

doi: 10.3788/gzxb20134202.0245

Gyrator 变换全息图及其在图像加密中的应用

林睿

(重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

摘 要:提出了 gyrator 变换全息图,利用 gyrator 变换快速算法模拟实现了 gyrator 变换全息图的产生和再现,并研究了基于相移数字全息的 gyrator 变换全息图.在此基础上提出了采用正弦相位光栅实现光学图像加密的新方法.该方法利用 gyrator 变换在相空间的旋转特性,将 gyrator 变换的角度、光栅的频率及光栅的旋转角度作为加密密钥,并利用两个或两个以上的 gyrator 变换系统的级联实现图像加密,增加了系统的安全性.依据相移数字全息进行的两个 gyrator 变换系统级联的仿真实验验证了该方法的可行性、有效性及其良好的安全性能.

关键词:gyrator 变换; gyrator 变换全息图; gyrator 变换快速算法;相移数字全息;图像加密

中图分类号:O438; TP911.73 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2013)02-0245-8

Gyrator Transform Hologram and Its Application in Image Encryption

LIN Rui

(School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 00067, China)

Abstract: The gyrator transform hologram is proposed. The generation and the reconstruction of the gyrator transform hologram are simulated by using the fast algorithm for computing the gyrator transform. This new type hologram based on phase-shifting digital hologram is also studied. A novel method is proposed for optical image encryption by using sinusoidal phase gratings based on the methods mentioned above. In this proposal method, the angle of gyrator transform, the frequency and the rotation angle of the gratings are regarded as the encryption keys according to the rotation properties of the gyrator transform in the phase space. Two or more cascaded gyrator transform systems are applied to realize the image encryption. The simulation experiments are performed with two cascaded gyrator transform systems on the basis of the phase-shifting digital hologram. The results confirm the feasibility, validity and the secure performance of the proposal method.

Key words: Gyrator transform; Gyrator transform hologram; Fast algorithm of gyrator transform; Phase-shifting digital hologram; Image encryption

0 引言

2007 年 J. A. Rodrigo 和 T. Alieva 等人在研究一阶光学系统相空间理论的基础上,提出了一种新的线性正则变换——gyrator 变换^[1] (Gyrator Transform, GT),并给出了 GT 的光学实现形式^[2]. 由于 GT 和分数傅里叶变换一样都是常规傅里叶变换的推广形式,藉之可以从一个新的角度去认识光的传播、成像和信息处理,从而可获得许多新的应

用,因而 GT 从其产生开始就被应用于图像处理^[3]和光学信息安全^[4-12]中,但尚未见 gyrator 变换全息图(Gyrator Transform Hologram, GTH)的报道. 本文提出利用光波经 GT 后在 GT 域上的场分布与变换角度有关的性质,可以制作一种既包含物体信息又包含有系统参量信息的 GTH,并利用其变换角度作为其再现的一个新的约束条件和保密自由度,应用于图像加密中.

基金项目:重庆市教委科技研究项目基金(No. KJ100717)资助

第一作者:林睿(1972-),男,讲师,硕士,主要研究方向为光学图像处理. Email: linrui@ctbu.edu.cn

收稿日期:2012-08-15;录用日期:2012-11-01

1 GT 及其光学实现

函数 $f(x, y)$ 的 GT 的数学形式定义^[1]如下

$$F(u, v) = G^\alpha \{ f(x, y) \} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) K_\alpha(u, v; x, y) dx dy \tag{1}$$

$$K_\alpha(u, v; x, y) = \frac{1}{|\sin \alpha|} \exp \{ j2\pi[(uv + xy) \cdot \cot \alpha - (xu + yv) \csc \alpha] \} \tag{2}$$

式(1)中 $G^\alpha \{ * \}$ 表示旋转角度为 α 的 GT, $K_\alpha(u, v; x, y)$ 为变换核, (u, v) 为空间频率坐标, (x, y) 为空间位置坐标. 当 $\alpha=0$ 时, $G^\alpha \{ * \}$ 为恒等变换; 当 $\alpha = \pi/2$ 时, $G^\alpha \{ * \}$ 为坐标交换的傅里叶变换. GT 的旋转角度 α 具有可加性和周期性^[1].

$$G^\alpha \{ G^\beta \{ f(x, y) \} \} = G^{\alpha+\beta} \{ f(x, y) \} \tag{3}$$

$$G^{\alpha+2n\pi} \{ f(x, y) \} = G^\alpha \{ f(x, y) \} \tag{4}$$

而 $G^\alpha \{ * \}$ 的逆变换为 $G^{-\alpha} \{ * \}$, 根据式(4), 有

$$G^{-\alpha} \{ f(x, y) \} = G^{2\pi-\alpha} \{ f(x, y) \} \tag{5}$$

可以将式(5)作为旋转角度为 α 的 GT 逆变换形式.

根据文献[2], GT 的光学实现形式是由三个广义柱透镜级联形成的光学系统, 如图 1. 图 1(a) 为三个广义柱透镜级联形成的透镜组光学系统, 透镜组中广义透镜之间的距离相同, 都为 z . 广义透镜 L_1 和广义透镜 L_3 的焦距同为 z , 广义透镜 L_2 的焦距为 $z/2$. P_1 和 P_2 分别为输入平面和输出平面.

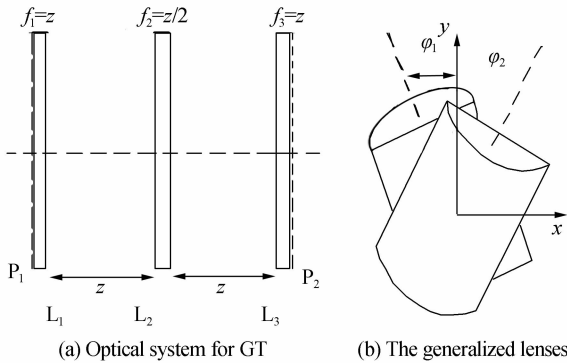


图 1 GT 的光学实现

Fig. 1 The optical implementation of GT

图 1(b) 为广义透镜的结构, 这里的广义透镜是由两个相同的会聚柱面透镜旋转一定的角度紧贴在一起构成的, 其中 φ_1 和 φ_2 分别为两柱面透镜对称轴相对于 oy 轴所旋转的角度, 且满足^[2]

$$\varphi_1 = -\varphi, \varphi_2 = \varphi - \pi/2 \tag{6}$$

输入平面上的光波复振幅 $f(x, y)$ 通过这个光学系统的变换作用, 在输出平面得到复振幅分布^[2]为

$$F(u, v) = \frac{1}{|2\lambda z \sin 2\varphi_2|} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot \exp \{ j2\pi[(uv + xy)(2\sin 2\varphi_1 \sin 2\varphi_2 - 1) - (xu + yv)] / 2\lambda z \sin 2\varphi_2 \} dx dy \tag{7}$$

式(7)中 λ 为光波波长. 如果令

$$\sin 2\varphi_1 = \cot(\alpha/2), \sin 2\varphi_2 = (\sin \alpha)/2 \tag{8}$$

则在引入坐标量纲归一化因子 $\sqrt{\lambda z}$ 的条件下, 式(7)与式(1)是完全一样的^[2].

2 GT 全息图

根据光学全息的原理, GTH 是物体在单色平面波的照明下, 利用 GT 的光学实现系统, 通过一定角度的 GT 后生成的物光波的 GT 波面与平面参考光波在 GT 域平面进行干涉, 用全息的方法记录下的物光波的 GT 波面的复振幅分布; 再现时, 用参考光波照明全息图, 再经过相应角度的逆 GT, 在系统的输出平面得到物体的再现像.

2.1 GT 全息图的记录和再现

GTH 记录光路如图 2(a). 图中 $L_{\alpha, i} (i=1, 2, 3)$ 表示构成变换角度为 α 的广义透镜. 用单色平面光波照明物平面 O 上的输入图像 $f(x, y)$, 在变换角度为 α 的 GT 域平面 H 上, 引入参考光 $R(u, v)$ 和

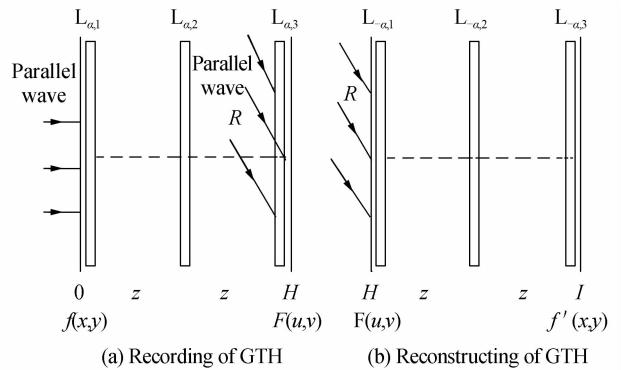


图 2 GTH 的记录和再现光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical route for GTH

图像的 GT 光场 $F(u, v) = G^\alpha \{ f(x, y) \}$ 进行干涉, 得到输入图像的 GTH 的光强分布为

$$D(u, v) = |R(u, v) + F(u, v)|^2 = |F|^2 + |R|^2 + R^* F(u, v) + RF^*(u, v) \tag{9}$$

经线性处理后的全息图的振幅透过率 $H(u, v)$ 和 $D(u, v)$ 成正比

$$H(u, v) = kD(u, v) \tag{10}$$

k 为比例常量. 再现时的光路如图 2(b). 图中 $L_{-\alpha, i} (i=1, 2, 3)$ 表示构成变换角度为 $-\alpha$ 的广义透镜. 用参考光波作为入射光波照明物平面上的全息图 $H(u, v)$, 透射光场为

$$T(u, v) = R(u, v) \cdot H(u, v) = kR(|F|^2 + |R|^2) + kR \cdot R^* \cdot F^*(u, v) \tag{11}$$

透射光场经过变换角度为 $-\alpha$ 的 GT 光学系统后, 在成像平面上的光场分布为

$$I(x, y) = G^{-\alpha} \{ T(u, v) \} = I_1 + I_2 + I_3 \tag{12}$$

$$I_1 = G^{-\alpha} \{ kR(|F|^2 + |R|^2) \} \tag{13}$$

$$I_2 = G^{-\alpha} \{k|R|^2 F(u, v)\} = k|R|^2 f(x, y) = f'(x, y) \quad (14)$$

$$I_3 = G^{-\alpha} \{kRRF^*(u, v)\} \quad (15)$$

式中, I_1 为衍射零级; I_2 为衍射正一级, 是原图像的重现像; I_3 为衍射负一级, 在变换角度不等于 $\pi/2$ 时, 通常为一个模糊的像, 模糊的程度与变换角度偏离 $\pi/2$ 的程度有关。

如果对透射光场施行角度为 $\alpha' = \alpha - \pi$ 的 GT, 则成像平面上的光强分布为

$$I'(x, y) = G^{\alpha'} \{T(u, v)\} = I'_1 + I'_2 + I'_3 \quad (16)$$

$$I'_1 = G^{\alpha'} \{kR(|F|^2 + |R|^2)\} \quad (17)$$

$$I'_2 = G^{\alpha'} \{k|R|^2 F(u, v)\} \quad (18)$$

$$I'_3 = G^{\alpha'} \{kRRF^*(u, v)\} \quad (19)$$

对于输入图像而言, $f(x, y)$ 是一个实数函数, 则依据文献[1], $F^*(u, v)$ 可以表达为

$$F^*(u, v) = G^{\pi-\alpha} \{f(-x, -y)\} \quad (20)$$

则

$$I_3 = G^{\alpha'} \{kRRF^*(u, v)\} = kRRG^{\alpha'} \{G^{\pi-\alpha} \{f(-x, -y)\}\} = kRRf(-x, -y) \quad (21)$$

可见, 对透射光施行与记录时的变换角度 α 相匹配的另一变换角度 $\alpha' = \alpha - \pi$, 将得到与原图像相反的像 $f(-x, -y)$, 类似菲涅尔全息图的共轭像再现, 这是 GTH 的一个显著特点。

2.2 数值模拟实验

为了验证提出的 GTH 的可行性, 在 GT 快速算法^[13]的基础上模拟了 GTH. 模拟实验中, 所用光波波长为 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 输入物体为 512×512 像素的二值图像(图 3(a)), GT 的角度分别为 $\alpha = 25^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 85^\circ, 88^\circ$ 和 90° , 参考光与光轴夹角为 $\theta = 1.6^\circ$, 物光与参考光的强度比为 1:3, 数值模拟结果如图 3 所示. 为简便仅给出变换角度为 75° 的全息图(图 3(b)), 各个变换角度相应的再现结果依次由图 3(c)至图 3(h)给出; 而图 3(i)则是图 3(b)在变换角为 105° 的 GT 下再现共轭像的结果。

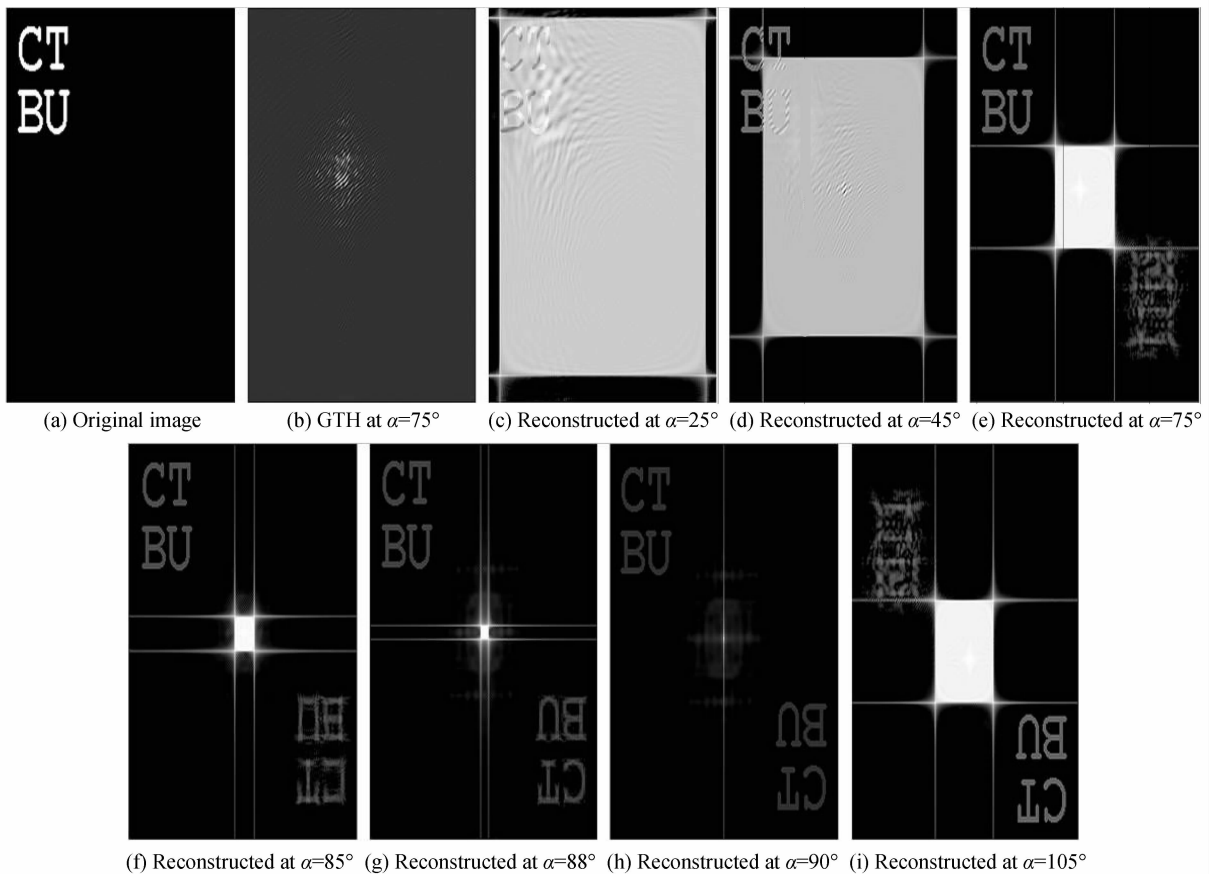


图 3 GTH 的生成和再现的数值模拟实验

Fig. 3 The numerical simulation experiments for the generation and reconstruction of GTH

从 GTH 的记录过程可见, GTH 与傅里叶变换全息图和菲涅尔全息图既不同而又有相似之处. 傅里叶变换全息图记录的是物的频谱, 菲涅尔全息图记录的是物光波前, GTH 记录的则是物光波经 GT 的波前. GT 域上的场分布既与物函数有关, 又

与变换角度有关, 而后者由式(8)决定于广义透镜的结构参量. 从 GTH 再现物体的像的方式上看, 它用原参考光照明全息图, 使全息图再现的波前再经过一逆变换系统成像, 再现方式与一般的傅里叶变换全息图相同. 从 GTH 再现像的分布上看, 小角

度的 GTH 再现的衍射 0 级分布的面积较大,对衍射正一级形成了较大的噪声干扰;随着变换角度的增大,衍射 0 级分布的面积逐渐减小,当变换角度接近 90°时,衍射 0 级就收缩到观察平面中央很小的一个矩形区域,而变换角为 90°时,GTH 就退化为傅里叶变换全息图,其再现结果和傅里叶变换全息图的再现结果是完全一样的;在变换角度不等于 90°,再现的衍射 0 级的形状为一个“#”形的分布,这是 GT 所特有的一种分布.因此,GTH 图既区别于一般的菲涅耳全息图,又有别于一般的傅里叶变换全息图.

2.3 消除衍射零级及共轭像的 GT 全息图

同其他全息图一样,要应用 GTH 必须消除再现时衍射 0 级和共轭像对于再现的原像的干扰.目前能较好地消除衍射 0 级和共轭像的技术是相移数字全息术^[14-15],将其应用于 GTH 中,相应的光路如图 4.文献[14]中指出通过调整平行参考光路中λ/2

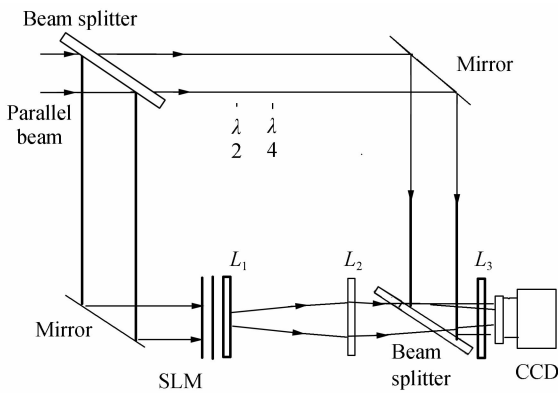


图 4 应用 GTH 的相移数字全息光路

Fig. 4 Schematic diagram of phase-shifting digital holography for the application of GTH

波片和 λ/4 波片快慢轴的相对位置关系可以获得相移值分别为 0、π/2、π 和 3π/2 的四幅全息图 $H_1(x, y)$ 、 $H_2(x, y)$ 、 $H_3(x, y)$ 和 $H_4(x, y)$,设参考光的共轭光波在干涉平面的复振幅分布为 $R^*(x, y)$,利用四步相移算法可得干涉平面处物光波复振幅分布为

$$O(x, y) = \frac{(H_1 - H_3) + i(H_2 - H_4)}{R^*(x, y)} \quad (22)$$

按照图 4 的光路,以 512×512 像素的图像作为输入图像(图 5(a)),假设 CCD 幅面大小为 512×512 个像素,像元尺寸为 6.45 μm×6.45 μm,物光与参考光的夹角为 3.6°,物光与参考光的强度比为 1:3,入射单色平面光波波长为 632.8nm,利用 GT 数值算法,模拟在变换角度为 45°时所进行的四步相移数字全息,得到的全息图像为图 5(c)(为简便只给出一幅数字全息图),由数字全息图计算得到的复值图像的振幅和相位分别为图 5(d)和图 5(e),而

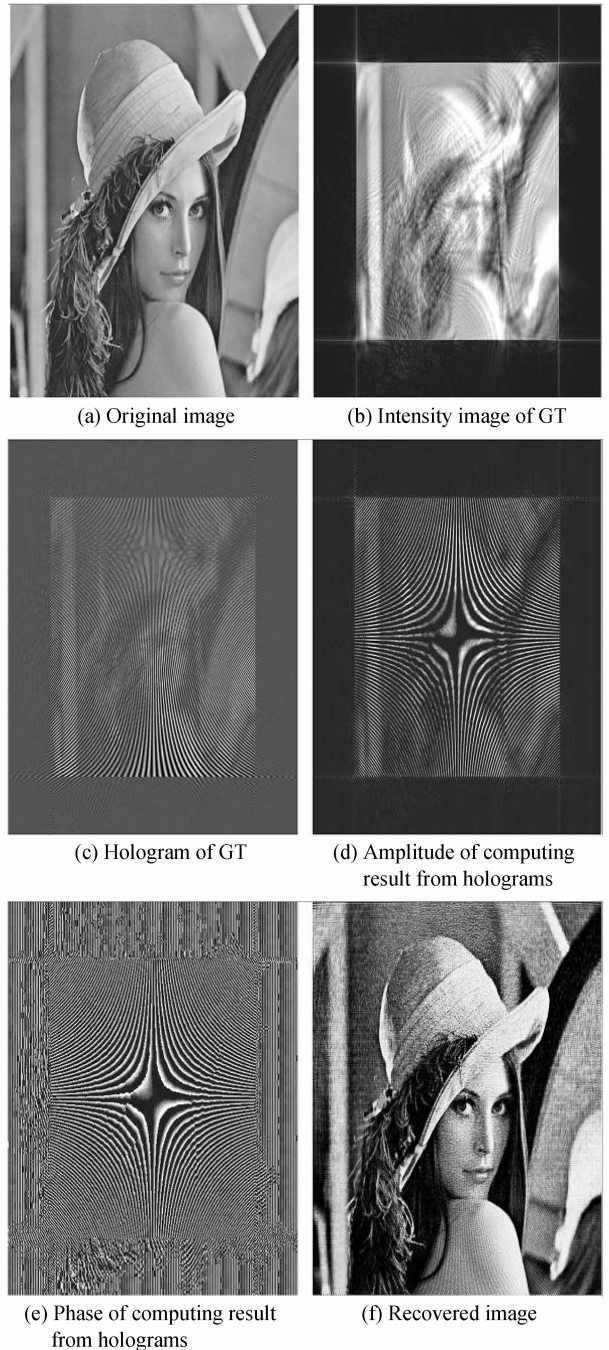


图 5 四步相移 GTH 的数值模拟实验

Fig. 5 Numerical simulation experiment of four-step phase-shifting GTH

由复值图像进行再现的结果如图 5(f).从再现结果可以看到,再现的图像有轻微的模糊,但图像的细节还是能清楚地分辨(如帽子的褶皱和帽檐线等),再现图像还带有轻微的双曲线型条纹噪音(图像下部),对图像信息的整体影响不大,文献[3]中指出,双曲线型噪音可通过 GT 域滤波得以消除.从再现像的结果可以看到,衍射 0 级和共轭像的干扰已被消除.图 5(b)是原图像的 GT 结果,对比图 5(c),可以看到全息图明显出现了双曲线型的干涉条纹,而由全息图计算出的复值图像的振幅和相位都带有双

曲线型条纹噪音,这就是再现像中带有双曲线型条纹噪音的原因,这是由 GT 产生的.进一步的实验表明,当逆 GT 角度和原变换角度一致时,双曲线型噪音将得到减弱或消除;而当逆 GT 的变换角度和原变换角度有差异时,双曲线型噪音将会增强,变换角度的差异过大时将使图像难以辨认,这就是文献[3]提出将 GT 角度作为信息加密密钥的一个重要原因.

3 GT 全息图在光学图像加密中的应用

在 GT 提出之后,文献[3]就指出 GT 能够应用于图像加密中,多次迭代的 GT 操作能够实现图像加密,并给出了应用两次迭代 GT 的图像加密算法和数值结果.文献[4]则将迭代 GT 的图像加密方法推广应用于光学图像加密系统中,尽管描述了采用干涉的方法来记录,但是他们都没有给出相应的 GTH,所有的结果都是数学算法上的数值结果.

在本文提出的 GTH 的基础上,应用图 4 的四步相移干涉数字全息方案,提出了一种采用正弦相位光栅实现 GT 光学图像加密的新方法.

3.1 采用正弦相位光栅的数字全息加密系统

Javidi 等人提出的双随机相位编码的图像加密技术^[16-17],其基本思想是:利用随机相位掩膜在变换域将待加密图像的傅里叶域频率信息的分布扰乱而获得振幅和相位都接近于白噪音的加密图像,实现加密.因此,在进行图像加密时只要想办法在变换域扰乱图像的傅里叶域频率信息就能达到加密的目的,而为了解密,则要求变换域是可逆的. GT 是可逆的变换,GT 的一个重要特征是使二维信号在相空间中发生位置坐标—空间频率坐标的一种扭曲旋转(又称为 cross-gyrator^[1]),即 GT 在相空间的旋转不是通常意义上的相平面 (x, u) 和相平面 (y, v) 的旋转(如傅里叶变换和分数傅里叶变换等),而是相平面 (x, v) 和相平面 (y, u) 的旋转,这种旋转改变了信号原有的位置坐标—空间频率坐标的对应关系,这就为扰乱信号的傅里叶频谱提供了一个天然的平台.但仅施行 GT 还不能完全扰乱信号的傅里叶频谱,若能先让信号的傅里叶频谱发生某一角度的旋转再施行 GT,则信号的傅里叶频谱会很大程度上被扰乱,若多次重复这一过程,并且使每次傅里叶频谱的旋转角度和 GT 角度都不一样,则输入信号的傅里叶频谱就会被完全扰乱.光学中的 θ 调制实验表明,用不同取向的光栅调制后的图像其傅里叶谱将按光栅调制方向旋转,因而可以采用正弦相位光栅实现对待加密图像的傅里叶频谱的旋转.

图 6 是本文提出的采用正弦相位光栅实现 GT

光学图像加密光路的示意图.这是两个子系统的级联形成的光路,每一单独的子系统由正弦相位光栅和 GT 系统组合后形成,光栅平面为 GT 系统的输入平面,而后一级的输入平面为前一级的输出平面,整个加密系统的输入图像由空间光调制器 SLM₁ 产生,光栅分别用两个空间光调制器 SLM₂ 和 SLM₃ 产生,而 SLM₁ 和 SLM₂ 紧密连接,系统的输出是由 CCD 来记录物光与参考光的干涉图像.用这部分光路取代图 4 中物光的 GT 部分即可采用相移数字全息的方法记录加密图像的数字全息图.

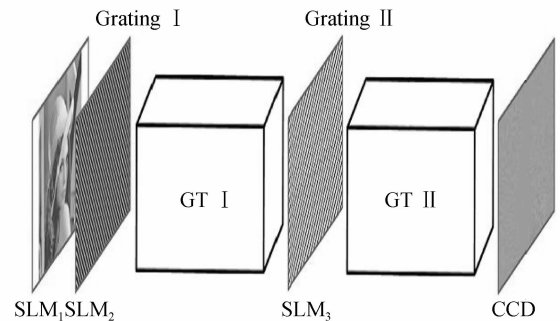


图 6 采用正弦相位光栅的 GT 光学图像加密光路示意图
Fig. 6 The sketch map of optical GT encryption by using sinusoidal phase gratings

正弦相位光栅由空间光调制器(SLM)产生,如德国 HoloEye 公司生产的 Holoeye LC2002 液晶 SLM 在一定条件的情况下,对于入射的光波,从检偏器出射的光与入射到液晶的光可以出现 π 以上的相位变化^[18],因而只需将送入到 SLM 的正弦光栅强度图像调制到相位输出的模式即可.而正弦光栅强度图像可用如下方法产生:

设 SLM 的像素尺寸是 $W \times H (W > H)$,构造一个大小为 $nW \times nW (n=2, 3, 4 \dots)$ 的图像平面,图像的水平坐标 0 和 $nW-1$ 分别对应的角度为 0 和 π ,这样将角度区间 $[0, \pi]$ 离散化为 nW 点,每个点的角度值为 $x_k = \frac{\pi}{nW-1} k (k=0, 1, 2, \dots, nW-1)$,则构造光栅图像的每一列的数值为 $z_k = \sin(f \cdot x_k)$ (f 为光栅频率),将构造的光栅图像逆时针旋转角度 φ 后截取图像中央区域大小为 $W \times H$ 的图像作为正弦光栅强度图像送入 SLM.这样产生的光栅包含由如下参量: W, H, n, f 和 φ ,只有所有参量相同时,按上述方法产生的正弦光栅才相同,为简便,我们可以默认加密和解密过程中所有的光栅的 W, H, n 参量都相同,而光栅函数可以表达为 $S(x, y; f, \varphi)$.

按照图 6 的加密光路,利用正弦相位光栅进行 GT 光学加密的数学算法描述如下:

设 GT 系统 I 和 GT 系统 II 的变换角度分别为 α_1 和 α_2 ,输入的图像函数为 $q(x, y)$,两个正弦相位光栅的相位分布函数分别为

$$g_1(x, y; f_1, \varphi_1) = \exp[-j \cdot S(x, y; f_1, \varphi_1)] \quad (23)$$

$$g_2(x, y; f_2, \varphi_2) = \exp[-j \cdot S(x, y; f_2, \varphi_2)] \quad (24)$$

其相应的相位共轭函数为

$$g_1(x, y; f_1, \varphi_1) = \exp[j \cdot S(x, y; f_1, \varphi_1)] \quad (25)$$

$$g_2(x, y; f_2, \varphi_2) = \exp[j \cdot S(x, y; f_2, \varphi_2)] \quad (26)$$

则加密过程为

$$Q(u, v) = G^{\alpha_2} \{g_2 \times G^{\alpha_1} \{q \times g_1\}\} \quad (27)$$

解密过程为

$$q'(x, y) = G^{-\alpha_1} \{G^{-\alpha_2} \{Q\} \times g_2^*\} \times g_1^* \quad (28)$$

采用相移数字全息方案时, CCD 记录的是加密图像 $Q(u, v)$ 的数字全息图, 而解密时的复函数

$Q(u, v)$ 则由相移数字全息算法计算得到, 解密过程完全在计算机中计算完成.

3.2 仿真实验及性能分析

依据式(27)和(28), 综合图4和图6, 对本文提出的在相移数字全息的基础上采用正弦相位光栅实现 GT 光学图像加密的方法进行数值模拟. 仍以图5的模拟参量作为基本的光学参量, 假定所用空间光调制器的分辨率都为 512×512 , 像素尺寸为 $32 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$, 产生光栅时, 参量 $n=3$, 两个正弦光栅 grating I(图7(b)) 和 grating II(图7(c)) 的参量分别为 $(f_1=560, \varphi_1=145^\circ)$ 和 $(f_2=470, \varphi_2=30^\circ)$,

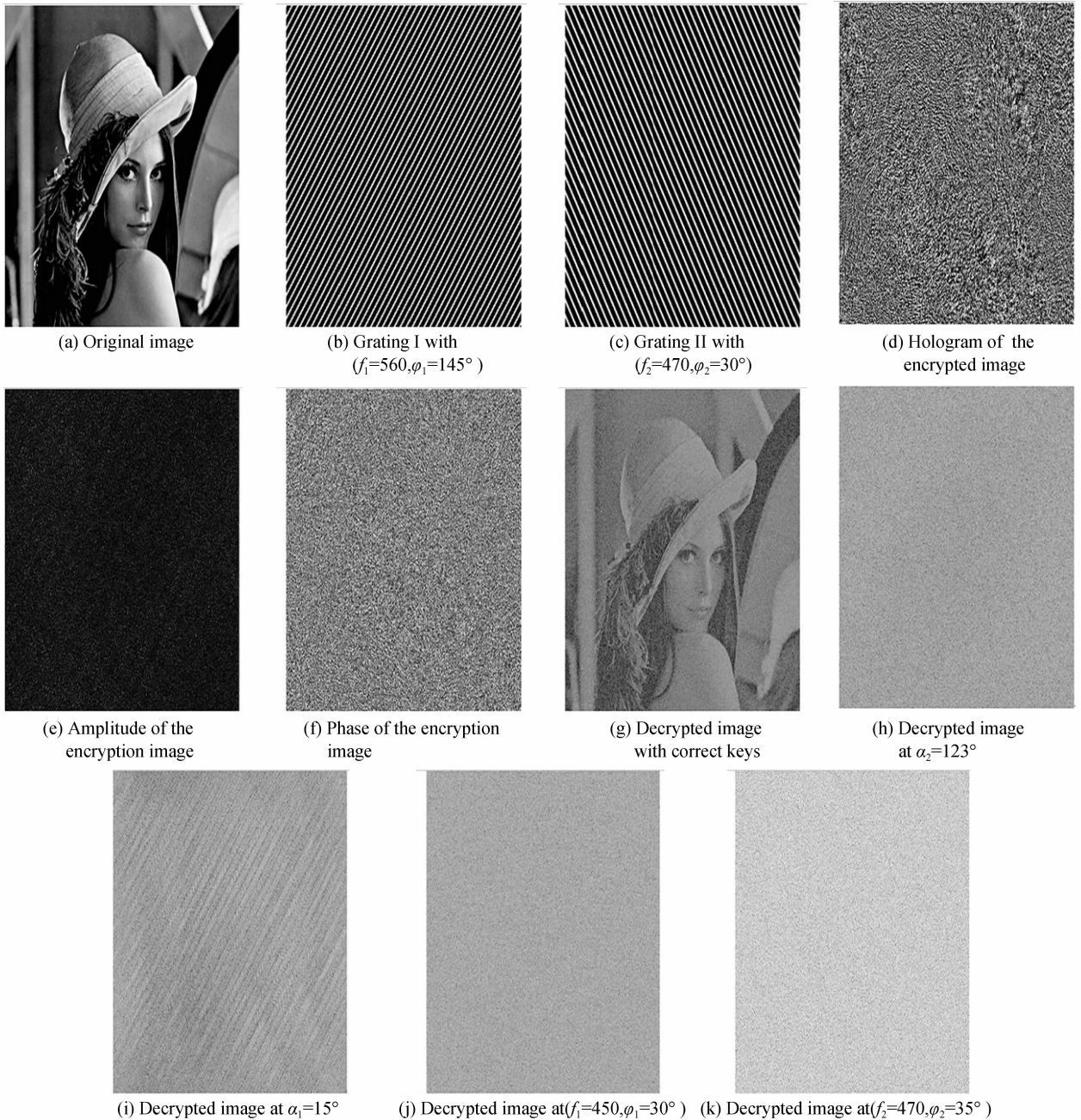


图7 采用正弦相位光栅及相移数字全息实现 GT 图像加密的仿真实验

Fig. 7 Simulation results of image encryption based on GT by using sinusoidal phase gratings and phase-shifting digital hologram

GT I 的变换角度为 $\alpha_1 = 50^\circ$, GT II 的变换角度为 $\alpha_2 = 167^\circ$, 实验结果如图 7 所示. 为了简便, 图像被加密后的四幅相移数字全息图只给出其中一幅(图 7(d)), 从全息图上不能得到原图像的信息, 而从数字全息图恢复的复值加密图像的振幅(图 7(e))和相位(图 7(f))也得不到原图像信息, 并且相位图像接近白噪音. 图 7(g)是在各个加密参量($\alpha_1, \alpha_2, f_1, f_2, \phi_1, \phi_2$)都正确的解密结果, 解密图像除了有轻微的模糊和含有噪音外, 与原图像是一致的. 图 7(h)~(k)分别是 α_2, α_1, f_2 和 ϕ_2 错误的解密结果, 可以看到这四个参量任意一个错误都不能得到正确的解密结果.

根据文献[4], 可以用两幅图像的相关系数(CC)来评价本文所提出的加密方法的性能. 如果以 $O(x, y)$ 和 $D(x, y)$ 分别代表原图和解密图像, 那么两幅图像的 CC 应该为

$$CC = \frac{E\{[O-E(O)][D-E(D)]\}}{\sqrt{E\{[O-E(O)]^2\}}\sqrt{E\{[D-E(D)]^2\}}} \quad (29)$$

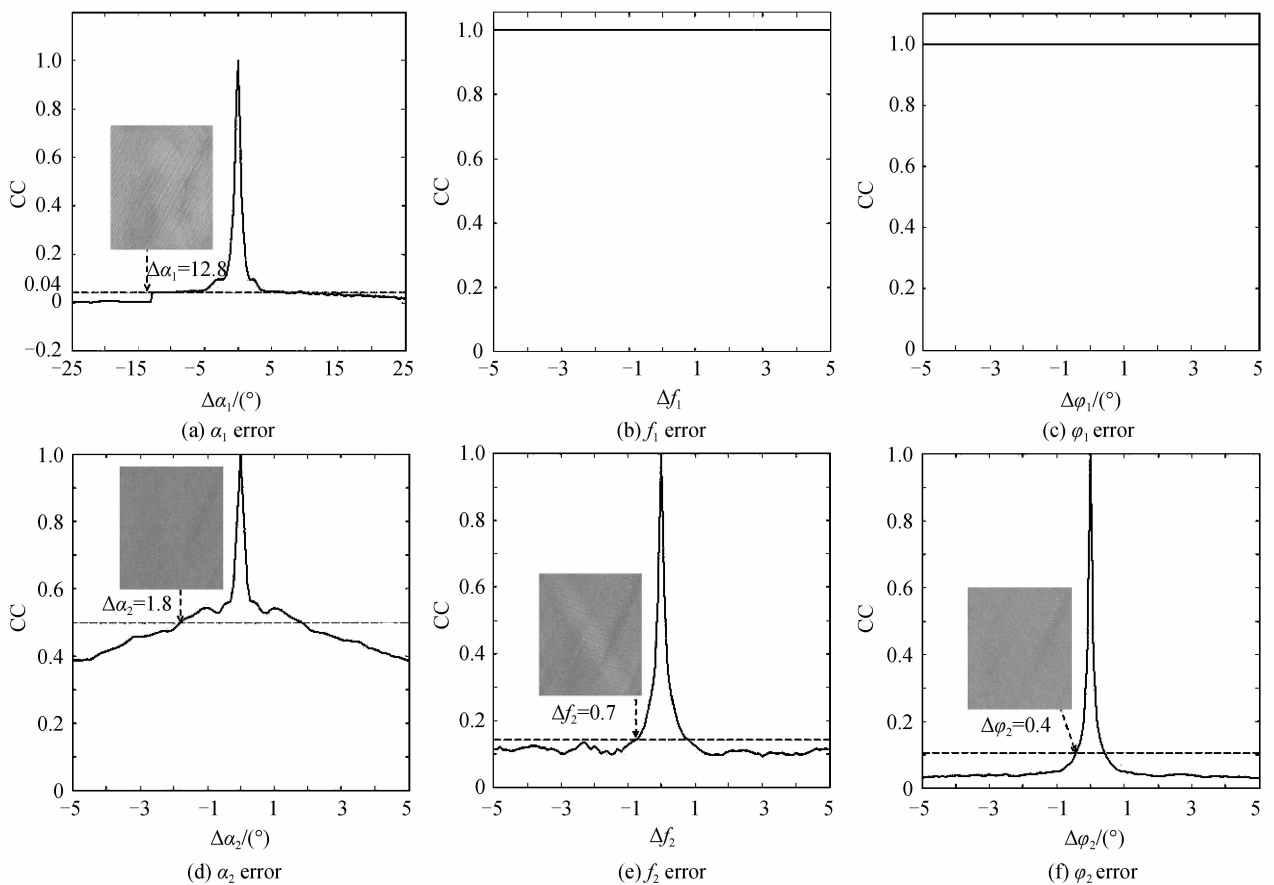


图 8 各加密参量单独错误的 CC 曲线

Fig. 8 The CC curve with the independent error of each encryption parameter

4 结论

本文基于全息理论和 GT 及其光学实现的理论的基础上提出了 GTH, 并在 GT 数值算法基础上模

拟实现了 GTH 的产生及其数字再现, 再现的结果与 GTH 的理论相符合, 并在相移数字全息和 GTH 的基础上提出了采用正弦相位光栅实现图像加密的新方法, 仿真实验结果表明, 该方法是可行的, 具有

这里 $E\{*\}$ 表示求期望值运算. 据此考察了在解密时各个加密参量单独错误的 CC, 如图 8. 从图中可以看到, 解密时第一级的 GT 系统中角度的错误对解密结果影响不大, 只有在变换角度错误较大时 ($|\Delta\alpha_1| > 12.8^\circ$, 图 8(a)) 才产生无法辨认的解密结果; 而第一级正弦相位光栅的错误则对于解密结果毫无影响(图 8(b)、(c)). 解密时第二级的 GT 系统中角度的错误对解密结果影响较大, 在 $|\Delta\alpha_2| > 1.8^\circ$ 时(图 8(d)), 解密的图像已经无法辨认; 而第二级正弦相位光栅的错误对解密结果影响很大, 光栅频率错误达到 0.7 或光栅的旋转角度错误达 0.4° 时, 解密图像和原图像的 CC 就降低到了 0.1 左右, 解密图像不可辨认(图 8(e)、(f)). 由此可看到, 第二级 GT 系统对整个加密系统的安全性起着决定作用, 第二级 GT 系统的三个参量(α_2, f_2, ϕ_2)是具有良好安全性能的加密密钥, 进一步的实验表明, 当采用多级 GT 系统级联时, 加密系统的密钥空间会增大, 加密系统的安全性能会得到更大的提高.

良好的安全性能。

参考文献

- [1] RODRIGO J A, ALIEVA T, CALVO M L. Gyrator transform: properties and applications[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(5): 2190-2203.
- [2] RODRIGO J A, ALIEVA T, CALVO M L. Experimental implementation of the gyrator transform[J]. *Journal of Optics Society of America A*, 2007, **24**(10): 3135-3139.
- [3] RODRIGO J A, ALIEVA T, CALVO M L. Applications of gyrator transform for image processing [J]. *Optics Communication*, 2007, **278**(2): 279-284.
- [4] LI Hui-juan, WANG Yu-rong. Information security system based on iterative multiple-phase retrieval in gyrator domain [J]. *Optics and Laser Technology*, 2008, **40**(7): 962-966.
- [5] LI Hui-juan, WANG Yu-rong. Double-image encryption based on iterative gyrator transform[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(23): 5745-5749.
- [6] LI Hui-juan. Image encryption based on gyrator transform and two-step phase-shifting interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, **47**(1): 45-50.
- [7] LIU Zheng-jun, GUO Qing, XU Lie, *et al.* Double image encryption by using iterativerandom binary encoding in gyrator domains[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(11): 12033-12043.
- [8] LIU Zheng-jun, XU Lie, LIN Chuang, *et al.* Image nryption scheme by using iterative random phase encoding in gyrator transform domains[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, **45**(5): 542-546.
- [9] SINGH N, SINHA A. Gyrator transform based optical image encryption using chaos[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, **47**(5): 539-546.
- [10] ABUTURAB M R. Securing color information using Arnold transform in gyrator transform domain[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(5): 772-779.
- [11] ABUTURAB M R. Securing color image using discrete cosine transform in gyrator transform domain structured-phase encoding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(10): 1383-1390.
- [12] ZHANG Yan-li. Image encryption based on gyrator transform[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 15-46.
张艳丽. 基于 Gyrator 变换的图像加密研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 15-46.
- [13] LIN Rui, LIU Qi-neng, ZHANG Cui-ling. A new fast algorithm for gyrator transform [J]. *Laser Technology*, 2012, **36**(1): 50-53.
林睿, 刘启能, 张翠玲. 一种新的 gyrator 变换的快速算法 [J]. 激光技术, 2012, **36**(1): 50-53.
- [14] TAJAHUERCE E, MATOBA O, VERRALL S C, *et al.* Optoelectronic information encryption with phase-shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(14): 2313-2320.
- [15] QIN Yi, GONG Qiong, YANG Xing-qiang. A method for accurate phase shift in two-step phase-shifting digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1282-1286.
秦怡, 巩琼, 杨兴强. 一种在二步相移数字全息中实现准确相移的方法[J]. 光子学报, 2011, **40**(8): 1282-1286.
- [16] REFREGIER P, JAVIDI B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding[J]. *Optics Letters*, 1995, **20**(7): 767-769.
- [17] QIN Yi, ZHENG Chang-bo. Color image encryption based on double random phase encoding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 326-329.
秦怡, 郑长波. 基于双随机相位编码的彩色图像加密技术[J]. 光子学报, 2012, **41**(3): 326-329.
- [18] REMENYI J, VARHEGYI P, DOMJAN L, *et al.* Amplitude, phase, and hybrid ternary modulation modes of a twisted-nematic liquid-crystal display at 400nm[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(17): 3428-3434.