

## 基于波数域相位补偿的白光干涉测量

罗松杰<sup>1\*</sup>, 陈子阳<sup>1</sup>, 丁攀峰<sup>2</sup>, 蒲继雄<sup>1</sup><sup>1</sup>福建省光传输与变换重点实验室, 华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;<sup>2</sup>华侨大学工学院, 福建 泉州 362021

**摘要** 白光扫描干涉测量中, 频域分析(FDA)方法通过波数域的相位解包裹和线性拟合得到斜率来计算物体表面形貌, 干涉仪中的振动噪声和背景噪声会给斜率测量带来误差, 从而影响 FDA 方法的测量精度。研究发现, 波数域相位线性拟合后的常数项能够有效补偿噪声对 FDA 方法的影响, 波数域相位补偿(PCWD)方法通过对波数域的线性相位作傅里叶逆变换, 得到空域的振幅和相位分布, 以距离振幅最高点最近的相位零点测量光滑反射镜表面形貌。仿真结果表明: 存在振动噪声时, PCWD 方法有 90% 的概率补偿 FDA 测量结果中平均 8.9 nm 的误差, 也有 10% 的概率给 FDA 测量结果额外引入平均 1.9 nm 的误差; 存在背景噪声时, FDA 与 PCWD 方法的平均测量误差分别为 4.5 nm 和 0.6 nm。实验结果表明: FDA 方法测量的反射镜表面结构的起伏小于 25 nm, 重复率为 7.4 nm; PCWD 方法测量的反射镜表面结构的起伏小于 4 nm, 重复率为 1.1 nm。综上所述, PCWD 方法在 FDA 方法的基础上进一步提升了测量精度。

**关键词** 测量; 白光干涉; 表面检测; 相位补偿; 噪声抑制

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1104002

## 1 引言

干涉测量技术以高精度、高速度和非接触性等优点受到广泛关注<sup>[1-4]</sup>, 使用单波长光源时, 干涉信号易受噪声的影响且测量范围不能超过光源波长的 1/4。当使用白光光源时, 弱时间相干性减小了光源纵向相干长度, 使干涉仪具有更大的测量范围和更强的抗噪能力<sup>[5-10]</sup>。白光扫描干涉仪通过移动参考臂来改变光程差, 得到随时间变化的白光干涉信号, 信号中存在两个重要的参数——包络峰值和光强峰值, 研究结果表明光强峰值<sup>[11]</sup>比包络峰值<sup>[12]</sup>有更高的测量精度。另外, 利用相移法<sup>[13-15]</sup>可以求解干涉信号的初始相位, 但相移法对参考臂的位移精度要求较高。由 de Groot 等<sup>[16-18]</sup>提出的频域分析(FDA)方法, 通过处理波数域的相位得到物体表面形貌, 该方法对采样频率的要求较低, 具有较高的测

量精度。

FDA 方法中, 波数域的相位经解包裹和线性拟合后为  $a_0 + a_1\sigma$ ,  $a_0$  与  $a_1$  为常数,  $\sigma$  为波数, 噪声使  $a_1$  偏离真实值, 给 FDA 方法引入了测量误差。研究发现,  $a_0$  可有效抑制噪声对  $a_1$  的影响。

波数域相位补偿(PCWD)方法通过在波数域使用线性拟合相位  $a_0 + a_1\sigma$  代替原相位进行傅里叶逆变换的方式在干涉信号中加入  $a_0$  部分, 得到空域中干涉信号的振幅和相位分布, 振幅最高点的位置为  $z_a$ , 距离  $z_a$  最近的相位零点的位置为  $z_p$ ,  $z_p$  受  $a_0$  与  $a_1$  共同影响。2017 年, 本课题组提出一种 PCWD 方法<sup>[19]</sup>, 通过探测色散相位并在波数域消除非线性色散相位得到近似线性的相位分布, 再进行傅里叶逆变换得到  $z_a$  与  $z_p$  的分布, 但该方法将测量精度的提升归于色散相位的消除, 并未对 PCWD 方法进行理论研究, 也未与 FDA 方法进行比较。

收稿日期: 2021-10-22; 修回日期: 2021-11-05; 录用日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(62005086)、东莞市引进创新创业领军人才计划资助(201927879)、华侨大学科研基金(605-5J115013)

通信作者: \*songjie@hqu.edu.cn

本文通过仿真分析  $a_0$  与  $a_1$  的特性,并与 FDA 方法的结果进行比较,评估 PCWD 方法对噪声的抑制能力,并利用 FDA 和 PCWD 方法测量表面光滑的反射镜,实验结果表明,PCWD 方法在 FDA 方法的基础上进一步提升了噪声抑制能力。因此 PCWD 方法可帮助干涉仪适应复杂的工作环境,具有一定的应用前景。

## 2 白光干涉原理

图 1 为白光扫描干涉仪示意图,光源选用光谱分布为  $I(\sigma)$  的超连续谱激光(SCL),样品表面的位置为  $z_0$ ,参考面的位置为  $z$ ,当利用压电陶瓷(PZT)促动器控制参考面扫描时,相机检测到的干涉信号<sup>[20]</sup>可表示为

$$S(z) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\sigma) \cos\{4\pi[z - z_0 - \varphi_n(z)]\sigma\} d\sigma + \varphi_b(z), \quad (1)$$

式中: $\varphi_n(z)$  为由外界振动引起的光程差的变化; $\varphi_b(z)$  为背景噪声。对式(1)作傅里叶变换,得到波数域的干涉信号为

$$\mathcal{F}(\sigma) = I_{\mathcal{F}}(\sigma) \exp(-j \cdot 4\pi z_0 \sigma) \exp[j\beta(\sigma)], \quad \sigma > 0, \quad (2)$$

式中: $\beta(\sigma)$  可由  $\varphi_n(z)$  和  $\varphi_b(z)$  的傅里叶变换得到。在理想情况下,波数域的相位分布如图 2(a) 所示,如果从蓝色的采样点开始进行相位解包裹,解包裹后的相位为  $a_0 + a_1\sigma$ ,其中  $a_1 = -4\pi z_0$ ,  $a_0 = 2n\pi$ ,整数  $n$  取决于第一个相位解包裹的采样点和  $z_0$ ,  $a_1$  是波数域中相位的斜率,FDA 方法通过参数  $z_s = -a_1/4\pi$  得到  $z_0$ 。当干涉信号中存在噪声时,对式(2)中的相位进行解包裹和线性拟合,得到的  $a_0 + a_1\sigma$  如图 2(b) 波数域相位分布中的虚线所示,受  $\beta(\sigma)$  影响,  $a_1 \neq -4\pi z_0$ , 这给参数  $z_s$  引入了误差。

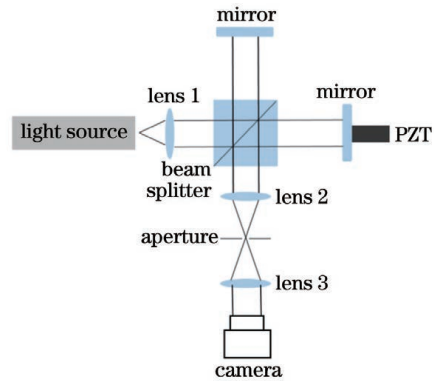


图 1 白光扫描干涉仪示意图

Fig. 1 Schematic of white-light scanning interferometer

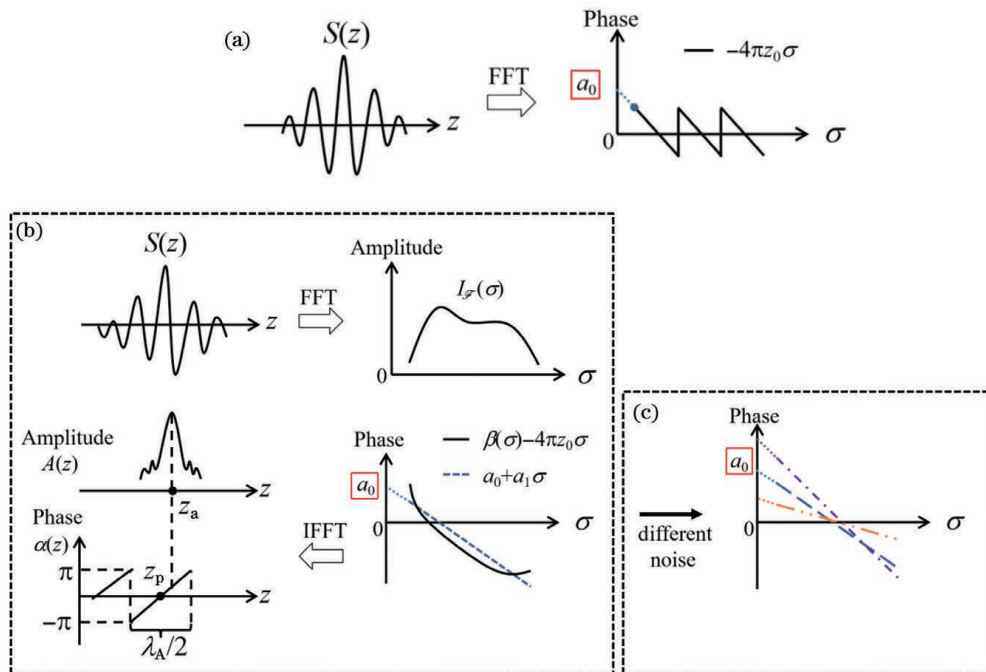


图 2 PCWD 方法示意图。(a) 理想干涉信号的波数域相位分布;(b) 存在噪声的信号处理示意图;(c) 理想情况的不同噪声影响下的波数域线性拟合相位分布

Fig. 2 Schematic of PCWD method. (a) Phase of ideal interference signal in wavenumber domain; (b) processing of interference signal with noise; (c) ideal linear fitting phase effected by different noise in wavenumber domain

将线性拟合的相位  $a_0 + a_1\sigma$  组成新的波数域干涉信号:

$$\mathcal{F}_L(\sigma) = I_{\mathcal{F}}(\sigma) \exp[j(a_1\sigma + a_0)], \sigma > 0, \quad (3)$$

把  $I_{\mathcal{F}}(\sigma)$  的傅里叶逆变换表示为  $A(z) \exp[j\alpha(z)]$ , 则  $\mathcal{F}_L(\sigma)$  的傅里叶逆变换可表示为

$$S_c(z) = A(z - z_s) \exp[j\alpha(z - z_s) + ja_0]. \quad (4)$$

如图 2(b) 所示,  $S_c(z)$  的相位周期为  $\lambda_A/2$ ,  $\lambda_A$  为平均波长, 振幅分布的最高点位置为  $z_a$ , 从振幅  $A(z - z_s)$  可知  $z_a = z_s$ , 距离  $z_a$  最近的相位零点  $z_p$  可表示为

$$z_p = z_s - a_0\lambda_A/(4\pi) = -a_1/(4\pi) - a_0\lambda_A/(4\pi), \quad (5)$$

其中,  $a_0$  通过  $a_0 \pm 2n\pi$  的形式存在于区间  $[-\pi, \pi]$  中。

图 2(c) 为理想情况的不同噪声相位  $\beta(\sigma)$  影响下的线性拟合相位示意图, 其延长线与纵轴的截距为  $a_0$ , 斜率为  $a_1$ , 当  $a_0$  的值减小时,  $a_1$  的值增大, 此时  $a_0$  与  $a_1$  受噪声影响产生相反的变化趋势, 根据式(5),  $a_0$  可补偿噪声对  $a_1$  的影响, 从而提升  $z_p$  的测量精度。但是, 噪声的影响是否总与图 2(c) 所示虚线的变化情况相符, 则需要通过仿真来验证。因此, 本研究将在仿真中讨论以下两个问题:

- 1) 相比于参数  $z_s$ , 参数  $z_p$  是否普遍具有更高的测量精度?
- 2) 受噪声影响, 是否存在  $a_0$  与  $a_1$  的变化趋势相同的情况, 导致  $z_p$  产生更大的测量误差?

### 3 仿真分析

通过在仿真中加入振动噪声和背景噪声来分析参数  $a_0$  和  $a_1$  对参数  $z_s$  (FDA) 和  $z_p$  (PCWD) 的影响, 参考实验数据中的噪声特性, 生成平均值为 0 nm、标准差为 20 nm 的高斯噪声作为振动噪声  $\varphi_n(z)$ , 采集实验中的背景噪声  $\varphi_b(z)$ , 把  $\varphi_b(z)$  与干涉信号之间的信噪比设为  $R_{\text{SNR}} = 10$ 。

图 3 为仿真的干涉信号分布图, 样品表面的位置  $z_0 = 0 \mu\text{m}$ , 采样点数  $N$  为 1024, 采样间隔  $\Delta z$  为  $0.0396 \mu\text{m}$ , 波数的采样间隔  $\Delta\sigma = 1/(2N\Delta z) = 0.0123 \mu\text{m}^{-1}$ 。对于干涉信号作傅里叶变换后, 波数域范围  $[1.15 \mu\text{m}^{-1}, 2.05 \mu\text{m}^{-1}]$  的相位如图 4(a) 所示, 解包裹后的相位分布如图 4(b) 所示, 线性拟合后得到的线性相位分布和非线性相位分布分别如图 4(c)、(d) 所示。从图 4(c) 得到  $a_0$  和  $a_1$  的值, 本节将通过归纳数据讨论前文提出的两个问题。

首先讨论问题一“相比于参数  $z_s$ , 参数  $z_p$  是否

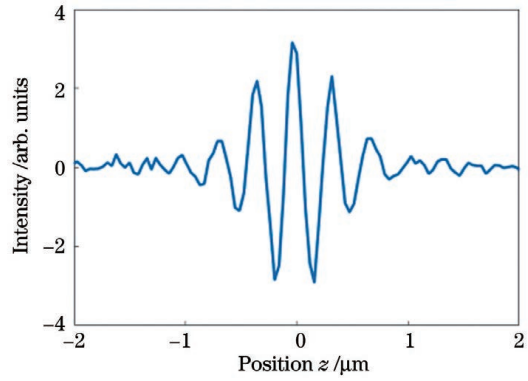


图 3 仿真白光干涉信号分布

Fig. 3 White-light interference signal in simulation

普遍具有更高的测量精度”。在仿真干涉信号中加入 10 万组数据振动噪声  $\varphi_n(z)$ , 对参数  $z_s$  和  $z_p$  进行统计, 结果如图 5 所示, 横坐标是  $z_s$  和  $z_p$  的分布区间, 纵坐标是分布在各个区间的  $z_s$  和  $z_p$  的个数。由图 5 可知, 参数  $z_s$  的分布区间在  $[-0.04 \mu\text{m}, 0.04 \mu\text{m}]$ , 参数  $z_p$  的分布区间在  $[-0.01 \mu\text{m}, 0.01 \mu\text{m}]$ , 在仿真中物体的位置为  $z_0 = 0 \mu\text{m}$ , 就整体而言,  $z_p$  比  $z_s$  更加接近于真实位置  $z_0 = 0 \mu\text{m}$ , 因此  $z_p$  具有更强的相位噪声抑制能力。

其次讨论问题二“受噪声影响, 是否存在  $a_0$  与  $a_1$  的变化趋势相同的情况, 导致  $z_p$  产生更大的测量误差”。在仿真中,  $a_0$  与  $a_1$  受振动噪声  $\varphi_n(z)$  影响的变化量定义为  $\Delta a_0$  与  $\Delta a_1$ , 通过  $\Delta a_0 \times \Delta a_1$  的符号判断  $a_0$  与  $a_1$  的变化趋势。图 6(a) 所示为 10 万组  $\Delta a_0 \times \Delta a_1$  值的符号分布比例:  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 < 0$ , 表示  $a_0$  与  $a_1$  的变化趋势相反, 占比为 90%;  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 > 0$ , 表示  $a_0$  与  $a_1$  的变化趋势相同, 占比为 10%。根据式(5), 当  $a_0$  与  $a_1$  的变化趋势相反时,  $\Delta a_0$  补偿  $\Delta a_1$  给参数  $z_s$  引入的误差, 因此参数  $z_p$  具有更高的测量精度。由此可见, 90% 的数据中参数  $z_p$  的测量精度比  $z_s$  高, 10% 的数据中参数  $z_p$  的测量精度比  $z_s$  低。

为了进一步分析  $a_0$  对参数  $z_p$  的影响, 分析了 10 万组数据中  $a_0$  对  $z_p$  测量结果的影响, 结果见图 6(b), 其中横坐标是式(5)中  $a_0$  对参数  $z_p$  的影响。从图 6(b) 可以看出: 当  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 > 0$  时, 多数  $\left| a_0 \frac{\lambda_A}{4\pi} \right|$  的值小于 3 nm, 平均值为 1.9 nm, 说明此时  $z_p$  的测量误差在  $z_s$  的测量结果的基础上平均增大了 1.9 nm; 当  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 < 0$  时, 多数  $\left| a_0 \frac{\lambda_A}{4\pi} \right|$  的值小于 20 nm, 平均值为 8.9 nm, 说明此时  $z_p$  的测量误差在  $z_s$  的测量结果的基础上平均减小了 8.9 nm。

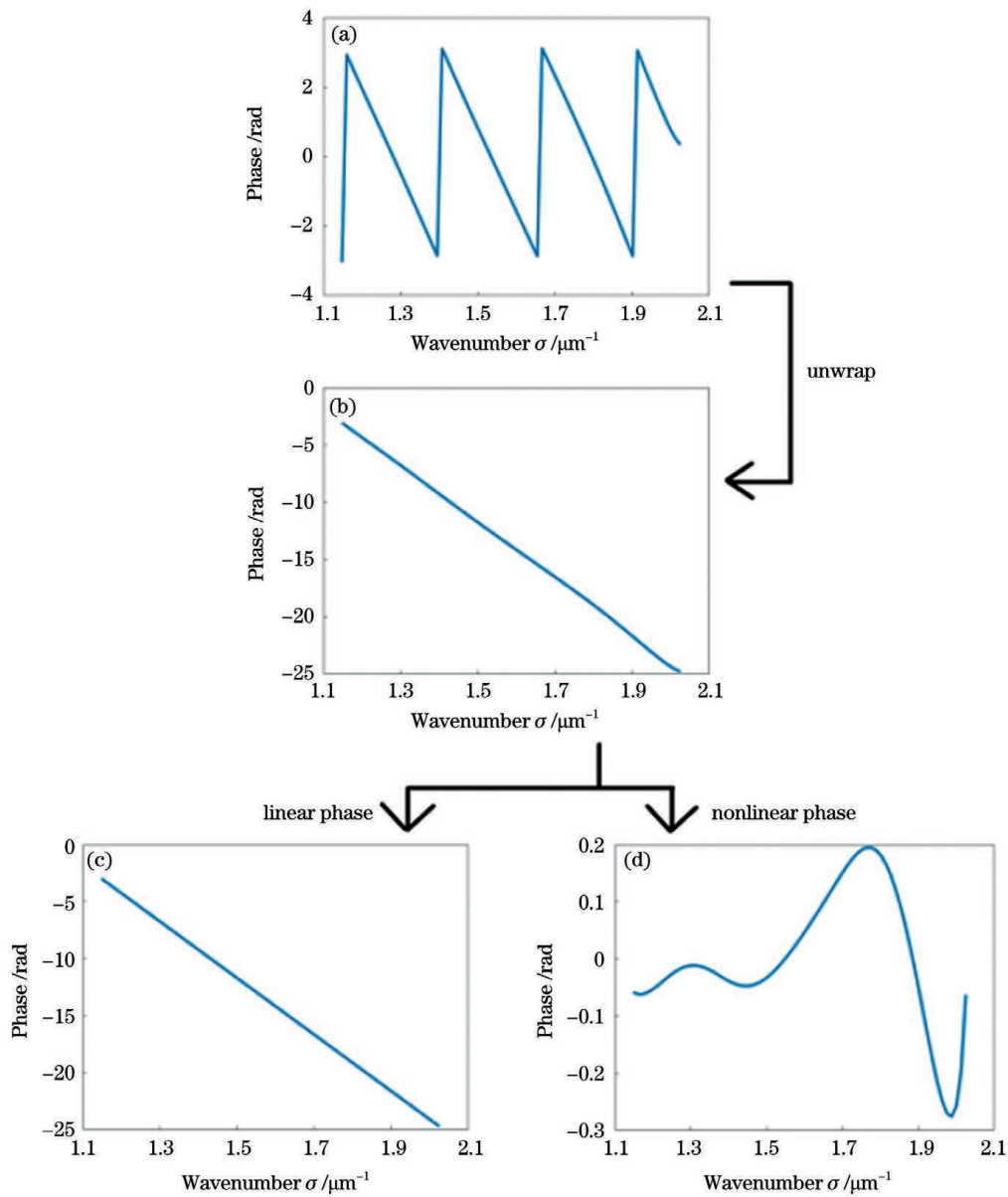


图 4 波数域相位解包裹以及相位拟合结果。(a) 波数域相位图；(b)解包裹后的相位；(c)线性相位部分；(d)非线性相位部分

Fig. 4 Phase unwrapping and fitting results in wavenumber domain. (a) Phase in wavenumber domain; (b) phase after unwrapping; (c) linear component of phase; (d) nonlinear component of phase

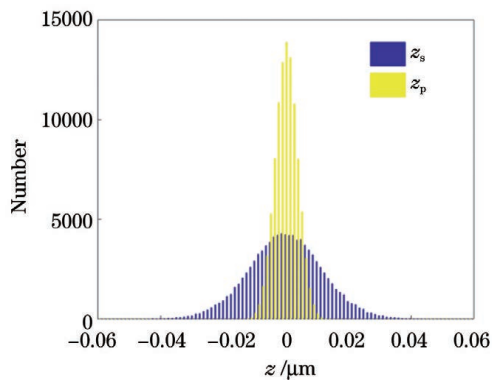


图 5  $z_s$  与  $z_p$  分布直方图

Fig. 5 Histogram of  $z_s$  and  $z_p$  value distribution

此外,在干涉信号中加入 10 组实验中采集的背景噪声  $\varphi_b(z)$ ,得到  $|z_s|$  与  $|z_p|$  的值如表 1 所示,其中物体的位置信息为  $z_0 = 0 \text{ nm}$ 。  $|z_s|$  的平均值为 4.5 nm,均方差为 3.0 nm;  $|z_p|$  的平均值为 0.7 nm,均方差为 0.5 nm。由此可见, $z_p$  有更强的背景噪声抑制能力。

综上所述,参数  $z_p$  相比于  $z_s$  普遍具有更高的测量精度,但并非对于所有的噪声分布,参数  $z_p$  都可以提供更高的测量精度。在 10 万组高斯分布相位噪声的仿真中,有 10% 的概率为  $z_p$  相比于参数  $z_s$  的测量误差平均增大了 1.9 nm,90% 的概率为

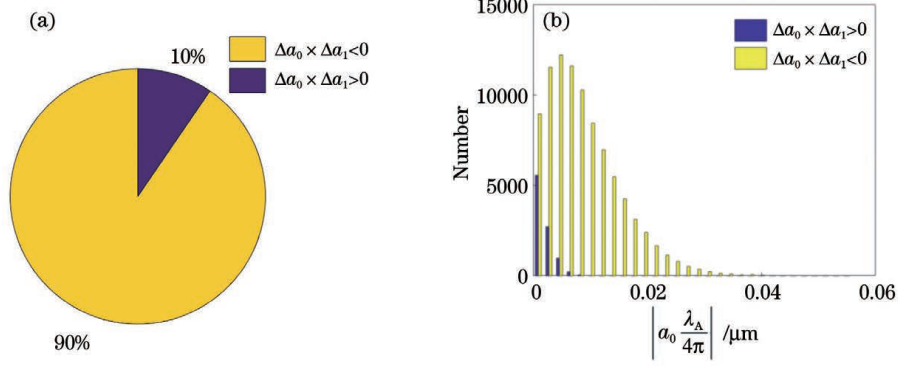


图 6 不同噪声对  $a_0$  与  $a_1$  影响的统计结果。(a)  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 < 0$  与  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 > 0$  的分布比例;(b)  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 < 0$  与

$\Delta a_0 \times \Delta a_1 > 0$  两种情况下的  $\left| a_0 \frac{\lambda_A}{4\pi} \right|$  分布直方图

Fig. 6 Statistical results of the influence of different noises on  $a_0$  and  $a_1$ . (a) Diagram of proportion of  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 < 0$  and

$\Delta a_0 \times \Delta a_1 > 0$ ; (b) histogram of  $\left| a_0 \frac{\lambda_A}{4\pi} \right|$  in the condition of  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 < 0$  and  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 > 0$

表 1 不同背景噪声情况下的  $|z_s|$  与  $|z_p|$  值

Table 1  $|z_s|$  and  $|z_p|$  obtained under different background noises

Noise group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$ z_s $ /nm	2.3	1.5	5.8	1.1	5.5	2.3	2.1	7.3	9.9	7.0
$ z_p $ /nm	0.4	0.3	0.5	1.0	0.6	1.0	0.3	0.2	0.7	1.7

$z_p$  相比于参数  $z_s$  的测量误差平均减小了 8.9 nm, 从整体而言, 参数  $z_p$  具有更高的测量精度。在仿真中加入 10 组从实验中采集的背景噪声, 背景噪声给  $z_p$  带来的平均误差为 0.7 nm, 相比于相位噪声, 背景噪声产生的影响较小, 因此本研究不对背景噪声进行过多的讨论。

仿真结果表明, PCWD 方法中的参数  $z_p$  具有更好的噪声抑制能力, 因此在使用 PCWD 方法测量光滑的反射镜表面形貌时, 其测量结果应相比于 FDA 方法的结果更为光滑, 多次测量的重复率值也应该更小。

### 4 实验结果

根据图 1 搭建干涉光路, 光源的光谱范围为 400~1200 nm, 被测样品和参考镜是表面光滑的反

射镜, Lens 1、Lens 2 和 Lens 3 是消色差透镜。高速相机的像素尺寸为 20 μm, 相机采样面积为 200 pixel×200 pixel, X 和 Y 表示像素点的位置, 压电陶瓷促动器的扫描速度为 80 μm/s, 干涉信号的采样点数为 1024。被测物体为反射镜, 可以认为其表面是光滑的连续曲面, 因此本实验用测量结果的粗糙度和重复率来评估参数  $z_s$  与  $z_p$  的测量精度。

对反射镜进行多次测量, 测量的时间间隔为 10 min, 把每次测量命名为  $M_1, M_2, \dots, M_n$ 。图 7 所示为  $M_1, M_2, M_3$  通过参数  $z_s$  测量得到的反射镜表面形貌, 其中  $X=100$  pixel、沿 Y 方向的三组表面形貌分布如图 8(a) 所示, 起伏基本小于 25 nm。图 9 所示为  $M_1, M_2, M_3$  通过参数  $z_p$  测量得到的反射镜表面形貌, 其中  $X=100$  pixel、沿 Y 方向的三组表面形貌分布如图 10(a) 所示。为了方便对比,

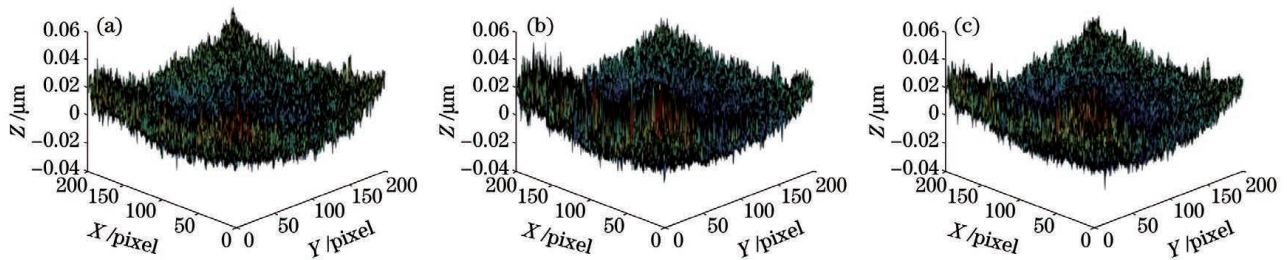


图 7 三组通过  $z_s$  测量的反射镜表面形貌。(a)  $M_1$ ; (b)  $M_2$ ; (c)  $M_3$

Fig. 7 Surface profiles of mirror obtained by the value of  $z_s$  in three measurements. (a)  $M_1$ ; (b)  $M_2$ ; (c)  $M_3$

图 10(b)放大了  $Y$  在区间  $[70 \text{ pixel}, 130 \text{ pixel}]$  的部分, 图 10(b)中表面中的起伏小于  $4 \text{ nm}$ 。首先对比整体表面形貌分布(图 7、图 9), 发现参数  $z_p$  的测量结果比参数  $z_s$  的测量结果光滑; 其次对比  $X = 100 \text{ pixel}$

的这条线上的测量结果(图 8、图 10), 发现参数  $z_p$  测量结果的起伏小于参数  $z_s$ 。由此可见, 参数  $z_p$  的测量结果更符合反射镜具有光滑连续曲面的实际情况, PCWD 方法相比 FDA 方法具有更高的测量精度。

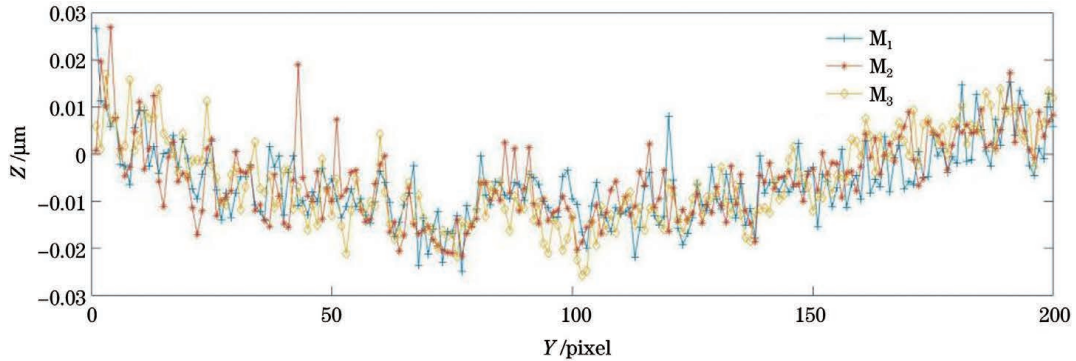


图 8 三组通过  $z_s$  测量的结果中  $X = 100 \text{ pixel}$  时沿  $Y$  方向的形貌分布

Fig. 8 Morphology distribution along  $Y$  direction with  $X = 100 \text{ pixel}$  in three measurements obtained by  $z_s$

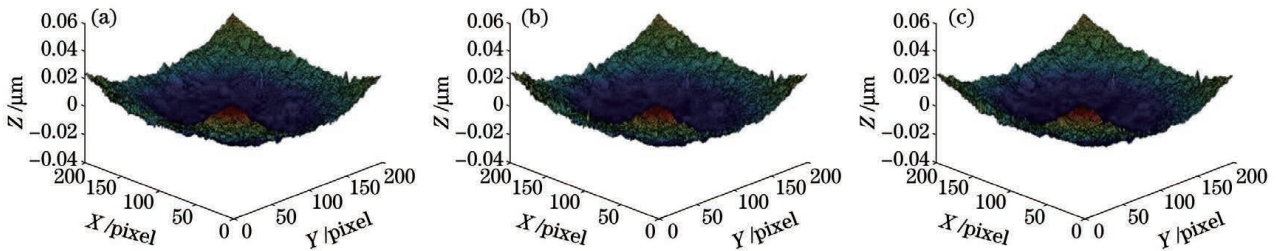


图 9 三组通过  $z_p$  测量的反射镜表面形貌。(a)  $M_1$ ; (b)  $M_2$ ; (c)  $M_3$

Fig. 9 Surface profiles of mirror obtained by the value of  $z_p$  in three measurements. (a)  $M_1$ ; (b)  $M_2$ ; (c)  $M_3$

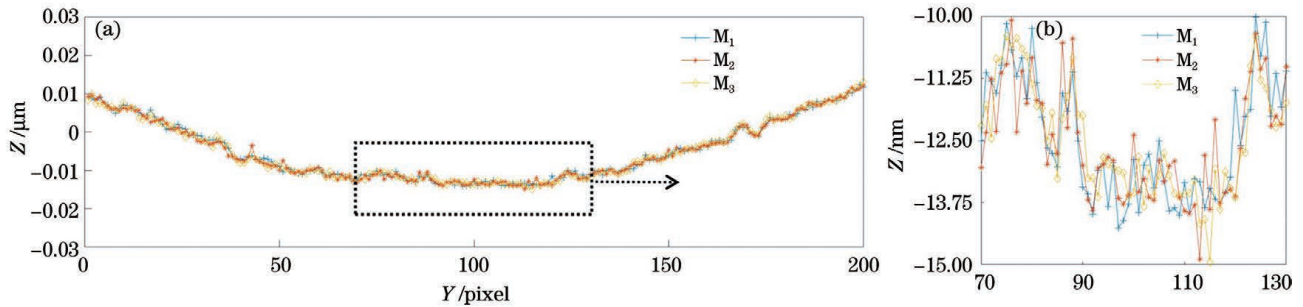


图 10 三组通过  $z_p$  测量的结果中  $X = 100 \text{ pixel}$  时沿  $Y$  方向的形貌分布及局部放大结果。(a)  $Y$  的范围是  $[0 \text{ pixel}, 200 \text{ pixel}]$ ; (b)  $Y$  的范围是  $[70 \text{ pixel}, 130 \text{ pixel}]$

Fig. 10 Morphology distribution along  $Y$  direction with  $X = 100 \text{ pixel}$  in three measurements obtained by  $z_p$  and local amplification result. (a) Region of  $Y$  is  $[0 \text{ pixel}, 200 \text{ pixel}]$ ; (b) region of  $Y$  is  $[70 \text{ pixel}, 130 \text{ pixel}]$

为了分析 PCWD 方法的稳定性, 将  $M_1$  和  $M_2$  的测量结果相减,  $X = 100 \text{ pixel}$  时沿  $Y$  方向的分布如图 11 所示, 参数  $z_s$  的测量结果起伏小于  $30 \text{ nm}$ , 而参数  $z_p$  的测量结果起伏小于  $4 \text{ nm}$ , 表明在  $M_1$  和  $M_2$  的测量中, 参数  $z_p$  的测量结果相比  $z_s$  更加稳定。参数  $z_s$  和参数  $z_p$  对整个平面的多次测量结果的重复率分别为  $7.4 \text{ nm}$  和  $1.1 \text{ nm}$ , 证明了参数  $z_p$  对系统中的随机噪声的抑制能力更

强。实验结果表明, PCWD 方法在表面测量中具有更高的测量精度和更好的稳定性, 与第 3 节的仿真结果相符。

## 5 结 论

在 FDA 方法的基础上提出了 PCWD 测量方法, 通过仿真分析了 PCWD 方法中的常数项  $a_0$  的特性, 仿真结果表明  $a_0$  有 90% 的概率降低 FDA

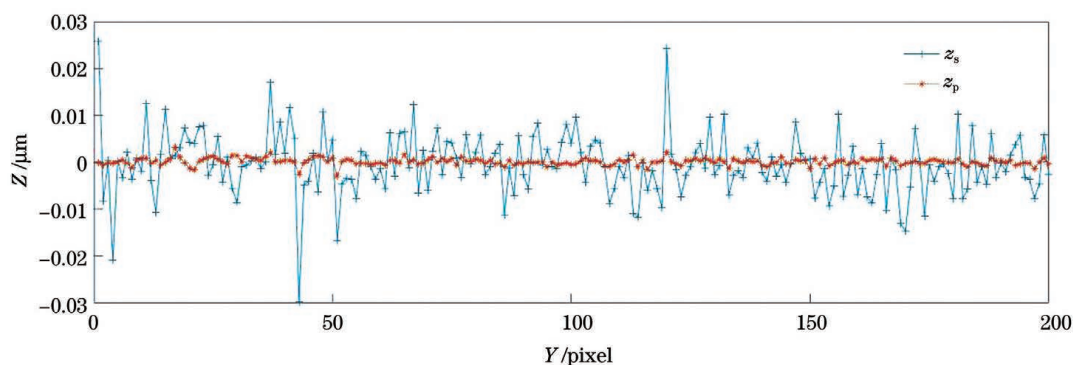


图 11 将  $M_1$  与  $M_2$  的测量结果相减后  $X=100$  pixel 时沿  $Y$  方向的分布

Fig. 11 Distribution along  $Y$  direction with  $X=100$  pixel after the subtraction of results between  $M_1$  and  $M_2$

测量结果中平均 8.9 nm 的误差,也有 10% 的概率增大 FDA 测量结果平均 1.9 nm 的误差,所以从整体而言,  $a_0$  有一定的噪声抑制能力。对光滑反射镜表面的测量结果显示: FDA 方法测量的表面起伏小于 25 nm, 重复率为 7.4 nm; PCWD 方法测量的表面起伏小于 4 nm, 重复率为 1.1 nm。因此, PCWD 的测量结果更加符合反射镜表面光滑的特点, 低重复率也说明了 PCWD 方法有更强的随机噪声抑制能力。

### 参 考 文 献

- [1] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. Journal of the Optical Society of America, 1982, 72(1): 156-160.
- [2] Servin M, Estrada J C, Quiroga J A, et al. Noise in phase shifting interferometry [J]. Optics Express, 2009, 17(11): 8789-8794.
- [3] Gao P, Yao B L, Lindlein N, et al. Phase-shift extraction for generalized phase-shifting interferometry [J]. Optics Letters, 2009, 34(22): 3553-3555.
- [4] 孙昊, 韩森, 唐寿鸿, 等. 干涉测量圆柱内表面的失调误差分析 [J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0112005. Sun H, Han S, Tang S H, et al. Misalignment analysis of cylindrical inner surfaces in interferometric measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0112005.
- [5] 赵可强, 谢芳, 马森, 等. 基于波数分辨的低相干干涉台阶高度测量系统的研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1112006. Zhao K Q, Xie F, Ma S, et al. Research on a wavenumber resolved low coherence interferometry for step height measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1112006.
- [6] 秦玉伟. 润滑油膜厚度的光学相干层析成像测量 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1142-1148. Qin Y W. Thickness measurement of lubricant film by optical coherence tomography [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(5): 1142-1148.
- [7] 董磊, 王斌, 刘欣悦. 基于光学相干和微弱信号检测的干涉探测技术 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0212001. Dong L, Wang B, Liu X Y. Interferometric detection technique based on optical coherence and weak signal detection [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0212001.
- [8] 刘经佑, 雷枫. 基于透过式低相干光学干涉测量透镜中心厚度 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 121201. Liu J Y, Lei F. Measurement of lens-center thickness based on low-coherence interference with transmitted illumination [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 121201.
- [9] 张昭琳, 苏俊宏. 光学薄膜损伤表面三维微观形貌的仿真与重构 [J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0212002. Zhang Z L, Su J H. Simulation and reconstruction of 3D microscopic morphology of damaged optical film surface [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0212002.
- [10] 吕思航, 丁红昌, 向阳, 等. 基于迈克耳孙干涉仪的表面焊接缺陷检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1912005. Lü S H, Ding H C, Xiang Y, et al. Surface welding defect detection based on Michelson interferometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1912005.
- [11] Park M C, Kim S W. Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms [J]. Optical Engineering, 2000, 39: 952-959.
- [12] Pikálek T, Fořt T, Buchta Z. Detection techniques in low-coherence interferometry and their impact on overall measurement accuracy [J]. Applied Optics, 2014, 53(36): 8463-8470.

- [13] Harasaki A, Schmit J, Wyant J C. Improved vertical-scanning interferometry[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(13): 2107-2115.
- [14] Guo T, Yuan L, Tang D W, et al. Analysis of the synchronous phase-shifting method in a white-light spectral interferometer[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(10): 2983-2991.
- [15] 李靓, 田爱玲, 王大森, 等. 基于多项式拟合背景光的随机两步相移算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1112008.  
Li J, Tian A L, Wang D S, et al. A random two-step phase shift algorithm based on polynomial fitting background light [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1112008.
- [16] de Groot P, Deck L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain[J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, 42(2): 389-401.
- [17] de Groot P, de Lega X C, Kramer J, et al. Determination of fringe order in white-light interference microscopy[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4571-4578.
- [18] Sinclair M B, de Boer M P, Corwin A D. Long-working-distance incoherent-light interference microscope[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(36): 7714-7721.
- [19] Luo S J, Sasaki O, Liu Y X, et al. Elimination of dispersion effect in a white-light scanning interferometer by using a spectral analyzer [J]. *Optical Review*, 2017, 24(1): 27-32.
- [20] Luo S J, Suzuki T, Sasaki O, et al. Signal correction by detection of scanning position in a white-light interferometer for exact surface profile measurement [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(13): 3548-3554.

## White-Light Interferometry Based on Phase Compensation in Wavenumber Domain

Luo Songjie<sup>1\*</sup>, Chen Ziyang<sup>1</sup>, Ding Panfeng<sup>2</sup>, Pu Jixiong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China;

<sup>2</sup> Engineering Institute, Huaqiao University, Quanzhou 362021, Fujian, China

### Abstract

**Objective** Interferometry is commonly used in industrial measurement because of its high accuracy, high speed, and noninvasive nature. Because the light with a single wavelength causes the limit of phase ambiguity, the white-light laser is used as a light source to provide a large measurement region and a better noise resistance. For white-light scanning interferometry, frequency-domain analysis (FDA) is a common method for obtaining the surface profile of an object from the slope of the phase, where the phase has been unwrapped and linearly fitted in the wavenumber domain. However, the measurement accuracy of FDA will decrease when the vibration and background noises change the slope of the linear-fitted phase. Thus, phase compensation in wavenumber domain (PCWD) is proposed to eliminate the effect of the vibration and background noises of FDA in this study. PCWD improves the measurement accuracy based on the FDA with simple signal processing. We assume that PCWD can be helpful in industrial measurement because of its high accuracy and stability.

**Methods** The noise changes the slope of the linear-fitted phase in the wavenumber domain for FDA. Surprisingly, the constant term of the linear-fitted phase in the wavenumber domain compensates for the FDA noise-induced changes in the slope of the linear-fitted phase. The FDA and PCWD propose two parameters for determining the measurement as  $z_s = -a_1/4\pi$  and  $z_p$  [Eq. (5)], respectively. The difference is that the  $z_s$  is determined by the slope of linear-fitted phase  $a_1$ , whereas the  $z_p$  is determined by the  $a_1$  and the constant term of linear-fitted phase  $a_0$ . If the noise-affected  $a_0$  and  $a_1$  have the opposite trend,  $z_p$  [Eq. (5)] will be more accurate than  $z_s$ . However, do the  $a_0$  and  $a_1$  always have the opposite trend? Because we are unsure about this, a simulation is performed to analyze the following questions:

- 1) Does the  $z_p$  provide a higher measurement accuracy than  $z_s$ ?
- 2) Is it possible for both  $a_0$  and  $a_1$  to have the same noise-affected change trend, resulting in a larger measurement error for  $z_p$ ?



The FDA and PCWD are also used to measure a smooth mirror in the experiment. Thus, the roughness and repeatability could be used to estimate the FDA and PCWD because the ideal measurement result should be a smooth and continuous surface.

**Results and Discussions** In a simulation, 100000 groups of vibration noise  $\varphi_n(z)$  are added to the interference signal to obtain the  $z_s$  and  $z_p$ . The position of the object is  $z_0 = 0 \mu\text{m}$ . The value of  $z_s$  is distributed in the region of  $[-0.04 \mu\text{m}, 0.04 \mu\text{m}]$ ; the value of  $z_p$  is distributed in the region of  $[-0.01 \mu\text{m}, 0.01 \mu\text{m}]$  (Fig. 5). Thus, the  $z_p$  provides a higher measurement accuracy than the  $z_s$ . Further, the change in  $a_0$  and  $a_1$  caused by vibration noise  $\varphi_n(z)$  is analyzed [Fig. 6(a)]. The variation of  $a_0$  and  $a_1$  is denoted as the  $\Delta a_0$  and  $\Delta a_1$ . If the trend of  $a_0$  and  $a_1$  is different,  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 < 0$ . Fig. 6(a) shows that the 90% data satisfied  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 < 0$ . If the trend of  $a_0$  and  $a_1$  is the same,  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 > 0$ . There are 10% data satisfied  $\Delta a_0 \times \Delta a_1 > 0$ . Based on Eq. (5), there is a 90% possibility that  $z_p$  is more accurate than  $z_s$ . Simultaneously,  $z_p$  has a 10% possibility of being less accurate than  $z_s$ . To analyze the character of  $a_0$ , the influence of  $a_0$  on  $z_p$  is discussed [Fig. 6(b)]. There is a 90% possibility for  $z_p$  to decrease the average error of 8.9 nm and a 10% possibility for  $z_p$  to increase the average error of 1.9 nm. To conclude, the  $z_p$  can provide better measurement accuracy based on the entire surface than the  $z_s$ . In addition, 10 groups of the background noise  $\varphi_b(z)$  obtained from the experiment are added to the interference signal to acquire the values of  $|z_s|$  and  $|z_p|$  (Table 1). The average values of  $|z_s|$  and  $|z_p|$  are 4.5 and 0.7 nm, respectively; the repeatability of  $|z_s|$  and  $|z_p|$  are 3.0 and 0.5 nm, respectively. Thus, the  $z_p$  has a better background noise resistance. The experimental result shows that the variation of the surface profile obtained from  $z_s$  and  $z_p$  is less than 25 and 4 nm, respectively; their repeatability are 7.4 and 1.1 nm, respectively. This result shows that PCWD provides good measurement accuracy and stability, which is consistent with the simulation results.

**Conclusions** In the present study, PCWD is proposed to measure the surface profile based on FDA. PCWD uses the constant value of the linear-fitted phase in the wavenumber domain to compensate for the noise-induced error in the slope of the linear-fitted phase. Further, a simulation is performed to study the characteristics of PCWD. Unexpectedly, some kinds of noise will increase the measurement error for PCWD. However, the negative effect cannot deny the good performance of PCWD in measuring the entire surface. The experimental result also agrees with the simulation, which proves that PCWD has better measurement accuracy and stability. Our study provides the white-light scanning interferometer with a method for determining the surface profile based on FDA with good noise resistance and helps the white-light scanning interferometer adapt to poor environments.

**Key words** measurement; white-light interferometry; surface measurement; phase compensation; noise suppression