

## 白光显微干涉测量曲面样品形貌误差的校正方法

李赫然 袁群 范筱昕 张佳乐 马剑秋 乔文佑 高志山 郭珍艳 雷李华 傅云霞

### Calibration method of topography error of white light interferometry on curved surface sample measurement

LI Heran, YUAN Qun, FAN Xiaoxin, ZHANG Jiale, MA Jianqiu, QIAO Wenyou, GAO Zhishan, GUO Zhenyan, LEI Lihua, FU Yunxia

引用本文:

李赫然,袁群,范筱昕,等.白光显微干涉测量曲面样品形貌误差的校正方法[J].*应用光学*,2024,45(2):422–429. DOI: 10.5768/JAO202445.0203004

LI Heran, YUAN Qun, FAN Xiaoxin, et al. Calibration method of topography error of white light interferometry on curved surface sample measurement[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 422–429. DOI: 10.5768/JAO202445.0203004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203004>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 非平行光干涉照明显微镜三维形貌检测研究

Research on three-dimensional detection of microscopy using nonparallel light interference illumination

应用光学. 2019, 40(3): 422–428 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0302003>

##### 干涉测量圆柱外表面的误差分析

Misalignment analysis of cylindrical outer surfaces in interferometric measurement

应用光学. 2020, 41(5): 1005–1013 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0503001>

##### 基于体视显微镜的三维显微表面测量系统

Three dimensional micro surface measurement system based on stereomicroscope

应用光学. 2017, 38(2): 270–276 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0203004>

##### 基于同步移相显微干涉的血红细胞形貌测量方法

Profile measurement of red blood cells based on simultaneous phase-shifting microscopic interference

应用光学. 2020, 41(5): 1020–1025 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0503003>

##### 一种基于结构光条纹投影的微小物体测量系统

Micro-objects measurement system based on structured light fringe projection

应用光学. 2019, 40(6): 1120–1125 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0603007>

##### 平行光波阵面调制下的双频干涉条纹形貌测量

Measurement of dual frequency interference fringe morphology under parallel optical wavefront modulation

应用光学. 2017, 38(6): 947–952 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0603001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0422-08

# 白光显微干涉测量曲面样品形貌误差的校正方法

李赫然<sup>1</sup>, 袁 群<sup>1</sup>, 范筱昕<sup>1</sup>, 张佳乐<sup>1</sup>, 马剑秋<sup>1</sup>, 乔文佑<sup>1</sup>, 高志山<sup>1</sup>,  
郭珍艳<sup>1</sup>, 雷李华<sup>2</sup>, 傅云霞<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094; 2. 江苏省计量科学研究院, 江苏南京 210023)

**摘要:** 白光显微干涉术在平面阶跃型结构的形貌测量中具有显著优势。但在测量斜率变化的曲面样品时, 由于物镜数值孔径的限制, 样品表面反射光随着斜率的增大而减弱, 干涉信号对比度降低, 导致形貌测量结果的误差增大。基于表面传递函数 (surface transfer function, STF) 计算得到的逆滤波器可用于校正曲面样品的形貌测量误差, 但现有方法的逆滤波器增益受限, 无法有效提升频谱中的高频信号, 对最大可测量斜率的提升有限。针对该问题, 提取由白光干涉仪特性参数计算获得的虚拟 STF 的模作为振幅增益函数, 由干涉图傅里叶变换得到的实测 STF 的相位作为相位补偿函数, 形成虚实融合型逆滤波器, 据此实现白光干涉仪曲面形貌测量误差的校正。应用该方法校正微球的形貌测量结果, 校正后最大可测量斜率从 8.09° 提升到 21.20°, 均方根误差从 0.545 5 μm 降低至 0.175 9 μm, 实现了提升曲面样品的最大可测量斜率和减小测量误差的目的, 有效提升了仪器针对曲面样品的测量范围。

**关键词:** 白光显微干涉仪; 表面传递函数; 表面形貌测量; 误差校正; 逆滤波算法

中图分类号: TN206; TH741

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0203004

## Calibration method of topography error of white light interferometry on curved surface sample measurement

LI Heran<sup>1</sup>, YUAN Qun<sup>1</sup>, FAN Xiaoxin<sup>1</sup>, ZHANG Jiale<sup>1</sup>, MA Jianqiu<sup>1</sup>, QIAO Wenyu<sup>1</sup>,  
GAO Zhishan<sup>1</sup>, GUO Zhenyan<sup>1</sup>, LEI Lihua<sup>2</sup>, FU Yunxia<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094,  
China; 2. Jiangsu Institute of Measurement and Testing Technology, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** White light microinterferometry has obvious advantages in measuring the topography of planar step structures. However, due to the limitation of the numerical aperture of the objective lens, the reflected light on the surface of the sample is weakened with the increase of the slope when measuring the curved surface sample, and the contrast of the interference signal decreases, which leads to the increase of the error of topography measurement. Based on the theory of surface transfer function (STF), the inverse filter can be calculated to correct the topography measurement error of curved surface samples. However, the gain of the inverse filter of the existing method is limited, which is unable to elevate the high-frequency signal in the spectrum, and the improvement of the maximum measurable slope is limited. To address this issue, the modulus of the virtual STF calculated by the characteristic parameters of the white light interferometer was used as the amplitude gain function, and the phase of the measured STF obtained by the Fourier transform of the measured interferogram was used as the phase compensation function. A virtual-measured fusion inverse

收稿日期: 2023-10-19; 修回日期: 2024-01-12

基金项目: 国家自然科学基金 (62175107, 62205148); 国家重点研发计划 (2022YFF0706302); 上海市自然科学基金 (21ZR1483100); 上海市优秀学术/技术带头人计划 (21XD1425000)

作者简介: 李赫然 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事精密光学测量研究。E-mail: liheran@njust.edu.cn

通信作者: 袁群 (1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事先进光学设计理论与方法、大口径激光干涉测试技术、低相干宽谱显微干涉测试技术等研究。E-mail: yuanqun@njust.edu.cn

filter was formed, which realized the correction of the curved surface topography measurement error of white light interferometer. Using this method to correct the topography measurement results of the microsphere, the maximum measurable slope after correction is increased from  $8.09^\circ$  to  $21.20^\circ$ , and the root mean square error is reduced from  $0.545\text{5 }\mu\text{m}$  to  $0.175\text{9 }\mu\text{m}$ , which achieves the purpose of improving the maximum measurable slope of curved surface sample and reducing the measurement error, and effectively improves the measurement range of the instrument for the curved surface sample.

**Key words:** white light microinterferometer; surface transfer function; surface topography measurement; error correction; inverse filtering algorithm

## 引言

目前,以精密微球、微透镜阵列等为代表的曲面型物体在光学、生物医疗器械等领域中具有广泛的应用,高精度地测量曲面物体的形貌和表面质量对产品的设计、制造和质量控制至关重要。白光显微干涉术是一种成熟的三维形貌测量技术,常用于精密结构、光学表面、光学元件等的检测和表征<sup>[1]</sup>,是精密制造和光学加工的重要保障<sup>[2]</sup>。白光干涉仪(white light interferometer, WLI)应用低相干光作为光源,通过待测表面反射的测试光和参考面反射的参考光发生干涉,由于光源在时间和空间相干性上的限制,使得干涉条纹只在零光程差附近产生,有效克服了单色光干涉的相位模糊问题,在台阶、沟槽等平面阶跃型结构的形貌测量中优势明显<sup>[3-4]</sup>。由于干涉显微物镜数值孔径(numerical aperture, NA)限制了光的最大入射角为 $\theta_{\max} = \arcsin(NA)$ ,因此,当曲面样品表面斜率接近或者超过 $\theta_{\max}$ 时,局部的反射光难以被物镜收集<sup>[5]</sup>,导致白光干涉仪在测量高斜率表面时误差产生以及样品表面形貌复原区域缩小,降低了测量效率和精度。对于阶跃型表面的测量,可以使用标准台阶板校准白光干涉仪,使测量精度达到亚纳米级;但曲面样品和阶跃型平面样品的形貌测量误差来源不一样,使用标准台阶板的校准方式不足以完全消除系统误差。且曲面形貌测量误差随着表面斜率的增大而增大<sup>[6]</sup>,导致白光干涉仪在测量复杂几何形貌的表面时无法得到良好的结果<sup>[7]</sup>。因此,在使用白光干涉仪测量曲面样品时,研究提升最大可测量斜率和校正形貌测量误差的方法,具有重要的科学意义和应用价值。

XIE W 等人的研究证明,与斜率相关的测量误差和系统的空间频率响应密切相关<sup>[8]</sup>,因此,确定白光干涉系统的频域传递特性有助于分析与计算其测量误差;COUPLAND J M 等人从标量波动方程出发<sup>[9]</sup>,将三维成像理论和表面散射理论相结

合,推导出自白光干涉三维成像模型,在基尔霍夫近似条件有效以及待测表面局部的曲率半径远大于波长的情况下,白光干涉系统的测量过程可以用三维 STF 表示;MANDAL R 等人根据理论对理想无像差白光干涉仪三维 STF 进行仿真<sup>[10]</sup>,实验测量白光干涉仪三维 STF,并计算逆滤波器校正干涉条纹<sup>[11]</sup>。在实际应用中,由于提取仪器实测 STF 的相位生成的普通逆滤波器对干涉条纹频谱的高频信号增益较小,使其对高斜率表面对应干涉条纹的校正效果有限,单纯提高全频段增益系数反而会使频谱的信噪比下降。因此,采用白光干涉仪实测 STF 构建滤波器会限制最大可测量表面斜率的提升。

本文针对白光干涉仪在测量曲面样品时形貌测量误差较大的问题,采用虚实融合型逆滤波的方法校正误差。首先通过仿真计算白光干涉仪特性参数对应的虚拟 STF,从中提取模作为振幅增益函数,再通过不锈钢微球得到仪器的实测 STF,提取其中的相位得到相位补偿函数,两者相乘得到虚实融合型逆滤波器。与相位函数相比,振幅函数与干涉条纹频谱增益的关联性更紧密,因此,虚实融合型逆滤波器可用于校正干涉条纹的振幅和相位误差,最终达到提升曲面样品的最大可测量斜率和减小形貌测量误差的目的。

## 1 基本原理

白光干涉仪输出干涉信号  $I(r)$  的过程可以表示为对物函数的三维线性滤波运算<sup>[12]</sup>,该运算在空域中由卷积表达:

$$I(r) = \int H(r-r') \cdot O(r') d^3r' \quad (1)$$

式中:  $H(r-r')$  是系统的点扩散函数;  $O(r')$  是定义三维物体在空域分布的函数,  $d^3r'$  表示三维空间积分  $dr'_x dr'_y dr'_z$ 。点扩散函数表达式为

$$H(r) = \int G_{NA}^2(r, k_0) k_0^2 S(k_0) dk_0 \quad (2)$$

式中:  $S(k_0)$  为光源谱密度, 通常按照高斯函数分布; 波数  $k_0$  为  $2\pi/\lambda_0$ ;  $G_{NA}(r, k_0)$  是成像系统的格林函数:

$$G_{NA}(r, k_0) = \int \frac{j}{4\pi k_0} \delta(|k| - k_0) \text{step}\left(\frac{k \cdot \hat{\mathbf{o}}}{k_0} - \sqrt{1 - NA^2}\right) \exp(2j\pi k \cdot r) d^3 k \quad (3)$$

式中:  $\hat{\mathbf{o}}$  为沿光轴方向的单位矢量;  $NA$  为光学系统的数值孔径;  $\delta(k)$  和  $\text{step}(k)$  分别为 Dirac 函数和 Heaviside 阶跃函数。

假设物体表面是光滑的, 且表面局部的曲率半径远大于波长, 则 2 个均匀介质之间的界面可以表示为薄膜状物体, 即“表层膜模型”<sup>[13]</sup>, 它是在样品表面  $x-y$  位置处沿  $z$  方向的一维 Dirac 函数, 表达式为

$$O(r) = 4j\pi RW(r_x, r_y) \delta[r_z - s(r_x, r_y)] \quad (4)$$

式中:  $R$  为物体的反射系数;  $W(r_x, r_y)$  是光照面积的窗函数;  $s(r_x, r_y)$  是三维物体表面高度的二维函数。在实际应用中, 表层膜模型可以表示为物体表面薄薄的一层, 在  $x-z$  方向上体现为物体表面的轮廓细线, 图 1 所示为 1 个微球及其顶部区域的表层膜模型。

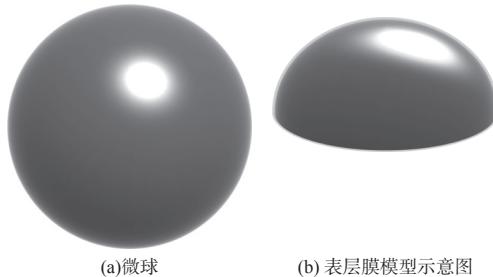


图 1 微球及其表层膜模型

Fig. 1 Microsphere and its foil model

对式(1)做傅里叶变换, 得到在频域中的滤波运算表达式为

$$I(k) = O(k) H(k) \quad (5)$$

式中:  $I(k)$  是干涉信号的频谱;  $O(k)$  是物体表面的频谱;  $H(k)$  即为系统的三维表面传递函数, 表达式为

$$H(k) = \iint G_{NA}(k', k_0) G_{NA}(k - k', k_0) d^3 k' \cdot k_0^2 S(k_0) dk_0 \quad (6)$$

式中:  $G_{NA}(k, k_0)$  为成像系统在频域上的格林函数, 表达式为

$$G_{NA}(k, k_0) = \frac{j}{4\pi k_0} \delta(|k| - k_0) \text{step}\left(\frac{k \cdot \hat{\mathbf{o}}}{k_0} - \sqrt{1 - NA^2}\right) \quad (7)$$

依据上述理论, 可以根据  $NA$  以及光源频谱分布表征理想白光干涉仪的成像过程, 由于微球表面斜率连续变化, 可以利用微球的表层膜模型和干涉条纹的频谱计算白光干涉仪的实测 STF, 计算公式为

$$H(k) = \frac{I(k)}{O(k)} \quad (8)$$

式中:  $I(k)$  是微球经过白光干涉仪测量的  $x-z$  方向干涉条纹的频谱;  $O(k)$  是通过微球的几何尺寸计算出相应的  $x-z$  方向表层膜模型的频谱。根据式(8)计算出的实测 STF 是一个复数值, 幅值表示白光干涉仪的空间频率通带, 相位表示经过标准台阶板校准后成像系统的光学像差<sup>[14]</sup>, 具体将其表示为

$$H_{\text{meas}}(k) = A(k) \exp[j\varphi(k)] \quad (9)$$

将白光干涉系统的实测 STF 相位取负值即可得到逆滤波器:

$$H_{\text{inv}}(k) = \exp[-j\varphi(k)] \quad (10)$$

可以应用逆滤波器校正带有像差的系统测量获取的干涉条纹, 将逆滤波器和直接通过白光干涉仪测量得到的干涉条纹的频谱相乘, 即可得到修正后的干涉条纹的频谱, 再经过傅里叶逆变换得到校正后的干涉条纹数据  $I'(r)$ :

$$I'(r) = \mathcal{F}^{-1}\{I(k) \cdot H_{\text{inv}}(k)\} \quad (11)$$

如图 2 所示, 白光干涉仪在测量斜率较大的位置时, 只有在 2 个光锥的重叠区域内的入射波矢量  $\mathbf{k}_i$  和反射波矢量  $\mathbf{k}_r$  才构成干涉信号, 此时物镜的有效  $NA$  减小, 局部的反射光减弱, 干涉信号对比度随之降低, 导致形貌测量误差增大。

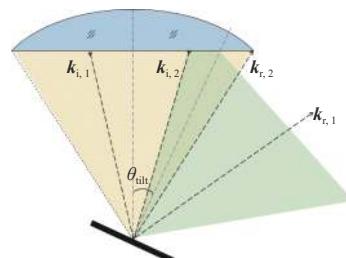


图 2 白光干涉仪测量倾斜表面的  $NA$  圆锥极限

Fig. 2  $NA$  cone limit of white light interferometer when measuring tilted surface

在文献 [10] 中, 以式(10)为基础计算普通逆滤波器, 虽然可以通过补偿相位来校正干涉条纹的频谱, 减小形貌测量的误差, 但无法有效提升频谱中的高频信号, 也无法提升截止频率, 因此对高斜率表面对应的边缘条纹的校正效果有限; 若是单

纯提升全频段增益系数就会导致低频信号失真, 反而会使干涉条纹频谱的信噪比下降, 形貌测量误差也会随之增大。因此, 有限增益的普通逆滤波校正算法限制了最大可测量表面斜率的提升。

针对上述问题, 本文提出提取白光干涉仪特性参数对应的虚拟 STF 的模作为逆滤波器的振幅增益函数, 再与普通逆滤波器相乘得到虚实融合型逆滤波器, 具体计算方法如下: 白光干涉仪特性参数对应的虚拟 STF 可以表示为

$$H_{\text{vir}}(k) = \frac{I_{\text{vir}}(k)}{O(k)} = A_0(k) \exp[j\varphi_0(k)] \quad (12)$$

式中:  $O(k)$  为待测物体的表层膜模型;  $I_{\text{vir}}(k)$  为虚拟白光干涉仪仿真生成的干涉条纹的频谱;  $A_0(k)$  为虚拟 STF 的模;  $\varphi_0(k)$  为相位。提取  $A_0(k)$  代入到式(10)中, 得到虚实融合型逆滤波器的表达式:

$$H_{\text{mix}}(k) = A_0(k) \exp[-j\varphi(k)] \quad (13)$$

该逆滤波器在提升高斜率表面对应的高频信号的同时, 避免了低频信号被过分放大, 仅在虚拟 STF 的带通范围内对干涉条纹频谱进行校正, 也避免了无效信号被凸显, 保证了校正过程的有效性。将式(13)代入到式(11)中, 即可应用虚实融合型逆滤波算法对原始干涉条纹数据进行校正, 实现提升曲面样品的最大可测量斜率和减小测量误差的目的。

## 2 虚拟 STF 和实测 STF 的计算

根据上节三维 STF 的相关理论设计虚实融合型逆滤波校正实验, 具体的实验流程如图 3 所示。

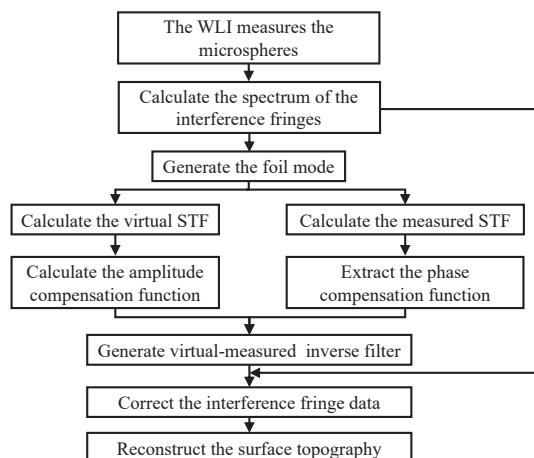


图 3 虚实融合型逆滤波校正算法流程图

Fig. 3 Flow chart of virtual-measured inverse filtering correction method

实验使用的是本课题组自研的白光干涉仪, 其

光源的中心波长  $\lambda_0=0.6 \mu\text{m}$ , 半峰宽度  $\Delta\lambda=0.18 \mu\text{m}$ , 干涉显微物镜  $NA=0.4$ , 放大倍率为  $20\times$ , 视场范围为  $350 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ 。根据仪器的特征参数, 可以计算可测量微球斜率的极限为  $\theta=\arcsin(NA)=23.58^\circ$ 。本文选购了半径为  $250 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  的不锈钢微球作为测量样品, 使得干涉条纹出现在横向范围为  $200 \mu\text{m}$  以内且靠近视场中心, 最大可测量斜率的位置仍保持在仪器可测量范围内。

基于虚拟白光干涉仪 VCSI 软件仿真计算白光干涉仪特性参数对应的虚拟 STF<sup>[15]</sup>, 为了与实际仪器测量过程的采图结果相匹配, 数值仿真前还需要设定水平和垂直方向的采样点数量和采样间隔。 $x$  和  $y$  方向采样点数量均为 1 024, 与实际单幅干涉图大小一致, 采样间隔为  $0.345 \mu\text{m}$ , 与实际相机成像的采样间隔一致;  $z$  方向采样点数量为 483, 实际扫描采图过程中同样为 483 幅, 采样间隔为  $0.075 \mu\text{m}$ , 与实际移相步长( $\lambda/8$ )一致。仿真结果如图 4 所示, 图 4(a) 和图 4(b) 分别为三维 STF 的  $k_x-k_z$  截面图和  $k_x-k_y$  截面图。

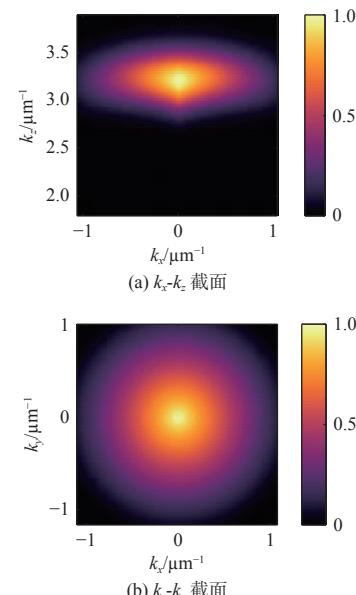


图 4 虚拟白光干涉仪的三维 STF

Fig. 4 3D STF of virtual WLI white light interferometer

将不锈钢微球置于玻璃平板上, 并调整位置使其位于白光干涉仪的视场中心, 记录扫描干涉条纹, 对测量得到的干涉条纹进行傅里叶变换计算其频谱。根据仿真的虚拟 STF 计算, 获得如图 5 所示的带通滤波器, 将其和干涉条纹的频谱相乘滤除无效数据, 经过带通滤波降噪前后的干涉条纹及条纹中心的干涉信号如图 6 所示。

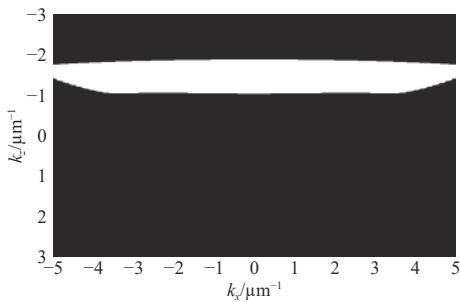
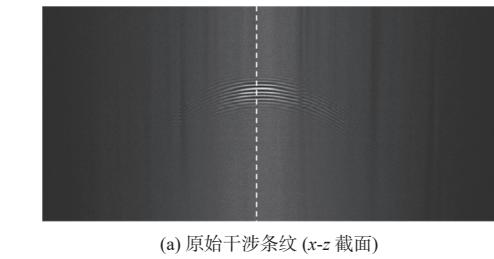
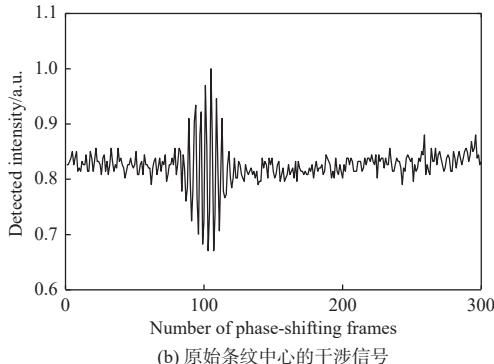
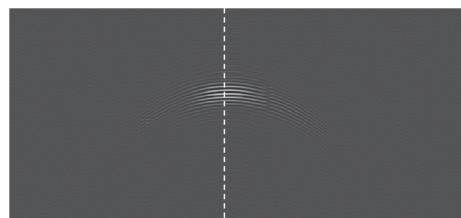
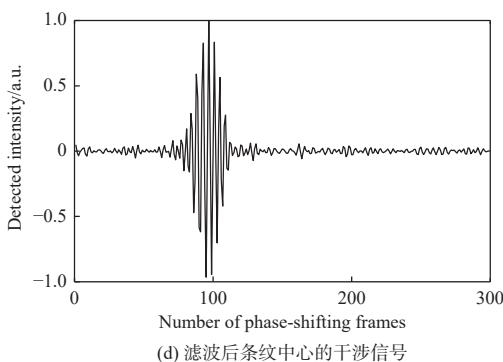


图 5 带通滤波器截面

Fig. 5 Cross section of bandpass filter

(a) 原始干涉条纹 ( $x$ - $z$  截面)

(b) 原始条纹中心的干涉信号

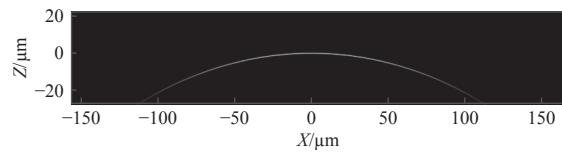
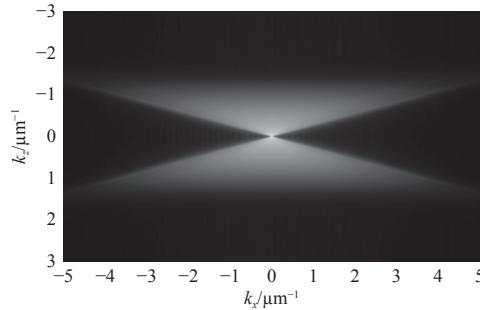
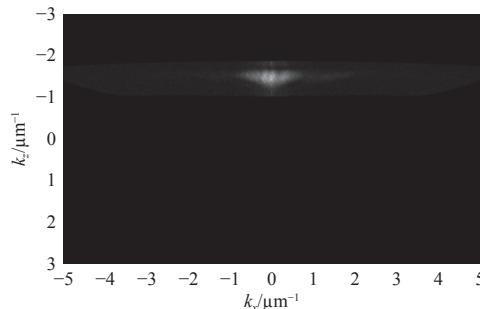
(c) 滤波后的干涉条纹 ( $x$ - $z$  截面)

(d) 滤波后条纹中心的干涉信号

图 6 经过带通滤波前后的干涉条纹和条纹中心的干涉信号

Fig. 6 Interference fringes and signals at fringe center before and after bandpass filtering

使用白光干涉仪多次测量不锈钢微球顶部到放置玻璃平板的高度, 确定不锈钢微球的平均半径为  $250.46 \mu\text{m}$ ; 再根据测量的直径生成微球对应的表层膜模型(如图 7 所示), 对表层膜模型进行傅里叶变换得到图 8 所示的频谱; 根据式(6)的计算过程, 用滤波后干涉条纹的频谱除以微球表层膜模型的频谱, 即可得到白光干涉仪的实测 STF, 结果如图 9 所示。

图 7 微球的表层膜模型( $x$ - $z$  截面)Fig. 7 Foil model of microsphere ( $x$ - $z$  cross section)图 8 表层膜模型的频谱( $k$ <sub>x</sub>- $k$ <sub>z</sub> 截面)Fig. 8 Spectrum of foil model ( $k_x$ - $k_z$  cross section)图 9 白光干涉仪实测 STF( $k$ <sub>x</sub>- $k$ <sub>z</sub> 截面)Fig. 9 Measured STF of WLI ( $k_x$ - $k_z$  cross section)

### 3 虚实融合型逆滤波校正结果分析

根据式(10)和式(13)分别计算普通逆滤波器  $\vec{H}_{\text{inv}}$  和虚实融合型逆滤波器  $\vec{H}_{\text{mix}}$ , 再根据式(11)分别计算出校正后的干涉条纹。条纹及其中心处(对应微球表面斜率为  $0^\circ$ )的干涉信号如图 10 所示, 与图 6 中干涉图相比, 可以看到条纹边缘清晰度有所提高。在微球表面斜率为  $10^\circ$ 、 $15^\circ$  和  $20^\circ$  时, 分别提取图 10(a)和图 10(c)对应位置的干涉信号。

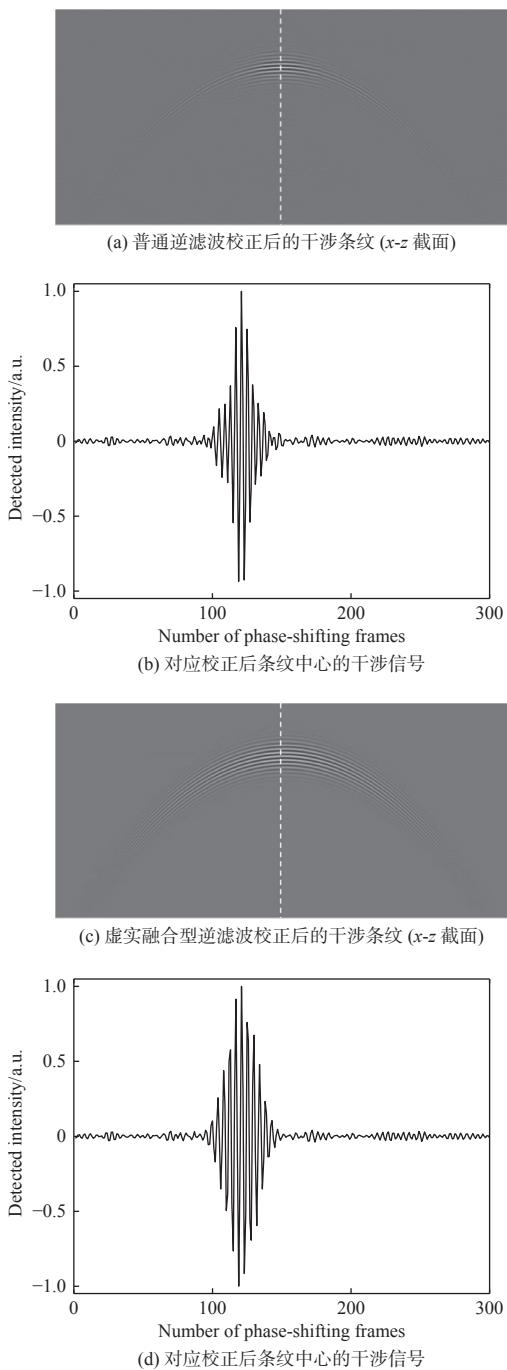


图 10 两种逆滤波校正后的干涉条纹及对应的干涉信号

**Fig. 10 Interference fringes after different inverse filtering correction and corresponding signals at center of fringe**

图 11 和图 12 分别为普通逆滤波校正后和虚实融合型逆滤波校正后不同表面斜率对应的干涉信号。对比这两组干涉信号, 普通逆滤波校正后的干涉信号的对比度会随着斜率增大而衰减, 且会伴随着出现多个包络, 将导致难以准确恢复表面形貌; 虚实融合型逆滤波校正后的干涉信号虽然会随着斜率增大而增大震荡, 但对比度没有明

显的衰减, 且无旁瓣影响相干峰位置的判别。

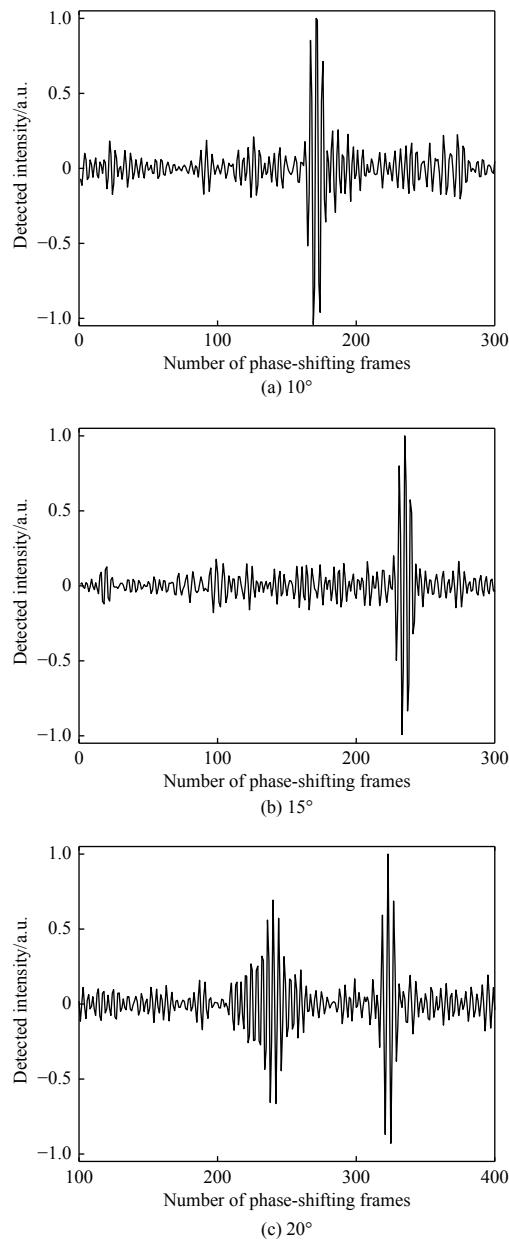
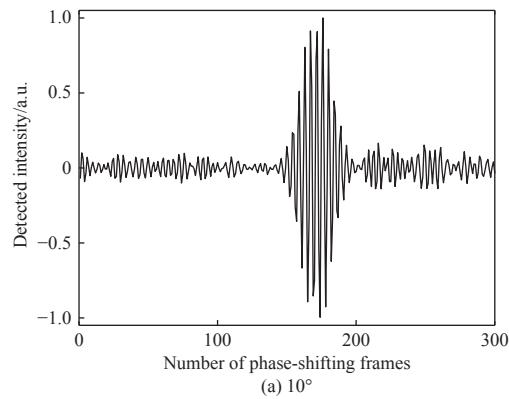


图 11 普通逆滤波校正后不同表面斜率对应的干涉信号

**Fig. 11 Interference signals corresponding to different surface slopes corrected by ordinary inverse filtering**



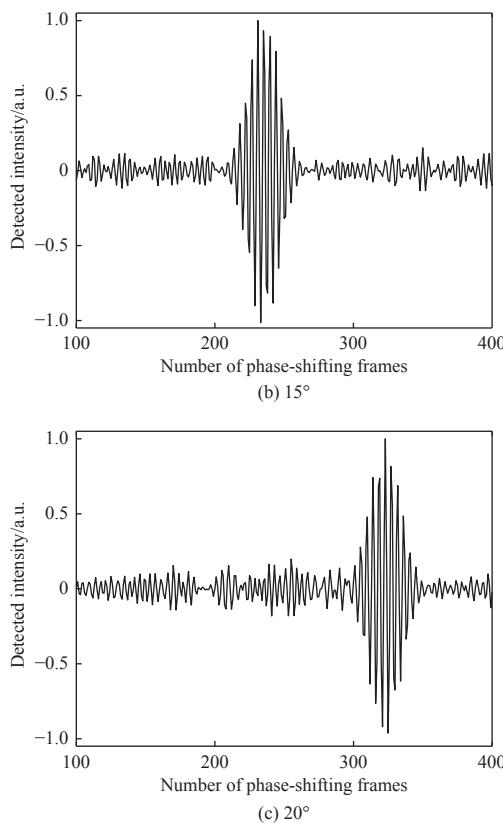


图 12 虚实融合型逆滤波校正后不同表面斜率对应的干涉信号

**Fig. 12** Interference signals corresponding to different surface slopes corrected by virtual-measured fusion inverse filtering

原始条纹和逆滤波校正后的形貌测量结果如图 13 所示, 表 1 具体给出两种逆滤波校正效果的对比数据。由于条纹级次计算误差, 形貌测量曲线会在部分位置出现高度突变。本文以形貌测量误差的每个数据点前后 10 个点的均方根误差(root mean square error, RMSE)为标准, 当其值大于  $0.3 \mu\text{m}$  时, 判定该点为最大可测量斜率的位置。普通逆滤波校正后的形貌测量结果存在大量毛刺, 由于对高频信号增益较小, 导致最大可测量表面斜率提升有限, 仅由  $8.09^\circ$  提升至  $16.93^\circ$ 。经过虚实融合型逆滤波校正后的形貌测量结果, 在更接近微球表面标称高度的同时减少了毛刺, 最大可测量斜率提升至  $21.20^\circ$ ,  $\sin(\theta)=0.36$ , 接近干涉显微物镜设计的测量极限, 均方根误差从  $0.5455 \mu\text{m}$  降低至  $0.1759 \mu\text{m}$ 。相对于普通逆滤波器而言, 虚实融合型逆滤波器可以进一步提升曲面样品的最大可测量斜率和减小误差。此外, 微球的横向测量范围相应地从未校正前的  $70.49 \mu\text{m}$  最终提升至  $181.14 \mu\text{m}$ , 在白光干涉仪对微球整体形貌的检测中可以减少旋转次数。

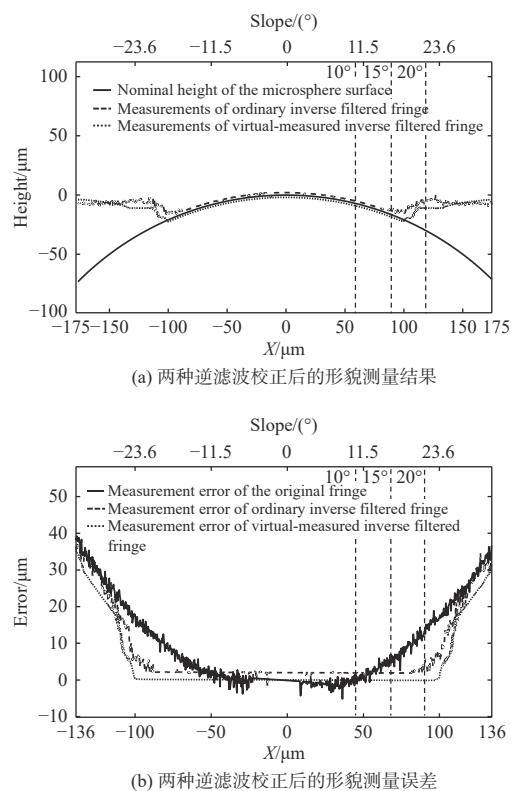


图 13 经过两种逆滤波校正的形貌测量结果和误差

**Fig. 13** Topography measurement results and errors corrected by different inverse filtering

表 1 两种逆滤波校正方法结果的对比

**Table 1** Comparison of results of two inverse filtering correction methods

Calibration method	RMSE/ $\mu\text{m}$	Lateral measuring range/ $\mu\text{m}$	Maximum measurable slope( $^\circ$ )
Uncalibrated	0.5455	70.49	8.09
Ordinary inverse filtered	0.3363	145.87	16.93
Virtual-measured inverse filtered	0.1759	181.14	21.20

#### 4 结论

在使用白光干涉仪测量曲面样品时, 形貌测量误差会随着表面斜率的增大而增大, 针对该问题, 本文通过提取虚拟 STF 的模作为振幅增益函数, 再由实测 STF 的相位计算相位补偿函数, 将二者结合形成虚实融合型逆滤波器, 用于校正曲面样品形貌测量的误差。与普通逆滤波校正方法相比, 虚实融合型逆滤波校正方法可以克服对高频信号的补偿不足的问题, 避免高斜率表面干涉信号无效包络的产生。应用该方法校正不锈钢微球的形貌测量结果, 在减小测量误差的同时可以有效

提升最大可测量斜率, RMSE 从  $0.545\text{ }5\mu\text{m}$  降低至  $0.175\text{ }9\mu\text{m}$ , 最大可测量斜率从  $8.09^\circ$  提升到  $21.20^\circ$ , 接近干涉显微物镜  $NA$  决定的测量极限, 提升了仪器针对曲面样品的测量范围。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 高志山, 袁群, 孙一峰, 等. 微结构显微光学无损检测方法(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(8): 23-40.  
GAO Zhishan, YUAN Qun, SUN Yifeng, et al. Non-destructive test methods of microstructures by optical microscopy(invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(8): 23-40.
- [ 2 ] 陈善勇, 薛帅, 熊玉朋, 等. 面向制造的光学面形超精密测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 177-190.  
CHEN Shanyong, XUE Shuai, XIONG Yupeng, et al. Research progress of ultra-precision measurement of optical surfaces for manufacturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 177-190.
- [ 3 ] 尹智瑶, 郭仁慧, 杨鑫, 等. 基于白光干涉的ICF靶丸表面缺陷测量方法[J]. 光学学报, 2022, 42(10): 79-87.  
YIN Zhiyao, GUO Renhui, YANG Xin, et al. Measurement method for surface defects on ICF capsules based on white light interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 79-87.
- [ 4 ] 张超, 袁群, 张佳乐, 等. 白光显微干涉三维形貌测量中的移相误差校正方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 341-348.  
ZHANG Chao, YUAN Qun, ZHANG Jiale, et al. Calibration method of the phase-shifting error for the topography measurement utilizing white light interferometric microscopy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7): 341-348.
- [ 5 ] KÜNNE M, HAGEMEIER S, KÄKEL E, et al. Investigation of measurement data of low-coherence interferometry at tilted surfaces in the 3D spatial frequency domain[J]. *Tm-Technisches Messen*, 2021, 88(S1): 65-70.
- [ 6 ] GAO F, LEACH R K, PETZING J, et al. Surface measurement errors using commercial scanning white light interferometers[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(1): 015303.
- [ 7 ] SU R, WANG Y H, COUPLAND J, et al. On tilt and curvature dependent errors and the calibration of coherence scanning interferometry[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3297-3310.
- [ 8 ] XIE W C, LEHMANN P, NIEHUES J. Lateral resolution and transfer characteristics of vertical scanning white-light interferometers[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(11): 1795-1803.
- [ 9 ] COUPLAND J M, LOBERA J. Holography, tomography and 3D microscopy as linear filtering operations[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(7): 074012.
- [ 10 ] MANDAL R, COUPLAND J, LEACH R, et al. Coherence scanning interferometry: measurement and correction of three-dimensional transfer and point-spread characteristics[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(8): 1554-1563.
- [ 11 ] SU R, THOMAS M, LIU M Y, et al. Lens aberration compensation in interference microscopy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128: 106015.
- [ 12 ] SU R, THOMAS M, LIU M Y, et al. High-accuracy surface measurement through modelling of the surface transfer function in interference microscopy[C]//Proceedings of Applied Optical Metrology III. San Diego: SPIE, 2019, 11102: 19-25.
- [ 13 ] COUPLAND J, MANDAL R, PALODHI K, et al. Coherence scanning interferometry: linear theory of surface measurement[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(16): 3662-3670.
- [ 14 ] 苏榕, 刘嘉宇, 乔潇悦, 等. 用于表面形貌测量的扫描白光干涉技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 60-80.  
SU Rong, LIU Jiayu, QIAO Xiaoyue, et al. Advances in scanning white light interferometry for surface topography measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 60-80.
- [ 15 ] SU R, LEACH R. Physics-based virtual coherence scanning interferometer for surface measurement[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(2): 120-135.