

长干涉腔波长移相计算的自适应相位筛选法

郭仁慧 李建欣 朱日宏 陈磊 何勇

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 波长移相干涉仪可用于大口径光学元件的测试。其移相量需经过标定方可采用定步长移相算法计算相位分布。在长腔长测试条件下,由于激光器的波长调谐驱动源的精度有限,采用定步长移相算法求解相位分布的精度不高。在分析干涉腔长和波面计算误差的基础上,提出了一种自适应相位筛选计算方法。根据电压-相位标定曲线采集多组周期干涉图,对干涉图中的光强值进行均匀分布抽样后,对其进行随机移相计算,求取每帧干涉图精确的步进移相量,从中筛选出移相量为 $\pi/2$ 的四帧干涉图,利用四步移相计算公式求得精确的相位分布。实验结果表明,在波长移相干涉仪中运用该方法,可以很好地解决长腔长测试条件下的相位计算问题,与未进行筛选的计算结果比较,其测试精度得到了显著提高。

关键词 测量;波长移相干涉;自适应;相位筛选;长干涉腔

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0112004

An Adaptive Phase Selecting Method of Wavelength Tuning at Long Interference Cavity Length

Guo Renhui Li Jianxin Zhu Rihong Chen Lei He Yong

(Institute of Electronic Engineering and Photoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The wavelength tuning interferometer is applied to measure large optical components. In order to obtain the wavefront using the algorithms with certain phase steps, the steps should be calibrated. When it is measured at long interference cavity length, the calculating precision of algorithms with certain steps is low. It is mostly because of the limited resolution of the laser controller. Based on analyzing the relationship between the interference cavity length and the calculating error of the wavefront, an adaptive phase selecting method is presented. Firstly, several periods of interferograms are sampled according to the voltage-phase calibration curve. Then the intensity values of the interferograms are uniformly sampled. By calculating the sampled intensity values with the randomly phase shifting algorithm, the phase steps between every two interferograms are obtained. According to the steps, four interferograms with $\pi/2$ step are chosen from those interferograms. At the end, the measured wavefront is obtained by calculating the four interferograms with four-step phase shifting formula. The experimental result shows the validity of the presented method. It can obtain the wavefront when it is measured at long interference cavity length in the wavelength tuning interferometer. And after comparing with the result of no selection method, it is clear to see that the presented method is of high precision.

Key words measurement; wavelength tuning interferometry; adaptive; phase selecting; long interference cavity length

OCIS codes 100.5070; 120.3180; 260.3160; 200.4560

收稿日期: 2012-07-26; 收到修改稿日期: 2012-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(61108041)和江苏省自然科学基金(BK2012802)资助课题。

作者简介: 郭仁慧(1979—),女,博士研究生,讲师,主要从事光学仪器、光学干涉测量等方面的研究。

E-mail: grhjj@163.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,博士,教授,主要从事光学仪器、光学测量和光学图像处理等方面的研究。

E-mail: zhurihong@vip.sina.com

1 引言

在光学系统中,采用大口径光学元件能扩大视场、降低系统复杂性、提高空间分辨率以及增大信号能量等,因此自 20 世纪 80 年代以来,世界各国在技术条件容许的情况下,在天文、能源和航天等领域都尽可能采用大口径光学元件^[1~4]。而在大口径光学元件的加工过程中必须有相应的测试手段,才能保证加工的高效率和高精度。干涉仪采用干涉检测技术,实现波长量级的非接触式测量,并具有比其他类型的检测仪器更高的灵敏度与更好的易用性。因此,应研制大口径平面干涉仪作为大口径光学元件的检测设备。国外,美国 Zygo 公司和 Wyko 公司已研制出 $\Phi 610$ mm 口径相移平面干涉仪^[5,6]。国内,南京理工大学、成都太科光电公司也研制出了 $\Phi 600$ mm 口径相移平面干涉仪^[7]。

移相技术从实现方式上可以分为硬件移相技术和波长移相技术^[8]。以压电陶瓷(PZT)为代表的硬件移相技术^[9],在移相过程中,容易因机械应力的变化产生误差。特别是当干涉仪系统较大时,会为 PZT 推动移相带来困难,并且非直线运动会引入较大误差。而在波长移相干涉仪中,激光器既作为光源,其波长又可以连续改变,起到移相器的作用,不再需要推动硬件实现移相,大大简化了干涉仪的机械结构。并且在测量中,系统的机械部分保持不动,消除了由于硬件移动引起的误差,从而进一步提高了测量精度。

移相算法以步进移相量为 $\pi/2$ 的定步长移相算法精度最高^[10]。但是,波长移相干涉仪在不同的干涉腔长下进行测试时,相同的波长变化量引起的步进移相量不一样,故采用定步长移相算法求解相位分布,需进行移相量的标定^[11,12]。当干涉腔长较长时,移相量的分辨率受激光器波长调谐分辨率的限制,同时由于环境振动、气流扰动等因素的影响^[13],导致移相量难以满足定步长移相算法的要求,从而给最终的波面测试结果引入较大误差。而根据大口径光学元件生产制造的实际测试需求,干涉仪需要满足最长 5 m 腔长的测试要求。因此,需解决长腔长下的波面测试问题。本文在分析干涉腔长和波面误差的关系的基础上,提出了一种自适应相位筛选计算方法。该方法能够从多幅干涉图中自适应地筛选出移相量为 $\pi/2$ 的 4 帧干涉图,再利用四步移相计算公式求得待测波面。实验结果表明,在长腔长测试条件下,该算法仍可以高精度地得到大口径光学元件的波面分布。

2 干涉腔长与波面误差

菲佐型波长移相干涉仪的系统结构如图 1 所示。由参考镜和测试镜反射的两束光产生干涉,波长调谐激光器在电压驱动源的驱动下改变波长,使得相位改变,通过图像卡采集多幅移相干涉图,由计算机处理后得到被测件的相位。

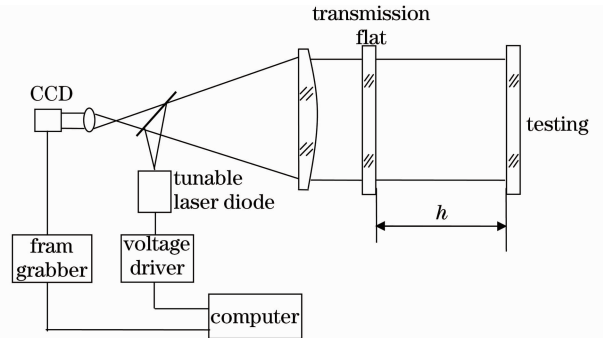


图 1 菲佐型波长调谐干涉仪系统结构图
Fig. 1 Schematic of the wavelength tuning Fizeau interferometer

波长调谐移相干涉仪的干涉光强为

$$I = A + B\cos(\varphi + \delta), \quad (1)$$

式中 A 为背景光强, B 为光强调制度, φ 为待测相位, δ 为移相量。其中

$$\varphi = \frac{4\pi h}{\lambda_0}, \quad (2)$$

$$\delta \approx -\frac{4\pi h t \Delta\lambda}{\lambda_0^2}, \quad (3)$$

式中 h 为干涉腔长, λ_0 为初始波长, $\Delta\lambda$ 为每次移相时的波长调谐量, t 为移相次数。

从(3)式可以看出,当移相量 δ 一定时,干涉腔长 h 增大时,要求波长调谐量 $\Delta\lambda$ 越小。而 $\Delta\lambda$ 受限于激光器波长调谐的分辨率和激光器电压驱动源的分辨率,不可能任意减小,导致干涉图之间的移相量偏离 $\pi/2$,如果此时直接采用四步移相计算方法会引入波面计算误差,主要分析过程如下。

假设波长调谐激光器的波长变化与输入驱动电压之间具有良好的线性关系,波长调谐范围为 $\lambda_{\min} \sim \lambda_{\max}$,输入电压范围为 $V_{\min} \sim V_{\max}$,有

$$K = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}. \quad (4)$$

假设电压驱动源的输出电压范围为 $V'_{\min} \sim V'_{\max}$,转换位数为 N ,则电压驱动源的输出电压最小步间隔量为

$$\Delta V_{\min} = \frac{V'_{\max} - V'_{\min}}{2^N}. \quad (5)$$

由 ΔV_{\min} 引起的最小波长变化量为

$$\Delta\lambda_V = \Delta V_{\min} K. \quad (6)$$

把可调谐激光器的最小波长调谐量表示为 $\Delta\lambda_L$,则使得步进移相量分辨率受最大影响的波长变化量为

$$\Delta\lambda_{\min} = \max(\Delta\lambda_V, \Delta\lambda_L). \quad (7)$$

利用以下波长变化关系

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi h}{\lambda_0^2} \Delta\lambda, \quad (8)$$

可以得到波长变化量为 $\Delta\lambda_{\min}$ 时相位变化量与腔长 h 之间的关系为

$$\Delta\varphi_{\min} = \frac{4\pi\Delta\lambda_{\min}}{\lambda_0^2} h. \quad (9)$$

令整数 M_n 取以下值

$$M_n = E\left(\frac{n\pi}{2\Delta\varphi_{\min}}\right), \quad n = 1, 2, 3, \quad (10)$$

式中符号 $E(x)$ 为对浮点数 x 取最接近的整数。

通过四步移相公式,可以求得待测相位分布

$$\varphi' = \arctan\left[\frac{\cos(\varphi + \Delta\varphi_{\min} M_3) - \cos(\varphi + \Delta\varphi_{\min} M_1)}{\cos\varphi - \cos(\varphi + \Delta\varphi_{\min} M_2)}\right]. \quad (11)$$

则由激光器波长调谐的分辨率和激光器电压驱动源的分辨率而引入的最大波面计算误差为

$$\epsilon_{\max} = \max\{|\varphi' - \varphi| \mid 0 \leq \varphi < 2\pi\}. \quad (12)$$

本文采用的激光器的中心波长为 $\lambda_0 = 1055 \text{ nm}$,波长调谐范围为 $\lambda_{\min} = 1054.917 \text{ nm}$, $\lambda_{\max} = 1055.325 \text{ nm}$,所对应的波长调谐输入电压范围为 $V_{\min} = -2.25 \text{ V}$, $V_{\max} = 2.25 \text{ V}$ 。根据波长调谐激光器的生产检测报告,激光器的输出波长变化在 $V_{\min} \sim V_{\max}$ 之间具有很好的线性关系,因此按照(4)式得到波长变化与驱动电压曲线的斜率为 $K = 9.06 \times 10^{-2} \text{ nm/V}$ 。制作了高精度的电压驱动源,其输出电压范围 $V'_{\min} = 0$, $V'_{\max} = 5 \text{ V}$,数模转换位数 $N = 18$ 。根据以上参数,可以得到最大波面计算误差 ϵ_{\max} 和干涉腔长之间 h 的曲线关系,如图2所示。从图中可以看出,随着干涉腔长 h 的增大,最大波面计算误差 ϵ_{\max} 同时增大。在测试腔长为 3 m 时,最大波面计算误差 ϵ_{\max} 将要达到 $\lambda/400$,此时如果不采用有效的计算处理方法,将会影响系统的测试精度。

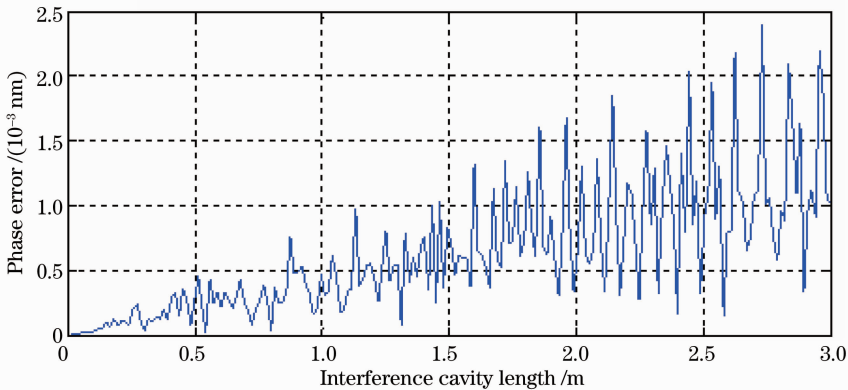


图2 最大波面计算误差和干涉腔长之间的关系图

Fig. 2 Relationship between maximum calculating error of the wavefront and the interference cavity length

3 自适应相位筛选法

为了有效减小由波长调谐分辨率受限带来的波面计算误差,本文提出了一种自适应相位筛选计算方法,根据电压-相位标定曲线采集多组周期干涉图,首先对干涉图序列的光强值进行均匀分布抽样,再对采样后的光强数据进行随机移相计算,求取每帧干涉图精确的相位步进量,然后从中筛选出4帧干涉图数据,使得相应的相位步进量 δ_0 最接近0, δ_1 最接近 $\pi/2$, δ_2 最接近 π , δ_3 最接近 $3\pi/2$,最后利用四步移相计算公式求得精确的待测相位。该方法的简要过程如图3所示,包括两个重要的计算处理过

程:随机移相计算和相位筛选。其中随机移相计算解决步进移相量的精确求解问题,相位筛选解决4帧移相数据的选择问题。

3.1 随机移相计算

为了解决移相量的精确计算问题,采用随机移相计算方法。随机移相计算是一种在步进移相量未知的情况下,采用最小二乘原理和迭代计算,在适合的收敛约束条件下对步进移相量和波面分布值进行联合求解的相位计算方法^[14~16]。如图4所示,随机移相计算的主要处理过程分为相位分布值求解和步进移相量求解两个迭代计算步骤,在第一步中假设

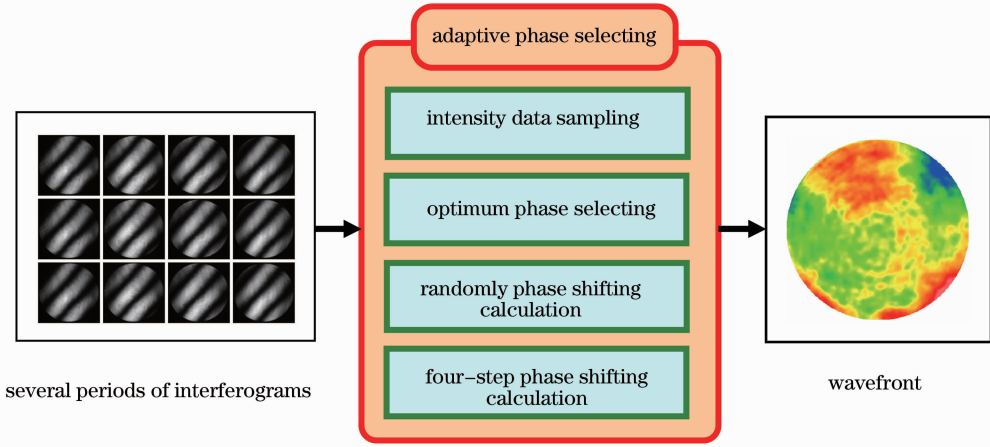


图 3 自适应相位筛选法
Fig. 3 Adaptive phase selecting method

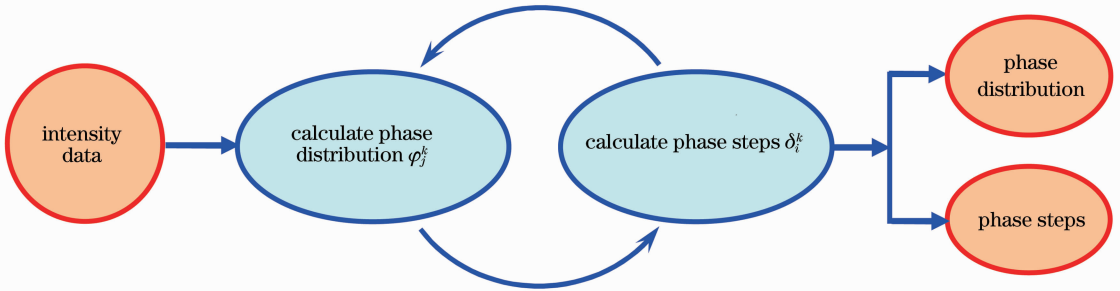


图 4 随机移相算法计算流程图
Fig. 4 Flow chart of the randomly phase shifting algorithm

步进移相量已知的条件下求解出相位分布值,在第二步中根据这个相位分布值反过来求解步进移相量。通过采用优化的收敛约束条件和迭代计算步骤,有效提高相位分布计算的收敛速度,实现快速精确的计算目的,满足实用要求。随机移相计算的主要原理过程如下所述。

1) 相位分布计算

采集的干涉图序列表示为

$$I_{ij}^T = A_{ij} + B_{ij} \cos(\varphi_j + \delta_i), \quad (13)$$

式中 i 为干涉图的序号, j 为干涉图中光强值的序号。

假设光强背景 A_{ij} 、光强调制度 B_{ij} 与干涉图序号 i 无关,而只与光强值序号 j 相关,则可以把 A_{ij} 和 B_{ij} 分别表示为 $A_{ij} = a_j, B_{ij} \cos \varphi_j = b_j, -B_{ij} \sin \varphi_j = c_j$, 因此有

$$I_{ij}^T = a_j + b_j \cos \delta_i + c_j \sin \delta_i. \quad (14)$$

此时的 I_{ij}^T 为干涉光强的理论值,引入以下目标函数

$$S_j = \sum_{i=1}^M (I_{ij}^T - I_{ij})^2 = \sum_{i=1}^M (a_j + b_j \cos \delta_i + c_j \sin \delta_i - I_{ij})^2 = f_{\min}. \quad (15)$$

根据最小二乘原理有

$$\mathbf{X}_j = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}_j, \quad (16)$$

式中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} M & \sum_{i=1}^M \cos \delta_i & \sum_{i=1}^M \sin \delta_i \\ \sum_{i=1}^M \cos \delta_i & \sum_{i=1}^M \cos^2 \delta_i & \sum_{i=1}^M \sin \delta_i \cos \delta_i \\ \sum_{i=1}^M \sin \delta_i & \sum_{i=1}^M \sin \delta_i \cos \delta_i & \sum_{i=1}^M \sin^2 \delta_i \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{X}_j = \{a_j \quad b_j \quad c_j\}^T, \quad (18)$$

$$\mathbf{B}_j = \left\{ \sum_{i=1}^M I_{ij}, \sum_{i=1}^M I_{ij} \cos \delta_i, \sum_{i=1}^M I_{ij} \sin \delta_i \right\}^T. \quad (19)$$

从解向量 \mathbf{X}_j 中求得相位分布

$$\varphi_j = \arctan(-c_j/b_j). \quad (20)$$

2) 移相量计算

假设光强背景 A_{ij} 、光强调制度 B_{ij} 与光强值的序号 j 无关,而只与干涉图的序号 i 相关,则可以把 A_{ij} 和 B_{ij} 分别表示为 $A_{ij} = a'_i, B_{ij} \cos \delta_i = b'_i,$

— $B_{ij} \sin \delta_i = c'_i$ ，因此有

$$I_{ij}^T = a'_i + b'_i \cos \varphi_j + c'_i \sin \varphi_j, \quad (21)$$

式中 φ_j 为上述“计算相位分布”过程的计算结果。

同样,引入以下目标函数

$$S'_i = \sum_{i=1}^M (I_{ij}^T - I_{ij})^2 = \sum_{i=1}^M (a'_i + b'_i \cos \varphi_j + c'_i \sin \varphi_j - I_{ij})^2 = f_{\min}. \quad (22)$$

根据最小二乘原理有

$$\mathbf{X}'_i = \mathbf{A}'^{-1} \mathbf{B}'_i, \quad (23)$$

式中

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} M & \sum_{j=1}^N \cos \varphi_j & \sum_{j=1}^N \sin \varphi_j \\ \sum_{j=1}^N \cos \varphi_j & \sum_{j=1}^N \cos^2 \varphi_j & \sum_{j=1}^N \sin \varphi_j \cos \varphi_j \\ \sum_{j=1}^N \sin \varphi_j & \sum_{j=1}^N \sin \varphi_j \cos \varphi_j & \sum_{j=1}^N \sin^2 \varphi_j \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$\mathbf{X}'_i = \{a'_i \quad b'_i \quad c'_i\}^T, \quad (25)$$

$$\mathbf{B}'_j = \left\{ \sum_{j=1}^N I_{ij} \quad \sum_{j=1}^N I_{ij} \cos \varphi_i \quad \sum_{j=1}^N I_{ij} \sin \varphi_i \right\}^T. \quad (26)$$

从解向量 \mathbf{X}'_i 中求得移相量

$$\delta_i = \arctan(-c'_i/b'_i). \quad (27)$$

3) 迭代与收敛条件

上述“相位分布计算”和“移相量计算”两个计算过程反复进行构成迭代循环,直到满足以下收敛条件时结束:

$$|(\delta_i^k - \delta_i^k) - (\delta_i^{k-1} - \delta_i^{k-1})| < \epsilon, \quad (28)$$

式中 ϵ 为迭代精度,一般设定为一个少量; k 表示迭代次数。按照以上的计算过程,可以求解出精确的相位分布值 φ_j 和步进移相值 δ_i 。

4) 光强数据采样

为了提高收敛速度,采用空间伪随机均匀分布抽样方法对干涉图序列光强进行采样,减少迭代过程的计算量。假设干涉图的分辨率为 $2^N \times 2^N$, 采样顺序为 $n(0 \leq n < 2^N \times 2^N)$ 的光强数据在原干涉图

中的坐标位置 (i, j) 可表示为

$$i = \sum_{m=0}^{N-1} 2^{N-m-1} \alpha(n, m), \quad (29)$$

$$j = \sum_{m=0}^{N-1} 2^{N-m-1} \beta(n, m), \quad (30)$$

式中

$$\alpha(n, m) = \begin{cases} 0, & \delta(n, m) \in \{0, 2\} \\ 1, & \delta(n, m) \in \{1, 3\} \end{cases} \quad (31)$$

$$\beta(n, m) = \begin{cases} 0, & \delta(n, m) \in \{0, 3\} \\ 1, & \delta(n, m) \in \{1, 2\} \end{cases} \quad (32)$$

$$\delta(n, m) = \left[\frac{n}{4^m} \right] \bmod(4), \quad (33)$$

(33)式中的符号 $[x]$ 表示对 x 向下取整。

最后被用来进行随机移相计算的光强数据为条纹有效区域内的采样点。图 5 给出了光强数据的采

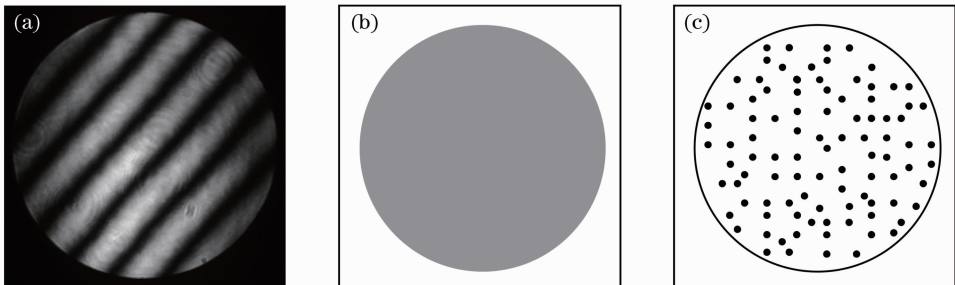


图 5 光强数据采样示意图。(a)干涉图;(b)有效区域;(c)采样数据点

Fig. 5 Diagram data of intensity points sampling. (a) Interferogram; (b) valid area; (c) sampled data points

样示意图。

通过空间伪随机均匀分布抽样,在没有降低收敛稳定性的同时,显著提高了随机移相计算的运算速度,使得波面测试软件在大测试腔长情况下的相位计算时间和小测试腔长时的相位计算时间相当,达到了很好的实用程度。

3.2 相位筛选

通过随机移相求得每帧干涉图精确的包裹步进移相量 $\delta_i (0 \leq \delta_i < 2\pi)$, 令

$$\Delta\phi_i = f_{\text{wrap}}\left(\frac{i\pi}{2}\right) - \delta_i, \quad (34)$$

式中号 $f_{\text{wrap}}(x)$ 为把相位 x 包裹到范围 $0 \sim 2\pi$ 之间。则 $\Delta\phi_i$ 满足

$$|\Delta\phi_i| \leq \Delta\phi_{\min}. \quad (35)$$

$$\psi_{\min} = \min\{|\Delta\phi_{k_0} - \phi| + |\Delta\phi_{k_1} - \phi| + |\Delta\phi_{k_2} - \phi| + |\Delta\phi_{k_3} - \phi| \mid k_i \in \{4m + i \mid m = 0, 1, \dots, M/4 - 1\}, \phi \in [-\Delta\phi_{\min}, \Delta\phi_{\min}]\}. \quad (40)$$

算法的简要过程为

- 1) 按照(34)式求得相位偏差 $\Delta\phi_i$;
- 2) 按照(40)式,对 $n = 0, 1, \dots, N$ 采用遍历计算方法找出相位差累加和达到最小值 ψ_{\min} 时的 4 帧干涉图;
- 3) 对筛选出的 4 帧干涉图采用四步移相计算方法求得待测相位。

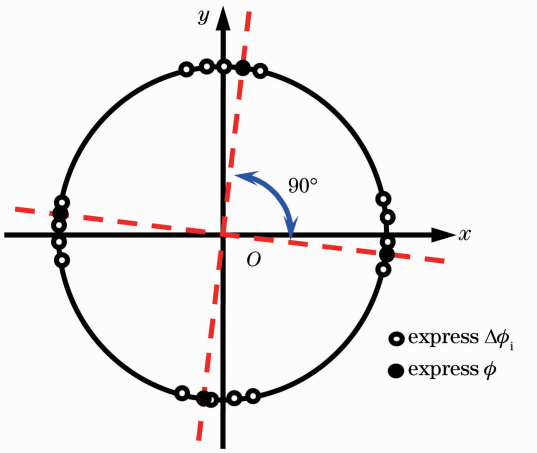


图 6 相位筛选图示

Fig. 6 Diagram of phase selecting

4 测试结果与分析

在不同腔长 $h = 0.26 \text{ m}$ 和 $h = 3 \text{ m}$ 时对口径为 600 mm 的平面镜进行测试实验。在 0.26 m 腔长

引入以下变量:

$$x_i = \sin\left(\Delta\phi_i + \frac{i\pi}{2}\right), \quad (36)$$

$$y_i = \cos\left(\Delta\phi_i + \frac{i\pi}{2}\right), \quad (37)$$

$$x'_i = \sin\left(\phi + \frac{i\pi}{2}\right), \quad (38)$$

$$y'_i = \cos\left(\phi + \frac{i\pi}{2}\right). \quad (39)$$

在 xy 二维坐标空间中, (x_i, y_i) 和 (x'_i, y'_i) 的分布情况如图 6 所示。相位筛选的基本思想是挑选出与坐标 (x'_i, y'_i) 距离最小的坐标 (x_i, y_i) , 使得相位差累加和达到最小。

测试时波长调谐分辨率完全能够满足精度要求,环境因素对测试的影响很小,可以准确地得到移相量为 $\pi/2$ 的干涉图,对其进行计算得到的相位分布作为参考相位分布;在 3 m 时先对干涉图不进行筛选直接计算得到波面分布,再通过自适应相位筛选法,筛选出符合移相精度要求的一组干涉图,进行波面计算。最后将计算结果与参考相位分布进行比较。

图 7 为腔长 $h = 3 \text{ m}$ 时采集的三组周期干涉图,图 8 为通过自适应筛选法从三组干涉图中筛选出的 4 帧干涉图,分别对应于第 08、05、10 和 03 帧。由这 4 帧干涉图计算得到的二维波面分布图如图 9 所示。其中图 9(a) 为腔长 $h = 0.26 \text{ m}$ 的计算结果, $d_{\text{PV}} = 0.063\lambda$, $\epsilon_{\text{RMS}} = 0.010\lambda$; 图 9(b) 为腔长 $h = 3 \text{ m}$ 不进行筛选的计算结果, $d_{\text{PV}} = 0.081\lambda$, $\epsilon_{\text{RMS}} = 0.010\lambda$, d_{PV} 值与 (a) 相差约 $\lambda/50$; 图 9(c) 为腔长 $h = 3 \text{ m}$ 采用了自适应相位筛选法的计算结果, $d_{\text{PV}} = 0.066\lambda$, $\epsilon_{\text{RMS}} = 0.010\lambda$, d_{PV} 值与 (a) 相差约 $\lambda/300$ 。从 d_{PV} 和 ϵ_{RMS} 值来看,采用了自适应相位筛选法的计算结果更接近于小腔长时的计算结果;从波面分布的形状来看,采用了自适应相位筛选法的波面分布也更接近于小腔长时的波面分布。进行了多组测试实验,数据结果基本和以上分析相似,表明在大腔长测试时采用自适应相位筛选法提高了测试精度。

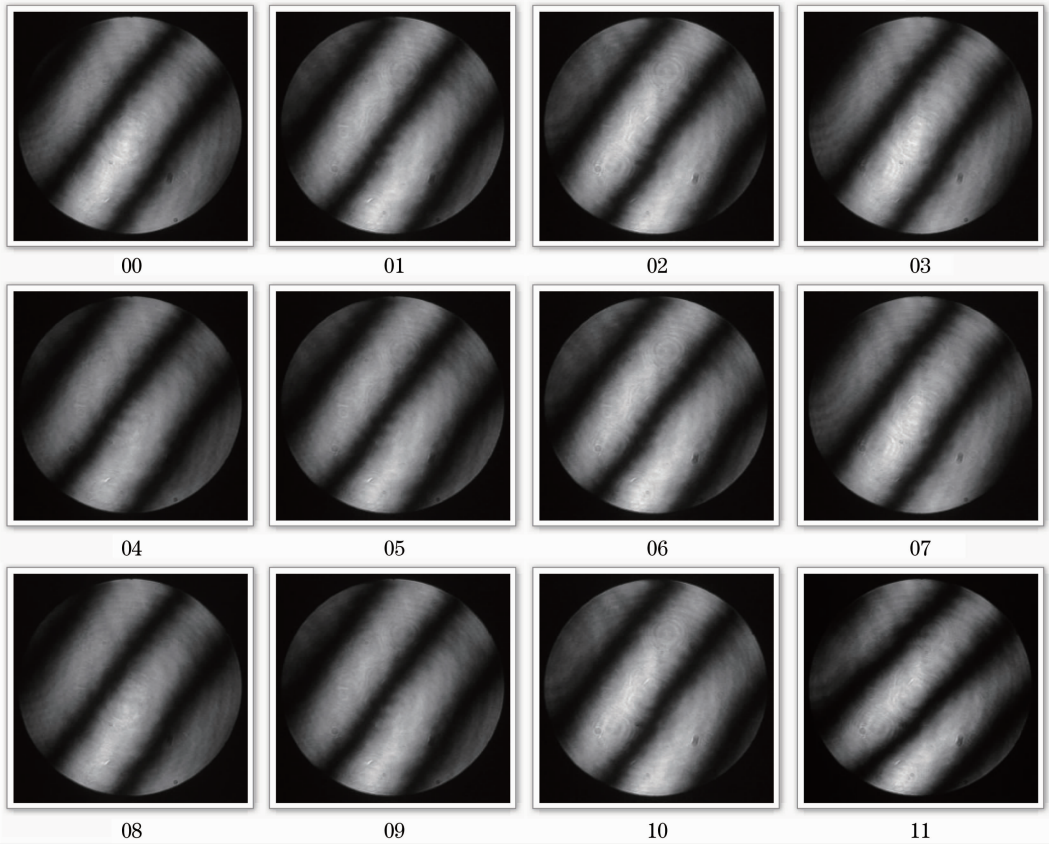


图 7 三组周期干涉图

Fig. 7 Three periods of interferograms

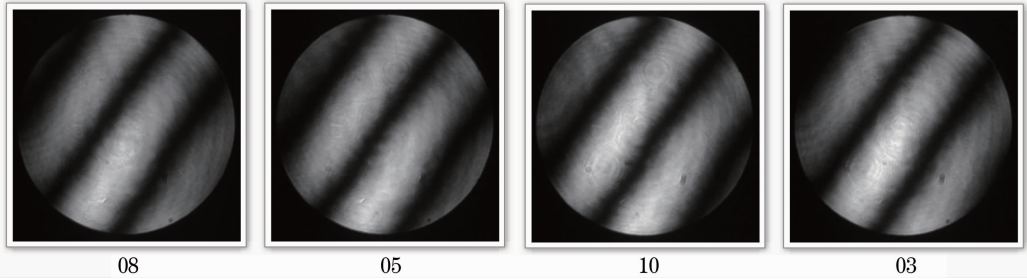


图 8 筛选出的四个干涉图

Fig. 8 Four selected interferograms

5 结 论

从分析干涉腔长和波面计算误差之间的关系出发,提出了一种自适应相位筛选法,以减小长腔长测试时波长调谐分辨率不够精细带来的波面计算误差。该方法可以快速、高精度地从多幅干涉图中筛选中移相量为 $\pi/2$ 的干涉图,从而可以采用四步法得到被测件的相位分布。实验结果表明该方法得到的测试结果与短腔长下的测试结果一致,与未进行

筛选的计算结果比较,测试精度得到了显著提高。根据方法的原理,其不仅可用于长腔长下波长移相的相位计算,还可运用于其他不能得到准确移相量的情况。

参 考 文 献

- 1 C. R. Wolfe, J. K. Lawson. The measurement and analysis of wavefront structure from large aperture ICF optics [C]. *SPIE*, 1997, **2633**: 361~385

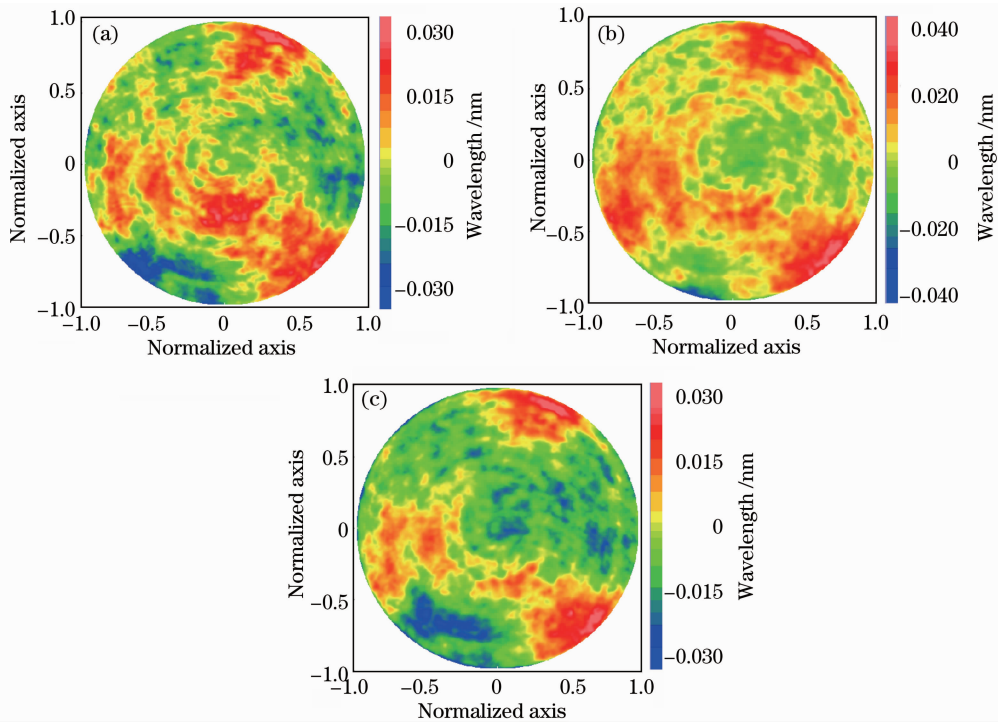


图 9 不同干涉腔长的测试结果。(a) 0.26 m 腔长测试时的波面分布；(b) 3 m 腔长测试时不进行筛选计算的波面分布；
(c) 3 m 腔长测试时采用自适应相位筛选法计算时的波面分布

Fig. 9 Results measured at different interference cavity lengths. (a) Wavefront measured at 0.26 m cavity length; (b) wavefront measured at 3 m cavity length without selecting; (c) wavefront measured at 3 m cavity length with the adaptive phase selecting method

2 J. Burge, L. B. Kot, H. M. Martin *et al.*. Optical metrology for the 8.4 m diameter mirror segments for the 25 m giant Magellan telescope [C]. Rochester: Frontiers in Optics, OSA Technical Digest, 2006. OFWB4

3 M. Bray. Using first principle in the specifying of optics for large high-power lasers (I): application to the MégaJoule Laser (LMJ) [C]. *SPIE*, 1996, **2775**: 328~344

4 许 乔. 高功率固体激光系统光学元件质量评价[R]. 博士后研究报告, 绵阳: 中国工程物理研究院, 1999

5 L. L. Deck, J. A. Soobitsky. Phase-shifting via wavelength tuning in very large aperture interferometers[C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 432~442

6 C. Ai, R. Knowlden, J. Lamb. Design of a 24" phase shifting interferometer[C]. *SPIE*, **2870**: 565~572

7 Zhu Rihong, Chen Lei, Gao Zhishan *et al.*. Near infrared large aperture (24 inches) interferometer system development [C]. Stuttgart: Fringe'09, 2009

8 Yu Yingjie, Zhang Benhao, Jiao Yunfang. Algorithms of the phase-shifting interferometer via wavelength tuning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(6): 560~566

于瀛洁, 张本好, 焦云芳. 波长移相干涉仪的算法研究[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(6): 560~566

9 Wei Haoming, Xing Tingwen, Li Yun *et al.*. Measurement errors in 632.8 nm high precision phase-shifting Fizeau interferometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041202

魏豪明, 邢廷文, 李 云等. 632.8 nm 高精度移相菲佐干涉仪测量误差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 041202

10 Qian Kemao. Comparison of some phase shifting algorithms with a phase of $\pi/2$ [C]. *SPIE*, 2001, **4596**: 310~313

11 Guo Renhui, Li Jianxin, Zhu Rihong *et al.*. Wavelength-tuned phase-shifting calibration based on the fourier transform in time domain [C]. 2009 IEEE International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics, 2009. 371~375

12 C. Joenathan. On phase measuring interferometry algorithms [C]. *SPIE*, **2622**: 514~521

13 Wang Ming, Hao Qun, Zhu Quidong *et al.*. Anti-disturbance phase-shifting interferometry method time-and-frequency-domain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112005

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**(11): 1112005

14 In-Bok Kong, Seung-Woo Kim. General algorithm of phase-shifting interferometry by iterative least-squares fitting [J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(1): 183~187

15 In-Bok Kong, Seung-Woo Kim. Portable inspection of precision surfaces by phase-shifting interferometry with automatic suppression of phase-shift errors [J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(5): 1400~1404

16 Zhaoyang Wang. Advanced iterative algorithm for phase extraction of randomly phase-shifted interferograms [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(14): 1671~1673

栏目编辑: 何卓铭