

## 电调谐波长移相干涉术

丁煜, 陈磊\*, 王志华, 朱文华, 刘致远

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了实现一体化结构干涉仪的现场数字化检测, 提出了一种电调谐波长移相干涉术, 通过控制注入电流, 调制半导体激光器(LD)的波长, 从而实现时域移相干涉。通过优化传统的随机移相干涉模型, 采用最小二乘求解线性回归模型迭代算法求解相位, 抑制了电调谐的控制精度有限、LD非线性引起的不等间隔移相, 以及环境震动引起的各采样点位相变化不同步的干扰。将该方法应用于现场检测的便携式斐索干涉仪上, 利用其与 Zygo GPI XP/D 型干涉仪测量同一块光学平晶, 测量结果的峰谷值偏差为 9.91 nm, 均方根值偏差为 5.22 nm, 能满足现场定量检测的精度要求。该方法还可以应用于其他类型的激光干涉仪中。

**关键词:** 干涉测量; 半导体激光器; 电流调制; 波长移相; 现场检测

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0506003

## Wavelength phase shifting interferometry based on current modulation

Ding Yu, Chen Lei\*, Wang Zhihua, Zhu Wenhua, Liu Zhiyuan

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A tunable wavelength phase shifting interferometry based on current modulation was proposed to achieve on-site measurement of the interferometers with integrated configuration. The wavelength was modulated by changing the current injected into the laser diode (LD) to achieve temporal phase shifting interferometry. The traditional random phase shifting interference model was optimized, and phase was retrieved by iterative algorithm using least-squares techniques to solve linear regression, which suppressed the interference of unequal interval phase shifting arising from the limit of controlling precision of the current modulation and nonlinearity of LD, and synchronized phase of each sampling point caused by environmental vibration. Experimentally, the proposed method is applied to an on-site Fizeau interferometer to test an optical flat, and the measurement results are compared with Zygo GPI XP/D interferometer, where the error of their peak-to-valley value is 9.91 nm and the error of root-mean-square value is 5.22 nm, which meets the requirement of online measurement and achieves quantitative measurement. The proposed method can be applied to other laser interferometers.

**Key words:** interferometry; laser diode; current modulation; wavelength phase shifting; on-site measurement

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(U1731115); 国家重大科学仪器开发专项(2013YQ150829)

作者简介: 丁煜(1994-), 男, 硕士生, 主要从事光干涉测量方面的研究。Email: dingyu@njjust.edu.cn

通讯作者: 陈磊(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。Email: chenlei@njjust.edu.cn

## 0 引言

一体化结构干涉仪具有较好的便携性和抗振性,常用于现场检测。为了实现高精度的相位提取,通常采用移相干涉术(PSI)<sup>[1]</sup>。常用的移相方法有硬件移相和波长移相。硬件移相的代表是以压电陶瓷堆(PZT)作移相器,该技术最为成熟,应用也最广泛,但其需要精密的机电控制系统,使得干涉仪结构复杂,不适用于小口径干涉仪,且振动的存在容易造成移相串扰,无法满足一体化结构干涉仪用于现场检测时的抗振要求。波长调谐移相则是以激光器作光源和移相器,通过改变激光器的输出波长实现移相,采用波长调谐移相技术可以简化干涉仪的机械结构。典型的波长移相方案采用外腔结构可调谐激光器作为移相器,Bird 等<sup>[2-5]</sup>以光栅作为关键的选频器件,采用机电调制方法,实现高精度、稳定的波长调谐,该方法常用于大口径干涉仪。但是,由于光栅调制频率不高,移相速度慢,且激光器整体价格昂贵,难以用于振动现场检测的一体化结构干涉仪中。基于半导体激光器电流调制的波长移相技术,是通过改变各注入电流而实现的。Liu 等<sup>[6-9]</sup>研究了半导体激光器的电流调制特性,并通过控温、控流、稳频技术实现快速、稳定的波长调谐。电流调制的半导体激光器频移速度快、价格便宜,将其用于便携式干涉仪中,无需额外移相器就能满足快速、高精度的现场检测要求。但是,半导体激光器注入电流的变化会引起输出光功率与激光器相干长度的改变,导致移相干涉图光强和调制度不一致,且很难控制电流的步进量,使调制电流与输出波长成线性关系,实现等间隔移相。另外,干涉仪在现场检测情况下,环境震动等因素的影响会使待测镜片的姿态发生随机改变,造成干涉图中各采样点的位相变化不同步,从而在测试结果中引入较大的纹波误差,因此,需解决移相量不准情况下的波面测试问题。

文中针对以上问题开展研究。优选出光强、对比度基本相同的系列干涉图,将激光器的工作点锁定在电流-波长曲线的线性区,实现准等步长移相,残余移相误差通过随机移相方法进行补偿;同时对传统的随机移相算法<sup>[10-12]</sup>干涉模型进行优化,采用

最小二乘求解线性回归模型迭代算法校正振动环境下各采样点相移不同步引入的计算误差。最后,以便携式激光干涉仪为平台,采用以上技术,恢复光学元件的面形。

## 1 原理

### 1.1 电流调制波长移相原理

波长调谐移相干涉图的光强分布为<sup>[13]</sup>:

$$I(x, y, t) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta(t)] \quad (1)$$

式中: $A(x, y)$ 为背景光强; $B(x, y)$ 为光强调制度; $\phi(x, y)$ 为波前相位差; $\delta(t)$ 为加入到参考光束中的随时间变化的相移量。 $\phi(x, y)$ 和 $\delta(t)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \frac{4\pi h(x, y)}{\lambda_0} \\ \delta(t) &= \frac{4\pi h(x, y)}{\lambda_0^2} \Delta\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $h(x, y)$ 为干涉腔长; $\lambda_0$ 为激光器中心波长; $\Delta\lambda$ 为每次移相的波长改变量。由公式(2)可以看出,相移量与干涉腔长 $h(x, y)$ 和波长改变量 $\Delta\lambda$ 有关。

基于电流调制的波长移相技术,是通过改变等离子增强半导体分布反馈激光器各电极上注入电流,引起载流子浓度变化,从而改变半导体材料的折射率和增益系数,实现波长调制,进而实现移相干涉的。上述变化可以表示为<sup>[14]</sup>:

$$\frac{dn}{dN_0} = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 n \omega^2 m} \quad (3)$$

式中: $n$ 为折射率; $N_0$ 为载流子浓度; $e$ 为电子电荷; $\varepsilon_0$ 为自由空间的介电常数; $m$ 为有效质量; $\omega$ 为发射频率。增益系数和折射率之间通过K-K关系相互联系。

### 1.2 最小二乘求解线性回归模型迭代算法

最小二乘求解线性回归模型迭代算法针对移相量非线性和干涉图各采样点相位不同步的情况,采用最小二乘原理和迭代计算,在适当的收敛条件下对移相量、倾斜因子和相位分布进行联合求解。

基于电流调制的移相干涉图,其背景和调制度随注入电流而变化,但当激光器工作于线性区,且经优选后背景和调制度变化很小,因此,假定干涉图背景和调制度为时间不变量。此时测量得到的干涉条纹光强可表示为:

$$I(x, y, t) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta(x, y, t)] \quad (4)$$

式中： $\Delta(x, y, t) = \delta(t) + \alpha(t)x + \beta(t)y$ ，其中， $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 为倾斜系数。相位恢复算法主要包括以下 4 个计算步骤<sup>[15-16]</sup>。

(1) 初始估计

首先，对干涉图背景  $A(x, y)$  和调制度  $B(x, y)$  进行初始估计：

$$A(x, y, t) = \{ \max[I_m(x, y, t)] + \min[I_m(x, y, t)] \} / 2$$

$$B(x, y, t) = \{ \max[I_m(x, y, t)] - \min[I_m(x, y, t)] \} / 2 \quad (5)$$

式中： $I_m(x, y, t)$ 为测量的干涉图的光强。相位估计采用随机移相算法<sup>[10]</sup>计算得到。

(2) 移相量和倾斜系数计算

对公式(4)的移相量  $\delta(t)$ 、倾斜系数  $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 进行线性一阶近似，光强可以表示为：

$$I_k(x, y, t) = I(x, y, t) + [\delta'(t) + \alpha'(t)x + \beta'(t)y]H(x, y, t) \quad (6)$$

式中： $k$ 为迭代次数； $H(x, y, t) = -B(x, y)\sin[\phi(x, y) + \Delta(x, y, t)]$ 。公式(6)是关于  $\delta'(t)$ 、 $\alpha'(t)$ 和 $\beta'(t)$ 的线性方程，干涉光强的迭代值  $I_k$ 和实际测量值  $I_m$ 之间的误差为：

$$\sum_{i=1}^N [I_m(r_i, t) - I_k(r_i, t)]^2 = f_{\min} \quad (7)$$

式中： $N$ 为计算的像素点的数量； $r$ 对应于空间位置  $(x, y)$ 。对公式(6)运用最小二乘法，求得  $\delta'(t)$ 、 $\alpha'(t)$ 和 $\beta'(t)$ ，则可更新迭代后的移相量和倾斜系数：

$$\delta_k(t) = \delta(t) + \delta'(t)$$

$$\alpha_k(t) = \alpha(t) + \alpha'_k(t) \quad (8)$$

$$\beta_k(t) = \beta(t) + \beta'_k(t)$$

(3) 迭代与收敛条件

由更新迭代后的干涉图光强  $I_k$  计算优值函数：

$$\chi(t) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{I_m(r_i, t) - I_k(r_i, t)}{B(r_i)} \right]^2 \quad (9)$$

当其满足： $\chi(t) < \varepsilon$ 时，终止迭代，式中： $\varepsilon$ 为迭代精度，一般设定为一个小量。

(4) 相位计算

将公式(4)余弦展开得到：

$$I(x, y, t) = A(x, y) + C(x, y)\cos[\Delta(x, y, t)] + S(x, y)\sin[\Delta(x, y, t)] \quad (10)$$

式中： $C(x, y) = B(x, y)\cos[\phi(x, y)]$ ； $S(x, y) = -B(x, y)\sin[\phi(x, y)]$ 。公式(10)为关于干涉图背景  $A(x, y)$ 、

$C(x, y)$ 和 $S(x, y)$ 的线性方程，干涉光强的理论值  $I$ 和实际测量值  $I_m$ 之间的误差为：

$$\sum_{j=1}^F [I_m(r, t_j) - I(r, t_j)]^2 = f_{\min} \quad (11)$$

式中： $F$ 为采集的干涉图的帧数。对公式(10)运用最小二乘法，求得干涉图背景  $A(x, y)$ 、空间量  $C(x, y)$ 和 $S(x, y)$ ，则调制度  $B(x, y)$ 和相位  $\phi(x, y)$ 更新为：

$$B(x, y) = \sqrt{C(x, y)^2 + S(x, y)^2}$$

$$\phi(x, y) = \arctan[-S(x, y)/C(x, y)] \quad (12)$$

当优值函数满足收敛条件后，可以求解出精确的相位分布，进而可以计算出待测元件的面形。具体的计算流程可以见图 1。

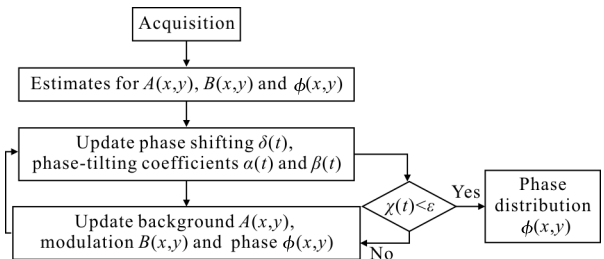


图 1 最小二乘求解线性回归模型迭代算法流程图

Fig.1 Flow chart of the iterative algorithm using least-squares techniques to solve linear regression

2 实验与结果

将以上技术用于便携式斐索型波长调谐干涉仪，其系统结构如图 2 所示。计算机控制波长调谐电控系统对激光器的输出波长进行调制，实现一系列

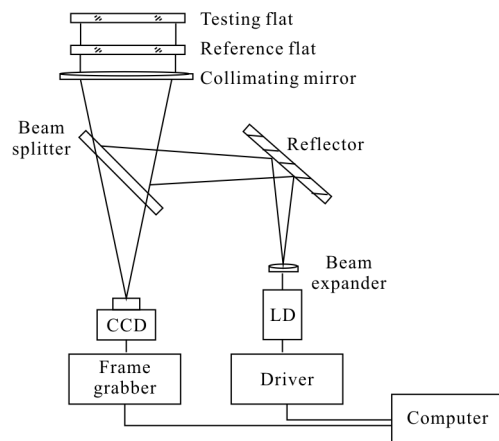


图 2 斐索型波长调谐干涉仪系统结构图

Fig.2 Layout of the wavelength tuning Fizeau interferometer

的移相，对应于斐索型干涉光路中的光程差发生变化，图像采集系统记录每次移相后干涉图的光强分布信息并传输回计算机进行数据处理。

电流调制移相系统包含粗调和精调模式，采用先粗调后精调的方式锁定激光器的工作点。粗调时，根据电流-波长的非线性曲线，调节激光器的工作电流，确定激光器工作波长的初始点，使激光器工作于线性区；精调时，通过计算机控制步进电流流量，精确锁定每一步的工作波长，实现准等步长移相，实验测得的归一化电流增量和移相量的关系曲线如图 3 所示。

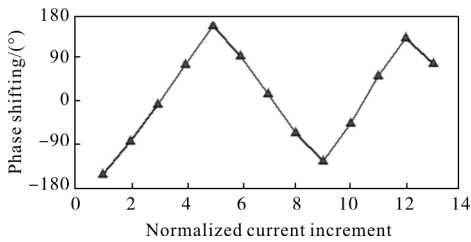
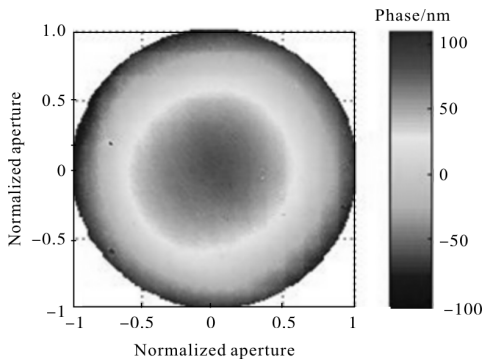


图 3 归一化电流增量-移相量关系曲线

Fig.3 Relationship between normalized current increment and phase shifting

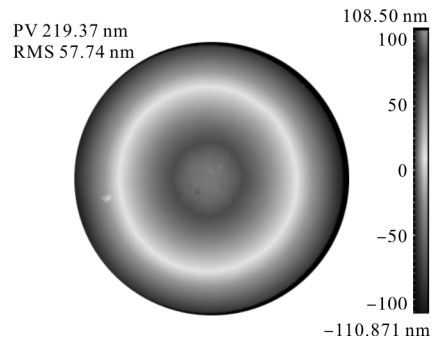
便携式斐索型波长移相干涉仪采用的是中心波长为 634.7 nm 的半导体激光器，利用干涉仪测量一个光学平晶的面形偏差，解算出的二维相位分布如图 4(a)所示，经过计算得出该被测波面的峰谷(PV)值为 209.46 nm，均方根(RMS)值为 52.52 nm。使用 Zygo GPI XP/D 型干涉仪(其工作波长为 632.8 nm)对该平面进行测试，测试结果如图 4(b)所示，其波面的峰谷(PV)值为 219.37 nm，均方根(RMS)值为 57.74 nm。测试结果的峰谷(PV)值偏差为 9.91 nm，均方根(RMS)值偏差为 5.22 nm 计算结果的一致性很好。

为验证电调谐波长移相干涉术的重复性，采用



(a) 便携式激光干涉仪测试结果

(a) Test result of portable laser interferometer



(b) Zygo GPI XP/D 型干涉仪测试结果

(b) Test result of Zygo GPI XP/D interferometer

图 4 二维相位分布

Fig.4 2D phase pattern

便携式斐索干涉仪对同一平晶进行测量，实验每隔 2 min 采集一次数据，每次采集 30 组数据，测量结果的 RMS 值如图 5(a)所示，尽管受到环境影响，3 次测量的重复性测量的标准差仍均小于 0.3 nm。在稳定性测试实验中，每隔 3 h 对同一平晶进行一组测量，每组测量 20 次，并取 20 次平均值作为该组测试结果，间断测试 3 d 共测试 10 组，测量结果的 RMS 值如图 5(b)所示，10 组测量结果的标准差为 0.02 nm。由此反映了所提电调谐波长移相干涉术的重复性和稳定性均很好。

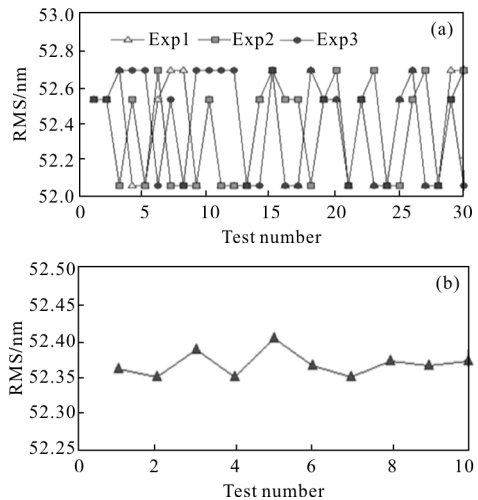


图 5 (a)重复性测量结果;(b)稳定性测量结果

Fig.5 (a) Result of repeated measurement;

(b) Result of stability measurement

### 3 讨论

#### 3.1 振动误差

为验证现场检验存在振动等干扰的情况下上述

相位恢复算法的有效性,利用便携式激光干涉仪进行了实验。用该干涉仪对 25.4 mm 口径的光学平面进行测试,通过测量过程中制造振动改变待测件的倾斜程度,连续采集 8 幅相位倾斜量不相等的干涉图,如图 6(a)~(h)所示。从图 6 可以看出,由于倾斜

量不同,图像中干涉条纹的疏密、方向不同。对于这组干涉图,采用多次迭代算法<sup>[10]</sup>和最小二乘求解线性回归模型的迭代算法计算相位分布,结果分别如图 7(a)和 7(b)所示。从图 7(a)和图 7(b)的对比可以看出,最小二乘求解线性回归模型的迭代算法进行

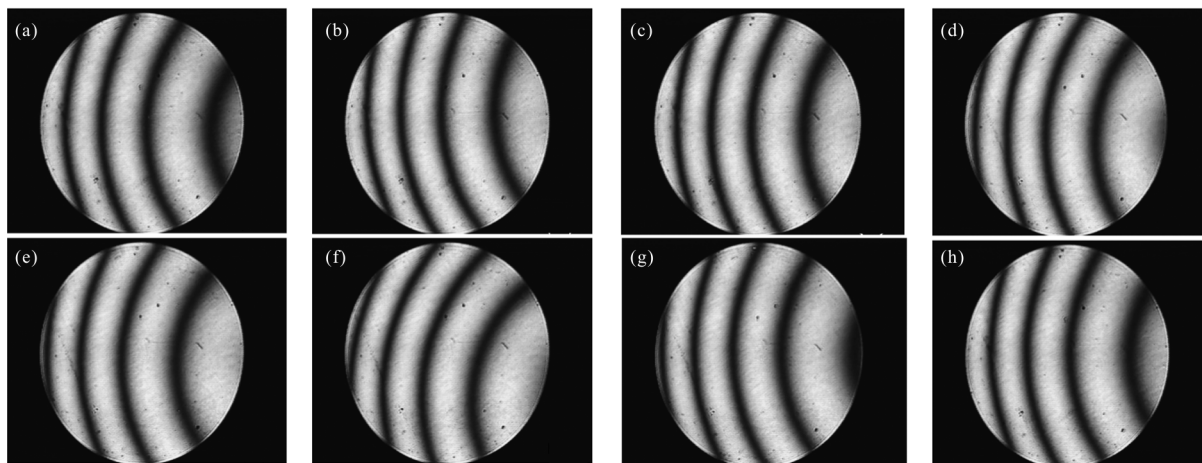


图 6 相位倾斜干涉图

Fig.6 Interferograms with phase tilting

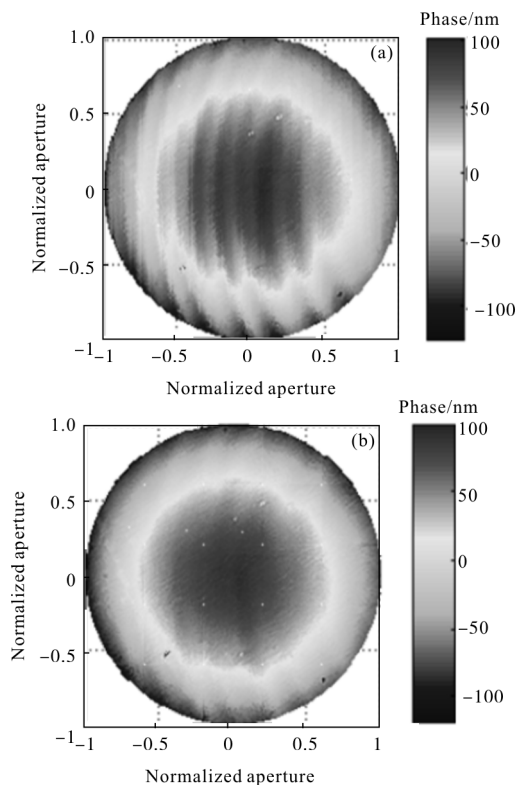


图 7 (a) AIA 算法得到的相位;(b)最小二乘求解线性回归模型的迭代算法得到的相位

Fig.7 (a) Phase derived by AIA; (b) Phase derived by iterative algorithm using least-squares techniques to solve linear regression

倾斜参数的计算是很有效的,解算出的相位纹波误差较小。对于存在正常范围振动的现场检测,该方法可较高精度地实现位相恢复。

### 3.2 干涉图精确优选

半导体激光器注入电流的变化会引起激光相干长度改变,有可能导致干涉图对比模糊,导致计算结果存在较大误差。如图 8(a)即为采集到的一幅对比度较差的干涉图。为保证恢复面形的正确性,需要剔除采集到的此类干涉图再进行相位解算。

在迭代算法中,当优值函数满足一定条件时,对于迭代求得的干涉图的光强理论值  $I(r, t)$ ,将采集到的每帧干涉图的光强与之相减得到残差:

$$e(r, t_j) = |I(r, t_j) - I_m(r, t_j)|, j=1, \dots, F \quad (13)$$

对于同一帧干涉图的每一个像素点的残差求和:

$$a_j = \sum_{i=1}^N e(r_i, t_j) \quad (14)$$

残差和的均方根值  $\sigma_1$  为:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{F} \sum_{j=1}^F (a_j - \bar{a})^2} \quad (15)$$

式中:  $\bar{a} = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^F a_j$ 。对于采集到的 F 帧干涉图,当满足:

$$a_j > 3\sigma_1 \quad (16)$$

则剔除这一帧干涉图,不用于相位计算。对于对比模糊的干涉图,迭代得到的光强理论值与采集到的干涉图光强偏差较大,因此求得  $a$  的较大,在  $3\sigma_1$  范围外会被剔除。图 8(b)、(c)分别为剔除对比模糊干涉图前后解算的二维相位分布。从图 8(b)、(c)的对比可以看出,上述的干涉图优选方法效果明显。因此,将工作点锁定到激光器的线性区,再利用干涉图优选方法剔除对比模糊的干涉图解算相位,恢复出的元件面形结果具有较好的可靠性。

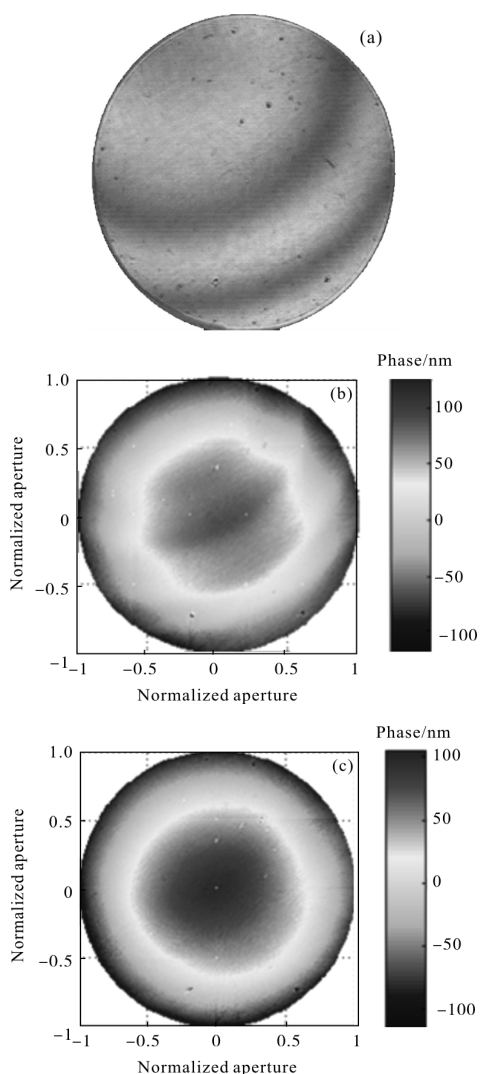


图 8 (a) 对比模糊干涉图; (b) 包含对比模糊干涉图解得的相位; (c) 剔除对比模糊干涉图解得的相位

Fig.8 (a) Contrast blurred interferograms; (b) Phase pattern with contrast blurred interferograms; (c) Phase pattern without contrast blurred interferograms

### 3.3 光强不一致性影响

对于电流调制波长移相技术,注入电流的变化会引起输出光功率的改变,导致干涉图光强不一致,若序列干涉图的光强不一致程度较大,会导致相位计算存在误差。通过校准电流-波长的非线性曲线,将激光器锁定在该曲线的线性段,并通过背景标定大致确定干涉图的光强不一致程度,并剔除光强变化较大的干涉图,能有效控制误差。

挡住测试光,只测量电流调制时参考光的光强  $I_1(r, t)$ ,通过等间隔采样得到每帧图的  $M$  个空间位置的光强值,求得各帧参考光强的均值:

$$\bar{I}_1(t_j) = \frac{\sum_{i=1}^M I_1(r_i, t_j)}{M}, j=1, \dots, F \quad (17)$$

并将其相对于第一帧图归一化得:  $b_j = \bar{I}_1(t_j) / \bar{I}_1(t_1)$ , 求一系列  $b_j$  的均方根值  $\sigma_2$ , 当满足:

$$b_j > 3\sigma_2 \quad (18)$$

则在计算相位时剔除该帧干涉图。图 9 为实际采集的一系列干涉图的光强不一致程度曲线,由图可知,光强不一致程度最大为 6.6%,且相位分布图中不存在明显的一倍条纹周期的波纹误差,因此相位恢复算法中可将背景和调制度假定为常量。

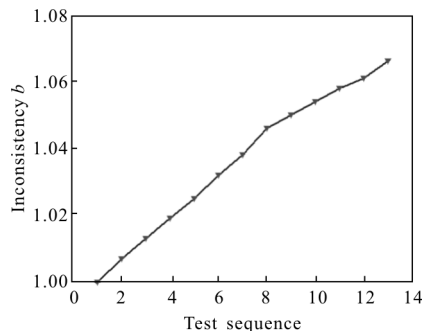


图 9 干涉图光强不一致程度曲线

Fig.9 Curve of inconsistency of interferogram intensity

## 4 结论

将电流调制的波长移相技术用于现场检测干涉仪,可以高精度地得到被测件的面形分布。该方法的应用可以使干涉仪结构紧凑,而且移相速度和计算速度快,适合于一体化干涉仪的现场检测。同时通过工作点锁定、干涉图优选以及多次平均的方法,解决了半导体激光器电流调制引入的干涉图光强和调制

度不一致问题。通过优化传统随机移相干涉模型,实现了 LD 非线性 and 外界扰动情况下移相非线性且相位倾斜的干涉图相位计算。该方法不仅适用于现场检测的便携式干涉仪,而且可以推广至其他类型的激光干涉仪中。

#### 参考文献:

- [1] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [2] Bird D M, Armitage J R, Kashyap R, et al. Narrow line semiconductor laser using fibre grating [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(13): 1115-1116.
- [3] Jin Jie, Ouyang Lixia, Zhang Yan, et al. Wavelength tuning method of the fiber grating external cavity semiconductor laser[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2006, 35(4): 437-440. (in Chinese)  
金杰, 欧阳丽霞, 张妍, 等. 光纤光栅外腔半导体激光器波长调谐方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(4): 437-440.
- [4] Wang Junzhen, Wang Yuefeng, Bai Huijun. A kind of narrow line width external cavity laser diode with wavelength stability and continuous tuning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1202002. (in Chinese)  
王军阵, 汪岳峰, 白慧君. 一种波长稳定可调的窄线宽外腔二极管激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1202002.
- [5] Chi M, Jensen O B, Petersen P M. Tuning range and output power optimization of an external-cavity GaN diode laser at 455 nm[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(9): 2263.
- [6] Liu J Y, Yamaguchi I, Kato J I, et al. Active phase-shifting interferometer using current modulation of a laser diode [J]. *Optical Review*, 1996, 3(4): 287-292.
- [7] Yuan Jie, Chen Wenlan, Qi Xianghui, et al. Design for power supply and frequency stabilization of ECL [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2006, 35(S3): 115-119. (in Chinese)  
袁杰, 陈文兰, 齐向辉, 等. 可调谐半导体激光器的高精密驱动电源与稳频设计 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S3): 115-119.
- [8] Yan Deke, Zhong Zhen, Sun Chuandong. Mathematical model of the laser frequency shift modulated by small signal low frequency current [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1465-1468. (in Chinese)  
阎得科, 钟镇, 孙传东. 小信号低频电流调制下激光频移数学模型[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1465-1468.
- [9] Cong Menglong, Li Li, Cui Yansong, et al. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1629-1636. (in Chinese).  
丛梦龙, 李黎, 崔艳松, 等. 控制半导体激光器的高稳定度数字化驱动电源的设计 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(7): 1629-1636.
- [10] Wang Z, Han B. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase -shifted interferograms [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(14): 1671-1673.
- [11] Vargas J, Quiroga J A, Belenguer T. Phase -shifting interferometry based on principal component analysis [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1326-1328.
- [12] Vargas J, Sorzano C O S. Quadrature component analysis for interferometry[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2013, 51(5): 637-641.
- [13] Malacara D. *Optical Shop Testing* [M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 2006.
- [14] Suzuki N, Morinaga M. Simulation of enhanced plasma effect wavelength tunable lasers [J]. *Optoelectronics, IEEE Proceedings*, 1995, 142(1): 55-60.
- [15] Deck L L. Model -based phase shifting interferometry. [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(21): 4628-4636.
- [16] Li J, Zhu R, Chen L, et al. Phase-tilting interferometry for optical testing.[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(15): 2838-2841.