第 59 卷 第 9 期 2010 年 9 月
1000-3290/2010/59(09)/6118-07

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 59, No. 9, September, 2010

优化的两步相移算法在图像加密中的应用研究*

孟祥锋[1)2)†] 彭 翔[2)] 蔡履中[1)] 何文奇[2)] 秦 琬[2)] 郭继平[2)] 李阿蒙[2)]

1)(山东大学信息科学与工程学院光学工程系,济南 250100)

2)(深圳大学光电工程学院,光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室,深圳 518060)

(2009 年 11 月 9 日收到;2009 年 12 月 7 日收到修改稿)

优化了此前提出的两步相移算法,仅通过两幅去除背景光强(或抑制直流分量)后的干涉图数据和一个(0, π)区间的相移值,就可以成功再现出原始物波场信息,无需借助于物光光强、参考光光强等其他辅助测量信息. 与菲涅耳域的双随机相位编码技术结合,该优化算法可以应用于图像加密方案中,通过计算机仿真实验验证了所提方案的可行性,并对几何密钥的灵敏度进行了测试分析.

关键词: 信息光学, 相移干涉术, 图像加密, 数字图像处理

PACC: 4225H, 4230K

1. 引 言

相移干涉术(PSI)的概念最早出现在上世纪 60 年代的电子工程领域,用来确定两个电信号的相位差[1]. 1997 年,Yamaguchi 等成功将相移技术引入到数字全息中[2],首先使参考波的相位作阶梯式或连续式变化,当相位变化到某些特定值时对干涉场(或全息图)进行采集记录,利用不同的相移算法,对记录的这些不同光强分布的干涉图(或全息图)进行计算,可数值获取被测物体的波前复振幅信息[3]. 近几年,随着高性能计算机和电荷耦合器件(CCD)的飞速发展,作为一种精密的相位测量技术,相移干涉术(PSI)已经被广泛应用于光学无损检测的诸多领域中[4—7],如数字全息显微、形貌测量、应力检测、波前重建、光学信息安全等.

传统的相移算法包括定步长相移算法[8]和等步长相移算法[9],但无论哪种算法都至少需要三幅干涉图(全息图、条纹图等)才能成功再现出原始物波场. 为了简化干涉图的记录次数及数值处理过程,有研究者开始探讨仅采用两幅干涉图(全息图、条纹图等)就可以恢复物光场的可能性[10—12]. 我们课题组提出了一种两步相移干涉术[13,14],它虽需要两幅干涉图和一个相移量,但需借助于物光或参考光光强,才能成功恢复出物光波的复振幅场分布. 最近,我们对该两步相移算法进行了优化[15],通过空域像素逐点均值法或频域低通滤波法分别抑制(或去除)两幅干涉图的背景光强(或零级谱),它无疑将传统的相移干涉术需要三幅以上干涉图减少到最少的极限情况——只需要两幅干涉图数据和一个(0, π)区间的相移值,就可以成功实现波前重建.

此优化的两步相移算法无疑可以应用到图像加密领域中,与菲涅耳域的双随机相位编码技术[16—22]结合,可以把待加密信息只隐藏到两幅干涉图数据中去,而且解密时,无需借助于其他的直接或间接测量手段. 该加密方案的优势很明显:可以降低数值计算量和存储量、提高加解密系统的传输效率等. 以下我们先介绍两步相移干涉术的算法优化,然后详细阐述基于此优化算法的图像加密方案、加密和解密过程、实验验证、可行性分析、几何参数密钥灵敏度测试等,最后给出结论.

2. 两步相移算法的优化

假设记录平面(x, y)上的物波场复振幅分布为 $U(x, y) = \sqrt{I_o(x,y)}\exp[\mathrm{i}\varphi(x, y)] = A_o(x,$

* 国家自然科学基金(批准号:60907005,60777008 和 60775021),中国博士后科学基金(批准号:200902334),深圳市科技计划项目(批准号:200734)和深圳市科技研发资金项目资助的课题.

† E-mail: xfmeng@szu.edu.cn

$y)\exp[\mathrm{i}\varphi(x,y)]$，$I_o(x,y)$，$A_o(x,y)$ 和 $\varphi(x,y)$ 分别表示物光光强、物光实振幅和相位分布. 参考波一般取与记录平面垂直的轴向平面波 $R(x,y)=\sqrt{I_r(x,y)}\exp(\mathrm{i}\delta_j)=A_r(x,y)\exp(\mathrm{i}\delta_j)$ $(j=1,2)$，其中 $I_r(x,y)$，$A_r(x,y)$ 和 δ_j 分别表示参考光光强、参考光实振幅和相位，对于两步相移干涉的情况，参考波的相移量可设 $\delta_1=0$，$\delta_2=\delta$ $(0<\delta<\pi)$，则第一幅和第二幅干涉图的光强分布可以分别表示为[13—15]

$$\begin{aligned}I_1(x,y)&=|U(x,y)+R(x,y)|^2\\&=[U(x,y)+R(x,y)][U(x,y)+R(x,y)]^*\\&=A_o^2(x,y)+A_r^2(x,y)+2A_o(x,y)A_r(x,y)\cos\varphi(x,y),\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}I_2(x,y)&=A_o^2(x,y)+A_r^2(x,y)+2A_o(x,y)A_r(x,y)\cos[\varphi(x,y)-\delta]\\&=A_o^2(x,y)+A_r^2(x,y)+2A_o(x,y)A_r(x,y)[\cos\varphi(x,y)\cos\delta+\sin\varphi(x,y)\sin\delta].\end{aligned}\tag{2}$$

下文中为了书写简便，均省略了各个参数的坐标 (x,y)，令 $a=I_o+I_r=A_o^2+A_r^2$，由(1)，(2)两式可得[13—15]

$$A_o\cos\varphi=\frac{I_1-a}{2A_r},\tag{3}$$

$$A_o\sin\varphi=\frac{I_2-I_1\cos\delta-(1-\cos\delta)a}{2A_r\sin\delta},\tag{4}$$

利用(3)，(4)两式，物光波场的复振幅可以表达为[13—15]

$$\begin{aligned}U'&=A_o\exp(\mathrm{i}\varphi)\\&=A_o\cos\varphi+\mathrm{i}A_o\sin\varphi\\&=\frac{I_1-a}{2A_r}+\mathrm{i}\frac{I_2-I_1\cos\delta-(1-\cos\delta)a}{2A_r\sin\delta},\end{aligned}\tag{5}$$

上式中，a 是物光光强和参考光光强之和，表示两幅干涉图的背景光强，对应着各自频谱域的零级谱信息. 我们此前的工作报道了获得背景光强 a 的两种辅助测量手段：1)直接用 CCD 测量和记录物光光强 I_o 和参考光光强 I_r[14]；2)仅测量参考光光强 I_r，然后通过解一个相关的一元二次方程获取 a[13]. 但这两种辅助测量手段均增加了实验复杂度.

为了避免辅助测量、增加实验的简便性与可行性，我们提出了两种从干涉图 I_1，I_2 数据中间接提取背景光强 a 的方法[15].

1)空域像素逐点均值法[23]：在空域中，采用文献[23]中报道的像素逐点均值法，干涉图 I_1，I_2 所有像素的均值强度 I_{1a}，I_{2a} 可以视为背景光强 a，其离散表达式可以写为[15,23]

$$a=I_{ja}=\frac{1}{KL}\sum_{l=0}^{L-1}\sum_{k=0}^{K-1}I_j(k\Delta x,l\Delta y),\ j=1,2.$$
$$k=0,1,\cdots,K-1,\ l=0,1,\cdots,L-1,\tag{6}$$

其中，$\sum$ 表示取和操作，Δx 和 Δy 分别表示水平和竖直方向上的像素尺寸，K 和 L 分别表示对应方向上的像素数.

2)频域低通滤波法[24]：另外一种提取 a 的方法可以采用傅里叶频谱域低通滤波技术，其流程图如图1，包含以下几个步骤[24]：(a)计算输入光强 $I(x,y)$ 的傅里叶变换(FT)，得到其频谱信息 $F(u,v)$，(b)选择合适的低通滤波函数 $H(u,v)$，与频谱信息 $F(u,v)$ 进行乘法滤波 $F(u,v)H(u,v)$，(c)对(b)中滤波的结果进行逆傅里叶变换(IFT)，(d)提取(c)中计算结果的实部，即为背景光强或零级谱信息 a.

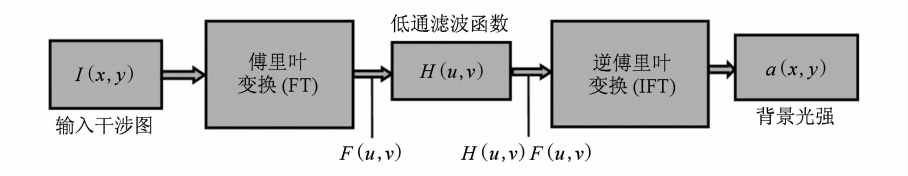

图 1　频域低通滤波法提取背景光强的流程图

最简单和常见的低通滤波器是二维理想低通滤波器(ILPF)[24]，其滤波函数可以表示为

$$H(u,v)=\begin{cases}1, & D(u,v)\leqslant D_0,\\0, & D(u,v)>D_0,\end{cases}\tag{7}$$

其中，$D(u,v)$ 为点 (u,v) 到滤波器中心的距离，D_0 为指定的非负数.

干涉图数据 I_1，I_2 减去从上述两种方法中提取的背景光强 a 后，可以得到两幅去除背景光强(或抑制直流分量)后的干涉图 I_{1s} 和 I_{2s}. 因此，(5)式的复振幅场可以被简化为[15]

$$U' = \frac{I_{1s}}{2A_r} + \mathrm{i}\frac{I_{2s} - I_{1s}\cos\delta}{2A_r\sin\delta}. \quad (8)$$

假设参考光为均匀分布的平面波,可以看出,参考光实振幅 A_r 仅出现在(8)式中的分母中,由于最后恢复的物波场实振幅都需要进行归一化操作,因此 A_r 对波前再现已经没有影响,可以在(8)式中予以省略. 所以,仅采用两幅去除背景光强后的干涉图和一个(0, π)区间的相移值,就可以成功实现波前重建[15].

3. 基于优化后两步相移算法的图像加密方案

与菲涅耳域的双随机相位编码技术[16—22]结合,优化后的两步相移算法可以应用于图像加密中,图2给出了该加密方案的光路示意图[13],两个随机相位板 Ψ_1 和 Ψ_2(随机分布在[0, 1]之间的白噪声)分别放置在物光波场的输入平面(x_0, y_0)和变换平面(x_1, y_1)中,输入平面、变换平面和记录平面(x, y)之间的距离分别为 z_1 和 z_2. 当波长为 λ 的平面波照射输入平面,在菲涅耳近似条件下,变换平面的复振幅场 U_1 可以表示为[13,18]

$$\begin{aligned} U_1(x_1,y_1) = {} & \frac{\exp\left(\mathrm{i}\frac{2\pi}{\lambda}z_1\right)}{\mathrm{i}\lambda z_1}\iint f(x_0,y_0) \\ & \times \exp[\mathrm{i}2\pi\Psi_1(x_0,y_0)] \\ & \times \exp\left\{\frac{\mathrm{i}\pi}{\lambda z_1}\times[(x_1-x_0)^2 \right. \\ & \left. + (y_1-y_0)^2]\right\}\mathrm{d}x_0\mathrm{d}y_0, \end{aligned} \quad (9)$$

其中,f 表示待加密图像. 为表述简便,我们将(9)式简写为[13,18]

$$\begin{aligned} U_1(x_1,y_1) = {} & \mathrm{FrT}_{z1}\{f(x_0,y_0) \\ & \times \exp[\mathrm{i}2\pi\Psi_1(x_0,y_0)]\}, \end{aligned} \quad (10)$$

FrT_{z1}表示对距离 z_1 的菲涅尔变换. 那么,记录平面的复波场 U 可以表示为[13,18]

$$\begin{aligned} U(x,y) = {} & \mathrm{FrT}_{z2}\{U_1(x_1,y_1) \\ & \times \exp[\mathrm{i}2\pi\Psi_2(x_1,y_1)]\}. \end{aligned} \quad (11)$$

引入与记录平面垂直的轴向平面波为参考光 $R(x, y) = A_r(x, y)\exp(\mathrm{i}\delta_j)$ $(j = 1,2)$,它在记录平面上与物光发生干涉,经过(1)和(2)式的两次曝光后,可以得到两幅含有待加密信息、并经过双随机相位板调制后的干涉图 I_1 和 I_2,至此完成了整个加密过程,其中主要密钥为两个随机相位板 Ψ_1 和 Ψ_2,其他几何参数 z_1,z_2 和 λ 可以视为辅助密钥[13,18].

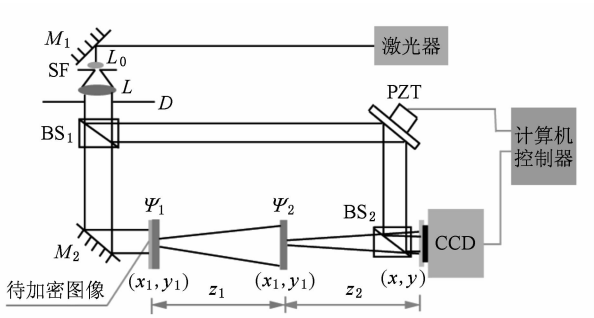

图2 加密方案的光路示意图(M 为反射镜,BS 为分束器,L 为透镜,SF 为针孔, PZT 为微位移器,D 为光阑)

两幅干涉图和所有加密密钥均传输或授权给解密方后,可以通过如下几个步骤解密出隐藏的图像信息[13—15,18]:

1)对两幅干涉图 I_1 和 I_2 进行数值分析,利用上一部分介绍的空域像素逐点均值法或频域低通滤波法提取出背景光强或零级谱信息 a.

2)用干涉图数据 I_1,I_2 减去1)中提取的背景光强 a,得到两幅去除背景光强(或抑制直流分量)后的干涉图 I_{1s}和 I_{2s}.

3)根据优化后的两步相移算法,恢复出记录平面加密后的复振幅场 U'[15],

$$U' = \frac{I_{1s}}{2} + \mathrm{i}\frac{I_{2s} - I_{1s}\cos\delta}{2\sin\delta}, \quad (12)$$

其中,由于前面已经分析了参考光为均匀平面波时,其实振幅 A_r 对波前再现没有影响,因此,(12)式的表示中,我们省略了分母中的 A_r. 也就是说,不再依赖于其他辅助测量,仅仅通过两幅干涉图就可以分析、解密出隐藏的图像信息.

4)通过两次逆菲涅尔衍射恢复出原输入平面(x_0, y_0)上的物光场复振幅 U_0[13],

$$\begin{aligned} U_0(x_0,y_0) = {} & \mathrm{IFrT}_{z1}\{\mathrm{IFrT}_{z2}[U'(x,y)] \\ & \times \exp[-\mathrm{i}2\pi\Psi_2(x_1,y_1)]\} \\ & \times \exp[-\mathrm{i}2\pi\Psi_1(x_0,y_0)], \end{aligned} \quad (13)$$

其中,IFrT 表示逆菲涅尔变换.

5)提取复振幅物体 U_0 的实振幅,然后对其进行归一化,可以解密出隐藏的振幅图像 f[13,18],

$$f'(x_0,y_0) = \frac{\mathrm{abs}(U_0) - \min[\mathrm{abs}(U_0)]}{\max[\mathrm{abs}(U_0)] - \min[\mathrm{abs}(U_0)]}, \quad (14)$$

其中，abs(·)代表取实振幅操作，max[·]和 min[·]分别代表取最大值和最小值操作.

4. 仿真实验

我们通过计算机仿真对加密系统的可行性进行了实验验证. 我们选取了标准的灰度图像“Lena”作为待加密图像，如图 3(a)所示，在此仿真实验中，所有图像的尺寸均为 256 × 256 像素，像素大小均为 15 μm，灰度级为 256. 选取的几何参数：波长 $\lambda = 532$ nm，距离参数 $z_1 = z_2 = 108.3$ mm，相移量 $\delta = \pi/10$，选取一个比物光波实振幅 A_o 最大值稍大的常数作为参考光的实振幅 A_r[13,18].

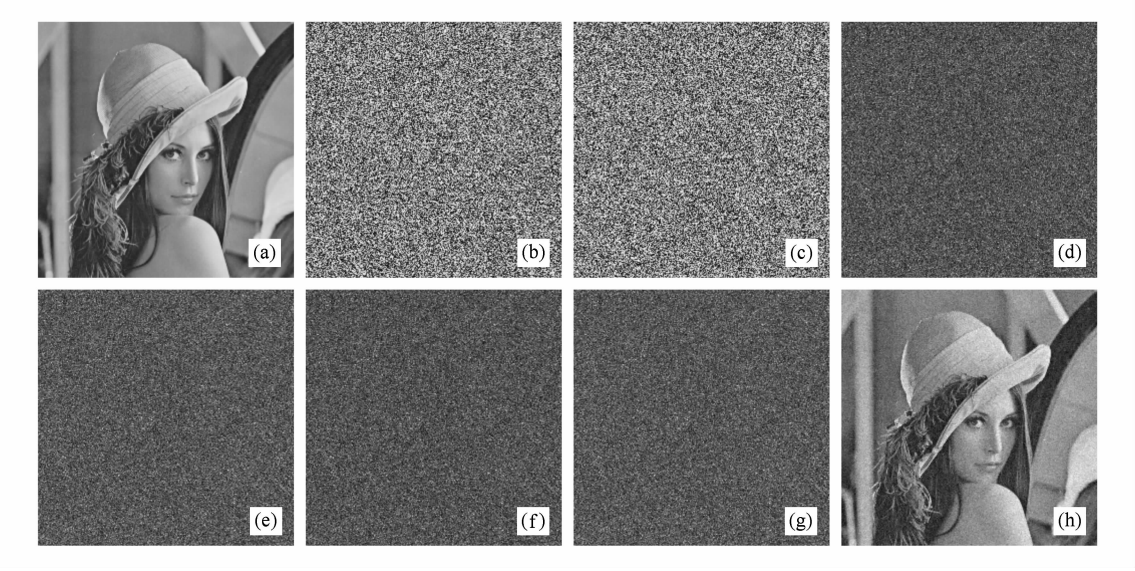

图 3　(a)待加密图像 f；(b)随机相位板 Ψ_1；(c)随机相位板 Ψ_2；(d)干涉图 I_1；(e)干涉图 I_2；(f)去除背景光强后的干涉图 I_{1s}；(g)去除背景光强后的干涉图 I_{2s}；(h)解密图像

我们采用相关系数 CC[18] 来数值评价解密图像的质量，相关系数可以表示为

$$\mathrm{CC} = \frac{\mathrm{COV}(h, h^{\mathrm{r}})}{\sigma_h \sigma_{h^{\mathrm{r}}}}, \tag{15}$$

其中，h 表示原始的待加密图像，h^{r} 表示解密图像，M 和 N 分别表示水平和垂直方向的像素数量，m 和 n 为对应方向上的像素位置，σ 是相应图像的标准差，COV(h, h^{r})代表求两幅图像的相关操作，可以定义为[18]

$$\mathrm{COV}(h, h^{\mathrm{r}}) = \mathrm{E}\{[h - \mathrm{E}(h)][h^{\mathrm{r}} - E(h^{\mathrm{r}})]\}, \tag{16}$$

其中 E[·]表示数学期望.

针对上文所介绍的两种提取背景光强的方法：空域像素逐点均值法和频域低通滤波法，我们分别进行了加密、解密测试. 图 3(b)和(c)分别给出了两个随机相位板 Ψ_1 和 Ψ_2，图 3(d)和(e)为加密后得到的两幅干涉图 I_1 和 I_2，利用空域像素逐点均值法，去除背景光强后的两幅干涉图 I_{1s}，I_{2s} 如图 3(f)和(g)所示. 当主要密钥和辅助密钥均正确使用时，解密后的图像如图 3(h)，很明显，解密图像恢复质量非常高，没有明显噪声或畸变，经计算其相关系数高达 0.972.

在频谱域，一般采用对数变换来增强频谱的视觉效果[24]，$F' = \log[1 + \mathrm{abs}(F)]$，这里 log 表示取对数操作. 使用对数变换进行视觉增强后，干涉图 I_1 和 I_2 的频谱信息分别如图 4(a)和(b)所示，为了更清晰的查看零级谱信息，将图 4(a)和(b)中心部分提取并放大后的效果，分别如图 4(c)和(d). 利用理想低通滤波器，从图 4(c)中提取出的零级谱如图 4(e)，从图 4(d)中提取出的零级谱与图 4(e)类似，在此处省略. 图 4(f)和(g)分别表示抑制直流分量后，空域中的干涉图 I_{1s}，I_{2s}. 图 4(h)给出了最后的解密图像，其相关系数为 0.972，解密质量与图 3(h)一样.

最后我们分析了几何参数误差的灵敏度曲线. 解密图像的相关系数 CC 与波长相对误差 $\Delta\lambda$ 之间

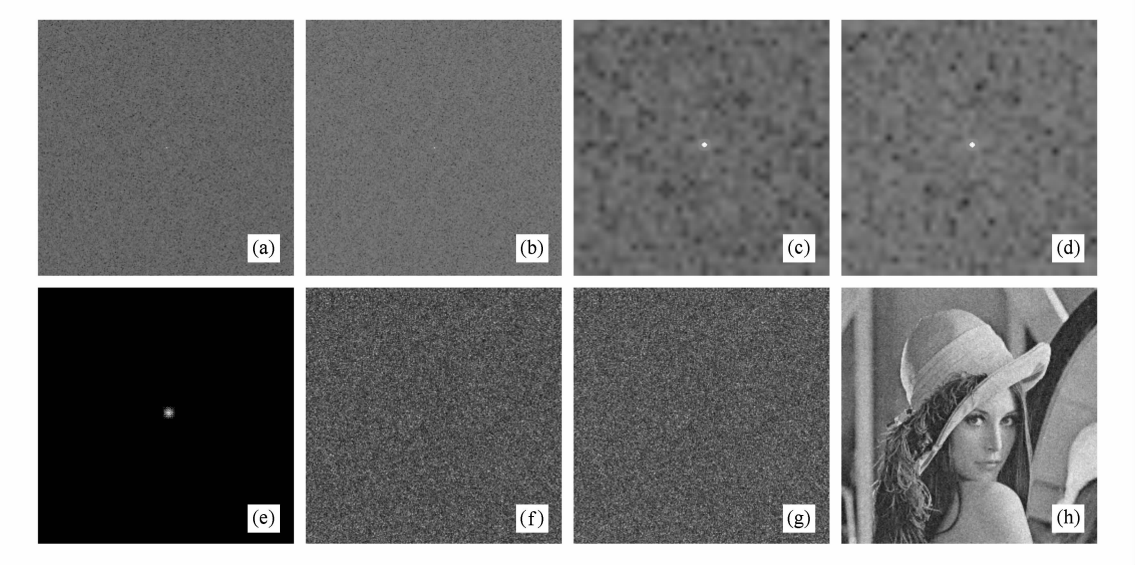

图 4 (a)使用对数变换进行视觉增强后,干涉图 I_1 的频谱信息;(b)使用对数变换进行视觉增强后,干涉图 I_2 的频谱信息;(c)对(a)的中心频谱部分放大后的效果;(d)对(b)的中心频谱部分放大后的效果;(e)从(c)中提取出的干涉图 I_1 的零级谱;(f)抑制直流分量后的干涉图 I_{1s};(g)抑制直流分量后的干涉图 I_{2s};(h)解密图像

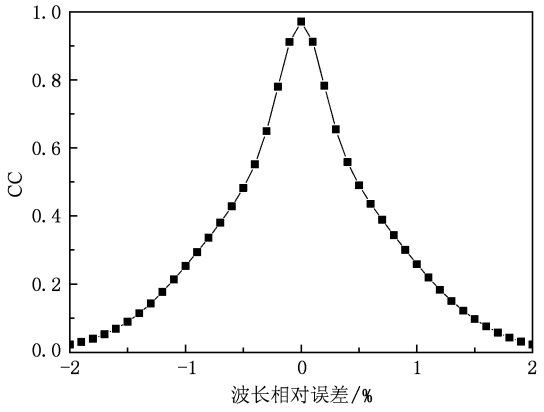

图 5 解密图像的相关系数 CC 与波长相对误差 $\Delta\lambda$ 的关系曲线

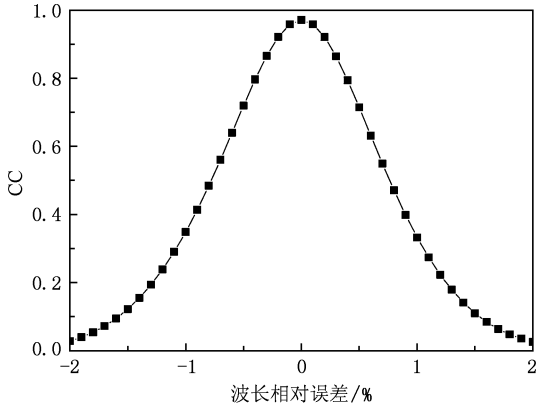

图 6 解密图像的相关系数 CC 与距离相对误差 Δz 的关系曲线

的关系曲线如图 5 所示[18]. 为了简单起见,我们固定输入平面和记录平面之间的距离不变 $z = z_1 + z_2 = 216.6$ mm,在变换平面上沿着轴向移动随机相位板 Ψ_2 微小距离 Δz,那么输入平面与变换平面、变换平面与记录平面之间的距离就分别变为 $z_1 + \Delta z$ 和 $z_2 - \Delta z$. 与图 5 类似,解密图像的相关系数 CC 与距离相对误差 Δz 之间的关系曲线如图 6. 从图 5 和图 6 不难看出,相关系数随着几何参数误差的增大而减小,而且,波长的灵敏度要高于距离参数的灵敏度.

5. 结 论

本文优化了此前提出的两步相移算法,通过空域像素逐点均值法或频域低通滤波法,将传统的相移干涉术需要三幅以上干涉图减少到最少的极限情况——只需要两幅干涉图数据和一个(0, π)区间的相移值,就可以成功实现波前重建,无需借助于其他辅助测量手段. 与菲涅耳域的双随机相位编码技术结合,我们阐述了该优化的两步相移算法在图像加密中的应用方案,并通过计算机仿真实验对其可行性进行了验证与分析. 与其他加密方案相比,其明显优势就是减少了数值计算量和存储量,降低了通讯负载,提高了加解密系统的传输效率.

[1] Carré P 1966 *Metrologia*. **2** 13

[2] Yamaguchi I, Zhang T 1997 *Opt. Lett.* **22** 1268

[3] Cai L Z, Liu Q, Yang X L 2004 *Opt. Lett.* **24** 183

[4] Guo H W, Yu Y J, Chen M Y 2007 *J. Opt. Soc. Am.* A **24** 25

[5] Luo Z Y, Yang L F, Chen Y C 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 3051 (in Chinese) [罗志勇、杨丽峰、陈永昌 2005 物理学报 **54** 3051]

[6] Guo C S, Cheng X, Ren X Y, Ding J P, Wang H T 2004 *Opt. Express* **12** 5166

[7] Xu X F, Cai L Z, Wang Y R, Yang, X L, Meng X F, Dong G Y, Shen X X, H. Zhang 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 121124

[8] Chen X, Gramaglia M, Yeazell J A 2000 *Appl. Opt.* **39** 585

[9] Schwider J, Burow R, Elssner K E, Grzanna J, Spolaczyk R, Merkel K 1983 *Appl. Opt.* **22** 3421

[10] Chen G L, Lin C Y, Yau H F, Kuo M K, Chang C C 2007 *Opt. Express* **15** 11601

[11] Ramírez J A H, Garcia-Sucerquia J 2007 *Opt. Commun.* **277** 259

[12] Guo C S, Yue Q Y, Wei G X, Lu L L, Yue S J 2008 *Opt. Lett.* **33** 1945

[13] Meng X F, Cai L Z, Xu X F, Yang X L, Shen X X, Dong G Y, Wang Y R 2006 *Opt. Lett.* **31** 1414

[14] Meng X F, Cai L Z, Wang Y R, Peng X 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 1668 (in Chinese) [孟祥锋、蔡履中、王玉荣、彭　翔 2009 物理学报 **58** 1668]

[15] Meng X F, Peng X, Cai L Z, Li A M, Guo J P, Wang Y R 2009 *Opt. Lett.* **34** 1210

[16] Refrégier P, Javidi B 1995 *Opt. Lett.* **20** 767

[17] Javidi B 2005 *Optical and digital techniques for information security* (New York: Springer)

[18] Meng X F, Cai L Z, Yang X L, Xu X F, Dong G Y, Shen X X, Zhang H, Wang Y R 2007 *Appl. Opt.* **46** 4694

[19] Peng X, Tang H Q, Tian J D 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 2629 (in Chinese) [彭翔、汤红乔、田劲东 2007 物理学报 **56** 2629]

[20] Peng X, Zhang P, Wei H Z, Yu B 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 1130 (in Chinese) [彭　翔、张　鹏、位恒政 2006 物理学报 **55** 1130]

[21] Liu F M, Zhai H C, Yang X P 2003 *Acta. Phys. Sin.* **52** 2462 (in Chinese) [刘福民、翟宏琛、杨晓苹 2003 物理学报 **52** 2462]

[22] Gai Q, Wang M W, Li Z L, Zhai H C 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 6955 (in Chinese) [盖　琦、王明伟、李智磊、翟宏琛 2008 物理学报 **57** 6955]

[23] Schnars U, Jüptner W P O 2002 *Meas. Sci. Technol.* **13** R85

[24] Gonzalez R Z, Woods R E 2002 *Digital image processing* (2*nd edition*) (Upper Saddle River: Prentice Hall)

Optimized two-step phase-shifting algorithm applied to image encryption *

Meng Xiang-Feng[1)2)†] Peng Xiang[2)] Cai Lü-Zhong[1)] He Wen-Qi[2)] Qin Wan[2)] Guo Ji-Ping[2)] Li A-Meng[2)]

1) (*Department of Optics, School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan* 250100, *China*)

2) (*College of Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen* 518060, *China*)

(Received 9 November 2009; revised manuscript received 7 December 2009)

Abstract

The two-step phase-shifting algorithm proposed previously is optimized, the original object wave field can be reconstructed by only one phase shift value in (0, π) and two interferograms, with the removal (or suppression) of background intensity (or dc term), and the additional measurements such as the object wave intensity, reference wave intensity, etc., are no longer required. Together with double random phase encoding technique in the Fresnel domain, the optimized two-step phase-shifting algorithm is then applied to image encryption system. The feasibility of the proposed scheme is verified by computer simulation. Furthermore, the sensitivity of geometrical keys has also been tested and analyzed.

Keywords: information optics, phase-shifting interferometry, image encryption, digital image processing

PACC: 4225H, 4230K

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60907005, 60777008 and 60775021), the China Postdoctoral Science Funded Project (Grant No. 200902334), the Shenzhen Program for Science and Technology (Grant No. 200734), the Science and Technology R&D Foundation of Shenzhen.

† E-mail: xfmeng@szu.edu.cn