

文章编号: 0253-2239(2007)01-0031-4

双随机相位加密全息标识防伪技术研究^{*}

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 上海理工大学光学与电子信息工程学院, 上海 200093)

摘要: 在输入面和频谱面上分别放置随机相位加密模板对图像数据进行加密是一种高密级的有效数据加密技术。在研究双随机相位数据加密技术的基础上,结合数字全息技术和印刷技术的特点,提出了一种新的双随机相位加密同轴相位全息标识(简称同轴相位全息标识)印刷防伪方法。理论分析证明了同轴相位全息标识方法能有效地恢复原始图像数据,仿真实验证明了该方法具有强抗随机干扰能力和抗位压缩性能。通过打印和扫描实验验证了同轴相位全息标识可以通过普通的数字印刷技术印制在证件等印刷品中作为防伪标识,印刷品中的同轴相位全息标识可以通过扫描输入计算机,变换生成数字图像,通过解密模板可从中恢复出原始图像数据。

关键词: 全息术; 加密技术; 相位全息标识; 印刷技术

中图分类号: O438; TP309.7 文献标识码: A

Anti-Fake Technique by Double Random Phase Encrypted Holographic Mark

Sun Liuji^{1,2} Zhuang Songlin^{1,2}

(¹ College of Printing and Publishing, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093
² College of Optics and Electronic Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract: It is a high quality data encryption technique by double random phase encoding with uniformly distributed random phase in both input and Fourier phases. Based on double random phase encoding technology and combination of digital holography and print technology, a new in-line phase holography mark printing anti-fake method with double random phase encryption is proposed. Theoretical analysis proves that the presented technology can recover data of the original image effectively, and the robust anti-interference and anti-bit compression characteristic is verified by computer simulation. Printing and scanning experiments demonstrates that the in-line phase holography mark can be printed on the printed matter (e. g. documents) as the anti-fake mark by common digital printing technique. The in-line phase holography mark can be input into a computer by scanning, and then converted to digital images. The original image data can be recovered by decryption mask.

Key words: holography; encryption; phase holography mark; printing technique

1 引 言

在全息防伪技术中,全息模板是用激光全息装置进行拍摄,然后经过一系列的电铸、制模、压印、切割、粘贴等工艺来完成全息防伪标识的制作。随着伪造者技术水平和经济实力的增强,全息防伪标识

的仿冒也可能达到以假乱真的目的。在研究双随机相位数据加密技术的基础上^[1~8],结合全息技术的特点,本文提出了一种新的同轴相位全息标识防伪方法。该加密防伪方法具有以下特点:制作方法简单,可通过普通的数字印刷技术来实现;保密防伪性

^{*} 上海市重点学科基金光学工程(T0501)、印刷出版(P0501)资助项目。

作者简介: 孙刘杰(1965—), 安徽人, 博士研究生, 副教授, 主要从事光学信息技术、数字印刷技术和印刷防伪技术研究与应用。E-mail: liujiesunx@163.com

导师简介: 庄松林(1940—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 目前研究方向为信息光学。E-mail: slzhuangx@yahoo.com.cn

收稿日期: 2006-04-04; 收到修改稿日期: 2006-05-24

能强,只有授权的钥匙模板才能看到原始图像(授权的钥匙模板随机变换生成,信息量大,无法复制);制作成本低,通过现代数字印刷系统直接在普通纸张上印制,并通过普通扫描仪将印刷的同轴相位全息标识输入计算机,进行识别和认证。

同轴相位全息标识采用了双随机相位模板进行了加密,双随机相位加密数据的实部、虚部或相位信息都可直接用来恢复原数据或图像信息,文献[6]等还证明了用相位信息优于仅用加密数据的实部或虚部信息恢复原始图像或数据。本文从应用角度提出了具有强抗干扰性能的同轴相位全息标识,该全息标识利用了双随机相位加密数据的相位信息,与参考光叠加形成同轴全息图像。理论分析和仿真实验证明了该全息图像具有强抗随机干扰能力和抗位压缩能力,可以通过普通的印刷技术印制在证件中作为防伪标识。

2 同轴相位全息标识技术

2.1 双随机相位的加密与解密技术^[1~8]

设待加密图像或数据为已归一化的 $f(x, y)$, 图像大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 。让 (x, y) 表示空域坐标, (ζ, η) 表示频域坐标; $\psi(x, y)$ 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

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

其中 $h(x, y)$ 为 $H(\zeta, \eta) = \exp[j2\pi b(\zeta, \eta)]$ 的脉冲响应, 符号 $*$ 代表卷积运算。

加密图像的解密过程是加密的逆过程, 即将加密图像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 $f(x, y)$ 。理论证明 $\psi(x, y)$ 是一个白噪声图像, 其均值为 0, 方差为

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

2.2 同轴相位全息标识的加密与解密技术

理论证明可分别利用 $\psi(x, y)$ 的实部、虚部或相位信息来恢复原始图像, 而且相位信息更优^[5, 6]。同轴相位全息就是将加密图像的相位信息(即物光)与参考光同轴叠加形成同轴相位全息图像, 该图像经过处理后印刷成为全息标识, 具有强抗随机干扰能力。

设 $\psi(x, y)$ 的相位为 $\exp[j\phi(x, y)]$, 同轴参考光的相位为 $\exp(j\phi_0)$, ϕ_0 为某一常量, 则同轴相位全息

图像为

$$h_{\psi} = |\exp\{j[\phi(x, y) + \phi_0]\} + \exp(j\phi_0)|^2 = 2 + \exp[j\phi(x, y)] + \exp[-j\phi(x, y)], \quad (3)$$

此全息图像含有 $\psi(x, y)$ 的相位项 $\exp[j\phi(x, y)]$, 此项即为恢复原始图像的相位信息。另外式中的常数项可通过零频滤波去除, $\exp[-j\phi(x, y)]$ 项增加了恢复图像的背景高斯白噪声的方差。尽管如此, 同轴相位全息图像在抗随机干扰方面具有其独特的优势。

2.3 同轴相位全息标识抗随机噪声干扰分析

设同轴相位全息图像 h_{ψ} 受随机噪声干扰为 $n(x, y)$, $\exp[j\phi(x, y)]$ 是函数 $f_{\psi}(\mu, \nu)$ 的傅里叶变换, 则受随机噪声干扰的同轴相位全息标识可认为是函数 $f_n(\mu + \nu) + f_{\psi}(\mu, \nu)$ 的傅里叶变换全息。其中 $f_{\psi}(\mu, \nu)$ 服从均值为零的高斯白噪声分布, 且 $f_n(\mu, \nu)$ 服从随机噪声分布, 一般为复数形式, 形成等效实数随机噪声干扰为 $n(x, y)$ 。

同轴全息的再现像有三项, 即: 物函数的自相关项的零频项、原始项、共轭项, 三个像完全叠加在一起。原始像和共轭项叠加大大降低了随机噪声干扰强度。其中干扰的原始像和共轭项叠加和为

$$f_n(\mu, \nu) + f_n^*(-\mu, -\nu), \quad (4)$$

若 $f_n(\mu, \nu)$ 为随机噪声, 则 $f_n^*(-\mu, -\nu)$ 也是随机噪声, 两随机噪声叠加必然部分抵消, 从而降低了随机噪声干扰强度; 若干扰噪声 $f_n(\mu, \nu)$ 具有实部为奇函数, 虚部为偶函数的特征, 则(4)式的叠加和为零, 即完全消除了干扰噪声。同轴相位全息具有强抗噪声干扰性能。

3 仿真和实验结果分析

加密的同轴相位全息图是实值图像, 可以像二维条码一样直接印刷在纸张等承印物上当作防伪标识。这种防伪标识还应具有如下特点: 标识数据量不宜过大, 标识尺寸应尽量小。作为加密的全息图数据应该进行压缩, 并变换成可印刷的标识; 标识经过印刷和扫描过程后, 应具有较小的畸变。可通过模型分析, 采用自动校准技术, 减少畸变^[9]。此种类型的防伪标识一定是可变数据标识。可变数据标识可通过可变数据印刷技术实现, 可变信息可通过数据库进行管理。为此对同轴相位全息标识进行了数据压缩性能、抗随机干扰性能和印刷认证仿真实验。

3.1 同轴相位全息标识数据压缩性能

用传统的信息压缩方法对加密数字全息图像数

据进行压缩,压缩比非常小。采用直接位压缩方法,压缩后的图像不仅质量好,而且压缩比高,文献[3]证明了该方法的有效性。本文仿真了同轴相位全息图像的位压缩性能,并与 $\psi(x,y)$ 的实部图像和纯相位图像的位压缩性能进行了比较。比较标准采用解密图像的峰值信噪比(PSNR):

$$R_{\text{PSN}} = 10 \lg \frac{MN}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x,y) - \tilde{f}(x,y)]^2}, \quad (5)$$

其中 $f(x,y)$ 和 $\tilde{f}(x,y)$ 分别表示为归一化的原始图像和恢复图像。

原始图像经过双随机相位调制加密,生成加密的复数图像,将加密图像的相位信息(即物光)与参考光同轴叠加形成同轴相位全息图像,并进行压缩,压缩性能如图 1 所示。从图 1 可知,实部图像、纯相位图像和同轴相位全息图像都有很强的位压缩性能,特别是同轴相位全息标识数据压缩性能更强,而变化率最小。即使每像素用 1 bit 存储,同轴加密相位全息图像依然能很好地恢复原图像的能力。图 2(a)为原始图像,图 2(b)为从每像素用 1 bit 存储的同轴加密相位全息图像中恢复的原始图像。

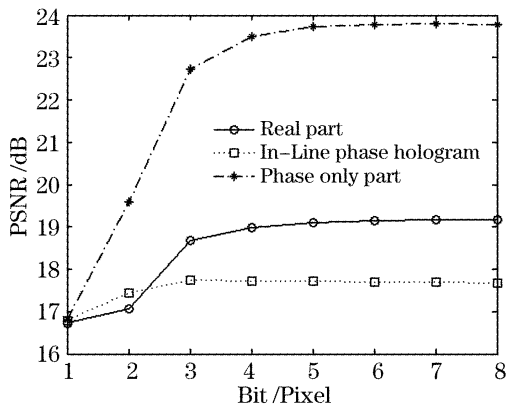


图 1 实部图像、纯相位图像和同轴相位全息图像的抗位压缩能力比较

Fig.1 Comparison of recovered image quality from the real part, phase-only part and in-line phase hologram with data compression

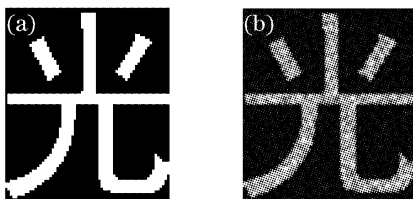


图 2 (a)原始图像,(b)从用 1 bit/pixel 存储的加密全息图中恢复的原始图像

Fig.2 (a) Original image, (b) Recovered original image from the encrypted (1 bit/pixel) hologram

3.2 同轴相位全息标识抗随机干扰性能

原始图像依然用图 2(a)所示的图像,加密生成的同轴相位全息标识抗随机干扰性能如图 3 所示。图 3 所加的随机干扰是均值为零,方差为 0.01 的高斯白噪声。从图 3 可知,同轴相位全息图像的抗高斯白噪声干扰能力强,用 4 bit/pixel 存储的同轴相位全息图像在受到强高斯噪声干扰时,还可以恢复原始图像,而实部图像、纯相位图像用 5 bit/pixel 存储就不能恢复原始图像了,在用 6 bit/pixel、7 bit/pixel 存储时恢复原始图像的质量也明显高于同样比特存储的实部图像和纯相位图像。

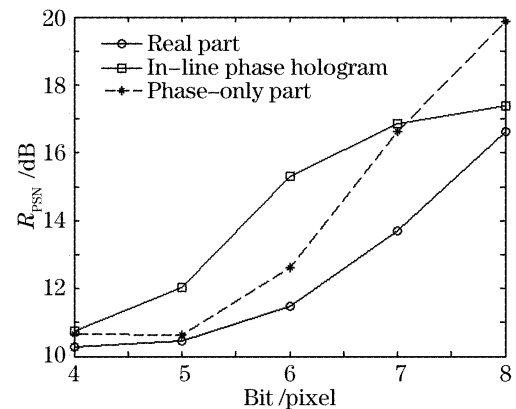


图 3 实部图像、纯相位图像和同轴相位全息图像的抗高斯白噪声干扰能力比较

Fig.3 Comparison of recovered image quality from the real part, phase-only part and in-line phase hologram with additive Gaussian noise

3.3 同轴相位全息标识的印刷和认证

同轴相位全息标识具有抗随机干扰能力和抗位压缩能力,可以通过印刷(通过调幅网点和调频网点技术)记录到纸张等承印物上当作防伪标识。原始图像依然用图 2(a)所示的图像,加密生成的同轴相位全息标识通过激光打印机打印和扫描重新输入计算机,并通过随机相位模板解密,恢复出原始图像信息,其实验结果如图 4 所示。

图 4(a)是由图 2(a)所示图像生成的同轴相位全息标识(大小为 256 pixel×256 pixel,灰度等级为 100,即通用印刷设备可恢复的灰度等级)通过 600 dpi 打印/扫描重新生成的同轴相位全息标识图像;图 4(b)是打印的全息标识图像被随意涂画污损后再扫描生成的同轴相位全息标识图像;图 4(c)是图 4(b)通过 Photoshop 软件画笔再次严重涂鸦后的同轴相位全息标识图像。图 4 中的(d)(e)(f)分别是(a)(b)(c)对应的由正确随机相位模板解密,恢复出的原始图像。从恢复的图像可以清楚地判断出所加认证信息。

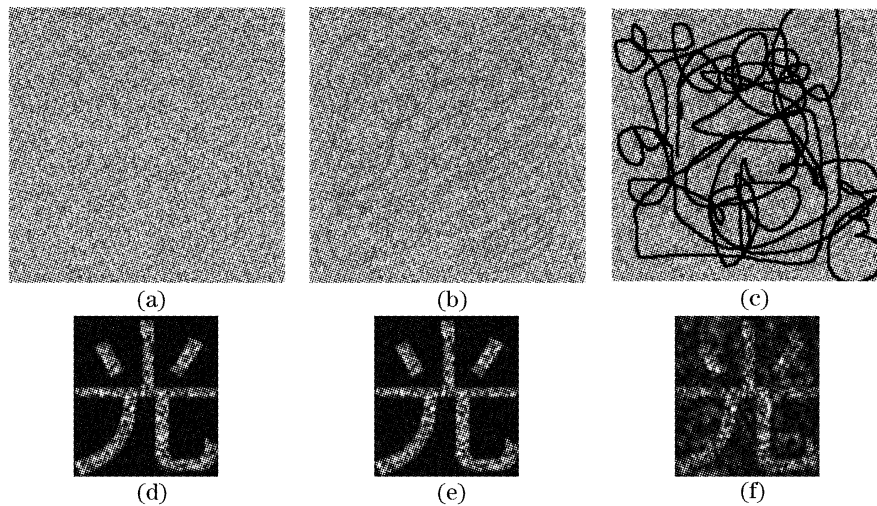


图 4 600 dpi 打印/扫描同轴相位全息标识和对应的解密恢复图像

Fig. 4 Scanned printed in-line holography marks with 600 dpi and the recovered images

4 结 论

同轴相位全息标识防伪技术是建立在双随机相位加密技术的基础上,并结合了同轴相位全息技术的特点,具有强鲁棒性能和加密性能。理论分析和仿真实验证明了同轴相位全息标识方法的可行性和实用性。打印扫描实验显示了同轴相位全息标识可以通过普通的印刷技术印制在证件中作为防伪标识,即使在严重污损的情况下,也可以由正确随机相位模板解密恢复出原始图像,并从恢复的图像判断出所加认证信息。同轴相位全息标识防伪技术具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

1 Refregier P, Javidi B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 767~769

2 Javidi B, Nomura T. Securing information by use of digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 28~30

3 Naughton T J, Javidi B. Compression of encrypted three-dimensional objects using digital holography[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(10): 2233~2238

4 Kishk S, Javidi B. Information hiding technique with double phase encoding[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(26): 5462~5470

5 Nishchal N K, Joseph J, Singh K. Fully phase encryption using digital holography[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(12): 2959~2966

6 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

7 Peng X, Yu L F, Cai L L. Double-lock for image encryption with virtual optical wavelength[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(1): 41~45

8 Peng Xiang, Zhang Peng, Niu Hanben. Information hiding theory based on virtual optics and its implementation with parallel hardware[J]. *Acta Optics Sinica*, 2004, **24**(5): 623~627 (in Chinese)

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

9 Lin C Y, Chang S F. Distortion modeling and invariant extraction for digital image print-scan process[R]. ISMIP 99