文章编号 2095-1531(2016)04-0483-08

# 双点干涉法位相缺陷检测中的解相算法比较

戚子文,刘炳国,张仲海,卢丙辉,刘国栋*
(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要**:双点光源移相干涉测量是大口径光学元件位相缺陷检测的一种重要方法。为了分析双点干涉中误差对解相算法的影响,首先给出相位缺陷检测的系统结构和理论模型,在此基础上,针对测量过程中主要存在的一次移相误差、二次移相误差、光强误差和随机振动误差,研究了 Hariharan 5 帧移相算法、13 帧移相算法和迭代随机移相算法的解相误差,并进行了仿真分析。结果表明,针对这几种误差源,13 帧算法解相精度整体优于 5 帧法,迭代随机移相算法解相效果优于 13 帧法和 5 帧法,当这几种误差按实际指标同时作用时,迭代随机移相算法解相误差 RMS 小于 5 帧法和 13 帧法,PV 值稳定在 0.5 nm 以内。由于随机振动占主要作用,说明迭代随机移相算法受误差影响很小。

**关 键 词**:位相缺陷;双点干涉;相位提取算法;误差分析
**中图分类号**:TH744.3 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20160904.0483

# Comparison of phase extraction algorithms in testing of phase defects with two-point interference

QI Zi-wen, LIU Bing-guo, ZHANG Zhong-hai, LU Bing-hui, LIU Guo-dong*
(*School of Electrical Engineering and Automation*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150001, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *lgd@hit.edu.cn*

**Abstract**: Two-point interference is an important method in testing of phase defects in optical elements with large diameter. In order to analyze the effects of errors on phase extraction algorithms in two-point interference system, the system structure and theoretical model are given firstly. Based on it, the Hariharan 5-frame algorithm, 13-frame algorithm and the advanced iterative algorithm are studied and simulated considering the linear phase shift error, nonlinear phase shift error, intensity error and random vibration error. The result shows that the accuracy of 13-frame algorithm is generally higher than that of 5-frame algorithm and the effect of advanced iterative algorithm is better than the other two. When the errors are given according to the analysis, the RMS error of the advanced iterative algorithm is less than those of 5-frame algorithm and 13-frame algorithm, and the PV of advanced iterative algorithm is less than 0.5 nm steadily. This means that the error of advanced iterative algorithm is affected less by errors while vibration plays the major role in the errors discussed.

**Key words**: phase defects; two-point interference; phase extraction algorithm; error analysis

**收稿日期**:2016-03-11;**修订日期**:2016-04-15
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(No. 61275096)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61275096)

## 1 引 言

惯性约束聚变(ICF)采用球形内爆增压技术,以高功率、高能量密度的激光轰击球形靶丸,使靶丸内的氘氚燃料达到点火条件,从而形成自持的热核反应,它被认为是解决未来能源危机最有前景的方案[1]。系统装置中包含很多大口径光学元件,位相缺陷是其常见的缺陷之一,其振幅透过率均匀,会对光的相位进行调制,无法被传统的光学元件探测。位相缺陷的存在可能会造成光线会聚,在大功率系统中会损坏整套系统,因此,光学元件位相缺陷的相关技术研究至关重要。为此,2013 年,美国劳伦斯实验室 F. L. Ravizza 等人提出线扫描相位微分成像技术[2](LPDI)进行位相缺陷粗定位,采用移相衍射干涉技术(PSDI)进行准确求解的光学元件位相缺陷检测方法,成功对上千块大口径光学元件进行了位相缺陷的快速检测,满足了美国 NIF 系统中对大口径光学元件位相缺陷快速检测需求,取得了非常好的检测效果。

在移相衍射干涉技术中,移相算法的解相精度直接影响了整套系统的精度。经过多年的发展,移相算法已经形成了较为成熟的理论[3]。近年来,学者们针对不同误差情况对移相算法进行优化。2012 年,张明照[4]等人提出使用连续小波变化分析瞬时条纹频率,获得加权最小二乘法的权重,有效抑制了快速干涉测量时干涉图中的无用信息。2013 年,单小琴[5]等人采用基于二维傅里叶变化的单帧算法,对一幅空间载波干涉条纹图进行处理得到相位,有效抑制了振动的影响。同年,刘江[6]等人基于条纹投影偏折法测量自由曲面提出了一种免疫光强变化的 5 帧算法,与其他算法相比,在光强变化时该算法能有效抑制误差。2014 年,高芬[7]等人基于扩展平均技术推导了 A 类和 B 类 5~13 帧移相算法公式,并仿真分析了两类算法对移相误差和 CCD 非线性误差的抑制能力。2015 年,刘乾[8]等人针对移相干涉过程中的移相误差和条纹对比度的变化,提出一种基于频域分析的算法,从载波干涉图频谱中提取出移相量和对比度信息,补偿给最小二乘法,从而获得相位分布。同年,韩志刚[9]等人针对宽带光干涉仪提出了一种对包络变化和移相误差不敏感的八步移相算法,可以实现移相量的在线标定和校正。卢丙辉[10]等人针对线性移相误差构造了新的 5 帧算法与 Hariharan 算法互补修正,大幅提高了算法的线性误差抑制能力。

## 2 系统组成

本文采用双点光源干涉的方案来实现大口径光学元件位相缺陷检测,原理如图 1 所示。测量光和参考光分别经过单模光纤后衍射形成球面波出射,待测光学元件放在单模光纤后,其后放置一个 CCD 接收干涉图样。当没有放置光学元件时,两束光发生双缝干涉,形成等间距条纹;当添加待测光学元件时,参考光通过不含位相缺陷的部分,测量光通过存在位相缺陷的部分,引入了一个缺陷调制相位,而使 CCD 上探测的光场分布发生变化,通过解光场分布可以求解出缺陷引入的相位分布。该方案使用光纤取代常用点衍射干涉仪中的小孔产生标准球面波,由于目前光纤纤芯直径可以达到 2 μm 以下,并且光纤可以进一步拉成光纤维,这样可以衍射出更高质量的标准球面波[11]。

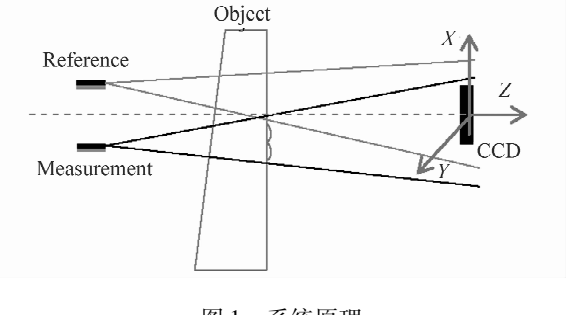


图 1 系统原理

Fig. 1 Principle sketch of the system

参考光和测量光球面波表达式分别为:

$$E_1 = A_1\exp[\mathrm{i}(\varphi_1 - \omega t)]/r\ , \tag{1}$$

$$E_2 = A_2\exp[\mathrm{i}(\varphi_2 - \omega t)]/r\ . \tag{2}$$

当测量光经过位相缺陷时引入调制相位 $\phi$,忽略时间量,则 CCD 上某一点的光强表示为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_2 I_2}\cos(\varphi)\ , \tag{3}$$

式中,$I_1 = A_1^2/r_1^2$,$I_2 = A_2^2/r_2^2$,$I_1 + I_2$ 为背景光强,

$2\sqrt{I_1 I_2}$为调制项,$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 + \phi$ 表示两束光相位差,包括初始相位差和调制相位,初始相位主要包括光点所在位置到两个光纤的距离差引入的相位差和两束光本身的初始相位差,特定的位置引入的相位差固定,可以去除。结合移相算法,可以求出相位差 $\varphi$,进而求得调制相位 $\phi$。

## 3　解相算法

常用的移相算法有定步长算法、等步长算法和单帧算法,其中定步长算法因为其简单、快速等优势使用最为广泛,因此,本文主要研究定步长移相算法中具有代表性的 Hariharan 5 帧法和 13 帧法。由于定步长移相算法对移相误差的抑制能力有限,这里介绍一种基于最小二乘的迭代随机移相算法。

Hariharan 5 帧法和常用 13 帧法公式分别为[12]:

$$\varphi = \arctan\frac{2(I_4 - I_2)}{I_1 + I_5 - I_3}, \tag{4}$$

$$\varphi = \arctan\frac{-3(I_0 - I_{12}) - 4(I_1 - I_{11}) + 12(I_3 - I_9) + 21(I_4 - I_8) + 16(I_5 - I_7)}{-4(I_1 + I_{11}) - 12(I_2 + I_3 + I_9 + I_{10}) + 16(I_5 + I_7) + 24I_6}, \tag{5}$$

其中,5 帧法和 13 帧法第 $m$ 帧图像移相值分别为 $\delta_m = (m-3)\pi/2$ 和 $\delta_m = (m-7)\pi/4$。5 帧法中 $m = 1 \sim 5$,13 帧法中 $m = 1 \sim 13$。

定步长移相算法速度快、精度高,但是要求移相值为固定值,如果环境振动较大,会引入随机的移相误差,此时定步长算法精度很难保证。

迭代随机移相算法(AIA)由通用移相算法(GPSA)演变而来,不要求移相值为固定量,只需移相值已知,可以有效解决移相误差的影响。当背景光强和调制度在移相过程中保持不变时,相位分布为 $\varphi(x,y) = \arctan[-c(x,y)/b(x,y)]$,其中[13]:

$$\begin{bmatrix} a(x,y) \\ b(x,y) \\ c(x,y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & \sum_{m=1}^{M}\cos\delta_m & \sum_{m=1}^{M}\sin\delta_m \\ \sum_{m=1}^{M}\cos\delta_m & \sum_{m=1}^{M}\cos^2\delta_m & \sum_{m=1}^{M}\cos\delta_m\sin\delta_m \\ \sum_{m=1}^{M}\sin\delta_m & \sum_{m=1}^{M}\sin\delta_m\cos\delta_m & \sum_{m=1}^{M}\sin^2\delta_m \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^{M} I_m(x,y) \\ \sum_{m=1}^{M} I_m(x,y)\cos\delta_m \\ \sum_{m=1}^{M} I_m(x,y)\sin\delta_m \end{bmatrix}, \tag{6}$$

式中,$I_m(x,y)$ 为第 $m$ 次移相后测量到的光强分布,$M$ 为干涉图帧数。这一过程可以根据任何移相值求解出相位分布,对移相要求降低,公式更具有通用性。

计算相位分布需要使用确定的移相值,而移相值可以根据相位分布确定。当每幅干涉图内背景光和调制度处处相等时,移相量为 $\delta_m = \arctan(-c_m/b_m)$,其中:

$$\begin{bmatrix} a_m \\ b_m \\ c_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \sum_{n=1}^{N}\cos\varphi_n & \sum_{n=1}^{N}\sin\varphi_n \\ \sum_{n=1}^{N}\cos\varphi_n & \sum_{n=1}^{N}\cos^2\varphi_n & \sum_{n=1}^{N}\cos\varphi_n\sin\varphi_n \\ \sum_{n=1}^{N}\sin\varphi_n & \sum_{n=1}^{N}\sin\varphi_n\cos\varphi_n & \sum_{n=1}^{N}\sin^2\varphi_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{N} I_{m,n} \\ \sum_{n=1}^{N} I_{m,n}\cos\varphi_n \\ \sum_{n=1}^{N} I_{m,n}\sin\varphi_n \end{bmatrix}, \tag{7}$$

式中,$N$ 表示干涉图内用于最小二乘的点的数目,$\varphi_n$ 表示第 $n$ 个点的相位值,$I_{m,n}$ 表示第 $m$ 幅干涉图内第 $n$ 个点的光强。

可以看出,确定移相值可以求解相位分布,确定相位分布可以求解移相值,二者可以形成一个迭代过程,称为迭代随机移相算法,过程如图 2 所

示。

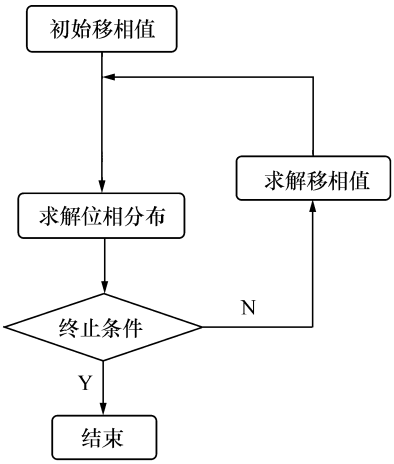


图2 AIA算法流程图

Fig. 2 Flow chart of AIA

迭代终止条件是求解的移相值稳定,可用式(8)表示,式中,$k$为迭代次数,$\varepsilon$为设定阈值。

$$|(\delta_m^k - \delta_1^k) - (\delta_m^{k-1} - \delta_1^{k-1})| < \varepsilon . \quad (8)$$

由于随机移相算法对移相值没有固定要求,因此可以有效抑制随机移相误差的影响,但是其原理要求背景光和调制度分别在干涉图内和干涉图间保持不变,而实际上是不均匀的,这会影响算法的精度。

## 4 仿真验证

为了比较Hariharan 5帧法、13帧法和13帧AIA算法在双点光源干涉系统中的优劣,针对这一模型进行了仿真,分析研究3种算法在几种误差源作用下的解相精度,建立模型如下。

双点光源距离CCD 400 mm,光源距离待测件100 mm,双点光源间距4 mm,光源波长采用532 nm,CCD分辨率为1 024×1 024。根据CCD分辨率,产生一个1 024×1 024的位相缺陷,其分布满足

$$\phi = \frac{2\pi\sqrt{1 - [(x-512)^2 + (y-512)^2]/800^2} - \pi}{}, \quad (9)$$

分布在$-\pi \sim \pi$之内。光源处初始光强为1,得到的相位分布如图3所示,其中干涉图如图4所示。

实际移相光路中的移相值可以表示为[14]:

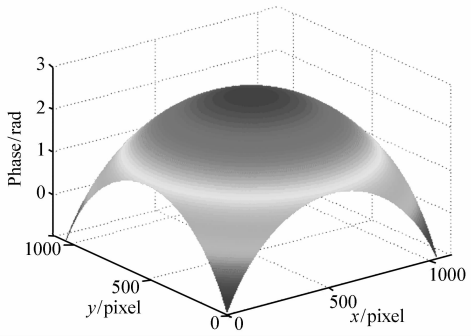


图3 相位分布

Fig. 3 Phase distribution

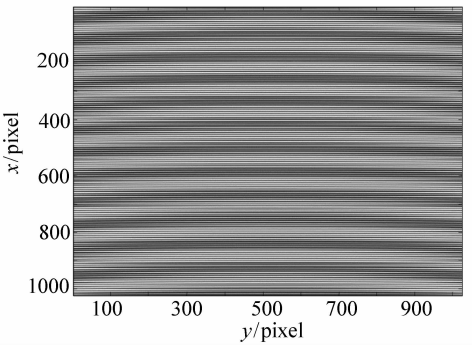


图4 干涉图

Fig. 4 Interference pattern

$$\alpha' = (1 + \varepsilon + \varepsilon'\alpha)\alpha + \alpha_1 + \alpha_2, \quad (10)$$

式中,$\alpha$为理论移相值,$\alpha'$为实际移相值。$\varepsilon$为一次误差系数,来源于移相方向与光轴存在的夹角,和移相长度成一次关系;$\varepsilon'$为二次误差系数,由于移相器运动导轨存在偏摆,和移相长度成二次关系;$\alpha_1$为移相器本身移相误差,取决于移相器的精度;$\alpha_2$为环境扰动引起的移相误差,主要是振动的影响。根据移相器的指标和调节能力,可以做到每移相$\pi/4$引入6 nm一次误差和1.2 nm二次误差,移相器本身精度可以达到0.1 nm;1 μm振动环境中,经过普通隔振后最大存在70 nm振动误差。此外,激光器的功率不稳定和CCD的探测误差,会导致干涉光强存在一定的随机波动,目前激光器的功率可以稳定在1%以内,CCD探测误差可以控制在0.7%以内。

下面分别添加上述几种误差源对3种算法进行仿真分析。不管采用何种移相算法,均会将相位限制在$[-\pi, \pi]$内,产生包裹,因此解包裹算

法的优劣也会对解相结果产生影响。由于本文解包裹算法不是主要研究内容,且在上述误差影响下干涉图不会出现坏点等异常点,因此本文基于图像中点,分别对相位图中每行和每列进行解包裹,简单快速。

移相器本身的精度很高,相对于一次误差和二次误差很小,可忽略不计。针对一次误差,在移相中添加一定的一次误差,每移相 π/4 引入一次误差范围为 1.2 ~ 12 nm,共 10 组数据平均分布,3 种算法得到的 RMS 如图 5 所示,其中,纵轴表示解相误差,单位为 nm,每 2π 的相位对应一个波长 532 nm。可以看出,随着一次误差的增大,13 帧法解相误差 RMS 增长比 5 帧法缓慢,AIA 算法的 RMS 则一直很小。

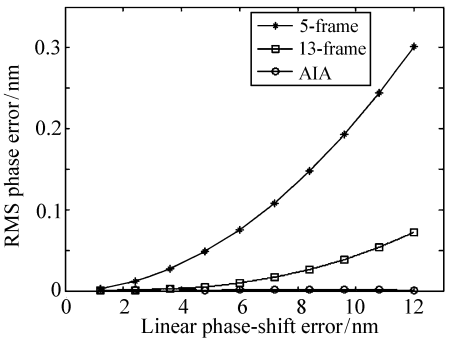


图 5　一次误差引起的解相误差

Fig. 5　Phase error due to linear phase shift

对二次误差进行仿真分析,以 π/4 为移相步长,二次误差系数取 0.24 ~ 2.4 nm,共 10 组数据平均分布,3 种算法得到的 RMS 如图 6 所示。可以看出,随着二次误差的增大,5 帧法解相误差迅速增加,对二次误差抑制能力较差,13 帧法在波动后也会上升,整体比 5 帧法精度高,AIA 算法 RMS 则依旧很低。一次误差和二次误差都属于移相误差,13 帧法抑制移相误差效果比 5 帧法好。AIA 算法由于自身原理,对移相误差尤其不敏感,抑制效果最好。

对光强探测误差进行分析,设定激光器和 CCD 的探测光强误差均为 0.2% ~ 2%,总共 10 组数据平均分布,由于给定的是光强变化的最大范围,在该范围内光强随机变化,因此每组数据进行 4 次测量,进行平均处理,得到的 RMS 如图 7 所示。可以看出,3 种算法在光强误差下的效果

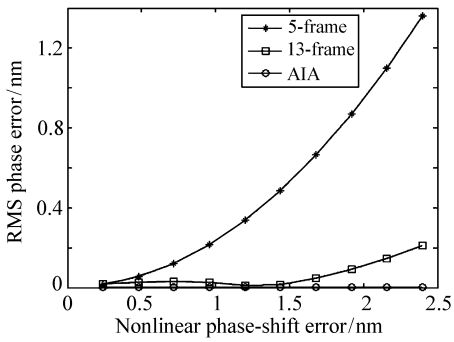


图 6　二次误差引起的解相误差

Fig. 6　Phase error due to nonlinear phase shift

相当,其中,13 帧法和 AIA 结果基本一致,比 5 帧法略好。当光强误差在 1% 以内时,13 帧法和 AIA 解相误差 RMS 均能限制在 0.015 nm 以内,5 帧法能限制在 0.02 nm 以内,结果和已知一致[14-15]。

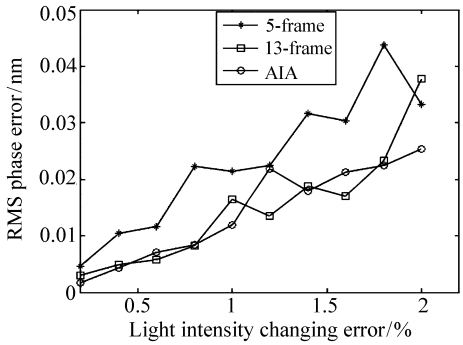


图 7　光强误差引起的解相误差

Fig. 7　Phase error due to light intensity phase shift

从上述分析可以看出,当一次误差、二次误差和光强探测误差满足上述限制条件时,3 种解相误差 RMS 都在 0.2 nm 以内,而这比较容易实现,因此,这些误差并不是主要影响。下面对振动进行仿真分析。

当随机振动振幅取 0、10、30、50、70 nm 时,此时一次误差、二次误差和光强误差按上述能做到的指标给定,解相结果进行 4 次平均,3 种算法解相误差 RMS 如表 1 所示,表中数据表示解相误差 RMS/PV 值,单位 nm。当没有振动时,3 种算法解相误差都很小,结果与上述单独分析结果一致。随着振动幅值的增大,5 帧法和 13 帧法的解相误差 RMS 和 PV 值都迅速增大,且 13 帧算法整体优

于5帧算法,13帧AIA算法则对振动较不敏感,PV值稳定在0.2~0.5 nm之间。当随机振动最大值到70 nm时,5帧和13帧算法解相误差波动较大,因为70 nm已经和移相步长相当,此时会出现串帧,结果非常不稳定,因此应尽量避免随机振动太大。

AIA算法解相精度高,但是算法速度慢。对于1 024×1 024的相位图片,AIA算法进行一次运算需要大约800 s,而5帧法和13帧法只要大约4 s。由于AIA算法每次大约要10次迭代即可收敛,收敛速度已经较快,因此很难从算法本身提升运算速度,后续有望通过提升硬件计算速度实现算法速度的提升,如使用计算机的并行运算等。此外AIA算法还要求背景光和调制度在干涉图内和干涉图间保持不变,当背景光和调制度变化较大时,可以将这两项加入迭代过程进行优化求解[16]。而且,AIA算法依然受振动影响,可以使用加权AIA法,针对具体误差得出具体权重,以获得更高的解相精度[17]。AIA算法在解相过程中可能会出现结算结果与理论相位刚好相反的情况,这是因为光强分布式(3)中余弦是偶函数,当移相值收敛于理论值的相反数时,解相结果与理论相位反向,此时需要标定出移相方向[18]。

**表1 不同振幅下解相结果**

**Tab.1 Phase errors due to vibration with different amplitude**

| Amplitude of vibration/nm | 5-frame | 13-frame | AIA |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.48/2.20 | 0.11/0.31 | 0.077 8/0.267 1 |
| 10 | 1.37/2.55 | 0.97/0.60 | 0.246 7/0.233 4 |
| 30 | 3.36/2.26 | 3.09/1.40 | 0.232 6/0.371 3 |
| 50 | 5.90/3.38 | 5.66/2.39 | 0.700 6/0.522 8 |
| 70 | 9.41/6.34 | 8.97/3.44 | 3.048 1/0.403 0 |

## 5 结 论

针对位相缺陷的检测,本文介绍了双点光源干涉方案,针对一次误差、二次误差、光强误差和随机振动误差,对5帧移相算法、13帧移相算法和13帧迭代随机移相算法进行了仿真比较。仿真结果表明,振动对解相误差影响最大,且13帧法解相精度比5帧法高,而13帧迭代随机移相算法对移相误差不敏感,解相误差RMS较小,PV值稳定在0.2~0.5 nm之间,说明解相误差分布存在整体偏移,可能和解包裹算法有关。然而,迭代算法的运算速度需要提升,并且可以添加权重抑制特定误差,迭代过程中可能会收敛于理论值的相反数,需要进行移相方向的标定。

**参考文献:**


[1] 卢丙辉,刘炳国,孙和义,等.基于子孔径拼接的衍射干涉靶丸形貌检测技术[J].强激光与粒子束,2016,28(2):022006.
LU B H,LIU B G,SUN H Y,*et al*.. Technology of target inspection by diffraction interferometer based on sub-aperture stitching[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2016,28(2):022006. (in Chinese)

[2] RAVIZZA F L. Imaging of Phase Objects using Partially Coherent Illumination[R]. Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL),Livermore,CA,2013. M. Sheik-Bahae,A. A. Said,E. W. Van Stryland. High-sensitivity,Single-beam n2 Measurements. Opt. Lett. 1989,14:955 957.

[3] 钱克矛,续伯钦,伍小平.光学干涉计量中的位相测量方法α[J].实验力学,2001,16(3):239-249.
QIAN K M,XU B Q,WU X P, Phase measurement methods in optical interferometry α[J]. *J. Experimental Mechanics*, 2001,16(3):239-249. (in Chinese)

[4] 张明照,牟建华,刘扬,等.应用复Morlet小波变换分析条纹图相位[J].光学 精密工程,2012,20(3):643-650.

ZHANG M ZH,MOU J H,LIU Y,*et al*.. Phase extraction for fringe patterns based on complex Morlet wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng*.,2012,20(3):643-650. (in Chinese)

[5] 单小琴,朱日宏,李建欣. 基于二维傅里叶变换的单帧干涉图相位提取方法[J]. 应用光学,2013,34(5):802-808.
SHAN X Q,ZHU R H,LI J X. Phase extraction for single frame interferogram based on 2D Fourier transform[J]. *J. Applied Optics*,2013,34(5):802-808. (in Chinese)

[6] 刘江,王飞,王高文,等. 免疫投影基准光强变化的五步移相算法在条纹投影偏折法中的应用[J]. 中国激光,2013(11):203-209.
LIU J,WANG F,WANG G W,*et al*.. Application of standard intensity insensitive five-step phase-shifting algorithm in projected fringe deflectometry[J]. *Chinese J. Lasers*,2013 (11):203-209. (in Chinese).

[7] 高芬,蒋庄德,李兵,等. 基于扩展平均的多步相移算法及误差抑制特性比较[J]. 光子学报,2013,43(4):426001-0426001.
GAO F,JIANG ZH D,LI B,*et al*.. Multi-step phase-shifting algorithm based on extended averaging technique and its error suppression characteristics comparison[J]. *Acta Photonica Sinica*,2013,43(4):426001-0426001. (in Chinese)

[8] 刘乾,王洋,吉方,等. 基于频域分析的抗振移相干涉测量[J]. 光学 精密工程,2015,23(1):252-259.
LIU Q,WANG Y,JI F,*et al*.. Vibration-insensitive phase-shifting interferometry based on frequency domain analysis[J]. *Opt. Precision Eng*.,2015,23(1):252-259. (in Chinese)

[9] 韩志刚,陈磊. 对包络变化及移相误差不敏感的宽带光八步移相算法[J]. 红外与激光工程,2015,44(4):1236-1242.
HANG ZH G,CHEN L. Eight-step phase shifting algorithm for broadband light interferometry insensitive to envelop variation and phase shifting error[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2015,44(4):1236-1242. (in Chinese)

[10] 卢丙辉,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(5):213-219.
LIU B H,LIU G D,SUN H Y,*et al*.. Phase extraction method of microsphere interferometry based on error complementary correction[J]. *Chinese J. Lasers*,2015(5):213-219. (in Chinese)

[11] 张宇,金春水,马冬梅,等. 光纤相移点衍射干涉仪关键技术[J]. 红外与激光工程,2015,44(1):254-259.
ZHANG Y,JIN CH SH,MA D M,*et al*.. Key technology for fiber phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2015,44(1):254-259. (in Chinese)

[12] DE GROOT P. Measurement of transparent plates with wavelength-tuned phase-shifting interferometry[J]. *Applied Optics*,2000,39(16):2658-2663.

[13] 苏志德. 高精度干涉测量随机移相技术研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2013.
SU ZH D. Research on Random Phase Shifting Technology in High Accuracy Interferometry[D]. Changchun:Changchun Institute of optics,Fine Mechanics and Physics,Chinese Academy of Sciences,2013. (in Chinese)

[14] 张宇,金春水,马冬梅,等. 可见光移相点衍射干涉仪的测试误差分析[J]. 红外与激光工程,2012,41(5):1351-1356.
ZHANG Y,JIN CH SH,MA D M,*et al*.. Analysis of measuring errors for visible light phase shifting point diffraction interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2012,41(5):1351-1356. (in Chinese)

[15] 刘艳,苏东奇,杨怀江,等. 高精度干涉检验移相算法对振动误差的免疫能力[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(5):500-508.
LIU Y,SU D Q,YANG H J,*et al*.. Immunity of phase shifting algorithms to vibration errors in high-accuracy interferometry[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*,2010,3(5):500-508. (in Chinese)

[16] 刘乾. 抗振动移相干涉测量算法与实验研究[D]. 北京:中国工程物理研究院,2015.
LIU Q. Research on the algorithm and experiment of vibration-insensitive phase-shifting interferometry[D]. Beijing:China Academy of Engineering Physics,2015. (in Chinese)

[17] 于杰. 用于相移点衍射干涉仪的加权最小二乘相位提取算法[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(6):605-615.
YU J. Weighted least square phase extraction algorithm for phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Chinese J.*

*Optics and Applied Optics*,2010,3(6):605-615. (in Chinese)

[18] 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):98-103.
LI D,JIANG H ZH,LIU Y,*et al*.. Research on randomly phase shifting surface measurement based on least-squares iteration[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2015,52(5):98-103. (in Chinese)

**作者简介:**

戚子文(1992— ),男, 江苏扬州人,硕士研究生,主要从事干涉测量和算法类方面的研究。E-mail: 13613612496@163.com

刘国栋(1974—),男, 辽宁大连人,博士,博士生导师,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail:lgd@hit.edu.cn