

# 二维虚光栅移相莫尔条纹相位提取算法

陈 晨 刘 克 李艳秋 汪 海

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

**摘要** 目前二维干涉图所采用的相位提取算法大多以傅里叶变换法为主,而傅里叶变换法对噪声比较敏感。虚光栅移相莫尔条纹法具有较高的提取精度,而且抗噪性较好。在一维干涉图的基础上,提出了一种适用于二维干涉图相位提取的二维虚光栅移相莫尔条纹法,该方法通过构造一定相移量的二维虚光栅实现相位提取。与傅里叶变换法对比研究的仿真结果表明:对于同一幅二维干涉图,在干涉图不含噪声的情况下,傅里叶变换法与该方法的相对重构误差分别是5.52%和3.46%;在干涉图含噪声的情况下,随着噪声的增加,该方法在抗噪性方面的优势越来越明显。对二维横向剪切干涉仪零位校准装置所采集到的二维干涉图进行处理,实验结果表明,傅里叶变换法和该方法所得到的测量结果均方根值分别为 $0.0053\lambda$ 和 $0.0037\lambda$ ( $\lambda = 632.8\text{ nm}$ )。

**关键词** 测量; 相位提取; 莫尔条纹; 二维干涉图

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0208004

## Two-Dimensional Virtual Grating Phase Shifting Moiré Fringe Method of Phase Extraction

Chen Chen Liu Ke Li Yanqiu Wang Hai

*Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

**Abstract** The most useful traditional technique to extract the phase information from a two-dimensional (2D) interferogram is fast fourier transformation (FFT), which is proven to be sensitive to noise. The virtual grating phase shifting Moiré fringe method has not only a good anti-noise characteristic but also a good extraction accuracy. Based on the research of processing the one-dimensional interferogram, a new two-dimensional virtual grating phase shifting Moiré fringe method which can process the two-dimensional interferogram is proposed, which can extract the phase information by generating a 2D virtual grating containing special phase-shift amount. The simulation result between the FFT method and the new method shows that in the case of the interferogram without noise, the relative reconstruction error using the FFT method and the proposed method are 5.52% and 3.46%, respectively. However, the new method has an obvious advantages over the FFT method gradually while the noise increases. Processing the 2D interferogram obtained by the 2D lateral shearing interferometer null test system developed by our research group, the root mean square experiment results of the FFT method and the proposed method are  $0.0053\lambda$  and  $0.0037\lambda$  ( $\lambda = 632.8\text{ nm}$ ), respectively.

**Key words** measurement; phase extraction; Moiré fringe; two-dimensional interferogram

**OCIS codes** 050.2770; 100.2960; 100.3175

收稿日期: 2014-08-04; 收到修改稿日期: 2014-08-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60938003)、国家科技重大专项、国家自然科学基金青年科学基金(61205164)、北京高等学校青年英才计划、北京理工大学基础研究基金(20120442004)

作者简介: 陈 晨(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: 2322513762@qq.com

导师简介: 刘 克(1980—),男,博士,副研究员,主要从事光学检测技术方面的研究。

E-mail: liuke@bit.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

## 1 引 言

目前常见的相位提取算法有相移法、傅里叶变换(FFT)法和虚光栅移相莫尔条纹法等。傅里叶变换法只需一幅干涉图,实现起来比较方便<sup>[1-4]</sup>,但是现有的光学干涉系统在进行测量时,所采集到的干涉图不可避免的会含有一定程度的噪声,而傅里叶变换法对噪声比较敏感,且边缘误差较大,从而会影响到整个系统的测量精度。虚光栅移相莫尔条纹法具有较好的综合性能<sup>[5-9]</sup>,用该方法处理一幅加有载频的干涉图时,可以实现干涉条纹移相的效果,且没有移相误差。而国内外学者对虚光栅移相莫尔条纹法的研究只保留在处理一维干涉图,对于多维干涉图的情况,目前还没有最新的研究。而在一些干涉测量系统中,所采集到的为二维(2D)干涉图。一维干涉图与二维干涉图光强表达式有所区别,所得到的莫尔条纹图及其傅里叶频谱也大不相同,故有必要对二维干涉图的相位提取算法进行研究。

本文在前人研究虚光栅移相莫尔条纹法处理一维干涉图的基础上,根据二维干涉图的特点,提出一种适用于处理二维干涉图的二维虚光栅移相莫尔条纹法,该方法通过构造含一定相移量的二维虚光栅,并与干涉图相乘形成莫尔条纹图,再通过一定的滤波处理,得到低频莫尔条纹图,通过本文提出的相移算法,可以得到所要求的相位信息。计算机模拟和实验研究结果表明,这种方法不仅具有更高的提取精度,而且抗噪性明显优于傅里叶变换法。

## 2 原 理

随着光干涉测量技术的发展,二维干涉图得到了越来越广泛的应用<sup>[10-11]</sup>。已有研究表明<sup>[11]</sup>,一幅在  $X$  和  $Y$  方向上加有载频为  $f_x$  和  $f_y$  的二维干涉图的光强分布函数通常可以表示为

$$i(x, y) = \{a_1(x, y) + b_1(x, y)\cos[2\pi f_x x + \phi_x(x, y)]\} \times \{a_2(x, y) + b_2(x, y)\cos[2\pi f_y y + \phi_y(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中  $a_1(x, y)$ 、 $a_2(x, y)$  为干涉图背景光强,  $b_1(x, y)$ 、 $b_2(x, y)$  是干涉条纹的幅值条纹调制度,  $\phi_x(x, y)$ 、 $\phi_y(x, y)$  分别为所要求的相位,为方便起见,以下分别简写为  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 。从(1)式可以看出,二维干涉图光强的数学表达式比一维干涉图要复杂,从而不能像一维干涉图那样仅仅构造4幅简单的一维虚光栅。但可以通过重新设置新的虚光栅,来求出所要得到的相位分布  $\phi_x$  和  $\phi_y$ 。下面结合本文方法的算法流程图对该方法做详细的介绍,算法流程图如图1所示。

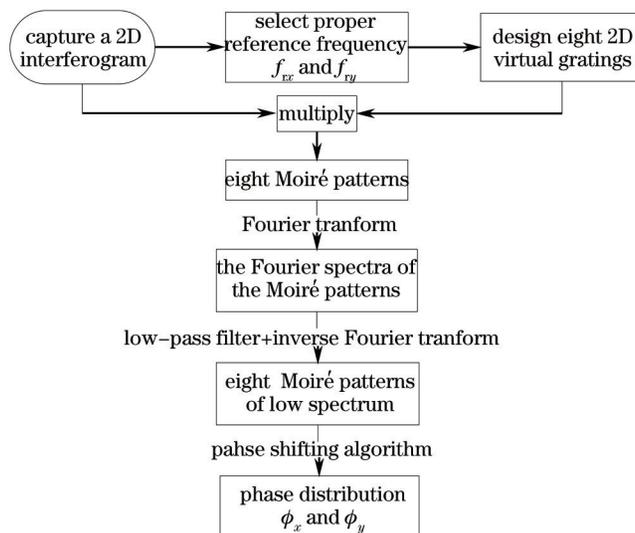


图1 算法流程图

Fig.1 Flow chart of the proposed algorithm

根据二维干涉图的光强表达式,不妨构造与二维干涉图光强表达式相似的二维虚光栅,然后对所得到的莫尔条纹图进行分析,看能否得到所要求的相位信息。二维虚光栅的光强表达式可设成如下形式:

$$i_t(x, y) = [1 + \cos(2\pi f_x x + \phi_1)][1 + \cos(2\pi f_y y + \phi_2)], \quad (2)$$

式中  $f_x$ 、 $f_y$  为二维虚光栅的参考频率,  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  为引入相移量。

对(2)式选取与干涉图载频  $f_x$ 、 $f_y$  接近的参考频率, 再对  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  取适当的值, 就可以通过计算机来生成虚光栅。一般来说, 所采集到的干涉图其载频满足  $f_x=f_y$ , 故二维虚光栅的参考载频也满足  $f_x=f_y$ , 如无特殊说明, 默认表示该条件成立。将实际干涉图与虚光栅相乘, 可得到莫尔条纹图, 由于所得到的莫尔条纹图其光强表达式比较复杂, 故此省略。

通过研究莫尔条纹的光强表达式可以发现, 莫尔条纹图中包含多种频率分量, 而且低频分量中含有相位信息  $\phi_x$  和  $\phi_y$  以及相移量  $\phi_1$  和  $\phi_2$ , 因此可以采用合适的低通滤波器滤掉不必要的高频和中频分量。如图2所示为在频域中进行低通滤波, 黑色方框内为含有有用信息的低频频谱。从图中可以看到, 由于干涉图与虚光栅都加入了一定的载频, 故高频、中频成分能与低频成分有效的隔离, 从而使滤出的低频频谱不受高频、中频频谱的干扰。

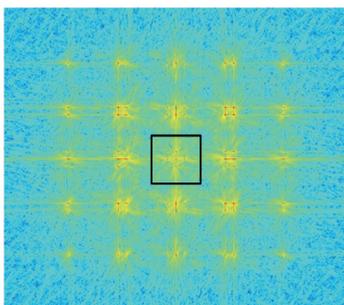


图2 莫尔条纹的傅里叶频谱

Fig.2 Fourier spectrum of the Moiré pattern

设黑色方框内的区域为  $G(x,y)$ , 区域以零频为中心, 一般截止频率以  $\frac{1}{2}f_x \sim \frac{3}{4}f_x$  为宜, 所选滤波器的函数  $R(x,y)$  可以表示为

$$R(x,y) = \begin{cases} 1, & (x,y) \in G(x,y) \\ 0, & (x,y) \notin G(x,y) \end{cases} \quad (3)$$

一般波前像差依据其空间频率可以分为三类: 空间频率范围为(1~5)cycle/pupil的低频像差, 空间频率范围为(6~20)cycle/pupil的中频像差波前, 空间频率大于 20 cycle/pupil的高频像差。根据奈奎斯特采样定理, 干涉图中每根条纹至少需占有 4 pixel 采样点, 因此对于一幅横向和纵向像素均为 512 pixel 的干涉图, 横向和纵向的条纹数量最多为  $512/4=128$  根, 基于以上的分析和测量经验, 所采集的干涉图的载频  $f_x$ 、 $f_y$  控制在 30~40 为宜<sup>[4]</sup>, 因此, 所选的低通滤波器能比较完整的滤出波面的低频和中频像差信息, 但会损失部分高频像差信息。

为了进一步的提高精度, 当被测波面存在较为严重的高频像差信息时, 低频频谱能量可能会更多的向高频频谱扩散, 如果滤波器窗口过小会导致有用信息的损失, 要想尽量完整的滤出有用信息, 可以适当增加波面采样点的数量和干涉图的载频, 进而增大滤波器的窗口, 就能比较完整进行滤波处理。

将低频频谱分离出之后, 再进行逆傅里叶变换, 此时得到的是只含低频分量的莫尔条纹图, 其光强表达式为

$$\begin{aligned} i_s(x,y) = & a_1 a_2 + \frac{1}{2} a_2 b_1 \cos[2\pi(f_x - f_{rx})x + \phi_x - \phi_1] + \frac{1}{2} a_1 b_2 \cos[2\pi(f_y - f_{ry})y + \phi_y - \phi_2] + \\ & \frac{1}{8} b_1 b_2 \cos[2\pi(f_x - f_{rx})x + 2\pi(f_y - f_{ry})y + \phi_x + \phi_y - \phi_1 - \phi_2] + \\ & \frac{1}{8} b_1 b_2 \cos[2\pi(f_x - f_{rx})x - 2\pi(f_y - f_{ry})y + \phi_x - \phi_y - \phi_1 + \phi_2] . \end{aligned} \quad (4)$$

通过上述步骤所获得的低频莫尔条纹图与处理一维干涉图时所获得的低频莫尔条纹图大不相同, 需要重新选取新的相移量进行计算。  $\phi_1$  和  $\phi_2$  都可以取  $0$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi$ 、 $3\pi/2$  这 4 个值, 一共可以组成 16 幅莫尔条纹图和对应的 16 幅低频莫尔条纹图。能否从这 16 幅低频莫尔条纹图中选出可以求取相位的条纹图是问题的

关键所在。经理论分析可以得到当  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  分别取如下 8 组值时能得到  $\phi_x$ 、 $\phi_y$ ： $(0, 0)$ 、 $(0, \pi)$ 、 $(\pi, 0)$ 、 $(\pi, \pi)$ 、 $(\pi/2, \pi/2)$ 、 $(\pi/2, 3\pi/2)$ 、 $(3\pi/2, \pi/2)$ 、 $(3\pi/2, 3\pi/2)$ 。记这 8 组值相对应的低频莫尔条纹图分别为  $i_{s1}$ 、 $i_{s2}$ 、 $i_{s3}$ 、 $i_{s4}$ 、 $i_{s5}$ 、 $i_{s6}$ 、 $i_{s7}$ 、 $i_{s8}$ 。

经上述步骤后可得到 8 幅低频莫尔条纹图,最终化简可得到如下表达式:

$$2\pi(f_x - f_{rx})x + \phi_x = \arctan \left[ \frac{(i_{s5} - i_{s8}) + (i_{s6} - i_{s7})}{(i_{s1} - i_{s4}) + (i_{s2} - i_{s3})} \right], \quad (5)$$

$$2\pi(f_y - f_{ry})y + \phi_y = \arctan \left[ \frac{(i_{s5} - i_{s8}) - (i_{s6} - i_{s7})}{(i_{s1} - i_{s4}) - (i_{s2} - i_{s3})} \right]. \quad (6)$$

以上所得到的是相位的包裹面,对其进行解包处理,就能得到待测的连续差分波面,再对其进行波前重构处理,就能得到所要测的连续波面。

### 3 算法仿真

为了验证方法的有效性,将傅里叶变换法和本文方法作对比研究进行了仿真实验。算法仿真的步骤可简要概括如下:1)用 Matlab 软件仿真任意一个原始波面  $W(x, y)$ ; 2)计算出原始波面两正交方向上的差分波面  $\Delta W_x, \Delta W_y$ , 根据差分波面,构造一幅二维干涉图; 3)分别用傅里叶变换法和本文方法进行相位提取,然后经相位展开、波前重构等相同的步骤处理后得到重建波面  $W_1(x, y)$ 、 $W_2(x, y)$ ; 4)对步骤 2)所模拟的理想干涉图加一定的噪声,再重复步骤 3)得到重构波面  $W_3(x, y)$ 、 $W_4(x, y)$ ; 5)分别比较在干涉图不加噪声和加噪声两种情况下,傅里叶变换法和本文方法的提取精度。重建波面  $W_i(x, y)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 与原始波面  $W(x, y)$  的一致性通过相对重建误差 (RRE,  $R_{RE}$ ) 来表示, RRE 可通过下式求得:

$$R_{RE} = \sqrt{\frac{\sum \sum [W(x, y) - W_i(x, y)]^2}{\sum \sum [W(x, y)]^2}} \times 100\%. \quad (7)$$

#### 3.1 不加噪声的干涉图

利用随机产生的 37 项 Zernike 系数和对应的 Zernike 圆多项式的线性组合,产生一个原始波面作为输入波面,取原始波面的函数为

$$W(x, y) = 2x^2 - 2y^2 - 6xy + 8yx^3 + 8xy^3 + x^3 - 3xy^2 + 3x^2y - y^3. \quad (8)$$

波面采样点为 512 pixel × 512 pixel, 生成的输入波面如图 3(a) 所示, 通过原始输入波面, 可以计算出其  $x$  和  $y$  方向的差分波面  $\Delta W_x$  和  $\Delta W_y$ , 分别如图 3(b) 和 3(c) 所示。根据前文所介绍的奈奎斯特采样定理和测量经验, 取  $x$  和  $y$  方向的载频  $f_x$  和  $f_y$  都为 32, 所得到的条纹数为 64, 因此可以得到所要构造的二维干涉图的光强分布函数为

$$I(x, y) = [1 + \cos(2\pi \times 32x + \Delta W_x)][1 + \cos(2\pi \times 32y + \Delta W_y)]. \quad (9)$$

为方便程序化处理, (9) 式中对比度设为 1。根据 (9) 式通过 Matlab 软件所仿真出的二维干涉图如图 3(d) 所示。

分别用傅里叶变换法和本文方法提取相位, 可以得到重构波面与原始波面的重构误差。

用傅里叶变换法提取相位得到的重构误差如图 4(a) 所示。通过 (7) 式, 可计算出傅里叶变换法的相对重建误差为 5.52%。

用二维虚光栅移相莫尔条纹法提取相位时, 所构造二维虚光栅的参考频率应与干涉图的载频接近, 这样有利于低通滤波处理, 二维虚光栅所选的参考频率为 38, 得到的重构误差如图 4(b) 所示。同理, 通过 (7) 式, 可得二维虚光栅移相莫尔条纹法的相对重建误差为 3.46%。

从上述仿真结果并结合图 4 可以看到, 在干涉图不加噪声的情况下, 傅里叶变换法和本文方法在中间区域的提取精度都较高, 而在边缘区域, 傅里叶变换法的误差较大。而本文方法结合了相移技术, 能有效的降低边缘区域的误差。相比于傅里叶变换法, 本文方法的相位提取精度有所提高。

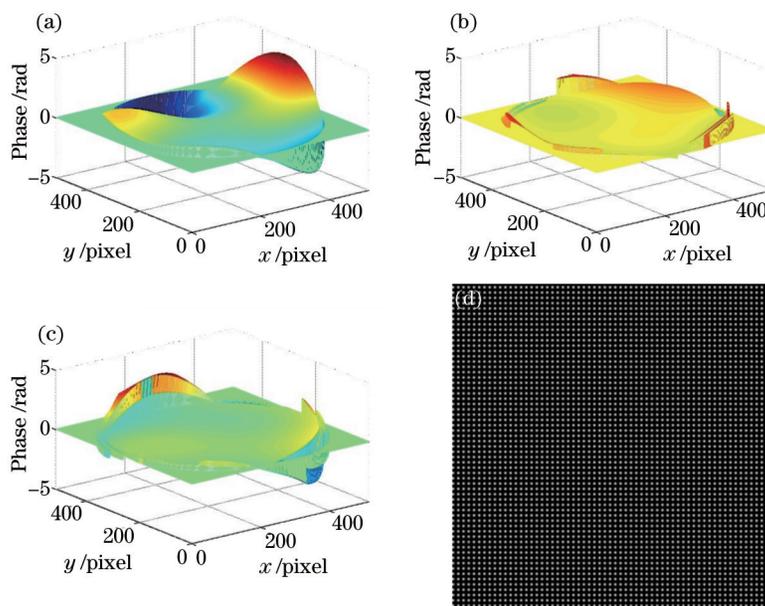


图3 仿真结果示意图。(a)原始输入波面;(b)x方向的差分波面;(c)y方向的差分波面;(d)模拟干涉图

Fig.3 Schematic of the simulation results. (a) Initial input wavefront; (b) difference wavefront of x direction; (c) differential wavefront of y direction; (d) simulated interferogram

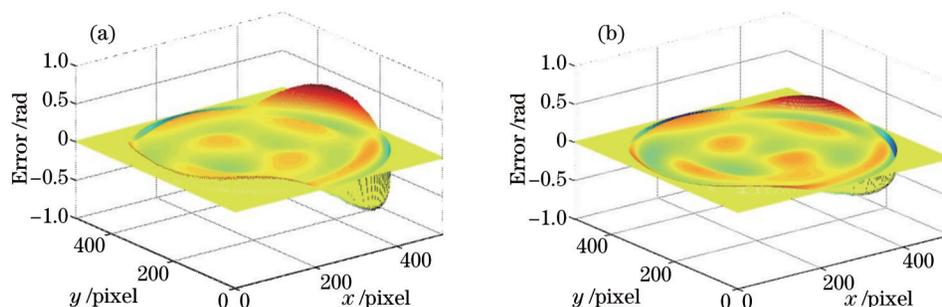


图4 重构误差。(a)傅里叶变换法;(b)二维虚光栅移相莫尔条纹法

Fig.4 Reconstruction error. (a) FFT method; (b) two-dimensional virtual grating phase shifting Moiré fringe method

### 3.2 加一定噪声的干涉图

光学干涉测量中所采集到的干涉图不可避免地会含有一定程度的噪声,其效果会直接影响相位提取的精度。为了研究两种算法对噪声的抵抗性,在3.1节所模拟的理想干涉图中加入不同强度的模拟随机高斯噪声,定义噪声的强度  $N_L$  为

$$N_L = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [N(x,y)]^2 / (m \times n)}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [W(x,y)]^2 / (m \times n)} \times 100\% , \quad (10)$$

式中  $N(x,y)$  为所添加的随机噪声,  $m \times n$  为波面上的采样点总数。

分别用傅里叶变换法和本文方法进行相位提取,其测量结果如图5所示。从图中可以看到,随着噪声水平的增加,两种方法的差距也越来越明显。其中横坐标表示所加高斯噪声的强度大小,纵坐标表示其对应的相对重构误差大小。

从上述仿真结果可以看出,在保持其他条件不变只对干涉图加噪声时,本文方法其抗噪性要优于傅里叶变换法,且随噪声水平的增加,其优势也越来越明显。这是因为本文的方法采用了低通滤波技术,能滤掉大部分的高频噪声。

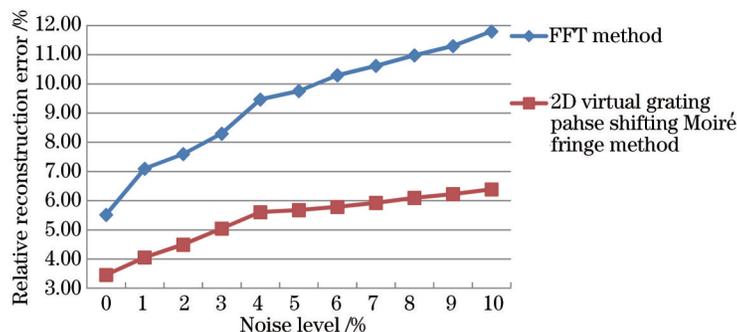


图5 两种方法的相对重构误差与噪声之间的关系

Fig.5 Relationship between relative reconstruction error and noise level of the two methods

### 4 实验结果与讨论

目前,实验室已自主开发了一套正交位相光栅横向剪切干涉原理实验装置。图6为该系统进行零检验实验的光路示意图。

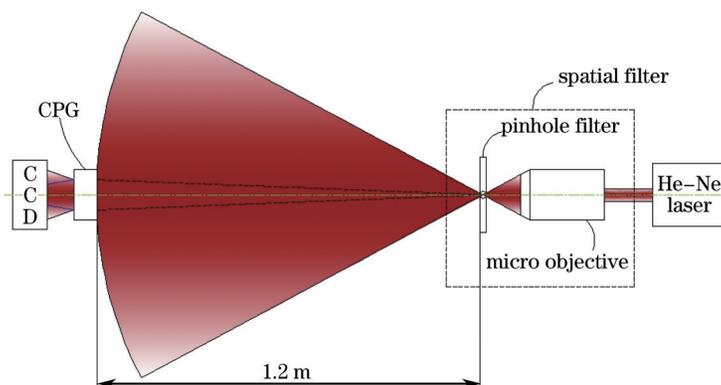


图6 干涉仪零检验装置光路示意图

Fig.6 Schematic diagram of the interferometer null test experiment

激光器发出的光束由显微物镜聚焦,经焦点处针孔滤波形成准球面波。正交相位光栅(CPG)放置在距离针孔约 1.2 m 的位置,因此仅有准球面波的中心部分的光束照明光栅,由于距离较远,可视为近似理想的平面波入射。经正交位相光栅衍射产生的 4 束光波在 CCD 靶面上形成二维横向剪切干涉图。

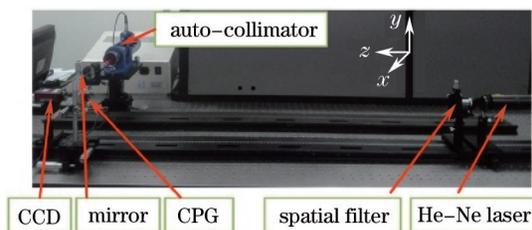


图7 干涉仪零检验装置实物图

Fig.7 Interferometer of null test system

图7为该系统进行零检验实验的实物图。采用波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为光源。空间滤波器由数值孔径为 0.4、倍率为 20 倍的显微物镜和直径为 15  $\mu\text{m}$  的针孔组成,物镜和针孔调节机构均带有自锁装置,具有较好的稳定性。正交位相光栅为实验室自主设计,主要产生 (+1, +1)、(+1, -1)、(-1, -1)、(-1, +1) 4 个级次的衍射光束。实验中用于采集干涉图的 CCD 像素尺寸为 13.5  $\mu\text{m}$ , 量化深度为 14 bit, 干涉图采样点数为 512 pixel $\times$ 512 pixel。实验中需要对光栅进行精密定位,使用平面反射镜与正交位相光栅旋转架相连接,并利用光电自准直仪测量平面反射镜的角度变化量,实现光栅的精密装调,减小光栅倾斜和旋转所导致的系统测量误差<sup>[11]</sup>。实验中使用的光电自准直仪测量精度为 0.1", 重复性为 0.05"。

实验所采集到的干涉图如图8所示。由于入射波是近似理想的平面波,故此实验装置可以视为零检验装置,即检测结果波面的均方根(RMS)值越接近0,则相位提取精度越高。

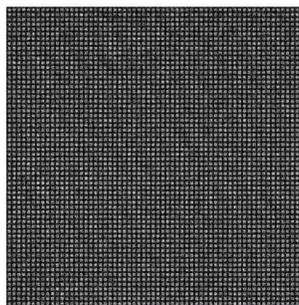


图8 干涉仪零检验装置采集到的干涉图

Fig.8 Interferogram collected by the interferometer of null test system

为了减小随机误差的影响,绝对测量精度利用多次测量结果的平均值表征。在实验的过程中,间隔2 min采集一幅干涉图,共随机采集了10幅干涉图,分别用傅里叶变换法和本文方法进行处理,得到的测量结果如图9所示。

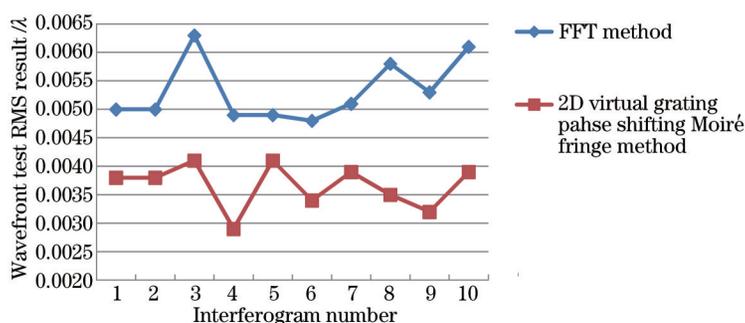


图9 干涉仪零检验装置的实验数据

Fig.9 Experiment results of interferometer of null test system

用傅里叶变换法提取相位得到10个测量结果,取平均值可得最终测量结果为 $0.0053 \lambda$  (RMS),同理,用二维虚光栅移相莫尔条纹法提取相位所得到的测量结果为 $0.0037 \lambda$  (RMS)。在实际的干涉测量系统中,噪声是不可避免的,从以上测量结果可以看出,在提取精度方面,本文方法较傅里叶变换法有一定的优势,实验的最终测量结果也进一步验证了本文方法的可行性。

## 5 结 论

在光学干涉测量系统中,比如正交位相光栅横向剪切干涉系统,所采集到的干涉图一般都是二维干涉图,如果用传统处理一维干涉图的虚光栅移相莫尔条纹法处理二维干涉图时将得不到所要求的差分相位。提出了一种适用于二维干涉图的二维虚光栅移相莫尔条纹法,计算机仿真结果表明,在边缘区域的提取精度要明显优于傅里叶变换法,而且不论是在理想的情况下还是在加噪声的情况下,该方法的提取精度都要优于傅里叶变换法。通过实验室的零检验系统验证了该结论的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 C Roddier, F Rodier. Interferogram analysis using Fourier transform techniques[J]. Appl Opt, 1987, 26(9): 1668-1673.
- 2 Zhang Min, Tang Feng, Wang Xiangzhao, et al.. Phase retrieval errors analysis of interferogram using two dimensional fast Fourier transform method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308002.  
张敏,唐峰,王向朝,等. 二维快速傅里叶变换干涉图相位提取误差分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308002.
- 3 Cui Wenda, Du shaojun. Phase retrieval based on fractional Fourier transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 091003.  
崔文达,杜少军. 基于分数傅里叶变换的相位恢复[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 091003.

- 4 Mitsuo Takeda, Hideki Ina, Seiji Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-patterns analysis for computer-based topography and interferometry[J]. Opt Soc Am, 1982, 72(1): 156-160.
- 5 Wang Jun, Chen Lei, Wu Quanying. Wavefront acquirement of single interferogram using the virtual grating moire fringe method with Gaussian filter in the spatial domain[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0508005.  
王 军, 陈 磊, 吴泉英. 利用空域滤波虚光栅叠栅法提取干涉图波面[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0508005.
- 6 Li Xiao, Ni Chuan, Wang Liangpeng, *et al.*. Measurement of the curvature radius of a small spherical surface with virtual grating phase-shift Moiré fringe method[J]. Optical Instruments, 2011, 33(3): 5-10.  
李 啸, 尼 川, 王良鹏, 等. 用虚光栅移相莫尔条纹法测量小球面曲率半径[J]. 光学仪器, 2011, 33(3): 5-11.
- 7 Wu Xuhua, Chen Lei, Sun Jiaofen. Application of virtual grating phase-shifting Moiré fringe method to angle departure evaluation of optical components[J]. Acta Metrological Since, 2006, 27(3): 221-223.  
武旭华, 陈 磊, 孙娇芬. 用虚光栅移相莫尔条纹法测量光学元件的角度偏差[J]. 计量学报, 2006, 27(3): 221-223.
- 8 Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Qiudong, *et al.*. Influence of interference fringe's spatial frequency on the phase measurement accuracy in digital Moiré phase-shifting interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2011, 28(10): 1008008.  
孟晓辰, 赫 群, 朱秋东, 等. 干涉条纹空间频率对数字叠栅移相干涉测量精度的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1008008.
- 9 Su Junhong, Liu Yichen. Digital Moiré technique for thin film thickness measurement[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108002.  
苏俊宏, 刘奕辰. 测量薄膜厚度的数字叠栅技术[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108002.
- 10 Fang Chao, Xiang Yang. A thirteen-step phase restoration algorithm in lateral shearing interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508003.  
方 超, 向 阳. 十三步光栅横向剪切干涉相位复原算法[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508003.
- 11 Hai Wang, Yanqiu Li, Ke Liu. Misalignment effects of cross-phase grating lateral shearing interferometer and its alignment technique[J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 054103.

栏目编辑: 史 敏