

# 两步相移数字全息物光重建误差分析与校正\*

徐先锋<sup>†</sup> 韩立立 袁红光

(中国石油大学(华东)物理科学与技术学院, 东营 257061)

(2010年8月27日收到; 2011年1月27日收到修改稿)

系统研究了两步相移数字全息干涉术中相移误差引起的波前再现误差的计算和校正方法. 基于衍射物光相位分布的随机性和振幅相位的相互独立性原理, 介绍了相移数字全息中物光波前再现误差的表达形式, 推导出步长为  $\pi/2$  的两步算法中物光重建误差的表达式. 通过进一步分析这一重建误差的结构和特点, 结合物光表达式, 给出了自动校正相移误差引起的波前重建误差的校正方法. 该方法无需增加测量, 在未知相移误差大小的情况下, 只对标准两步相移算法恢复的物光复振幅进行处理就可以实现对物光振幅和相位的同时校正. 计算机模拟结果表明, 校正后可将物光重建误差减小两个数量级. 光学实验也令人满意地验证了该方法的有效性和高效性.

**关键词:** 相移干涉术, 数字全息, 物光重建, 误差校正

**PACS:** 42. 40. Kw, 42. 30. Wb

## 1. 引言

数字全息<sup>[1-4]</sup>结合了迅速发展的现代光电记录器件(如电荷耦合器件(CCD)等)及计算机图像处理技术, 又拥有传统全息技术可以同时记录、再现物波振幅及相位信息的优点, 还避免了传统全息的湿处理及难以精确复位等不便之处, 已成为近年来信息光学领域发展迅速的一个研究分支. 该技术可以方便准确地实施数据及图像的量化记录、存储、变换、加工等处理, 已广泛应用于生物医学、工程检测和工业测量等方面.

由于 CCD 的分辨率低, 要求离轴记录方式的物光与参考光的夹角很小, 对数字全息的实际应用带来很大限制<sup>[5]</sup>. 相移干涉术<sup>[6]</sup> (PSI) 通过引入相移技术消除了普通同轴数字全息中零级项和共轭像的干扰, 充分利用了再现物光视场, 提高了再现像的质量, 使其广泛应用于从生物显微到干涉计量等诸多领域. 该技术结合了相移干涉和数字全息的优点, 具有测量精度高、易于操作、能够实现全场测量、数字处理能力强大等优点, 大大推进了数字全息技术的发展和應用.

PSI 研究的核心问题是各种物光恢复算法, 包括定步长算法、等步长算法<sup>[7,8]</sup>、任意步长算法<sup>[9]</sup>和广义相移数字全息算法<sup>[10-13]</sup>. 对于标准定步长算法, 物光恢复方法较为简单, 但由于环境因素影响和实验条件限制, 实际应用中存在多种误差因素<sup>[14-16]</sup>. 其中相移误差<sup>[15]</sup>由相移器实际相移量与标称值的差值引起, 会引入物波振幅和相位误差, 严重影响物光再现质量. 为减小或消除相移误差对波前再现结果的影响, 一方面要提高相移器的精度, 另一方面就是增强算法对相移误差的免疫性. 在等步长算法中<sup>[8]</sup>, 通过相移设计原理选择对相移误差相对免疫的相移值可以有效减小物光波前再现误差. 同时, 对相移误差引起的物光再现误差进行校正一直是提高相移数字全息成像质量和测量精度的一个重要渠道. Cai 等<sup>[17]</sup>对三步以上定步长算法中相移误差引起的物光再现误差进行了研究, 找到了简洁有效的校正方法.

由于两步 PSI<sup>[18-22]</sup>具有使用的干涉图少、计算相对简单、对硬件的计算存储要求低、重建物光质量好精度高等优点, 对其研究和应用逐渐增多. 两步广义相移数字全息算法从干涉图中抽取相移值, 对相移误差自然免疫, 已获得很好的成像效果. 步

\* 国家自然科学基金(批准号:60977006, 60777008)、中央高等学校基本科研基金(批准号:09CX04002A)和山东省自然科学基金(批准号:ZR2009GM016)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: xuxf@upc.edu.cn

长为  $\pi/2$  的标准定步长算法<sup>[18]</sup>使用公式直接恢复物光,算法简洁,但成像效果受到相移误差的影响,需要进行误差校正.我们对两步定步长 PSI 中相移误差引起的物光再现误差形式进行了研究,得出了计算公式,进一步利用物光衍射场的随机性和振幅相位的相对独立性,找到了简单、有效、适用的校正方法.该方法无需增加光路的复杂性和其他测量,仅对两步标准相移算法恢复的物光复振幅进行简单运算就可以实现对振幅场和相位场的同时校正,可大幅度提高再现像的质量.本文首先介绍物光再现误差的计算和校正方法,然后给出计算机模拟和实验验证结果,最后得出结论.

## 2. 物光波前再现误差

在两步 PSI 记录过程中,假设光路中物平面  $P_o$  和记录平面  $P_h$  之间的距离为  $z$ ,则  $P_h$  面上物光场  $O(x, y)$  是  $P_o$  面上原始物场  $U_o(x, y)$  的非涅耳衍射.将  $P_h$  面上的物波和正入射参考波的复振幅分别记为

$$O(x, y) = A(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \quad (1)$$

和

$$R = A_r \exp(i\delta_j) \quad (j = 1, 2). \quad (2)$$

(2)式中  $A_r$  和  $\delta_j$  分别是参考光的实常数振幅和常数相位,  $A(x, y)$  和  $\varphi(x, y)$  分别为记录面上物光的实数振幅和相位.对两步标准 PSI,设参考光相位  $\delta_1 = 0, \delta_2 = \pi/2$ .由于相移误差的存在,实际相移值  $\alpha$  与  $\pi/2$  的偏离值为  $\Delta\alpha$ ,两幅干涉图的强度分别为

$$I_1(x, y) = A^2(x, y) + A_r^2 + 2A(x, y)A_r \cos[\varphi(x, y)] \quad (3)$$

和

$$I_2(x, y) = A^2(x, y) + A_r^2 + 2A(x, y)A_r \cos[\varphi(x, y) - \alpha]. \quad (4)$$

为简洁,在下面的推导过程中省略坐标  $(x, y)$ .若  $\alpha = \pi/2$ ,对应标准两步相移数字全息,由(3)和(4)式得到记录面上物光波前恢复公式

$$O = \frac{1}{2A_r} \{ (I_1 - A^2 - A_r^2) + i[I_2 - (A^2 + A_r^2)] \}. \quad (5)$$

将(5)式对  $\alpha$  微分后得到波前误差表达式

$$\begin{aligned} \Delta O &= \frac{\partial O}{\partial I_1} \Delta I_1 + \frac{\partial O}{\partial I_2} \Delta I_2 \\ &= \frac{i}{2A_r} (\Delta I_1 + \Delta I_2). \end{aligned} \quad (6)$$

因为(3)式中不含有  $\alpha$ , (3)式对  $\alpha$  的微分为零,所

以  $\Delta I_1 = 0$ .对(4)式微分有

$$\Delta I_2 = 2AA_r \sin(\varphi - \alpha) \Delta\alpha. \quad (7)$$

将  $\Delta I_1$  和  $\Delta I_2$  代入(6)式,可得

$$\Delta O = -i\Delta\alpha A \cos\varphi. \quad (8)$$

(8)式形式较简单,为一个虚数乘以物光实部.由此可知,在两步标准算法中相移误差的存在影响记录面上物光的虚部,但对原始物面上的再现物光振幅和相位都有影响.

## 3. 误差校正基本原理

依据(1)和(8)式,含有误差的物光波前为

$$\begin{aligned} O_1 &= O + \Delta O \\ &= A \cos\varphi + iA(\sin\varphi - \Delta\alpha \cos\varphi). \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式可看成一个复数,实部没有受到误差的影响,而虚部受到相移误差的影响,对波前误差有贡献.若能根据(9)式的实部信息调整虚部的大小和相应复角,则可自动完成误差校正.利用三角函数关系,(9)式等号右端括号中的部分可以写成一个常数  $\gamma$  与一个余弦函数乘积的形式,即

$$O_1 = A \cos\varphi + iA\gamma \cos(\varphi - \theta). \quad (10)$$

(10)式中,常数  $\gamma$  和常数  $\theta$  分别表示对波前虚部大小的影响和对物光相位的偏离,  $\gamma$  和  $\theta$  由相移误差  $\Delta\alpha$  决定.由衍射物光相位分布的随机性及振幅相位分布的相对独立性<sup>[23-26]</sup>可知

$$\begin{aligned} &\langle |A(x, y) \cos[\varphi(x, y) - \varphi_0] | \rangle \\ &= \langle |A(x, y) \sin[\varphi(x, y) - \varphi'_0] | \rangle \\ &= 2\langle |A(x, y) | \rangle / \pi. \end{aligned} \quad (11)$$

利用(11)式,可以得到表达式

$$\gamma = \frac{\langle |O_{li}| \rangle}{\langle |O_{lr}| \rangle} \quad (12)$$

和

$$\theta = 2 \arcsin \left\{ \frac{\langle |O_{lr} - O_{li}/\gamma| \rangle}{2\langle |O_{lr}| \rangle} \right\}. \quad (13)$$

在公式(12)和(13)中  $O_{li}(x, y)$  和  $O_{lr}(x, y)$  分别是含有误差波前的虚部和实部.相对于三步以上 PSI 校正方法<sup>[17]</sup>,公式(12)和(13)的形式更简洁,物理意义更明显.再利用公式  $O_{li}/\gamma = A \cos(\varphi - \theta) = A(\cos\varphi \cos\theta + \sin\varphi \sin\theta)$ ,能够得到

$$A \sin\varphi = \frac{O_{li}/\gamma - O_{lr} \cos\theta}{\sin\theta}. \quad (14)$$

校正后的物光波前可写成

$$O_2 = O_{lr} + i \frac{O_{li}/\gamma - O_{lr} \cos\theta}{\sin\theta}. \quad (15)$$

实际上, (15)式的实部为  $O_{1r} = A \cos \varphi$ , 校正后的虚部为  $A \sin \varphi$ , 所以有

$$O_2(x, y) = O(x, y). \quad (16)$$

从(16)式不难看出, 这一校正方法直接得到了原物光的复振幅, 进一步去掉了标准四步相移算法校正中的常数项<sup>[17]</sup>. 由此可知, 用上述方法能够在理论上得到记录面上真实物光  $O(x, y)$ , 从而使逆菲涅耳衍射后得到的待测物体的信息更接近其真实情况.

在实际校正过程中, 计算步骤也比较简便. 首先利用公式(5)和采集的干涉图强度信息  $\{I_j\}$  及物光参考光的强度计算记录平面  $P_h$  上的物场  $O_1(x, y)$ , 分离出  $O_1(x, y)$  的实部  $O_{1r}(x, y)$  和虚部  $O_{1i}(x, y)$ . 然后利用公式(12)和(13)分别计算常数  $\gamma$  和  $\theta$  (在此过程中对反正弦函数总取正值). 最后利用上述结果, 按照(15)式构造新的物场  $O_2$ .

#### 4. 计算机模拟验证

为了考察算法的有效性和准确性, 我们使用了一系列计算机模拟来检验算法的性能<sup>[21]</sup>. 模拟的光学装置和部分参数与文献[13]相同, 模拟的测试物体表面用函数表示为

$$W(x, y) = 20\lambda \sin \left\{ \left[ (x + x_0)^2 + (y + y_0)^2 \right] / 36 \right. \\ \left. + \left[ (x + x_1)^2 + (y + y_1)^2 \right] / (2R) \right\}. \quad (17)$$

其中  $R = 88 \text{ cm}$ ,  $x_0 = y_0 = 400$ ,  $x_1 = y_1 = 50$ , 像面尺寸为  $512 \times 512$ . 在本文中,  $x, y$  坐标和像面尺寸均以像素为单位, 而每一像素的大小为  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ . 使用的激光波长是  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 记录平面与原始物平面之间的距离为  $z = 216.5 \text{ mm}$ . 为了模拟实际情况, 假设  $P_0$  面上的物光强度以高斯衰减形式从中心的 1 减小为边缘上的 0.21. 模拟过程中所假设的相移误差  $\Delta\alpha = 0.21 \text{ rad}$ . 被 CCD 接收的物光场  $O = A \exp(i\varphi)$  通过待测物体复振幅  $U$  的菲涅耳衍射得到, 它与相位变化前后的参考光干涉, 形成两幅干涉图强度  $\{I_j\}$ . 记录物光、参考光强度及  $\{I_j\}$  后, 由公式(5)可以再现出存在相移误差的物光波  $O_1 = A_1 \exp(i\varphi_1)$ . 通过  $O_1$  和(12)–(15)式, 能够求出校正后的物场  $O_2 = A_2 \exp(i\varphi_2)$ .  $U_1$  和  $U_2$  分别表示  $O_1$  和  $O_2$  在原始物面  $P_0$  上的逆菲涅耳衍射.

图 1 给出了用光程差高度表示的物体表面的三维立体图. 为了直观表现原始物面上物光的校正效果, 图 2 给出了该平面上原始物光波  $U$ 、用标

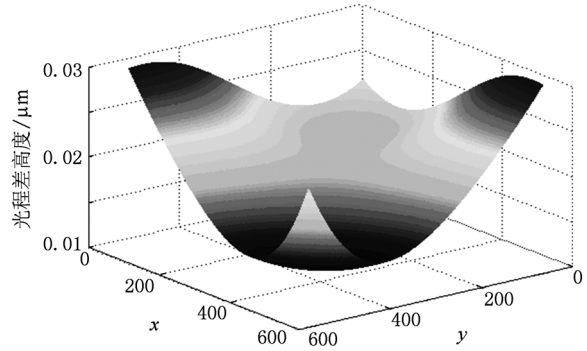


图 1 待测物体三维立体分布

准相移算法直接计算(未校正)的物光波  $U_1$  和用本文算法校正后的物光波  $U_2$  的振幅图与相位图. 图 2(a) 给出了物面  $P_0$  上原始物体表面的强度图, 图 2(c) 和(e) 分别是校正前和利用本文方法校正后重建的强度图. 图 2(b), (d) 和(f) 分别给出对应  $U, U_1$  和  $U_2$  的相位图. 由图 2(c) 和(d) 不难看出: 校正前重建物光的强度受到干扰, 出现了明显的相位图条纹; 相位图也发生了改变(在圆圈内较为明显). 误差校正后的效果可以从图 2(e) 和(f) 中看出: 影响图 2(c) 的相位场条纹被消除了, 图 2(d) 中圆圈内的条纹畸变也得到了校正. 经过校正后很难看出图 2(e) 与(a) 或图 2(f) 与(b) 的区别. 由此可知, 本文提出的校正方法可以有效实现两步标准相移算法中由相移误差造成的物光再现误差的校正. 我们也利用其他参数在同样情况下进行了一些计算, 结果基本一致, 为了简洁, 本文只给出部分结果.

为明显表现出本文提出的校正方法在改善重建物光质量方面的效果, 需要对重建物光振幅和相位的误差分布进行对比分析.  $O_1$  和  $O_2$  的各自相对振幅误差和相位误差分别按照  $\Delta A_1/A = (A_1 - A)/A$ ,  $\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \varphi$ ,  $\Delta A_2/A = (A_2 - A)/A$  和  $\Delta\varphi_2 = \varphi_2 - \varphi$  的定义计算得到. 去掉直流分量, 最终求出校正前和校正后的波前误差的变化分量  $(\Delta A/A)_v$  和  $(\Delta\varphi)_v$ .

图 3 给出了  $O_1$  和  $O_2$  的相对振幅误差  $(\Delta A/A)_v$  (图 3(a) 和(c)) 和相位误差  $(\Delta\varphi)_v$  (图 3(b) 和(d)) 在各自图像水平中心线上的误差分布. 图 3(a) 和(b) 分别对应校正前  $O_1$  的相对振幅误差和相位误差, 图 3(c) 和(d) 分别对应校正后  $O_2$  的相对振幅误差和相位误差. 从图 3 可以看出, 校正

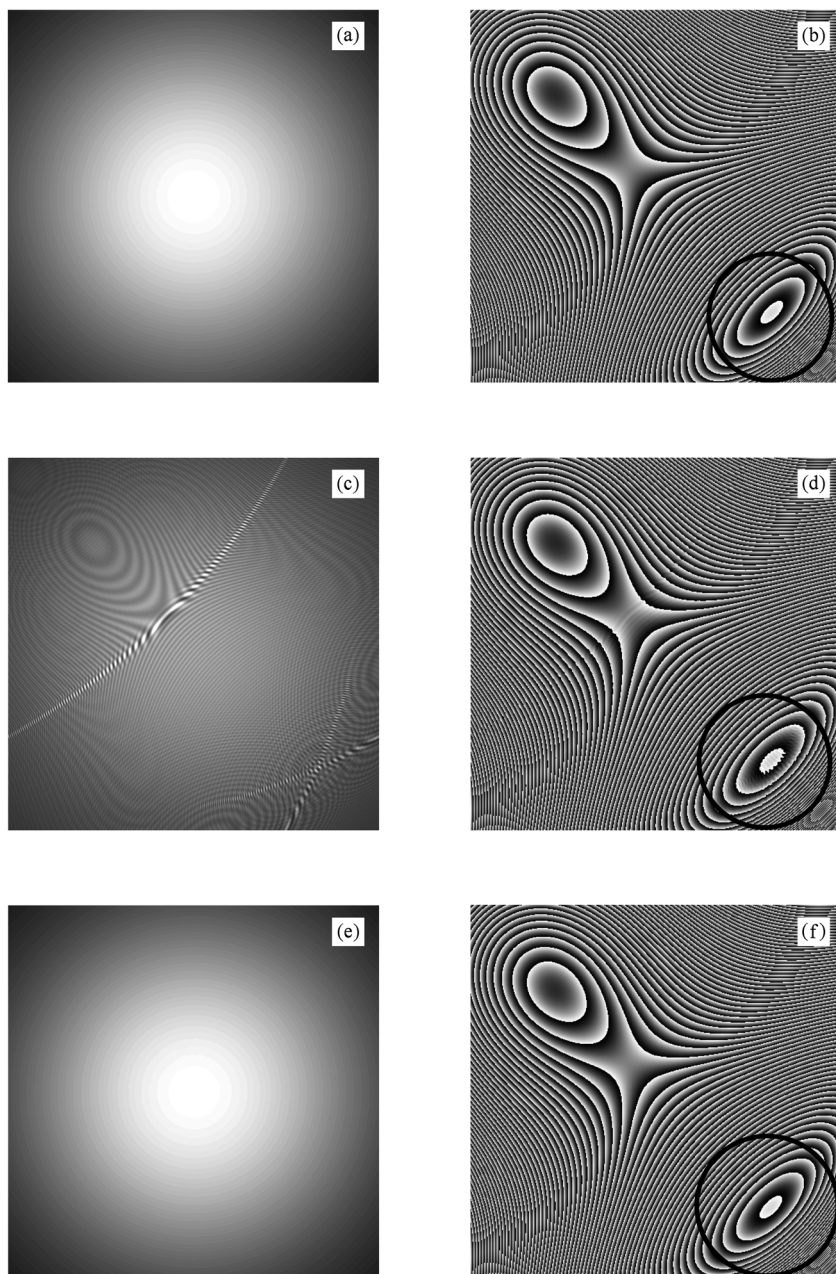


图2 原始物平面上波前校正 (a)  $U$  的振幅, (b)  $U$  的相位, (c) 校正前  $U_1$  的振幅, (d) 校正前  $U_1$  的相位, (e) 校正后  $U_2$  的振幅, (f) 校正后  $U_2$  的相位

前后物光的相对振幅误差与相位误差量值大致相等,这也验证了 Cai 等<sup>[17]</sup> 的结论. 显然,  $O_1$  的  $|(\Delta A/A)_v|$  和  $|(\Delta\varphi)_v|$  的最大值分别在 0.1 和 0.1 rad 附近, 而校正后,  $O_2$  的相应误差最大值却不到 0.001 和 0.001rad, 精度提高了约两个数量级.

分别由  $O_1$  和  $O_2$  进行逆菲涅耳变换后, 在原始物平面上物波的恢复效果如图 4 所示. 图 4(a) 和 (b) 分别对应校正前  $O_1$  的相对振幅误差和相位误差, 图 4(c) 和 (d) 分别对应校正后  $O_2$  的相对振幅

误差和相位误差. 同样可以看出, 虽然校正前相对振幅误差和相位误差分别超过了 0.2 和 0.2 rad, 但校正后两者都有了显著减小, 分别减小到 0.002 和 0.002 rad 以下. 原始物面上整体校正效果与记录面上的情况相同, 充分证明了本文所提方法的高效性. 对于记录面和原始物面上的相位误差, 校正前都出现了一些较大的离散点, 这会使物光解包出现误差积累致使解包失败. 校正后, 这些离散点都消失了, 有利于物光的三维再现.

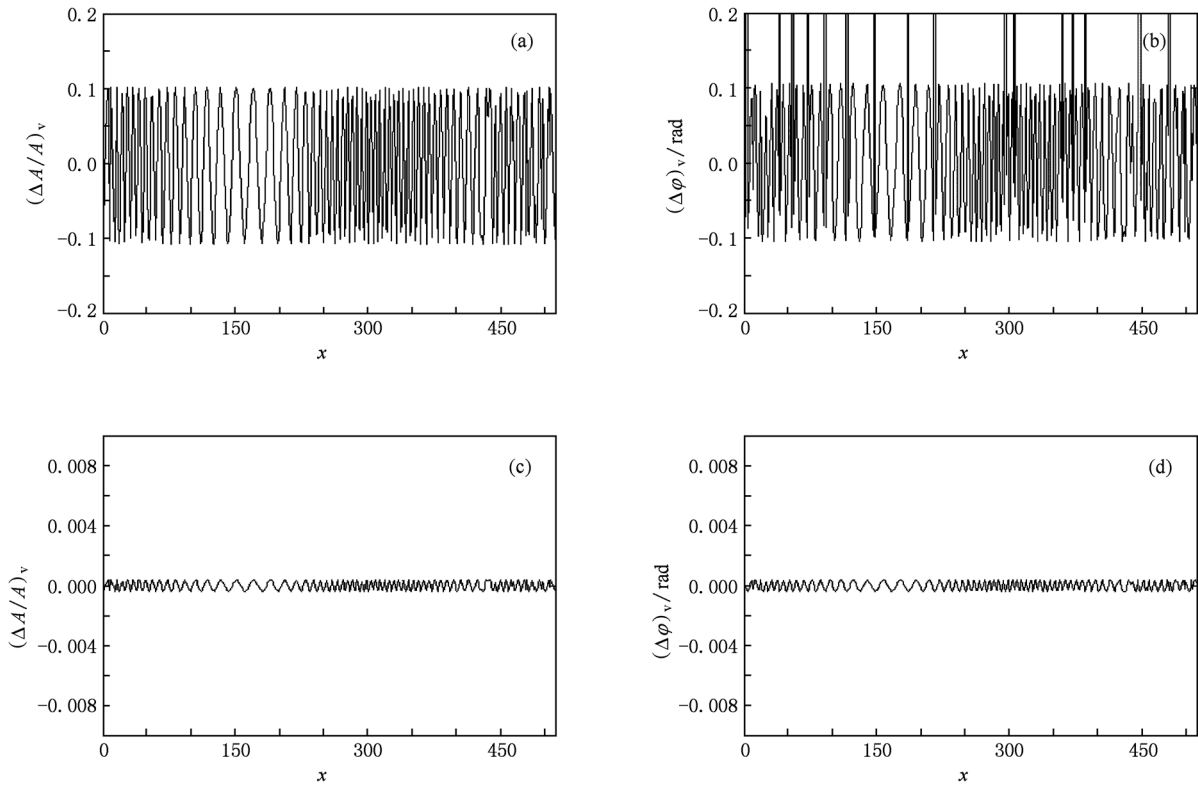


图3 记录面  $P_h$  上的波前误差 (a)校正前的相对振幅误差  $(\Delta A/A)_v$ , (b)校正前的相位误差  $(\Delta\varphi)_v$ , (c)校正后的相对振幅误差  $(\Delta A/A)_v$ , (d)校正后的相位误差  $(\Delta\varphi)_v$

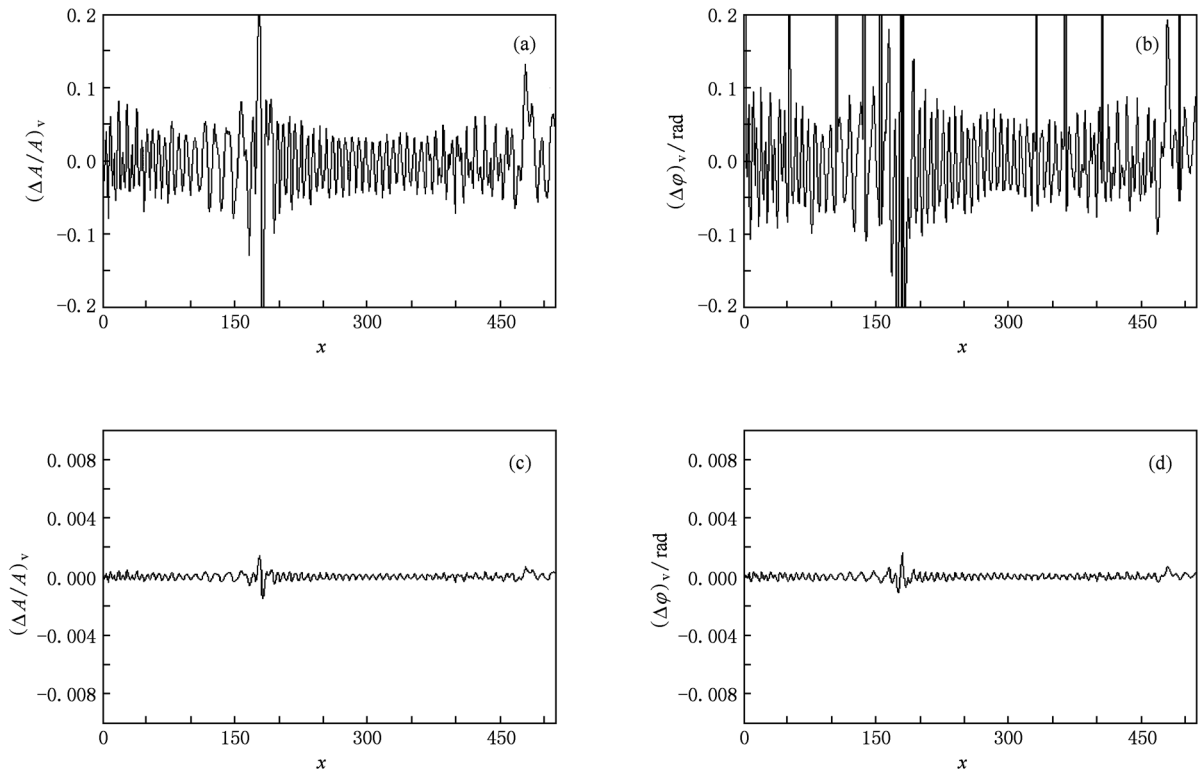


图4 原始物面  $P_o$  上的波前误差 (a)校正前的相对振幅误差  $(\Delta A/A)_v$ , (b)校正前的相位误差  $(\Delta\varphi)_v$ , (c)校正后的相对振幅误差  $(\Delta A/A)_v$ , (d)校正后的相位误差  $(\Delta\varphi)_v$

### 5. 实验验证

为了进一步证实本文方法在实际应用中的可行性,我们也做了两步 PSI 的光学实验,实验装置如图 5 所示.

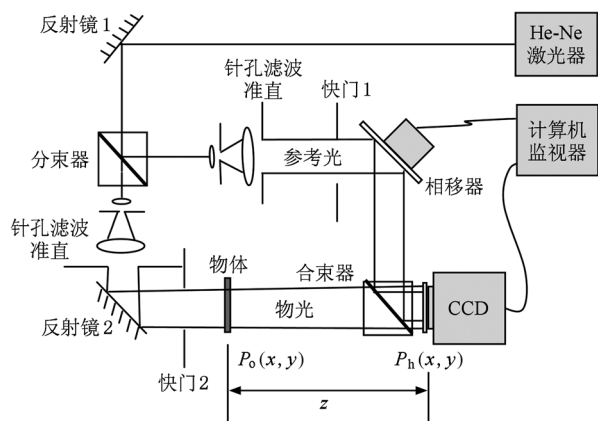


图 5 实验装置示意图

图 5 中快门 1 和快门 2 分别控制物光和参考光

的开关, He-Ne 激光器发出的激光由反射镜 1 反射,再经分束器形成透射光和反射光. 两束光分别被针孔滤波和透镜准直后形成单色平面波. 透射光被反射镜 2 反射后垂直入射到原始物平面  $P_0$  的物体上,衍射后的物光经过合束器到达距离  $z$  处的 CCD 记录面  $P_h$  上. 经过分束器后的反射光作为参考光被相移器镜面和合束器反射到  $P_h$  面上,与物光干涉产生干涉条纹,被 CCD 记录下来传输到计算机中.

实验中使用了一个波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光光源和一个压电陶瓷微移器作为相移器. CCD 的芯片具有  $1024 \times 1536$  像素,每个像素的大小是  $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ ,只有中心的  $768 \times 768$  像素部分被选为干涉图的大小,记录面  $P_h$  到物面  $P_0$  的距离  $z = 9.8 \text{ cm}$ . 物面  $P_0$  上是轻微发散的球面波,参考光是一束垂直入射的平面波. 通过快门的控制,我们首先测量了衍射物光和参考光的强度、第一幅干涉图  $I_1$ . 由相移器产生名义相移值  $\pi/2$  后,记录另一幅干涉图  $I_2$ . 使用公式(5)计算出记录面上含有误差的物光  $O_1(x, y)$ ,再用逆菲涅耳变换得到原始

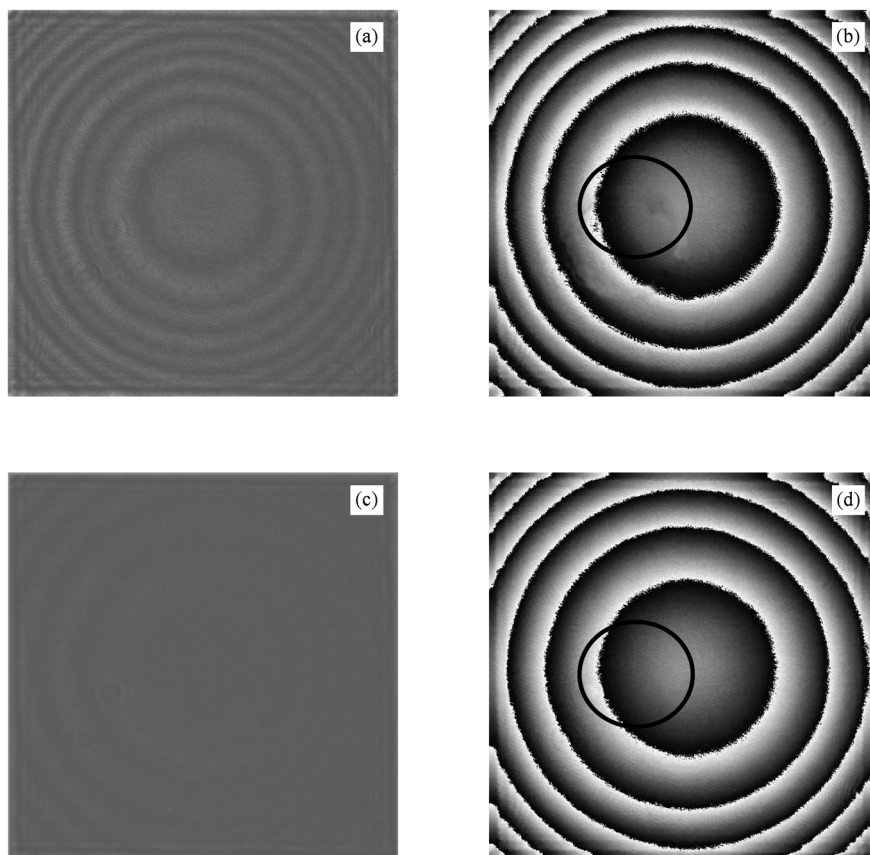


图 6 校正前后物面上重建的物光强度与相位分布 (a)校正前的强度,(b)校正前的相位,(c)校正后的强度,(d)校正后的相位

物光复振幅. 图 6(a) 和(b) 分别给出了这一重建物光的强度和相位分布, 图 6(c) 和(d) 是利用本文提出的校正方法对  $O_1(x, y)$  校正后得到的相应结果. 因为原物光是轻微发散的球面波, 重建物光的强度应为常量, 相位图应为一系列同心圆环. 由于误差的影响, 在图 6(a) 中的强度分布受到相位分布的干扰, 图 6(b) 中的相位图也发生了畸变(圆圈中的畸变较明显). 而校正后的强度分布(图

6(c)) 和相位分布(图 6(d)) 的质量都得到了明显改善.

为了更加具体量化校正前后相位分布情况, 图 7 给出了两种情况下重建原始物光相位在物面水平中心线上的分布. 从图 7 不难看出, 由于误差的影响图 7(a) 出现了若干条代表离散点的较粗的竖直线, 且斜线也发生了明显弯曲, 但在校正后的图 7(b) 中得到了明显改善.

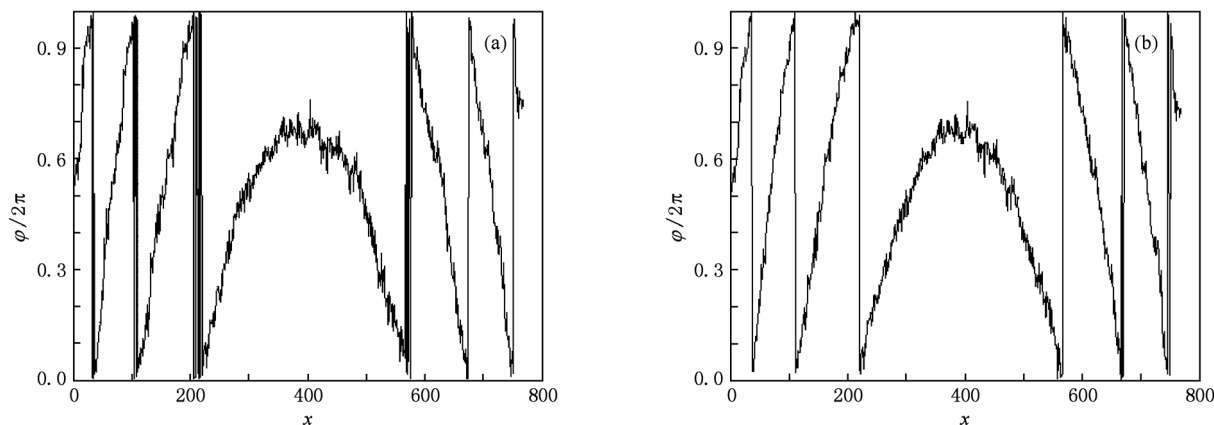


图 7 原始物面水平中心线上归一化相位分布 (a) 校正前的分布, (b) 校正后的分布

## 6. 结 论

本文提出了一种能够在两步标准 PSI 中同时校正任意相移偏差引起的再现波前振幅误差和相

位误差的方法. 该方法利用衍射相位场分布的统计特性, 可以大大减弱相移误差对物光重建的影响, 能够将相应精度提高约两个数量级. 计算机模拟和光学实验都证明了该方法的高效性和可靠性.

- [1] Goodman J W, Lawrence R W 1967 *Appl. Phys. Lett.* **11** 77
- [2] Li J C, Zhang Y P, Xu W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5385 (in Chinese) [李俊昌、张亚萍、许蔚 2009 物理学报 **58** 5385]
- [3] Zhong L Y, Zhang Y M, Lü X X, Qian X F, Xong B H 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 465 (in Chinese) [钟丽云、张以谟、吕晓旭、钱晓凡、熊秉衡 2004 光学学报 **24** 465]
- [4] Hu H F, Wang X L, Li Z L, Zhang N, Zhai H C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7662 (in Chinese) [胡浩丰、王晓雷、李智磊、张楠、翟宏琛 2009 物理学报 **58** 7662]
- [5] Leith E N, Upatnieks J 1962 *J. Opt. Soc. A* **52** 1123
- [6] Yamaguchi I, Zhang T 1997 *Opt. Lett.* **22** 1268
- [7] Patil A, Raphael B, Rastogi P 2004 *Opt. Lett.* **29** 1381
- [8] Langoju R, Patil A, Rastogi P 2007 *Appl. Opt.* **46** 8007
- [9] Greivenkamp J E 1984 *Opt. Eng.* **23** 350
- [10] Cai L Z, Liu Q, Yang X L 2003 *Opt. Lett.* **28** 1808
- [11] Cai L Z, Liu Q, Yang X L 2004 *Opt. Lett.* **29** 183
- [12] Guo H W, Yu Y J, Chen M Y 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 25
- [13] Xu X F, Cai L Z, Meng X F, Dong G Y, Shen X X 2006 *Opt. Lett.* **31** 1966
- [14] Brophy C P 1990 *J. Opt. Soc. Am. A* **7** 537
- [15] Han C, Han B 2006 *Appl. Opt.* **45** 1124
- [16] Xu X F, Cai L Z, Wang Y R, Meng X F, Cheng X C, Zhang H, Dong G Y, Shen X X 2008 *J. Opt. A* **10** 085008
- [17] Cai L Z, Liu Q, Yang X L 2004 *Opt. Commun.* **233** 21
- [18] Guo C S, Zhang L, Wang H T, Liao J, Zhu Y Y 2002 *Opt. Lett.* **27** 1687
- [19] Zhang S 2006 *Opt. Commun.* **268** 231
- [20] Xu X F, Cai L Z, Wang Y R, Yang X L, Meng X F, Dong G Y, Shen X X, Zhang H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 121124
- [21] Xu X F, Cai L Z, Wang Y R, Meng X F, Sun W J, Zhang H, Cheng X C, Dong G Y, Shen X X 2008 *Opt. Lett.* **33** 776
- [22] 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、鹏翔 2009 物理学报 **58** 1668]

- [23] Cai L Z, Liu Q, Yang X L 2005 *J. Mod. Opt.* **52** 45  
 [24] Gao P, Yao B L, Lindlein N, Mantel K, Harder I, Geist E 2009 *Opt. Lett.* **34** 3553  
 [25] Xu X F, Cai L Z, Wang Y R, Li D L 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 024215  
 [26] Xu X F, Cai L Z, Wang Y R, Yan R S 2010 *J. Opt. A* **12** 015301

## Analysis and correction of object wavefront reconstruction errors in two-step phase-shifting interferometry\*

Xu Xian-Feng<sup>†</sup> Han Li-Li Yuan Hong-Guang

(College of Physics Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Dongying 257061, China)

(Received 27 August 2010; revised manuscript received 27 January 2011)

### Abstract

The method of calculating and correcting object wave reconstruction errors caused by phase shift errors in two-step phase-shifting interferometry is studied systematically. Based on the principle of random distribution and the amplitude-phase independence of diffractive object wave, the expression of objective wave reconstruction error is introduced and the formula for that in the two-step standard algorithm is deduced. The automatic error correction method is suggested by further analyzing the structures, the characters of those errors caused by phase shift errors, and the objective expression. By the proposed method, the reconstructive amplitude and phase errors can be corrected at the same time through simple operation on the objective complex amplitude reconstructed by the standard two-step method without the additional measurement or the acknowledge of phase shift. The computer simulations are carried out to verify the effectiveness of this method, and the results show that the method is robust and reduces the effect of phase shift error on object wave-front reconstruction by about 2 orders of magnitude. Optical experiments also indicate that this method is effective and efficient.

**Keywords:** phase-shifting interferometry, digital holography, objective wave reconstruction, error correction

**PACS:** 42.40.Kw, 42.30.Wb

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60977006, 60777008), the Fundamental Scientific Research Foundation for the Central Universities of China (Grant No. 09CX04002A) and the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2009GM016).

<sup>†</sup> E-mail: xuxf@upc.edu.cn