

文章编号: 0258-7025(2007)03-0402-04

# 基于同轴菲涅耳全息标识印刷防伪技术

孙刘杰<sup>1,2</sup>, 庄松林<sup>1,2</sup>

(上海理工大学<sup>1</sup> 出版印刷学院, <sup>2</sup> 光学与电子信息工程学院, 上海 200093)

**摘要** 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, 提出了一种新的同轴菲涅耳全息标识防伪方法, 利用双随机相位加密复数数据信息(物光信息), 与参考光叠加形成同轴全息图像。理论分析了同轴菲涅耳全息方法能有效地恢复原始图像数据, 并对加密的同轴菲涅耳全息图像的强抗位压缩性能进行了仿真, 最后通过打印和扫描对同轴菲涅耳全息标识的防伪功能进行了验证。结果表明, 该全息标识防伪方法具有强的抗位压缩能力, 可以通过逆菲涅耳变换和多重解密密钥恢复原始认证信息, 是一种十分有效的全息标识。该全息标识方法可通过可变数据印刷技术印制在证件等印刷品中作为个性化防伪标识。

**关键词** 全息; 同轴菲涅耳全息; 加密技术; 全息标识; 防伪

**中图分类号** O 438; TP 309.7 **文献标识码** A

## Identification Mark of Encrypted In-Line Fresnel Holography

SUN Liu-jie<sup>1,2</sup>, ZHUANG Song-lin<sup>1,2</sup>

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

**Abstract** It is a higher security technology that the data are encrypted by double-random phase encoding with uniformly distributed random phase. A new encrypted in-line Fresnel holographic mark is proposed based on the double-random phase encoding method, the holography and the digital printing technology. Theoretic and computer simulation prove that the encrypted in-line Fresnel holographic mark has the characteristics of availability and security. Computer simulations also indicate the encrypted in-line Fresnel holographic mark can be compressed with higher compressive ratio. Experimental results on the printing and scanning processes are presented to demonstrate that the proposed encrypted in-line Fresnel holographic mark can be printed on print matter by printer or digital printing machine as an identification mark.

**Key words** holography; in-line Fresnel holography; encryption; holography mark; forgery prevention

## 1 引言

激光全息制版技术比普通印刷制版技术复杂, 所以具有较强的防伪性能; 又因为激光全息图的衍射效率与角度有关, 当从不同的角度去观察时, 就会产生颜色变化, 所以又具有包装的装饰作用。因此, 激光压膜全息防伪技术在我国的商品商标与包装上得到了广泛的应用。然而, 由于全息图像的可见性和计算机图像处理技术的发展, 伪造这样的商标已

不是太难的事情, 因而急需发展新的安全防伪技术。

本文在研究双随机相位数据加密技术的基础上<sup>[1~9]</sup>, 结合全息技术的特点<sup>[6~13]</sup>, 提出了一种新的同轴菲涅耳全息标识防伪方法。该方法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[9]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。

**收稿日期:** 2006-08-09; **收到修改稿日期:** 2006-10-08

**基金项目:** 上海市重点学科基金光学工程(T0501)和印刷出版(P0501)资助项目。

**作者简介:** 孙刘杰(1965—), 安徽怀宁人, 上海理工大学出版印刷学院博士研究生, 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, 上海理工大学光学与电子信息工程学院教授, 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

## 2 原理

### 2.1 双随机相位菲涅耳加密与解密技术

设待加密图像或数据为已归一化的  $f(x_0, y_0)$ , 图像大小为  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 。设  $(x_0, y_0)$  表示  $L_1$  平面即输入面坐标,  $(x_1, y_1)$  表示  $L_2$  平面即变换面坐标,  $(x, y)$  表示  $L_3$  平面即输出面坐标,  $\phi(x, y)$  表示双随机相位菲涅耳衍射加密图像。  $p(x, y)$  和  $b(\zeta, \eta)$  为均匀分布在  $[0, 1]$  之间的两个独立白噪声随机图像。  $L_1, L_2, L_3$  平面间的距离分别为  $z_1$  和  $z_2$ , 则双随机相位菲涅耳衍射加密图像在  $L_2, L_3$  平面上的光场分布分别为

$$U_1(x_1, y_1) = \frac{\exp(ikz_1)}{i\lambda z_1} \times \iint f(x_0, y_0) \exp[j2\pi p(x_0, y_0)] \times \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_1} [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, (1)$$

$$U(x, y) = \frac{\exp(ikz_2)}{i\lambda z_2} \times \iint U_1(x_1, y_1) \exp[j2\pi b(x_1, y_1)] \times \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z_2} [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1, (2)$$

式(1)和式(2)可以统一表示为简单的菲涅耳变换形式

$$U_1(x_1, y_1) = FrTr\{f(x_0, y_0) \exp[j2\pi p(x_0, y_0)], \lambda, z_1\}, (3)$$

$$U(x, y) = FrTr\{U_1(x_1, y_1) \exp[j2\pi b(x_1, y_1)], \lambda, z_2\}, (4)$$

其中  $U(x, y)$  就是双随机相位菲涅耳加密信息。加密图像的解密是加密过程的逆过程, 即将加密图像进行逆菲涅耳变换后乘以  $\exp[-j2\pi b(\zeta, \eta)]$ , 再进行逆菲涅耳变换后乘以  $\exp[-j2\pi p(x, y)]$ , 就可得到原始图像  $f(x, y)^{[1]}$ 。

### 2.2 同轴菲涅耳全息标识

双随机相位菲涅耳加密信息  $U(x, y)$  是复数信息, 无法通过印刷方式记录在承印物上作为防伪标识。全息技术则可以同时记录物波函数的振幅信息和相位信息, 并通过全息记录装置记录, 生成可印刷的全息图像, 可作为防伪标识。同轴菲涅耳全息标识就是将加密的菲涅耳图像信息(即物光)与参考光同轴叠加形成加密同轴菲涅耳全息图像。

设  $U(x, y) = A(x, y) \exp[j\phi(x, y)]$ , 其中  $A(x, y)$  为振幅,  $\exp[j\phi(x, y)]$  为相位, 同轴参考光的相位为  $\exp(j\phi_0)$ , 则同轴全息图像为

$$H(x, y) = |A(x, y) \exp\{j[\phi(x, y) + \phi_0]\} + \exp(j\phi_0)|^2 = 1 + |A(x, y)|^2 + A(x, y) \exp[j\phi(x, y)] + A(x, y) \exp[-j\phi(x, y)], (5)$$

此全息图像含有  $A(x, y) \exp[j\phi(x, y)]$ , 此项即为恢复原始认证图像的信息。另外常数 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。处理后的全息图像可表示为

$$H'(x, y) = A(x, y) \exp[j\phi(x, y)] + A(x, y) \exp[-j\phi(x, y)]. (6)$$

## 3 仿真和结果分析

加密同轴菲涅耳全息标识是实值图像, 此图像若要直接印刷在纸张等承印物上当作防伪标识, 还需要对全息图像进行处理。全息标识数据量和标识的尺寸都不宜过大, 作为加密的全息图数据必须进行压缩; 标识经过印刷和扫描过程后应具有较小的畸变, 作为印刷全息标识还必须具有相应的抗干扰能力。为此, 对加密的菲涅耳变换全息标识进行了数据压缩性能仿真, 并将压缩后的菲涅耳变换全息标识进行了打印/扫描实验。

### 3.1 同轴菲涅耳全息图像恢复认证信息的效果

仿真用的原始认证图像是英文字母“Optics”,

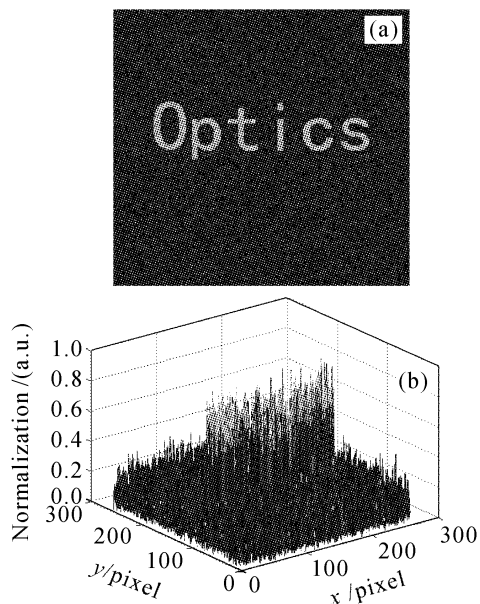


图 1 菲涅耳全息图像恢复认证的效果

(a) 恢复的认证图像; (b) 认证图像的三维表示

Fig. 1 Effect of recovered image from encrypted Fresnel hologram

(a) recovered image; (b) 3D diagram of the recovered image

也可以是公司图标或其他识别标识符。菲涅耳全息图像恢复认证信息的效果如图 1 所示。从图 1(a) 可以非常清楚地辨认证图像信息,但存在一定的背景噪声。图 1(b) 是认证图像的三维图像表示,图像中间的认证信息“Optics”能量集中,其灰度值相对较大(对灰度值进行了归一化处理),可清晰辨认。在图 1(b) 中的背景上存在均匀分布的噪声,而噪声也存在一定的强度,这是式(6)的第二项  $A(x, y)\exp[-j\phi(x, y)]$  在解密恢复过程中引入的背景高斯白噪声。由于背景高斯白噪声能量均匀分布,不影响恢复图像的辨认,特别是原始认证图像是二值图像时,通过图像处理技术可以去除其影响。加密同轴菲涅耳全息图像可以有效地恢复认证信息。

### 3.2 菲涅耳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。而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[7]证明了该方法的有效性。本文仿真了菲涅耳全息图像的位压缩性能,仿真用的原始认证图像是英文字母“Optics”。为了比较压缩后恢复图像的质量,采用量化误差的公式为

$$\text{Err} = \frac{\langle [I(x, y) - \tilde{I}(x, y)]^2 \rangle^{1/2}}{\langle \tilde{I}(x, y) \rangle}, \quad (7)$$

式中  $I(x, y)$  为压缩后恢复图像的强度,  $\tilde{I}(x, y)$  为未压缩全息图所恢复图像的强度,符号  $\langle \rangle$  为取均值运算。

图 2 中横坐标表示存储压缩图像每像素值所用的位数,1 表示图像用 1 bit/pixel 存储,纵坐标是压缩后解密图像的量化误差。图 3 是根据压缩的加密数字全息图恢复的原始认证图像,(a) 和 (b) 分别为压缩的全息图像由 1 bit/pixel 和 8 bit/pixel 存储所恢复的图像。

从图 2 和图 3 可以清楚地看到,加密菲涅耳全息图像具有强的位压缩性能,即使全息图像用

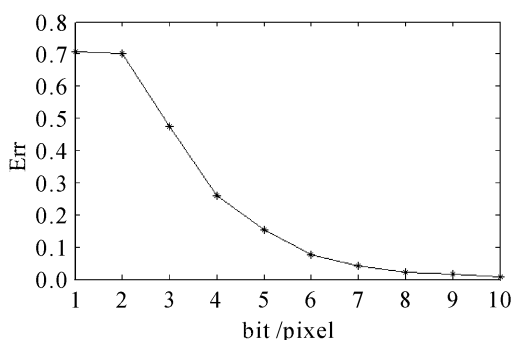


图 2 菲涅耳全息标识数据压缩性能

Fig. 2 Data compression ratio of encrypted Fresnel hologram

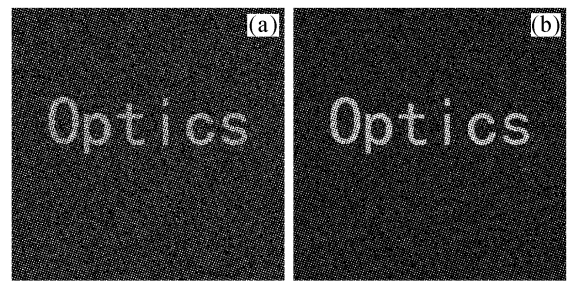


图 3 根据压缩的加密数字全息图恢复的原始图像

Fig. 3 Recovered images from the compressed holograms by the correct keys

(a) 1 bit/pixel; (b) 8 bit/pixel

1 bit/pixel 存储,恢复的原始图像依然清晰可辨。

### 3.3 同轴菲涅耳全息标识的印刷和认证

同轴菲涅耳全息标识有很强的抗位压缩能力,可以通过印刷方式直接记录到纸张等承印物上当作防伪标识。原始图像依然是英文字母“Optics”,加密生成的同轴菲涅耳全息标识通过 HP LaserJet 6L 激光打印机打印和 HPScan 2300C 扫描重新输入计算机,并通过逆菲涅耳变换和多重密钥解密,恢复出原始图像信息。其实验结果如图 4 所示。

图 4(a) 为由原始认证图像通过菲涅耳衍射加密生成的同轴菲涅耳全息标识(大小为 256 pixel × 256 pixel, 256 灰度等级,即印刷设备可以重现的灰度等级);图 4(b) 为图 4(a) 通过 600DPI 打印/扫描

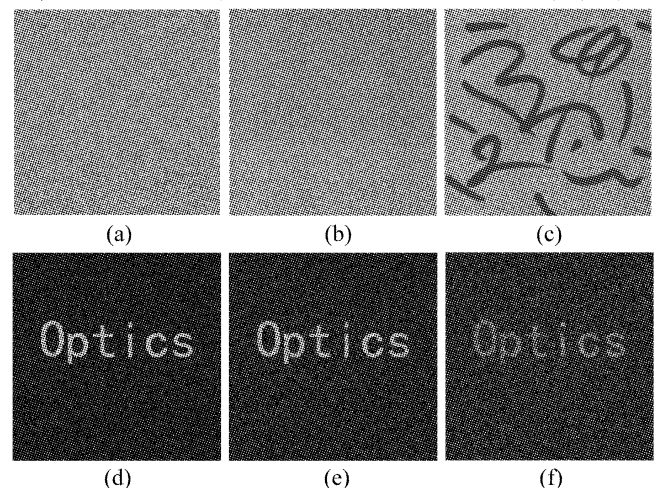


图 4 同轴菲涅耳全息标识和对应的正确解密恢复图像 (a) 加密生成的全息标识;(b) 打印/扫描生成的全息标识;(c) 严重污损后再扫描生成的全息标识;(d), (e), (f) 分别为 (a), (b), (c) 对应的正确解密恢复出的图像

Fig. 4 In-line Fresnel holographic marks and the recovered images using the correct keys

(a) holographic mark by encrypting; (b) holographic mark by printing and scanning; (c) holographic mark by defiling severely and scanning; (d), (e), (f) is recovered images of (a), (b), (c) using correct keys separately

重新生成的同轴菲涅耳全息标识图像;图 4(c)为打印图像用记号笔随意涂画严重污损后再扫描恢复的同轴相位全息标识图像;图 4(d),(e),(f)分别为(a),(b),(c)对应的由正确多重密钥解密及对应逆菲涅耳变换恢复出的原始图像。图 4 中(e),(f)所对应的量化误差分别为 0.5926 和 0.9023。

在扫描过程中,存在一定的几何畸变和像素值畸变。由于全息图像有较强的位压缩能力,可以对像素值畸变有较强的适应性。加密全息图像的几何畸变,则可以通过旋转、缩放、重采样等几何变换进行相应的畸变校正,使扫描图像恢复成加密全息图像所对应的像素数(256 pixel $\times$ 256 pixel),这样就可以进行解密恢复认证信息。图 4(b),(c)就是经过几何变换校正后的扫描图像,图 4(e),(f)是其对应恢复认证图像,从恢复的图像可以清楚地判断出所加认证信息。

## 4 结 论

同轴菲涅耳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,并结合了全息技术的特点,具有多重密钥加密的高安全性能。理论分析和仿真实验证明了该方法的可行性和实用性。打印扫描实验显示了同轴菲涅耳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,也可以由正确多重解密密钥恢复出原始图像,并从恢复的图像判断出所加认证信息。该加密防伪方法具有制作方法简单,可通过普通的数字印刷技术来实现;多重密钥保护,保密防伪性能强,只有拥有正确的多重密钥才能恢复原始图像(密钥随机生成,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菲涅耳全息标识输入计算机,进行识别和认证。该方法可以通过可变数据印刷技术印制在证件等印刷品中作为个性化防伪标识,有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- Guohai Situ, Jingjuan Zhang. Double random-phase encoding in Fresnel domain [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(14):1584~1586
- P. Refregier, B. Javidi. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):767~769
- Xiang Peng, Lingfeng Yu, Lilong Cai. Double-lock for image encryption with virtual optical wavelength [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(1):41~45
- 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. Information hiding technique with double phase encoding [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(26):5462~5470
- B. Javidi, T. Nomura. Securing information by use of digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):28~30
- T. J. Naughton, B. Javidi. Compression of encrypted three-dimensional objects using digital holography [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(10):2233~2238
- N. K. Nishchal, J. Joseph, K. Singh. Fully phase encryption using digital holography [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12):2959~2966
- Mingzhao He, Luzheng Cai, Qing Liu *et al.*. Phase-only encryption and watermarking based on phase-shifting interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(13):2600~2606
- Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Analysis of some fundamental issue about digital hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):465~471  
钟丽云,张以谟,吕晓旭等. 数字全息中的一些基本问题分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4):465~471
- Liu Cheng, Liu Zhigang, Cheng Xiaotian *et al.*. Spatial-filtering method for digital reconstruction of electron hologram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2):150~154  
刘诚,刘志刚,程笑天等. 数字滤波法再现电子全息图[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2):150~154
- Guo Yongkang, Huang Qizhong, Du Jinglei. Fractional Fourier transform hologram and its application in anti-counterfeiting [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(6):821~825  
郭永康,黄奇忠,杜惊雷. 分数傅里叶变换全息图及其在防伪中的应用[J]. *光学学报*, 1999, **19**(6):821~825
- Huang Qizhong, Du Jinglei, Su Jingqin *et al.*. White light reconstruction CGH interference for anti-counterfeiting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(3):233~236  
黄奇忠,杜惊雷,粟敬钦等. 白光再现计算全息干涉防伪技术[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(3):233~236