

文章编号 1004-924X(2015)01-0252-08

基于频域分析的抗振移相干涉测量

刘 乾*, 王 洋, 吉 方, 何建国, 张连新
(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:针对移相干涉测量中振动引起的移相误差和对比度变化,提出了一种从空间载波干涉图频谱中提取移相和对比度信息的方法。该方法通过分析载波干涉图频谱,从基带和边带中提取移相和对比度信息,运用最小二乘法补偿对比度变化并复原波前位相。最后采用构造平滑孔径函数对带有孔径的干涉图进行处理。数值仿真证明:提出的方法可以高精度检测移相量和对比度变化,能够有效补偿因对比度变化引起的位相复原误差。在频率为 9 Hz、幅度为 0.5 μm 的简谐振动条件下实验验证了本文方法的实用性。结果显示:从受振动干扰的干涉图中复原平面表面时,其复原误差 PV 值小于 0.015 波长。该方法无需硬件改动,有望为移相干涉测量应用于现场测量提供一种低成本的解决方法。

关键词:移相干涉术;确定性加工;振动;频域分析;现场测量

中图分类号:TH744.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0252

Vibration-insensitive phase-shifting interferometry based on frequency domain analysis

LIU Qian*, WANG Yang, JI Fang, HE Jian-guo, ZHANG Lian-xin

(*Institute of Machinery Manufacturing Technology,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

* *Corresponding author, E-mail: liuqianblue@126.com*

Abstract: An algorithm was proposed to deal with the phase-shifting error and contrast variation in a Phase-shifting Interferometry (PSI) under vibration. The algorithm detected phase shifts and contrast variation by analyzing the spectra of spatial-carrier interferograms firstly. Then the phase shifts were used as priori information to retrieve the wavefront phase from least-square equation with contrast compensation. To deal with interferograms with non-rectangular aperture, a mask with soft border was constructed and data extrapolation was avoided. The effectiveness of the proposed algorithm was validated by simulations and experiments. The simulation results show the proposed method can detect the phase shifts and contrast variation in high accuracy and can compensate effectively phase retrieval errors caused by contrast variation. The practicability of the algorithm was verified under a simple harmonic vibration with a frequency of 9 Hz and an amplitude of 0.5 μm . The measurement under vibration demonstrates that the retrieval error of a flat surface is less than 0.015 waves (PV value). The algorithm provides a low-cost approach to application of PSI to field measurement under vibration without modification of the hardware of interferometers.

收稿日期:2014-08-20;修订日期:2014-10-11.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2013ZX04006011)

Key words: phase-shifting interferometry; deterministic manufacturing; vibration; frequency domain analysis; on-machine testing

1 引言

移相干涉技术(Phase-Shifting Interferometry, PSI)是测量光学元件表面轮廓、波前分布的重要方法,具有高精度和高空间分辨率的优点。PSI的精度高是因为测量过程中参考镜和被测镜之间的光程差可以按照预设值精确改变(即移相)。一般的移相干涉仪的移相步长小于100 nm。如此小的移相步长很容易受外界扰动破坏,导致测量误差,因此移相干涉仪需放置在隔振平台上使用,并且远离加工设备。但这会降低加工效率,尤其是在工件尺寸很大的情况下。

确定性加工方法可定量去除表面材料,已逐渐成为加工高精度光学元件的重要手段^[1-3]。确定性加工需要预先了解光学元件的面形、掌握超差区域的位置和超差量,然后才能对超差区域进行定量修整。若反复装卸光学元件,二次定位误差将影响加工精度。因此,确定性加工对光学元件面形的现场测量需求更高。

目前,PSI应用于现场测量的最大障碍是振动,因为振动会导致移相误差和干涉条纹对比度变化。沿干涉腔方向的振动不仅会改变干涉腔长度、影响光程差,还会使参考镜和被测镜之间发生倾斜,从而使帧内移相不一致。若由振动引起的光程差变化速度不同,还会由于图像传感器存在平均效应,使采集到的干涉图对比度也发生变化,最终造成条纹模糊^[4]。因此,移相误差和对比度变化均是移相干涉测量的重要误差源^[4-5]。目前可以从硬件和算法两方面解决振动下的移相误差问题:若采用硬件方法,则需要对光路进行改进^[6-7],这样增加了硬件成本;后者则基于普通移相干涉仪,通过算法复原波前位相,成本较低。

抗振算法主要分成三类:一是从时域干涉信号提取位相信息^[8-10];二是从空间载波干涉图确定移相状态,再通过最小二乘方程求解位相^[11-13];三是利用迭代法求解波前位相^[14-17]。这些算法均有一定的抗振能力,但都有缺点,如第一类算法需要大量干涉图且振动幅度不能过大;第

二类算法难以处理带有孔径的干涉图;第三类算法耗时较长。更重要的是,这些算法仅针对移相误差,对于对比度变化则无能为力。文献[18]涉及的专利曾提出对干涉图的光强变化进行修正的方法,但仍不能处理对比度变化的干涉图。

针对上述问题,本文提出一种可以检测干涉图移相量和对比度的方法,其能够减小移相干涉技术因振动导致的测量误差。该方法通过分析空间载波干涉图的频谱来检测干涉图的移相量和对比度变化,然后利用带有对比度补偿的最小二乘方程求解波前位相分布;最后,给出了处理带有孔径干涉图的简单方法。

2 算法原理

2.1 与振动相关参数的检测

假设移相干涉测量共采集了 M 帧受振动影响的干涉图,其中第 m 帧干涉图的光强为:

$$I_m(x, y) = \alpha_m A(x, y) + \beta_m B(x, y) \times \cos[\varphi(x, y) + 2\pi(f_{xm}x + f_{ym}y) + \delta_m], \quad (1)$$

式中: $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 、 $\varphi(x, y)$ 分别为背景、调制度和波前位相; f_{xm} 和 f_{ym} 是引入的空间载波频率; δ_m 是移相的平移量; α_m 和 β_m 分别是干涉图背景和调制度的变化量。

由于移相是一个相对过程,因此可认为 $\delta_1 = 0$ 。对于传统移相干涉技术, f_x 、 f_y 、 α 和 β 都是不变的, δ 应为预设移相值。受振动影响,这 5 个参数均为与振动有关的未知量,其中载频 f_x 、 f_y 的变化是由参考镜和被测镜的相对倾斜导致的。由式(1)可知,要求出 $\varphi(x, y)$, 首先要确定这 5 个未知量。

对干涉图加窗,并展开式(1)的余弦项,得:

$$I_{wm}(x, y) = \alpha_m W(x, y) A(x, y) + \beta_m \exp(j\delta_m) \times W(x, y) C(x, y) \exp[j2\pi(f_{xm}x + f_{ym}y)] + \beta_m \exp(-j\delta_m) \times W(x, y) C^*(x, y) \exp[-j2\pi(f_{xm}x + f_{ym}y)], \quad (2)$$

式中: $W(x, y)$ 为窗口函数; j 为虚数单位; $C(x, y) = B(x, y) \exp[j\varphi(x, y)]/2$ 。对干涉图加窗有两

个目的:一是抑制由于干涉图边缘数据截断所导致的谱泄露,二是使得边带形状接近窗函数,便于函数拟合,进而确定边带位置。对式(2)进行二维傅里叶变换,得:

$$i_{w_m}(u, v) = \alpha_m a_w(u, v) + \beta_m \exp(j\delta_m) c_w(u - f_{xm}, v - f_{ym}) + \beta_m \exp(-j\delta_m) c_w^*(u + f_{xm}, v + f_{ym}), \quad (3)$$

式中: $a_w(u, v)$ 和 $c_w(u, v)$ 分别为 $W(x, y)$ $A(x, y)$ 和 $W(x, y)C(x, y)$ 的傅里叶变换。由式(3)可知,载波干涉图的空间频谱包含三部分:一部分是零频附近的基带(式中第一项);另外是在 (f_{xm}, f_{ym}) 附近的边带及其共轭(式中第二、三项)。当空间载频足够大时,基带和边带将在频域分离。由于基带和边带的强度分别与 α 和 β 成正比,因此可以通过比较基带和边带的模值来确定背景和调制度的变化量。而移相信息则包含在边带中,载频 (f_{xm}, f_{ym}) 可以由边带在频域的位置确定,平移量 δ 由边带的位相角确定。

根据傅里叶变换性质,有:

$$c_w(u, v) = \text{FT}[W(x, y)] * \text{FT}[C(x, y)], \quad (4)$$

式中:FT 表示傅里叶变换, * 表示卷积运算。由于调制度 $B(x, y)$ 和波前位相 $\varphi(x, y)$ 均为低频函数,因此 $\text{FT}[C(x, y)]$ 在频域分布较窄,如果用—个宽频域函数(如 $\text{FT}[W(x, y)]$)与 $\text{FT}[C(x, y)]$ 卷积,得到的函数频域宽度将会增加,且形状更接近 $\text{FT}[W(x, y)]$ 。因此,可以利用 $\text{FT}[W(x, y)]$ 的函数形式对 $c_w(u, v)$ 做函数拟合,以对边带进行精确定位。即便 $\text{FT}[W(x, y)]$ 和 $c_w(u, v)$ 因函

$$\begin{bmatrix} A \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \alpha_m^2 & \sum \alpha_m \beta_m \cos \Delta_m \\ \sum \alpha_m \beta_m \cos \Delta_m & \sum \beta_m^2 \cos^2 \Delta_m \\ \sum \alpha_m \beta_m \sin \Delta_m & \sum \beta_m^2 \sin \Delta_m \cos \Delta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum \alpha_m I_m \\ \sum \beta_m I_m \cos \Delta_m \\ \sum \beta_m I_m \sin \Delta_m \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式(7)、式(9)中的 \sum 均是对干涉图序号 m 求和,式(9)中的 A 、 p 、 q 、 Δ_m 、 I_m 均省略了坐标 (x, y) 。求得波前位相为:

$$\varphi(x, y) + 2\pi(f_{x1}x + f_{y1}y) = \arctan\left[-\frac{q(x, y)}{p(x, y)}\right]. \quad (10)$$

经解包裹和去倾斜运算后即可重构波前,得到被测面形。

虽然式(9)可以补偿干涉图对比度变化,但是仍对干涉图质量有一定要求,对比度过差的干涉

数形式不同而存在定位误差,但该误差对所有干涉图的边带均相同,另外,由于移相是一个相对量,故该误差可通过相减自然消除。本文后续仿真和实验均选用高斯函数为窗口函数。假设第 m 帧干涉图频谱的边带位置是 (P_{xm}, P_{ym}) , 则可以得到第 m 帧干涉图相对于第一帧干涉图的倾斜因子:

$$\begin{cases} k_{xm} = 2\pi(P_{xm} - P_{x1})/L_u \\ k_{ym} = 2\pi(P_{ym} - P_{y1})/L_v \end{cases}, \quad (5)$$

式中: L_u 、 L_v 分别为干涉图傅里叶变换在 u 、 v 方向的长度。检测到边带位置后,提取边带位相角,并减去第一帧干涉图边带的位相角,即可得到移相平移量 δ_m 。得到移相的倾斜因子和平移量之后,即可计算每个像素点的移相量:

$$\Delta_m(x, y) = k_{xm}x + k_{ym}y + \delta_m. \quad (6)$$

2.2 波前位相复原

得到与振动相关的参数 α 、 β 、 f_x 、 f_y 、 δ 之后,可以通过最小二乘法拟合求解波前位相。定义残差:

$$E(x, y) = \sum [I'_m(x, y) - I_m(x, y)]^2, \quad (7)$$

式中: $I'_m(x, y)$ 为实际得到的干涉图数据, $I_m(x, y)$ 为式(1)定义的理论值。令:

$$\frac{\partial E(x, y)}{\partial A(x, y)} = 0, \frac{\partial E(x, y)}{\partial p(x, y)} = 0, \frac{\partial E(x, y)}{\partial q(x, y)} = 0, \quad (8)$$

式中: $p(x, y) = B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 2\pi(f_{x1}x + f_{y1}y)]$, $q(x, y) = -B(x, y) \sin[\varphi(x, y) + 2\pi(f_{x1}x + f_{y1}y)]$ 。得到求解波前位相的最小二乘方程:

$$\begin{bmatrix} \sum \alpha_m \beta_m \sin \Delta_m \\ \sum \beta_m^2 \sin \Delta_m \cos \Delta_m \\ \sum \beta_m^2 \sin^2 \Delta_m \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum \alpha_m I_m \\ \sum \beta_m I_m \cos \Delta_m \\ \sum \beta_m I_m \sin \Delta_m \end{bmatrix}. \quad (9)$$

图难以提供充足的信息,反而可能会带有较大的噪声。这种干涉图可以通过 β/α 加以判别并剔除,以提高面形复原的精度。

3 数值仿真

由于难以测得振动影响下的光程变化,因此采用数值仿真方法来验证算法。仿真条件为,波前位相为球面 $\varphi(x, y) = 0.6\pi(x^2 + y^2)$, 背景为 $A(x, y) = 140 \exp[-0.2(x^2 + y^2)]$, 调制度为

$B(x, y) = 110\exp[-0.1(x^2 + y^2)]$, $-1 \leq x, y \leq 1$ 。干涉图分辨率为 128×128 , 载波干涉图 x 方向的载频 $f_x = 3/128 \text{ pixel}^{-1}$, y 方向的载频 $f_y = 3/128 \text{ pixel}^{-1}$, 移相的倾斜量、背景和调制度随机引入, 移相量步进为 1, 并加入方差为 4 的白噪声, 共生成 6 帧干涉图, 如图 1 所示。

使用本文算法检测载波干涉图的倾斜因子、平移量、背景和调制度的波动, 结果如表 1 所示。表中默认第一帧干涉图的移相量为零, 且背景与调制度波动对第一帧干涉图归一化。由表 1 可见, 倾斜因子的检测误差小于 $10^{-3} \text{ rad/pixel}$, 平移量的检测误差小于 0.07 rad , 背景和调制度波动的检测误差小于 1%。

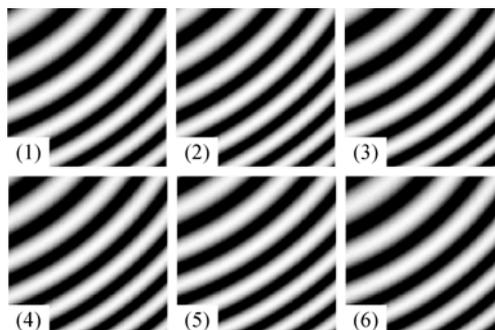


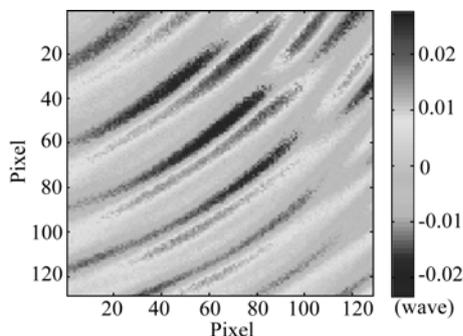
图 1 仿真生成的干涉图
Fig. 1 Interferograms generated in computer

表 1 干涉图参数的检测结果

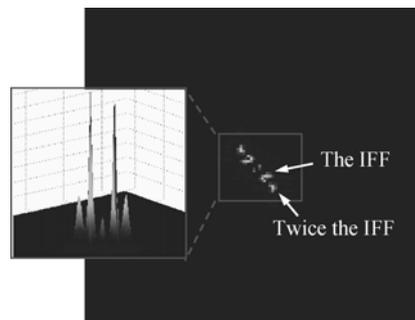
Tab. 1 Detected results of interferogram parameters

干涉图序号	真实值					检测结果				
	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
$k_x (\times 10^{-2} \text{ rad/pixel})$	1.67	-0.17	0.65	-0.49	-1.15	1.64	-0.17	0.62	-0.48	-1.13
$k_y (\times 10^{-2} \text{ rad/pixel})$	1.49	0.31	0.29	1.54	-1.32	1.46	0.30	0.28	1.52	-1.29
平移量/rad	1	2	3	4	5	0.949	2.001	3.005	3.965	4.931
背景波动	1.004	0.839	0.910	0.835	1.037	1.004	0.843	0.912	0.840	1.028
调制度波动	0.997	1.107	1.089	1.135	1.047	0.986	1.106	1.088	1.129	1.040

为进行对比, 分别采用不补偿^[11-13]和补偿对比度变化的方程求解位相和复原误差, 结果分别如图 2(a)和 3(a)所示。很明显, 补偿对比度变化后的复原误差更小。为分析误差组成, 对误差空间分布进行傅里叶变换, 得到其空间频谱, 分别如图 2(b)和 3(b)。



(a) 误差分布图
(a) Error map



(b) 误差频谱

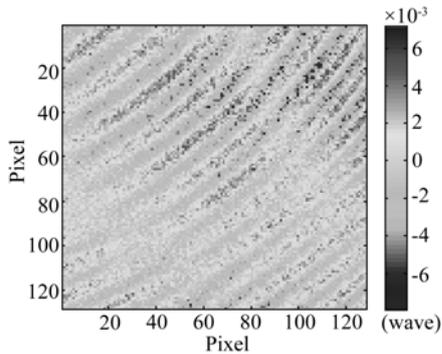
(b) Spatial spectrum of errors

图 2 未进行对比度变化补偿的复原误差

Fig. 2 Retrieval error without compensation of contrast variation

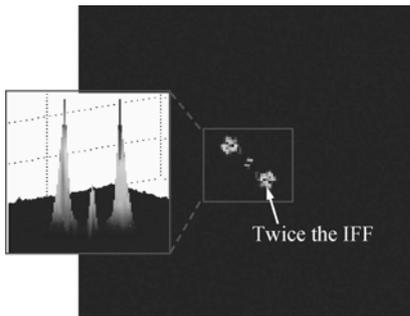
由图 2、3 可知, 未补偿对比度变化的误差频谱主要由两部分组成, 一部分分布在干涉条纹相同频率处, 另一部分在条纹的二倍频率处。而补偿了对比度变化的复原误差则集中在干涉条纹的二倍频率处。根据相关文献可知^[5,19], 背景强度变化导致的误差与干涉图条纹频率(Interference Fringe

Frequency, IFF)相同,而调制度变化和移相量误差导致的误差分布频率是干涉图条纹频率的两倍。因此,未做对比度补偿的复原误差源于对比度变化和移相量误差,而补偿了对比度变化的复原结果中与干涉图条纹同频率的误差已基本消除,表明补偿具有很好的效果,而二倍频率的误差仍存在,此时的误差绝大部分源自于移相检测误差。



(a) 误差分布图

(a) Error map



(b) 误差频谱

(b) Spatial spectrum of errors

图 3 补偿了对比度变化的复原误差

Fig. 3 Retrieval error with compensation of contrast variation

数值仿真实证了算法的有效性,表明算法可以高精度检测移相量和背景、调制量波动。另外应当注意的是,本算法只能补偿整帧干涉图的对比度变化,在剧烈振动的情况下,可能会出现参考面和被测面不同部分的移相速度相差太多的情况,从而导致干涉图帧内对比度差异过大,即干涉图部分区域条纹清晰,另一部分区域条纹模糊,此时算法可能失效。

4 带有孔径干涉图的处理

本文频域分析法检测干涉图参数的一个重要环节是通过二维傅里叶变换得到干涉图的频域分

布。若干涉条纹未能充满图像传感器,则会由于数据截断而导致谱泄露,造成频谱重叠,算法可能失效。此时需要对带有孔径的干涉图进行数据延拓,其原理就是根据已有的干涉图条纹分布对非干涉区域进行填充,确保干涉条纹充满所有像素。延拓算法^[20]虽能取得不错的效果,但需要大量运算,且对于载频较小的干涉图效果有限。

为抑制谱泄露,提出一种简单可行的方法。由于干涉图光强阶跃式的不连续分布主要发生在孔径边缘,因此首先构造一个形状与干涉孔径相似、但在孔径边缘是平滑过渡的孔径函数 $\Psi(x, y)$,然后令此函数与干涉图相乘,可以得到边缘平滑过渡的干涉图,从而抑制数据突变,降低谱泄露。

为构造平滑边缘的孔径函数 $\Psi(x, y)$,首先要确定干涉孔径函数 $\Omega(x, y)$ 。分析某像素 (x, y) 在干涉图序列上的光强变化,如果 (x, y) 处灰度变化明显,超过阈值,则认为 (x, y) 随移相发生了光强变化,形成了干涉条纹,故可判定该像素在干涉孔径内,属于 $\Omega(x, y)$,记为 1。反之,若 (x, y) 处的灰度变化不明显,则该像素的光强仅源自于参考镜的反射,表明该点在孔径外,不属于 $\Omega(x, y)$,记为 0。如此可得二值化分布的孔径函数 $\Omega(x, y)$ 。然后构造一个低通滤波器,通过空域卷积或频域滤波方法对 $\Omega(x, y)$ 进行滤波,将 $\Omega(x, y)$ 中从数值 0 到 1 阶跃而产生的高频分量滤除,余下的低频分量构造成了边缘平滑过渡的孔径函数 $\Psi(x, y)$ 。

5 实验

验证实验在 Fizeau 型平面干涉仪上进行。干涉仪通过压电陶瓷推动参考镜,实现移相,预设值为 $\pi/4$,图像传感器分辨率为 250×250 ,曝光时间为 1 ms,采样频率为 65 Hz。首先测试了自行研制的磁流变抛光机床的元件平台在开机运行下的振动情况:使用加速度传感器测试位移,发现在 9 Hz 频率处有明显的振动,振幅约为 $0.3 \mu\text{m}$;使用电子水平仪测试元件平台角度抖动,发现最大的角度变化量为 $0.1 \mu\text{rad}$,对应于 0.5 m 口径的光学元件,该角度变化量约引入 0.15 根条纹变化。通过压电陶瓷驱动器产生频率为 9 Hz、振幅为 $0.5 \mu\text{m}$ 的正弦波来模拟实际振动。压电陶瓷驱动器推动镜架产生振动位移,角度的变化量通过镜架导轨的间隙产生。被测件为带有缺口的 $\Phi 60 \text{ mm}$ 平晶,共采集 13 帧干涉图,其中一帧如

图 4 所示,并给出了两条直线上的灰度轮廓分布,其中的灰度值不代表绝对值,仅表示自身的相对分布。由图 4 中箭头所指之处可见,由于孔径的截取,干涉图灰度分布并不连续。

以光强变化 7% 为阈值,确定干涉孔径,得到孔径函数 $\Omega(x, y)$,再构造一个 40×40 的 Blackman 函数与 $\Omega(x, y)$ 进行卷积,得到边缘平滑过渡的孔径函数 $\Psi(x, y)$,如图 5 所示。将 $\Psi(x, y)$ 与图 4 的干涉图相乘,得到的干涉图如图 6 所示。对比图 4 和图 6 的灰度轮廓可以发现,干涉条纹分布规律基本不受影响,而孔径的边缘变得平滑。为对比效果,给出了干涉图平滑前后的频谱分布,如图 7 所示。

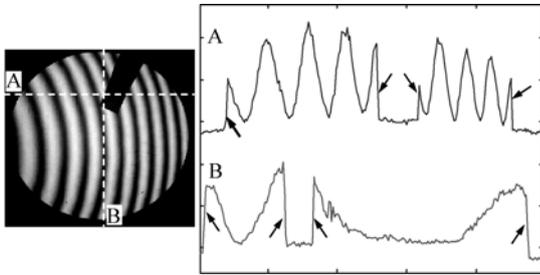


图 4 实验采集到的平晶表面干涉图及其灰度轮廓图
Fig. 4 Interferogram of a flat surface captured in experiment and its gray profiles

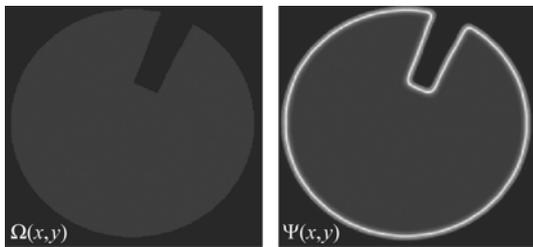


图 5 平晶表面的干涉孔径 $\Omega(x, y)$ 和构造的边缘平滑过渡孔径 $\Psi(x, y)$
Fig. 5 Detected interferogram aperture mask $\Omega(x, y)$ and mask with soft border $\Psi(x, y)$

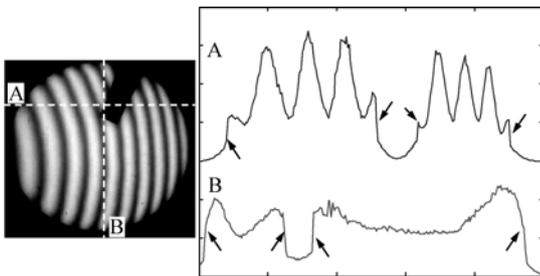


图 6 平滑后的干涉图及其灰度轮廓图
Fig. 6 Interferogram and its gray profiles after border smoothing

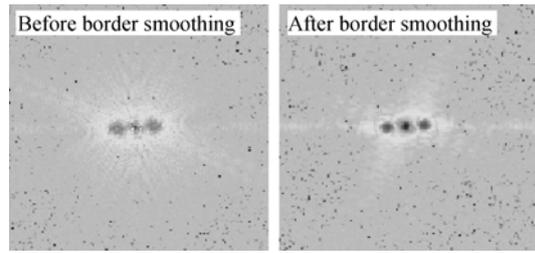
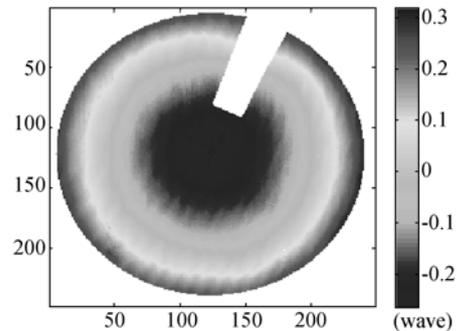


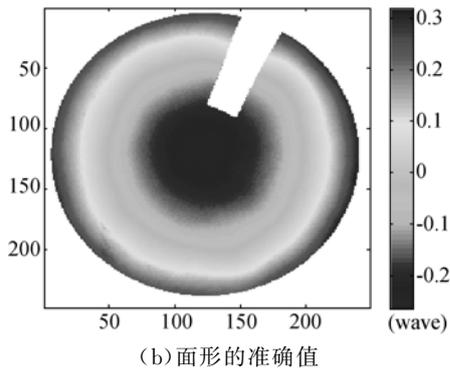
图 7 干涉图平滑前、后的频谱分布对比
Fig. 7 Comparison of spectra for interferograms before and after border smoothing

得到平滑干涉图后,利用频域分析算法对干涉图的相关参数进行检测并复原位相,面形重建结果如图 8(a) 所示,其 PV 值为 0.584 波长, RMS 值为 0.151 波长。使用十三步算法^[21]对振动干扰的干涉图进行位相复原,则失败。在隔振状态下使用商品干涉仪对平晶表面的测量结果如图 8(b) 所示,其面形 PV 值为 0.595 波长, RMS 值为 0.151 波长,该结果可视为面形的准确值。实验结果证明,本文算法可从受振动干扰的干涉图序列中高精度重建波前。

文中给出了使用本文算法检测到的移相量变化曲线,如图 9、10 所示。根据检测结果,振动导致的倾斜在 y 方向大于 x 方向,第 4 和第 8 帧干涉图的倾斜因子 k_y 差距最大,约为 0.03 rad/pixel,对于 250×250 分辨率的干涉图,相当于在 y 方向上变化了 1.2 根条纹。移相平移量也大幅偏离预设值,最大达到 4.3 rad,是移相步长的 5.5 倍。移相量被振动完全扰乱是十三步算法失败的主要原因。另外,本文还给出了干涉图的对比度变化曲线,如图 11 所示,对比度对第一帧干涉图进行归一化处理,可见由于振动影响采集的 13 帧干涉图中对比度的变化 7%。



(a) 使用本文方法从振动实验中复原的面形
(a) Reconstructed surface of experiment under vibration by proposed algorithm



(b) 面形的准确值
(b) Accurate value of flat surface

图 8 振动下的实验结果

Fig. 8 Experiment results under vibration

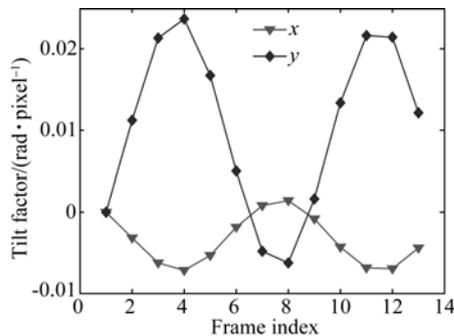


图 9 本文算法检测的移相倾斜因子

Fig. 9 Tilt factors of phase shifts detected by proposed method

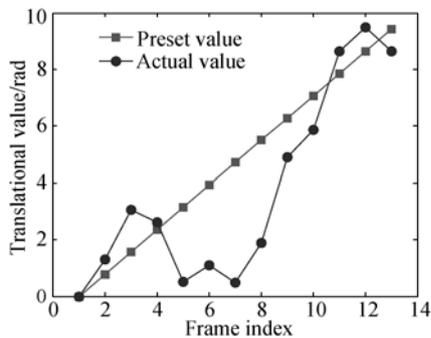


图 10 本文算法检测的移相平移量

Fig. 10 Translational values of phase shifts detected by proposed method

参考文献:

- [1] 王朋, 陈亚, 宣斌, 等. 大口径光学元件的机械手抛光 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1077-1085.
WANG P, CHEN Y, XUAN B, *et al.*. Polishing large aperture mirrors by manipulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1077-1085. (in Chinese)
- [2] 王永刚, 崔天刚, 马文生, 等. 弹性球状小磨头加工 Wolter I 型掠入射反射镜的去除函数 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 10-16.
WANG Y G, CUI T G, MA W SH, *et al.*. Remov-

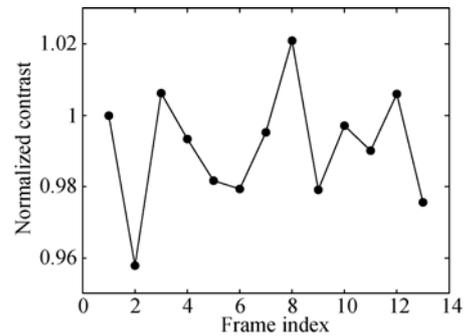


图 11 本文算法检测到的对比度变化

Fig. 11 Contrast variation detected by proposed method

另外, 本文算法速度较快。以处理上述实验中 13 帧 250×250 分辨率的干涉图为例, 2.9 GHz 处理器的计算机仅需不到 4 s 的时间即可完成计算。

6 结 论

针对移相干涉测量中振动引起的移相误差和对比度变化, 本文提出了一种从空间载波干涉图频谱中提取移相对比度信息的方法, 并利用带有对比度补偿的最小二乘方程求解波前位相。经数值仿真证实, 该方法可以高精度检测移相量和对比度变化, 并可以有效补偿因干涉图对比度变化而引起的位相复原误差。另外, 文中给出了处理带有孔径干涉图的简单方法。在频率为 9 Hz, 幅度为 $0.5 \mu\text{m}$ 的简谐振动下的实验证实了该方法的实用性, 面形的复原误差 PV 值小于 0.015 波长, 可满足应用需要。该方法无需改动干涉仪硬件, 为移相干涉技术用于现场测量提供了一种低成本的实现途径, 甚至有望将干涉仪集成于确定性光学加工设备中, 以提高加工精度和效率。

al function for fabrication of Wolter I grazing mirror by elastic ball tool [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 10-16. (in Chinese)

- [3] 李娜, 王波, 金会良, 等. 微结构光学元件的大气等离子体数控加工 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 934-940.
LI N, WANG B, JIN H L, *et al.*. Numerically controlled atmospheric pressure plasma processing of micro-structured optics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 934-940. (in Chinese)
- [4] KINNSTAETTER K, LOHMANN A W, SCH-

- WIDER J, *et al.*. Accuracy of phase shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1988, 27(24): 5082-5087.
- [5] WINGERDEN J, FRANKENA H, SMORENBURG C. Linear approximation for measurement errors in phase shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1991, 30(19): 2718-2729.
- [6] DECKL. Vibration-resistant phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(34): 6655-6662.
- [7] 吴新民. 光干涉测试中的抗振技术研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2001.
- WU X M. *Research on vibration-resistance technology for optical interferometry* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2001. (in Chinese)
- [8] HAO Q, ZHU Q D, HU Y. Random phase-shifting interferometry without accurately controlling or calibrating the phase shifts [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(8): 1288-1290.
- [9] PARK J, KIM S. Vibration-desensitized interferometer by continuous phase shifting with high-speed fringe capturing [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(1): 19-21.
- [10] 王明, 郝群, 朱秋东, 等. 时频域双重分析法抗干扰移相干涉术 [J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1112005.
- WANG M, HAO Q, ZHU Q D, *et al.*. Anti-disturbance phase-shifting interferometry method time-and frequency-domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1112005. (in Chinese)
- [11] XU J CH, XU Q, CHAI L Q. Tilt-shift determination and compensation in phase-shifting interferometry [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, 10: 075011.
- [12] LIU Q, WANG Y, JI F, *et al.*. Phase- and tilt-shift determinations by analysis of spectra sidebands for phase-shift interferometers [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(31): 7654-7659.
- [13] LIU Q, WANG Y, HE J G, *et al.*. Tilt shift determinations with spatial-carrier phase-shift method in temporal phase-shift interferometry [J]. *J. Opt.*, 2014, 16: 075404.
- [14] XU J CH, XU Q, CHAI L Q. Iterative algorithm for phase extraction from interferograms with random and spatially nonuniform phase shifts [J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47(3): 480-485.
- [15] 苏志德, 史振广, 苏东奇, 等. 在随机和倾斜移相下光强归一化的迭代移相算法 [J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112001.
- SU ZH D, SHI ZH G, SU D Q, *et al.*. Iterative phase shifting algorithm with normalized intensity in the presence of random and tilt phase shifts [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112001. (in Chinese)
- [16] 赵智亮, 夏伯才, 陈立华, 等. 相移干涉测量中相移误差的自修正 [J]. *光学精密工程*, 2013, 31(5): 1116-1121.
- ZHAO ZH L, XIA B C, CHEN L H, *et al.*. Self-correction of phase step error in phase shifting interferometric measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 31(5): 1116-1121. (in Chinese)
- [17] LIU Q, WANG Y, JI F, *et al.*. A three-step least-squares iterative method for tilt phase-shift interferometry [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(24): 29505-29515.
- [18] 郝群, 朱秋东, 胡摇, 等. 一种在干涉图外圈开辟环形光强监测区的光强修正方法, 中国: CN 101482394 B [P]. 2010.
- HAO Q, ZHU Q D, HU Y, *et al.*. A light intensity correction method to open annular light intensity monitoring area in the outer interference pattern, China: CN 101482394 B [P]. 2010.
- [19] 马冬梅, 邵晶, 金春水, 等. 一种对移相干涉仪随机误差模态的评估方法, 中国: CN 103047928 A [P]. 2013.
- MA D M, SHAO J, JING CH SH, *et al.*. A assessment method of random error modal for phase-shift interferometer, China: CN 103047928 A [P]. 2013.
- [20] RODDIER C, RODDIER F. Interferogram analysis using Fourier transform techniques [J]. *Appl. Opt.*, 1987, 26(9): 1668-1673.
- [21] GROOT P D. Measurement of transparent plates with wavelength-tuned phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(16): 2658-2663.

作者简介:



刘 乾(1983—),男,山东单县人,博士研究生,工程师,2006年于北京理工大学获得学士学位,2009年于中国工程物理研究院研究生部获得硕士学位,主要从事精密测量、光学设计方面的研究。
E-mail: liuqianblue@126.com



王 洋(1963—),男,辽宁营口人,博士,研究员,博士生导师,1998年于西北工业大学获博士学位,主要从事超精密加工与测量方面的研究。

(版权所有 未经许可 不得转载)