图 5(b)是含水印图像经 Photoshop 画笔任意涂鸦后的图像;图 5(c)是含水印图像加入强度为 0.02 的椒盐噪声后的图像。



(c) 加噪声图像
(c) Noise added image

图 5 含水印图像经过剪切、涂鸦和加性随机噪声操作后的图像及其恢复水印图像

Fig. 5 Superposed images (upper row) through occluding, scratching, adding noise and the recovered images (low row)

4 结 论

加密同轴全息数字水印技术建立在双随机相位加密技术的基础上,并结合了数字全息技术的特点,具有高安全性、不可见性和鲁棒性。理论分析证明了加密全息数字水印方法的可行性。仿真实验证明了加密同轴全息数字水印具有抗低通滤波、剪切、叠加噪声和 JPEG 压缩等干扰能力。从嵌入水印后的图像及其受干扰图像中,通过正确的相位模板解密,都可获得重建水印图像。在水印重建过程中,不需要原始图像的参与,此重建过程是盲检测过程。

参考文献:

- [1] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital watermarking by a holographic technique [J]. *Appl. Opt.*, 2002,41(5):865-873.
- [2] KISHK S, JAVIDI B. Information hiding technique with double phase encoding[J]. *Appl. Opt.*, 2002,41(26):5462-5470.
- [3] NAUGHTON T J, JAVIDI B. Compression of encrypted three-dimensional objects using digital holography[J]. *Opt. Eng.*, 2004,43(10):2233-2238.
- [4] JAVIDI B, NOMURA T. Securing information by use of digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 2000,25(1):28-30.
- [5] KISHK S, JAVIDI B. Watermarking of three-dimensional objects by digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2003,28(3):167-169.
- [6] REFREGIER P, JAVIDI B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding [J]. *Opt. Lett.*, 1995,20(7):767-769.
- [7] NISHCHAL N K, JOSEPH J, SINGH K. Fully phase encryption using digital holography[J]. *Opt. Eng.*, 2004,43(12):2959-2966.
- [8] CAI L Z, HE M Z, LIU Q, *et al.*. Digital image encryption and watermarking by phase-shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2004,43(15):3078-3084.
- [9] HE M Z, CAI L Z, LIU Q, *et al.*. Phase-only encryption and watermarking based on phase-shifting interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2005,44(13):2600-2606.
- [10] 周文静,彭娇,于瀛洁. 基于数字全息技术的变形测量[J]. *光学精密工程*, 2005,13(增):46-51.
ZHOU W J, PENG J, YU Y J. Deformation measurement via digital holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(supp.):46-51. (in Chinese)
- [11] 潘武,田贻丽. 光学全息的数字实现[J]. *光学精密工程*, 2005,13(增):15-20.
PAN W, TIAN Y L. Digital implementation scheme of optical holograms[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(supp.):15-20. (in Chinese)

作者简介:孙刘杰(1965—),男,安徽怀宁人,副教授,在读博士,主要从事光学信息技术、数字水印技术和印刷防伪技术研究与应用。E-mail:liujiesunx@163.com