

# 动态干涉仪干涉图位置配准及移相误差校正

郑东晖<sup>1</sup> 陈磊<sup>1</sup> 李金鹏<sup>1</sup> 朱文华<sup>1</sup> 李建欣<sup>1</sup> 韩志刚<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094

<sup>2</sup>南京理工大学先进发射协同创新中心, 江苏 南京 210094

**摘要** 为抑制动态干涉仪系统中存在的干涉图空间位置匹配误差以及移相误差,采用相位相关算法和载频交叠重构干涉术,前者以光斑边缘为匹配特征,通过配准测试光斑,实现对4幅移相干涉图在空间位置上的像素级配准;后者按列交叠重构4幅载频移相干涉图,实现相位谱与误差谱在傅里叶频谱中相分离,滤取相位谱即可抑制移相误差对测量结果的影响。实验结果显示,两种方法均可以有效抑制干涉图的位置配准误差以及移相量误差,其结果与干涉仪结果相吻合,均方根值和峰谷值分别相差 $0.0057\lambda$ 和 $0.0235\lambda$ 。相位相关算法不受光强畸变等因素的影响,而载频交叠重构干涉术可以同时抑制由移相器件造成的两倍频相位误差和由光强畸变引入的一倍频相位误差。

**关键词** 物理光学; 动态干涉; 相位相关; 像素配准; 线性载频; 移相误差

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0226002

## Position Registration for Interferograms and Phase-Shifting Error Calibration in Dynamic Interferometer

Zheng Donghui<sup>1</sup> Chen Lei<sup>1</sup> Li Jinpeng<sup>1</sup> Zhu Wenhua<sup>1</sup> Li Jianxin<sup>1</sup> Han Zhigang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

<sup>2</sup>*Advanced Launch Corporative Innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

**Abstract** To suppress the spatial mismatching and the phase-shift error in dynamic interferometer, the phase correlation algorithm and carrier squeezing interferometry are used respectively. The former takes the edge of test beam spot as the match characteristics to achieve the matching precision with pixel level of 4 phase-shift interferograms in space by registering the test spot. The latter achieves separating the phase lobe and the error lobe in Fourier spectrum through the rearranging of 4 carrier phase-shift interferograms, therefore the phase error can be suppressed by extracting the phase lobe. The experimental result shows that the mismatching error and the phase-shift error are suppressed well by the two techniques, and the corrected result accords with the interferometer, where the differences between their root-mean-square value and peak-to-valley value are  $0.0057\lambda$  and  $0.0235\lambda$  respectively. The phase correlation algorithm is not affected by factors such as intensity distortion, and the carrier squeezing interferometry can also suppress the phase error whose spatial frequency is twice the fringes caused by phase-shifting devices and phase error with the same spatial frequency as the fringes caused by the intensity distortion error.

**Key words** physical optics; dynamic interferometry; phase correlation; pixel registration; linear carrier; phase-shift error

**OCIS codes** 260.3160; 120.2650; 120.5050; 050.1950

收稿日期: 2015-08-25; 收到修改稿日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(61108041, 61409052)、中国科学院天文光学技术重点实验室项目(CAS-KLAOT-KF201404)、江苏省研究生科研创新计划(KYZZ15\_0121)

作者简介: 郑东晖(1989—),男,博士研究生,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: zdonghui\_njust@163.com

导师简介: 陈磊(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。

E-mail: chenlei@mail.njust.edu.cn (通信联系人)

## 1 引 言

动态干涉仪能够在同一时刻、不同空间位置获得多幅移相干涉图,有效地避免了振动、空气扰动等时变误差因素的影响,实现被测相位的实时测量<sup>[1-6]</sup>。目前大多数动态干涉仪均采用空间分光、偏振器件移相方案。如 Kolipoulos<sup>[7]</sup>结合薄膜分束片(PBS)和1/4波片,采用4个电荷耦合器件(CCD)同时获得4幅移相干涉图; Hettwer等<sup>[8]</sup>采用衍射光栅分出0级和±1级光,在±1级衍射光中插入1/4波片,波片快轴方向分别与P光、S光一致,3束光经检偏器后,在同一个CCD上得到3幅相位差为 $\pi/2$ 的移相干涉图; Yan等<sup>[9]</sup>采用聚合物研制延迟阵列,通过与CCD靶面的像素级匹配,实现动态干涉测量; Abdelsalam等<sup>[5]</sup>在参考光路中引入1/4波片调制参考光的偏振态,使之与测试光偏振态相互垂直,结合光栅与偏振阵列,在斐索共光路干涉仪中实现动态测量; 钱克矛等<sup>[10]</sup>采用龙基相位光栅分光、偏振片组移相,实现了对动态过程相位的测量。以上方案中均采用一个或多个CCD在同一时刻、不同空间位置获得多幅干涉图,由于干涉图在空间上是相互分离的,需要进行位置配准,否则将引入相位恢复误差<sup>[11]</sup>;同时由波片、偏振片的加工和装调引起的延迟量以及方位角误差,将导致干涉图移相量偏离理想值<sup>[12]</sup>。Kiire等<sup>[13]</sup>通过特定的方法使4幅干涉图具有相似的灰度分布,采用互相关运算确定各幅干涉图之间的位置匹配关系; Chen等<sup>[14]</sup>直接在光路中加入一个目标,分光后各干涉图中均含该目标像,采用相关运算计算位置匹配关系; 田枫等<sup>[15]</sup>基于方差分析、阈值分割和改进Hough变换的统计分析方法,提出一种圆形域同步移相干涉图位置配准方法;一些学者<sup>[13,16-18]</sup>采用迭代法和线性载频干涉图等校正移相量误差;李博等<sup>[19-20]</sup>通过圆载频处理技术得到每个子图的基频能量和相位信息,通过各子图之间的相位差校正位置匹配误差和移相量误差。

针对动态干涉仪系统中存在的干涉图空间位置匹配误差以及移相误差,本文采用相位相关算法对4幅干涉图进行像素级位置配准,校正位置匹配误差;位置配准完成后,采用载频交叠重构干涉术(CSI)校正移相量误差。

## 2 动态干涉仪的系统误差及其校正方法

动态干涉仪光路图如图1所示。偏振方向相互正交的参考光与测试光,经二维相位光栅分光,通过小孔光阑选取(±1, ±1)4支衍射效率一致的级次,分别经过延迟阵列的4个子波片,依次引入 $\pi/2$ 、 $\pi$ 、 $3\pi/2$ 、 $2\pi$ 的延迟量,最后经过透光轴与水平方向成45°的偏振片,由CCD采集得到移相量依次相差 $\pi/2$ 的4幅同步移相干涉图。该动态干涉系统基于光栅分光、延迟阵列移相,干涉图空间位置不匹配、移相量不准确为系统中重要的误差。

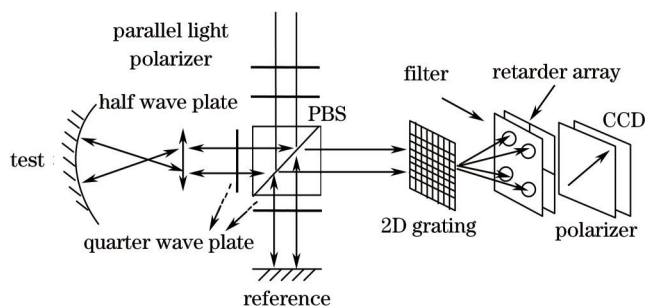


图1 动态干涉仪光路图

Fig.1 Light path of dynamic interferometer

由于干涉图空间位置不匹配导致的相位恢复误差,称之为失配误差<sup>[11]</sup>,可以表示为

$$\Delta\varphi = \frac{1 + \cos 2\varphi}{4} \left[ \frac{\partial\varphi}{\partial x} (\Delta x_0 + \Delta x_2) + \frac{\partial\varphi}{\partial y} (\Delta y_0 + \Delta y_2) \right] + \frac{1 - \cos 2\varphi}{4} \left[ \frac{\partial\varphi}{\partial x} (\Delta x_1 + \Delta x_3) + \frac{\partial\varphi}{\partial y} (\Delta y_1 + \Delta y_3) \right], \quad (1)$$

式中 $\varphi$ 表示待测相位,  $(\Delta x_n, \Delta y_n)$ 表示第 $n$ 幅干涉图引入的 $x$ 方向以及 $y$ 方向的空间位置匹配误差。因此,在解算待测相位前需要对4幅移相干涉图的空间位置进行配准。

除此以外,系统中的移相器件引入的移相量误差会导致测量误差。一些采用了类似动态干涉系统结构的误差分析已经表明<sup>[21-22]</sup>,最主要的误差源就是作为空间移相器的偏振器件的加工或放置偏差,而其他偏振

器件导致的测量误差微乎其微。系统中偏振片透光轴方位角误差只改变干涉图的对比度,不会产生移相量误差;理想情况下,系统中作为移相器的延迟阵列4个子波片快轴均沿水平方向,由于加工和装调的原因,快轴方位角存在偏差,由快轴方位角偏差  $\Delta\theta_n$  引入的移相量误差  $\Delta\delta_{n1}$  可以表示为<sup>[12]</sup>

$$\Delta\delta_{n1} = \Delta\theta_n \cdot \cos\delta_n \sqrt{2 - 2\cos\delta_n} \cdot \left[ \sin\left(\tan^{-1}\frac{\sin\delta_n}{\cos\delta_n - 1}\right) - \sin\delta_n \right], \quad n = 0, 1, 2, 3, \quad (2)$$

式中  $\delta_n$  表示延迟量的名义值,令子波片自身的延迟量误差为  $\Delta\delta_{n2}$ ,则干涉图光强可以表示为

$$I_n = s_0 \left[ 1 + V \cos\left(\varphi + \frac{n\pi}{2} + \Delta\delta_n\right) \right], \quad n = 0, 1, 2, 3, \quad (3)$$

式中  $s_0$  表示入射光强,  $V$  为调制度,  $\varphi$  为待测相位,  $\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n1} + \Delta\delta_{n2}$ 。由以上分析可知,子波片的延迟量误差以及快轴方位角误差实表现为干涉图的移相量误差。

针对动态干涉仪系统中的失配误差与移相误差,一方面,采用相位相关算法(PCA)可以校正干涉图的空间位置匹配误差,实现4幅移相干涉图在空间位置上的精确配准;另一方面,采用CSI可以抑制系统中移相器件产生的移相误差。

### 2.1 基于PCA的干涉图空间位置配准方法

PCA是一种基于傅里叶平移特性的平移参数估计方法,它建立了图像在空域的平移运动和频域线性相位差变化的对应关系。即当一幅图像平移运动之后,其频谱与原始图像相比发生了线性相移,提取该线性相移信息就可以确定空间平移量。该方法常用于光学遥感中高分辨率图像的亚像素匹配,其特点是对图像的阶跃点敏感,能够根据图像的细节部分实现匹配<sup>[23]</sup>。一幅图像  $f_0$  在空域产生平移后,令其为  $f_1$ ,两者可以表示为

$$f_0 = f(x, y), \quad (4)$$

$$f_1 = f(x - \Delta x_1, y - \Delta y_1), \quad (5)$$

式中  $(\Delta x_1, \Delta y_1)$  表示  $f_1$  相对  $f_0$  沿  $x$  轴和  $y$  轴的平移量,分别对  $f_0$  和  $f_1$  作傅里叶变换,设图像大小为  $M \times N$ ,可以得到

$$F_0(u, v) = F(u, v), \quad (6)$$

$$F_1(u, v) = F(u, v) \exp\left[-j2\pi\left(\frac{u\Delta x_1}{M} + \frac{v\Delta y_1}{N}\right)\right]. \quad (7)$$

计算两者的归一化功率谱,对归一化功率谱进行傅里叶逆变换,得到单位脉冲函数为

$$C(x, y) = FT^{-1}\left(\frac{FT\{f_1\} \cdot FT\{f_0\}^*}{|FT\{f_1\}| \cdot |FT\{f_0\}|}\right) = \delta(x - \Delta x_1, y - \Delta y_1), \quad (8)$$

式中\*为取共轭运算,  $\delta$  为狄拉克函数。得到  $f_1$  相对  $f_0$  沿  $x$  轴和  $y$  轴的平移量  $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ :

$$\begin{cases} \Delta y_1 = -(M - x + 1), & x > M/2 \\ \Delta y_1 = x - 1, & x < M/2 \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Delta x_1 = -(N - y + 1), & y > N/2 \\ \Delta x_1 = y - 1, & y < N/2 \end{cases}. \quad (10)$$

图1所示基于光栅分光、延迟阵列移相的动态干涉仪,CCD在获取4幅同步移相干涉图后,需对干涉图进行分割配准,旋转半波片,使参考光消光,得到4个测试光光斑,对4个光斑进行分割配准,以其中一个光斑为基准,采用PCA计算其他3个测试光斑相对基准测试光斑的平移量,实现同步移相干涉图的空间位置配准。

### 2.2 基于CSI的移相误差校正方法

CSI通过在4幅移相间隔为  $\pi/2$  干涉图中引入线性载频,对4幅干涉图交叠重构得到载频挤压条纹图,对其进行傅里叶变换,由于线性载频的存在,使得误差谱与相位谱相分离,提取相位谱即可实现相位的精确重构<sup>[24]</sup>。动态干涉仪中的移相误差主要表现为波片组的延迟量误差、由加工和装调产生的波片组快轴方位角误差引入的延迟量误差,CSI不受移相误差形式的限制,可以实现对以上误差的联合校正。

引入适当的线性载频  $f_c$ ,一般取每幅干涉图15~25根条纹,得到4幅同步移相干涉图,按列交叠重构得

到载频挤压条纹图,并对载频挤压条纹图做二维傅里叶变换。在载频挤压条纹图的全局线性载频  $\pm f_0$  附近,分别有一个与其距离为  $2f_c$  的误差谱旁瓣,表示为

$$S(f_0 + f_c, 0) = \frac{s_0 V}{2} (1 + R_1) \hat{\Theta}_{+1}(u - f_0 - f_c, v), \quad (11)$$

$$S(f_0 - f_c, 0) = \frac{s_0 V}{2} R_2 \hat{\Theta}_{-1}(u - f_0 + f_c, v), \quad (12)$$

式中  $R_1 = -\frac{1}{4i} \sum_{n=0}^3 (\Delta\delta_{n1} + \Delta\delta_{n2})$ ,  $R_2 = -\frac{1}{4i} \sum_{n=0}^3 (\Delta\delta_{n1} + \Delta\delta_{n2}) \exp(-i4\pi n f_0)$ , 均为误差因子,  $\hat{\Theta}_{\pm 1} = FT[\exp(\pm i\hat{\phi} + 2\pi f_c x')]$   $= \hat{\Theta}_{\pm 1}(f_x \mp f_c, f_y)$ , 式中  $x'$  为扩展坐标,  $\hat{\phi}$  为  $\phi$  在  $x$  方向的扩展相位。采用合适的高斯滤波器  $G(u, v)$  提取(11)式表示的相位谱,恢复扩展相位  $\hat{\phi}$ :

$$\hat{\phi}(x', y) + 2\pi(f_c + f_0)x' = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{FT^{-1}[S(u, v)G(u, v)]\}}{\text{Re}\{FT^{-1}[S(u, v)G(u, v)]\}} = \tan^{-1} \frac{\text{Im}\{I_0 V (1 + R_1) \exp(i\hat{\phi} + i2\pi f_c + i2\pi f_0)\}}{\text{Re}\{I_0 V (1 + R_1) \exp(i\hat{\phi} + i2\pi f_c + i2\pi f_0)\}}, \quad (13)$$

由(13)式可知,误差项  $R_1$  在运算中通过除法消除,将(11)式表示的展宽相位恢复到原始大小,进行解包得到原始待测相位。

### 3 数值仿真

设由波片延迟量精度和快轴方位角误差引入的延迟量误差在  $(-\pi/9, \pi/9)$  内随机取值。倾斜泰曼干涉仪的参考镜,在  $x$  方向引入载频,构造如图 2(a)所示的移相干涉图,背景光强呈高斯分布,待测相位包含球差和象散。以干涉图  $I_0$  为基准,干涉图  $I_1$  相对  $I_0$  的空间偏移量为  $(-8 \text{ pixel}, -10 \text{ pixel})$ , 干涉图  $I_2$  相对  $I_0$  的空间偏移量为  $(6 \text{ pixel}, 5 \text{ pixel})$ , 干涉图  $I_3$  相对  $I_0$  的空间偏移量为  $(-4 \text{ pixel}, -3 \text{ pixel})$ 。

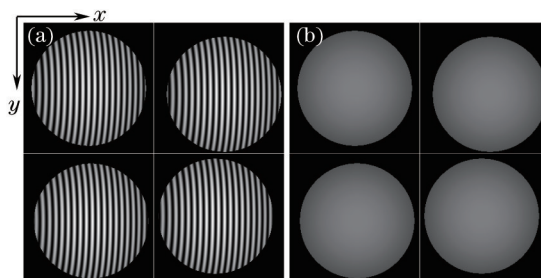


图 2 (a) 含有位置匹配误差与移相量误差的仿真干涉图; (b) 仿真测试光斑图

Fig.2 (a) Simulation interferograms with mismatching error and phase shift error; (b) simulation test light spots with registration

#### 3.1 PCA 干涉图空间位置配准

在图 2(a)所示仿真干涉图基础上,得到如图 2(b)所示的没有干涉条纹的测试光斑,对光斑  $f_0$  和  $f_1$  进行傅里叶变换,计算归一化功率谱,再进行傅里叶逆变换,得到如图 3 所示的脉冲函数,通过坐标寻址运算找出脉冲函数的峰值坐标(210,208),根据(9)式和(10)式计算出空间偏移量为  $(-8, -10)$ , 即干涉图  $I_1$  相对干涉图  $I_0$  分别沿  $x$  和  $y$  方向偏离 8 pixel 和 10 pixel。同样地,可以得到干涉图  $I_2$  相对  $I_0$  的偏移量  $(6 \text{ pixel}, 5 \text{ pixel})$ , 干涉图  $I_3$  相对  $I_0$  的偏移量  $(-4 \text{ pixel}, -3 \text{ pixel})$ , 与预设值相同。

#### 3.2 CSI 抑制移相误差

对 4 幅移相干涉图进行空间位置配准后,按列进行交叠重构,得到如图 4(a)所示的载频挤压条纹图,对其进行傅里叶变换,得到如图 4(b)所示的傅里叶频谱,由于原始干涉图中引入了载频  $f_c$ , 相位谱与误差谱相互分离,滤取出相位谱就可以正确恢复相位。利用移相干涉算法(PSI)直接从 4 幅干涉图中求解得到的相位分布如图 5(a)所示,由于移相误差的存在,在相位分布中存在波纹现象,波纹的空间频率是干涉条纹频率的两倍。利用 CSI 求解得到的相位分布如图 5(b)所示,由于排除了移相误差,相位分布中的波纹消失。

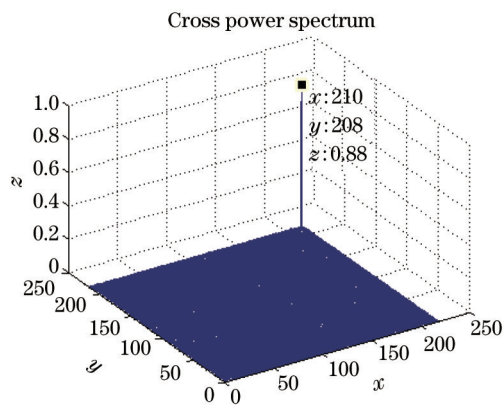


图3 PCA算法得到的脉冲函数

Fig.3 Impulse function with PCA

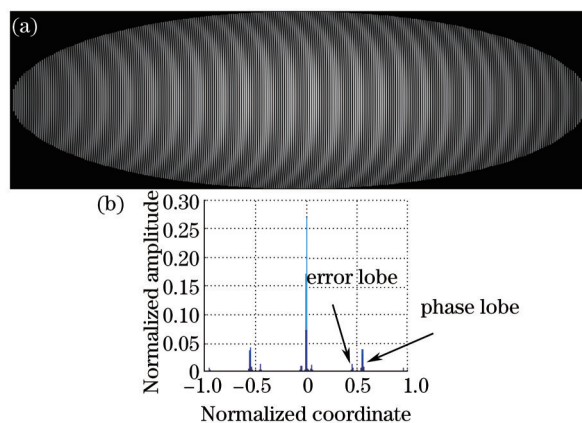


图4 (a) 载频挤压条纹图; (b) 载频挤压条纹频谱图

Fig.4 (a) Carrier frequency squeezing interferogram; (b) spectrum of carrier frequency squeezing interferogram

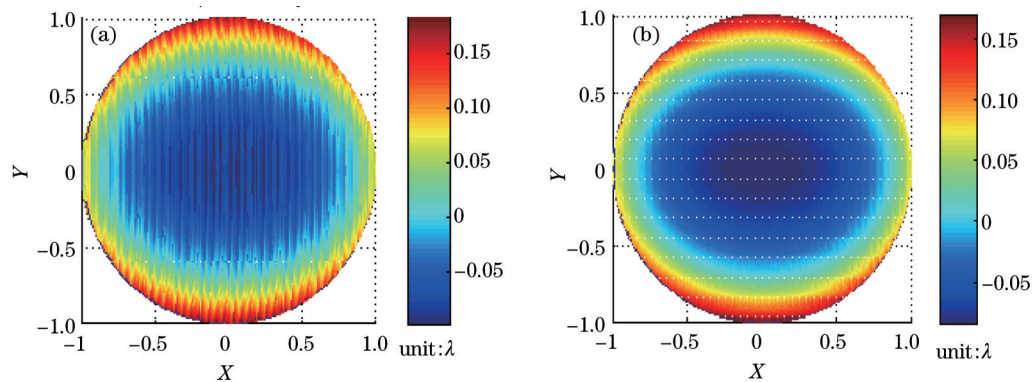


图5 (a) PSI相位解调结果; (b) CSI相位解调结果

Fig.5 (a) Phase derived by PSI; (b) phase derived by CSI

## 4 实验结果

基于图1所示的动态干涉仪光路图,搭建了实验系统,波长为632.8 nm。采用中心波长为632.8 nm的He-Ne激光器;分光器件采用二维棋盘相位光栅,光栅周期40 μm;延迟阵列采用1/4波片、1/2波片、3/4波片及全波片胶合件,4个子波片快轴方向一致,均沿水平方向,波片材料为石英晶体;CCD相机采用Imaging Source DMK 23G374 Gigabit Ethernet camera。对一块球面镜进行测试,得到如图6(a)所示的4幅载频同步移相干涉图。对4幅同步移相干涉图进行分割,同时转动半波片,使参考光消光,得到如图6(b)所示的没有干涉条纹的4个光斑。采用PCA算法对图6(b)所示4个光斑进行空间位置配准,以光斑 $f_0$ 为基准,计算得到光

斑  $f_1$  相对光斑  $f_0$  的位置偏移量为(0 pixel,0 pixel),光斑  $f_2$  相对光斑  $f_0$  的位置偏移量为(0 pixel,2 pixel),光斑  $f_3$  相对光斑  $f_0$  的位置偏移量为(-1 pixel,1 pixel)。

校正完位置匹配误差后,采用 CSI 算法对 4 幅干涉图进行重构得到载频挤压条纹图,经傅里叶变换提取相位谱,得到的结果如图 7 所示。图 7(a)所示为直接采用 4 步移相算法解算得到的待测相位分布,峰谷(PV)值为  $0.4555 \lambda$ ,均方根(RMS)值为  $0.0720 \lambda$ ,结果中存在明显的波纹误差,周期为条纹周期的两倍;图 7(c)所示为动态干涉仪(4D PhaseCam6000)测试结果,PV 值为  $0.3346 \lambda$ ,RMS 值为  $0.0570 \lambda$ ;图 7(b)所示为采用 CSI 算法对移相误差进行抑制后解算得到的待测相位分布 PV 值为  $0.3581 \lambda$ ,RMS 值为  $0.0627 \lambda$ ,由移相误差引入的波纹误差得到有效抑制,结果与 4D PhaseCam6000 测试结果相吻合。

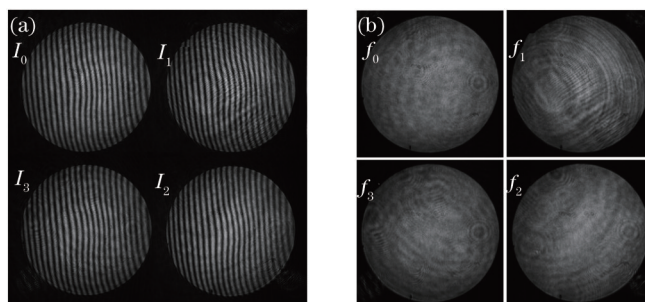


图 6 (a) 实验采集得到载频同步移相干涉图; (b) 待配准光斑图

Fig.6 (a) Experimental simultaneous phase-shifting interferograms with carrier frequency; (b) light spots with registration

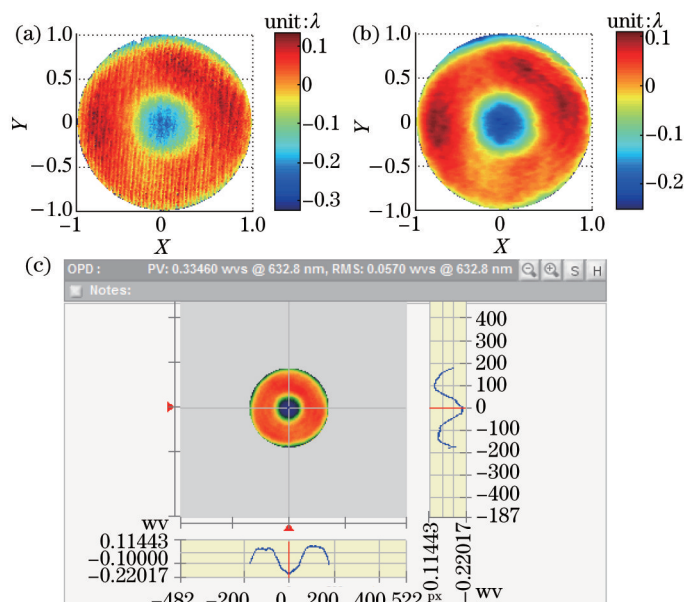


图 7 (a) PSI 相位解调结果; (b) CSI 相位解调结果; (c) 4D PhaseCam6000 测试结果

Fig.7 (a) Phase derived by PSI; (b) phase derived by CSI ; (c) phase measured by 4D PhaseCam6000

## 5 讨 论

### 5.1 光强畸变误差

参考光与测试光经光栅衍射后,处于共光路系统中,因此可以认为由光栅衍射产生的波前畸变对测量结果没有影响,考虑光栅衍射引入的光强匹配误差,设理想背景光强为  $I_0$ ,4 幅干涉图的光强畸变系数(光强畸变量与理想背景光强的比值)分别为  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ ,则 4 幅干涉图的光强表达式为

$$I_i = I_0(1 + a_i) \left[ 1 + \cos\left(\varphi + \frac{i\pi}{2}\right) \right], \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (14)$$

则由光强匹配误差产生的测量误差为

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_4} - \varphi, \quad (15)$$

对于误差小量,有

$$\Delta\varphi \approx \tan(\Delta\varphi) = \frac{\frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_4} - \tan \varphi}{1 + \frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_4} \tan \varphi} = \frac{(I_3 - I_1)\cos \varphi - (I_2 - I_4)\sin \varphi}{(I_2 - I_4)\cos \varphi + (I_3 - I_1)\sin \varphi}, \quad (16)$$

对(16)式作泰勒级数展开,得

$$\Delta\varphi \approx \frac{1}{2} \left[ (a_3 - a_1)\sin \varphi + (a_4 - a_2)\cos \varphi + \frac{1}{2}(a_4 + a_3 - a_2 - a_1)\sin 2\varphi \right], \quad (17)$$

因此光强畸变产生的相位误差与干涉条纹周期相同。实验装置中采用棋盘相位光栅,采用熔石英材料,其占空比为0.5,选取 $(\pm 1, \pm 1)$ 4支衍射级次,相关的分析表明<sup>[25]</sup>,采用该类型的棋盘相位光栅, $(\pm 1, \pm 1)$ 4支衍射级次的衍射效率相对误差为1.46%,在此基础上仿真分析4幅干涉图光强不匹配情况下的测量误差。其中一组仿真结果如图8所示,图8(a)为其中一帧仿真干涉条纹图,图8(b)为4步移相算法解算结果,相位分布图中存在一倍条纹周期的波纹误差,图8(c)为CSI解调结果,波纹误差得到明显的抑制。因此,采用CSI法也可以抑制光强不匹配引入的一倍频相位误差。

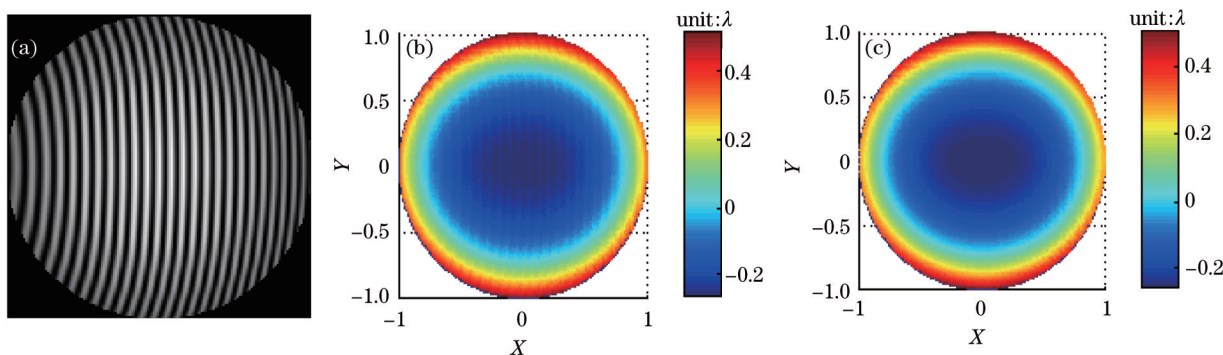


图8 (a) 其中一帧干涉图; (b) PSI相位解调结果; (c) CSI相位解调结果

Fig.8 (a) One of the interferograms; (b) phase derived by PSI; (c) phase derived by CSI

## 5.2 干涉图载频的选取

为了使恢复的相位不受移相误差的影响,要求载频  $f_c$  大小能使得相位谱与误差谱之间不发生混叠。二者分别对 $\pm 1$ 级相位频谱  $\Phi_{\pm 1}$  进行了调制,而调制的系数为  $(1 + R_1)$  和  $R_2$ , 由于移相误差  $\Delta\delta$  通常为小量,因此  $R_2$  的幅度将明显小于  $(1 + R_1)$ 。设相位谱的半宽度为  $H$ , 误差谱的半宽度为  $H'$ , 有

$$H' = R_{21}H, \quad (18)$$

式中  $R_{21} = R_2 / (1 + R_1)$ , 则载频要求为

$$f_c \geq \frac{H' + H}{2} = \frac{1 + R_{21}}{2} H. \quad (19)$$

由于载频挤压条纹图载频  $f_0$  远大于背景光强频谱的半宽度,因此干涉图背景光强不均匀分布对测试结果没有影响。

## 6 结 论

针对动态干涉仪系统中存在的干涉图位置配准误差和移相量误差,采用相位相关算法,以测试光斑为匹配特征,可以实现4幅移相干涉图在空间位置上的像素级配准,该方法不受光强畸变等因素的影响;采用CSI法,通过构造载频挤压条纹图,可以实现相位谱与误差谱的分离,提取相位谱即可抑制移相误差的影响,可以同时抑制由移相器件造成的两倍频相位误差和光强畸变引入的一倍频相位误差,同时不受误差形式的限制,实现了对系统中移相器件由加工和装调产生的方位角误差、延迟量误差引入的移相量误差的联合校

正,通过仿真和实验验证了以上方法的可行性,适用于分光结构的动态干涉系统。

## 参 考 文 献

- 1 Daniel Malacara. Optical Shop Testing, Third Edition[M]. New Jersey : Wiley-Interscience Press, 2007.
- 2 Wangping Zhang, Xiaoxu Lu, Leihuan Fei, *et al.*. Simultaneous phase-shifting dual-wavelength interferometry based on two-step demodulation algorithm[J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5375-5378.
- 3 Leihuan Fei, Xiaoyu Lu, Hailing Wang, *et al.*. Single-wavelength phase retrieval method from simultaneous multi-wavelength in-line phase-shifting interferograms [J]. Optics Express, 2014, 22(25): 30910-30923.
- 4 Noel-Ivan Toto-Arellano, David Serrano-García, Luis García-Lechuga, *et al.*. Dynamic phase profile of a thin flame using a single-shot polarizing phase shifting interferometry[C]. Imaging and Applied Optics , 2013, JTU4A.31.
- 5 D G Abdelsalam, Baoli Yao, Peng Gao, *et al.*. Single-shot parallel four-step phase-shifting using on-axis Fizeau interferometry[J]. Applied Optics, 2012, 51(20): 4891-4895.
- 6 Li Jinpeng, Chen Lei, Zhu Wenhua, *et al.*. Point diffraction interferometry based on phase demodulation technique for circular carrier interferogram[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112001.  
李金鹏, 陈 磊, 朱文华, 等. 基于圆载频干涉图相位解调技术的点衍射干涉术[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112001.
- 7 C L Koliopoulos. Simultaneous phase shift interferometer[C]. SPIE, 1991, 1513: 119-127.
- 8 A Hettwer, J Kran, J Schwider. Three channel phase-shifting interferometer using polarization-optics and a diffraction grating[J]. Optical Engineering, 2000, 39(4): 960-966.
- 9 Peizheng Yan, Keyi Wang, Pengcheng Cui, *et al.*. Single-exposure polarization phase-shifting interferometer using an azo-polymer orientation array[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 73: 75-79.
- 10 Qian Kemaoy, Miao Hong, Wu Xiaoping. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(1): 64-67.  
钱克矛, 缪 泓, 伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 64-67.
- 11 Qian Kemaoy, Wu Xiaoping, Anand Asundi. Grating-based real-time polarization phase-shifting interferometry: error analysis[J]. Applied Optics, 2002, 41(13): 2448-2453.
- 12 Zheng Donghui, Chen Lei, Li Bo, *et al.*. Research on phase-shifting characteristic of retarder array in simultaneous phase-shifting interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412004.  
郑东晖, 陈 磊, 李 博, 等. 同步移相干涉仪中的延迟阵列移相特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412004.
- 13 Tornohiro Kiire, Suezou Nakadate, Masato Shibuya. Phase-shifting interferometer based on changing the direction of linear polarization orthogonally[J]. Applied Optics, 2008, 47(21): 3784-3788.
- 14 Terry Yuan-Fang Chen, Yi-Liang Du. One-shot surface profile measurement using polarized phase-shifting[C]. SPIE, 2009, 7511: 751102.
- 15 Tian Feng, Bai Fuzhong, Wu Yaqin, *et al.*. Position registration for simultaneous phase-shifting interferograms based on statistical analysis method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6):0626001.  
田 枫, 白福忠, 吴亚琴, 等. 基于统计分析方法的同步移相干涉图位置配准[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0626001.
- 16 Y J Yu, J Peng, Z Q Wang. Spatial phase-shifting interferential system on polarization interference and grating beam-splitting error testing[J]. J Phys Conf Ser, 2006, 48: 992-997.
- 17 Lu Binghui, Liu Guodong, Sun Heyi, *et al.*. Phase extraction method of microsphere interferometry based on error complementary correction[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5):0508004.  
卢炳辉, 刘国栋, 孙和义, 等. 基于误差互补修正的微球干涉测量相位提取方法[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0508004.
- 18 Li Dong, Jiang Hongzhen, Liu Yong, *et al.*. Research on randomly phase shifting surface measurement based on least-squares iteration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 051202.  
李 东, 姜宏振, 刘 勇, 等. 基于最小二乘迭代的随机移相面形检测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 051202.
- 19 Li Bo, Chen Lei, Li Jinpeng, *et al.*. Systematical errors correction of simultaneous phase shifting interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s108002.  
李 博, 陈 磊, 李金鹏, 等. 同步移相干涉测试中的系统误差校正[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s108002.
- 20 Bo Li, Lei Chen, Bing Zhao. Spatial mismatch calibration using circular carrier technique in the simultaneous phase shifting



- interferometry[J]. Applied Optics, 2012, 51(8): 1037-1044.
- 21 Xu Chen. Study of Dynamic Interferometry Technology and Application[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.  
徐 晨. 动态干涉测试的理论与技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- 22 Zuo Fen, Chen Lei. Errors researching for a simultaneous phase shifting interferometer[J]. Optical Technique, 2009, 35(4): 536-540.  
左 芬, 陈 磊. 一种同步移相干涉测量系统的误差研究[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 536-540.
- 23 Wang Yun, Yan Changxiang. Sub-pixel image registration of spectrometer images[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 661-667.  
王 运, 颜昌祥. 光谱仪图像的亚像素配准[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(3): 661-667.
- 24 Bo Li, Lei Chen, Tuya Wulan, *et al.*. Carrier squeezing interferometry: suppressing phase errors from the inaccurate phase shift[J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 996-998.
- 25 Fang Bo. Wavefront Measurement with Four-Wave Lateral Shearing Interferometry Based on Phase Grating[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.  
方 波. 基于相位光栅的四波横向剪切干涉法波前检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.

栏目编辑: 张 雁