

# 激光与光电子学进展

## 白光干涉空间频域算法累积相位误差分析及抑制

邓钦元, 黄庆卿\*, 侯杰, 张焱, 熊飞, 陈俊华

重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065

**摘要** 空间频域算法作为白光干涉测量的重要算法之一, 被广泛应用于微纳结构表面形貌测量领域。然而, 传统空间频域算法中存在着由被测样品倾斜及表面形貌起伏变化引起的相位误差累积效应, 并且该相位误差与干涉信号中零光程差位置的偏移程度密切相关。为此, 对相位误差累积效应的原理进行分析, 并在传统空间频域算法的基础上提出了一种基于包络信号辅助分析的方法以抑制相位误差累积。该方法首先通过包络信号分析对原始干涉信号中的零光程差位置的偏移进行对称性校正, 再通过空间频域算法对校正后的对称信号进行相位分析, 从而尽可能抑制零光程差位置偏移对空间频域分析的影响。为了验证本文方法的有效性, 分别从仿真和实验的角度对该方法进行讨论。

**关键词** 显微; 白光干涉; 形貌测量; 包络信号; 空间频域算法; 相位误差累积效应

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0718001

### Analysis and Restriction About Accumulated Phase Error in Spatial Frequency-Domain Algorithm for White-Light Interferometry

Deng Qinyuan, Huang Qingqing\*, Hou Jie, Zhang Yan, Xiong Fei, Chen Junhua

School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

**Abstract** As one of the most important algorithms for white-light interferometry, the spacial frequency-domain algorithm (FDA) is widely applied in the field of micro-nano structure surface topography measurement. However, traditional FDA measurement result involves phase error accumulation effect caused by sample slope and the surface fluctuation, and the phase error is closely related with the offset of zero optical path difference (OPD) position in the interference signal. This paper explains the reason of phase error accumulation effect existing in traditional FDA, and proposes an envelope-signal-assisted analysis (ESAA) method based on traditional FDA to exhibit the phase error accumulation. The ESAA method firstly perform a symmetric adjustment for the offset of zero OPD position existing in the original interference signal. Then, the FDA is applied for the adjusted symmetric interference signal which can restrict the phase error accumulation effect as more as possible. To demonsrate the validity of proposed method, both simulation and experimental analysis are elaborated and discussed.

**Key words** microscopy; white-light interference; topography measurement; envelope signal; spatial frequency-domain algorithm; phase error accumulation effect

**OCIS codes** 180.3170; 070.2025; 120.5050

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-08-24; 录用日期: 2020-09-03

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2005900)、国家自然科学基金(61903057)、重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-fxydX0018, cstc2019jcyj-zdztzxX0027)、重庆市教育委员会青年基金(KJQN201900642)

\*E-mail: qingq.huang@gmail.com

## 1 引言

白光干涉测量是一种高精度的微纳结构表面形貌测量方法<sup>[1-8]</sup>,并且被广泛应用于微纳结构表面缺陷检测<sup>[4, 9]</sup>、微小位移测量<sup>[10-11]</sup>、超材料检测<sup>[12]</sup>以及传感器测试<sup>[13-14]</sup>等领域。目前,常用的白光干涉算法包括:时域调制度算法<sup>[15-17]</sup>、空间频域算法(FDA)<sup>[18-20]</sup>及傅里叶变换算法<sup>[21]</sup>等。其中,时域调制度算法通过干涉信号的包络曲线来确定信号极大值采样点,并结合了相移算法<sup>[22-23]</sup>对干涉信号零光程差位置进行精准定位,进而恢复样品表面形貌。空间频域算法利用了干涉信号的频谱相位信息来分析样品表面形貌。傅里叶变换算法与空间频域算法类似,通过对干涉信号进行频谱分解,并从中提取多个单色光的相位信息进行分析,进而恢复被测样品表面形貌。上述几种算法中,时域调制度算法计算相对简单,但是易受背景噪声影响,而且该方法对采样步距精度依赖较大;傅里叶变换算法对于光谱信息利用有限,其测量稳定性受到一定影响;空间频域算法利用多光谱相位信息进行线性拟合插值,不仅具备传统相移算法的高精度优点,而且能有效应对外界噪声干扰,此外对于采样步距没有严格要求。因此,空间频域算法在白光干涉测量领域具备广泛应用前景。

尽管空间频域算法具备种种优点,但是在实际应用过程中也面临着诸多问题,如局部 $2\pi$ 模糊效应等<sup>[18, 21]</sup>。由于空间频域算法需要利用干涉信号的频谱相位信息测量样品形貌,其离散傅里叶变换过程不可避免地会涉及 $2\pi$ 模糊问题,尤其是

当样品表面出现台阶或者其他比较复杂的局部特征缺陷时, $2\pi$ 模糊问题表现非常突出。在前期的研究工作中,我们针对空间频域算法中的局部 $2\pi$ 模糊效应提出了一种基于相邻像素点差分分析的方法,能够有效消除因噪声以及样品表面复杂特征引起的局部 $2\pi$ 模糊<sup>[20]</sup>。然而,除 $2\pi$ 模糊之外,传统空间频域算法中还存在着由样品倾斜以及样品表面起伏变化引入的相位误差累积效应,而该累积相位误差在实际测量过程中往往未引起足够重视。

通过进一步分析可以发现,传统空间频域算法中的相位误差累积与干涉信号中的零光程差位置偏移程度密切相关。因此,本文提出一种基于包络信号辅助分析(ESAA)的白光干涉测量方法,该方法在传统空间频域分析的基础上引入了包络信号分析,从而对干涉信号中零光程差的位置偏移进行对称性校正,进而抑制传统空间频域分析中存在的相位误差累积效应。整个方法主要分为两步:1)包络信号分析,提取原始信号包络信号曲线,确定包络曲线极大值采样点位置,并提取关于该点对称的局部对称信号;2)空间频域分析,对提取的局部对称信号进行频谱相位分析,计算中心频率相位信息并恢复样品表面形貌。本文分别从理论和实验两个方面对所提方法进行分析和讨论。

## 2 基本原理

### 2.1 相位误差累积效应分析

根据光学相干理论,白光干涉测量系统中测量光束与参考光束在扫描位置 $\zeta$ 处所产生的相干信号的光场强度可以表示<sup>[24-26]</sup>为

$$I(\zeta, h) = I_1 + I_2 + 2\Gamma(\zeta, h) = I_1 + I_2 + \frac{1}{2} \rho \theta_0^2 \int_0^\infty f(k) \cos[2k(\zeta - h) + \gamma] dk, \quad (1)$$

式中: $I_1$ 、 $I_2$ 分别为测量光束与参考光束的平均光强; $\Gamma(\zeta, h)$ 为两束光的相干函数,其可以表示为不同光谱成分之间的相干函数的线性叠加,如(1)式中的积分项所示; $\rho$ 为比例因子; $f(k)$ 为光源频谱分布函数; $\theta_0$ 为测量系统中光束最大入射角度; $k$ 为波数, $k = 2\pi/\lambda$ ;  $h$ 为被测物体相对于干涉物镜零光程差参考面的距离,如图1所示; $\gamma$ 为与被测物体表面反射有关的相位偏移量。

对(1)式进行傅里叶变换,可得干涉信号的傅里叶相位分布为

$$\varphi(K) = -Kh + \gamma = -2kh + \gamma, \quad (2)$$

式中: $K$ 为傅里叶频率, $K = 2k$ 。(2)式表明,各频谱成分的相位分布 $\varphi(K)$ 与傅里叶频率 $K$ 呈线性关系,其斜率代表了高度信息,而传统空间频域算法正是利用这一线性关系进行拟合分析,进而恢复被测结构表面形貌,如图2所示<sup>[19]</sup>。考虑到背景噪声影响会导致计算的斜率中存在偏移误差 $\tau$ ,因此通常采取计算中心频率相位的方式来表示被测结构表面形貌,其理论公式<sup>[19-20]</sup>为

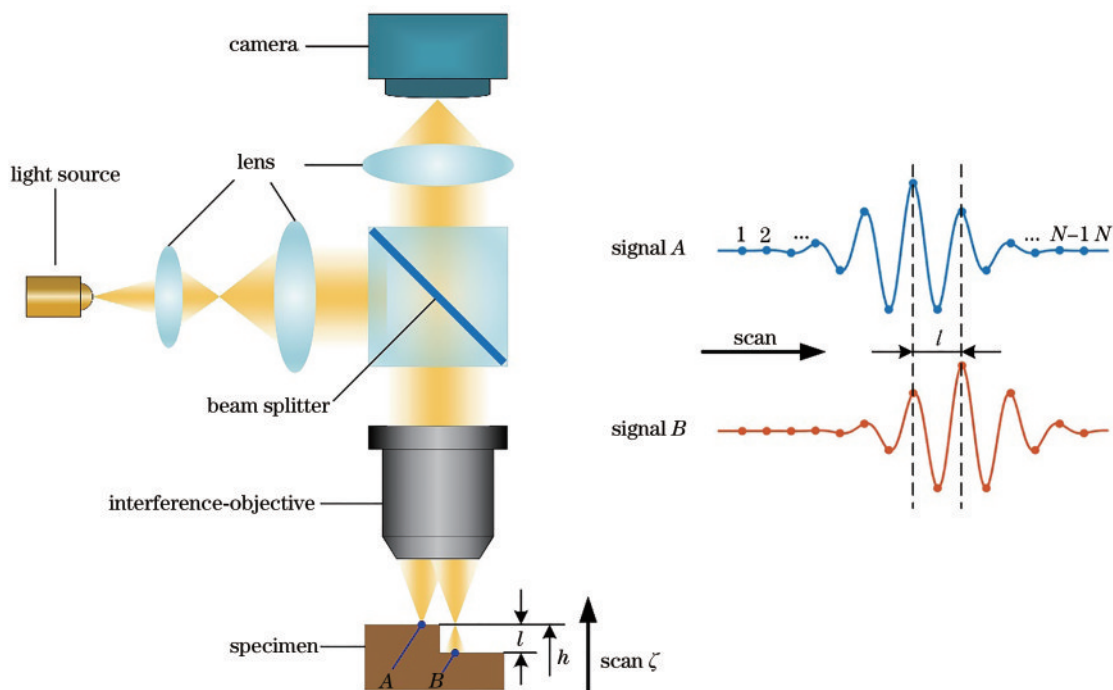


图 1 白光干涉测量信号采集原理图

Fig. 1 Schematic of signal acquisition for white-light interferometry

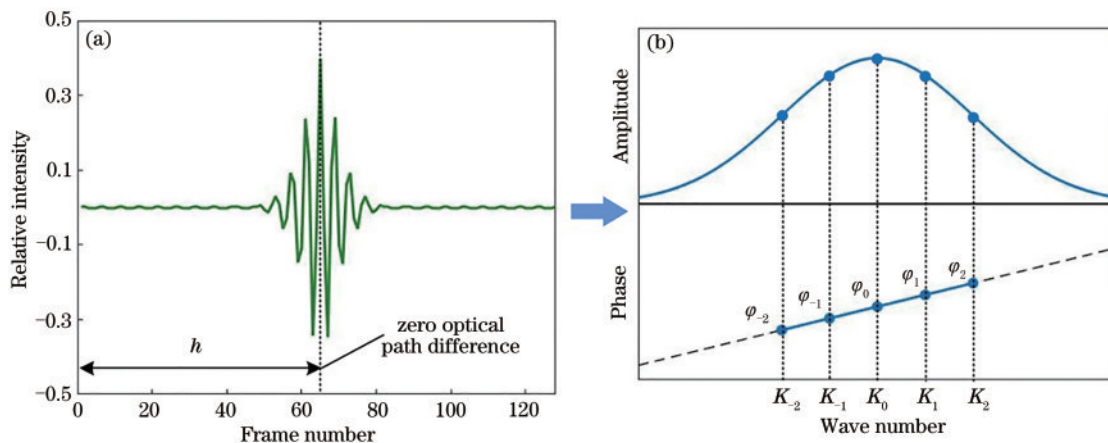


图 2 传统空间频域算法原理示意图

Fig. 2 Schematic of traditional FDA algorithm

$$\varphi(K_0) = K_0 \frac{d\varphi(K)}{dK} - K_0\tau + \gamma = K_0 \frac{d\varphi(K)}{dK} + D = -K_0h + \gamma, \quad (3)$$

式中： $\varphi(K_0)$ 为中心频率 $K_0$ 所对应的傅里叶相位； $D$ 为线性拟合过程中的相位截距。

根据(2)式、(3)式可以看出，在不考虑反射相位 $\gamma$ 影响的前提下，理论上任意点的傅里叶相位 $\varphi(K)$ 与其偏离零光程差参考面的距离 $h$ 呈线性关系。然而，在实际的白光干涉测量过程中，由于只能通过离散采样获取扫描信号，且采样长度

和步距受到一定限制，傅里叶相位 $\varphi(K)$ 与距离 $h$ 之间将不再呈完全线性关系。以图1中信号A、B的离散采样点为例，不妨设 $I_A(n)$ 和 $I_B(n)$ 分别表示上述两种离散信号，其中 $n=1, \dots, N$ ，且 $I_A(n)$ 关于零轴位置对称。受离散采样步距 $\Delta_{step}$ 以及采样长度 $N$ 的限制， $I_A(n)$ 和 $I_B(n)$ 的离散频谱信号关系为

$$G_B(p, l) = G_A(p) \cdot \exp(-jKl) + \Omega(p, l), \quad (4)$$

式中:  $l$  为  $A$ 、 $B$  两点之间的高度差;  $p$  为频谱坐标,  $p = 1, \dots, N$ ;  $\Omega(p, l)$  为一复数, 是与信号零光程差

位置的相对偏移量  $l$  相关的一个小量。为分析简便, 不妨假设  $l = m\Delta_{\text{step}}$ ,  $m$  为一非零整数, 则  $\Omega(p, l)$  可以表示为

$$\Omega(p, l) = \sum_{n=1}^m [I_B(n) - I_A(N - m + n)] \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi}{N}(n-1)(p-1)\right] = r(p, l) \cdot \exp[j\omega(p, l)], \quad m = 0, 1, \dots, \quad (5)$$

式中:  $r(p, l)$  和  $\omega(p, l)$  分别为  $\Omega(p, l)$  的幅值和相位。由于  $A$  点信号关于零轴对称, 其傅里叶相位理论上为 0。结合 (4) 式、(5) 式可知, 在离散采样状态下,  $B$  点信号的离散傅里叶相位可以表示为

$$\varphi_B(p, l) = -Kl + \delta(p, l), \quad (6)$$

式中:  $\delta(p, l)$  为与  $\Omega(p, l)$  相关的相位小量, 如图 3 所示。此时,  $G_B(p)$  的傅里叶相位将不再与  $B$  点的偏

移距离  $l$  呈完全线性关系, 若再利用 (3) 式的中心频率相位来表示被测结构形貌, 将不可避免地包含相位误差  $\delta(p, l)$ 。除此之外, 随着零光程差位置的相对偏移距离  $l$  增加,  $\delta(p, l)$  将逐渐累积变大, 导致  $\varphi_B(p, l)$  偏离理论值  $-Kl$  更大, 最终形成明显的相位误差累积效应。

### 2.2 包络信号辅助分析

为了抑制传统空间频域算法中由于扫描信号零光程差位置偏移所导致的相位误差累积效应, 需要尽可能确保干涉信号关于零光程差位置对称。由于在实际测量过程中零光程差位置未知, 本文考虑以靠近零光程差位置的包络信号极大值采样点作为替代, 对原始采样信号进行对称性校正。本文将分两步来实现这一目标: 1) 提取原始信号的包络曲线, 寻找包络曲线极大值采样点位置; 2) 以包络信号极大值采样点为参考, 提取一段相对对称的扫描信号进行空间频域分析。尽管包络信号极大值采样点与零光程差位置之间存在较小偏移, 但是该偏移造成的相位误差较小, 对于整体测量效果影响有限。

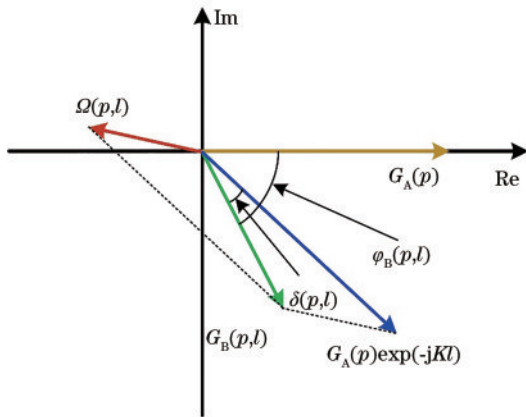


图 3 离散采样干涉信号分析相位差示意图

Fig. 3 Schematic of phase difference for discrete sampling interference signal analysis

1) 包络信号分析。根据欧拉公式, (1) 式可以写为

$$I(\zeta, h) = I_{\text{DC}} + u(\zeta, h) + u^*(\zeta, h), \quad (7)$$

式中:  $I_{\text{DC}} = I_1 + I_2$ ;  $u(\zeta, h) = \frac{1}{4} \rho \theta_0^2 \int_0^\infty f(k) \exp[j(2\zeta k - 2hk + \gamma)] dk$ ;  $u^*(\zeta, h)$  为  $u(\zeta, h)$  的共轭复数。对 (7) 式进行傅里叶变换, 可得

$$F(K) = D(K) + U(K) + U^*(K), \quad (8)$$

式中:  $F(K)$ 、 $D(K)$ 、 $U(K)$  和  $U^*(K)$  分别为  $I(\zeta, h)$ 、 $I_{\text{DC}}$ 、 $u(\zeta, h)$  和  $u^*(\zeta, h)$  的傅里叶变换。提取 (8) 式中的正频频谱信息  $U(K)$ , 并对其进行傅里叶逆变换, 可得干涉信号包络信息 (如图 4 中虚线所示) 为

$$M(\zeta, h) = 2 \left| \text{IFFT}[U(K)] \right| = \frac{1}{2} \rho \theta_0^2 \left| \int_0^\infty f(k) \exp[j(2\zeta k - 2hk + \gamma)] dk \right|, \quad (9)$$

式中:  $\text{IFFT}[\cdot]$  为傅里叶逆变换函数。通过 (9) 式求取的包络曲线, 即可确定极大值采样点的位置  $N_{\text{max}}$ ,

如图 4 所示。

2) 空间频域分析。在上述包络信号分析的基

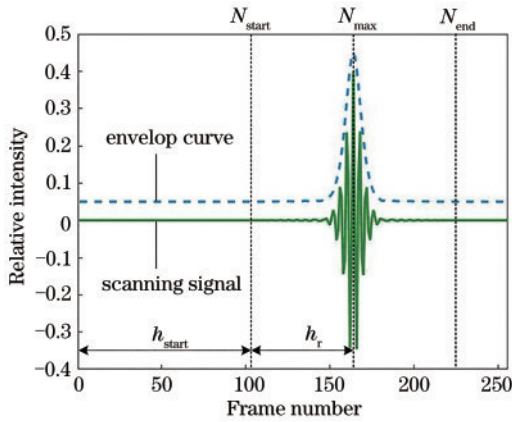


图 4 包络信号辅助分析原理图  
Fig. 4 Schematic of ESAA

基础上,从原始信号中提取一段关于包络信号极大值采样点  $N_{max}$  对称的信号,用于后续空间频域分析。对称信号的起始点设为  $N_{start}$ ,其相对于原始信号起始点的位移为  $h_{start}$ ,如图 4 所示。根据(3)式,对称信号段的中心频率傅里叶相位为

$$\varphi_r(K_0) = K_0 \frac{d\varphi_r(K)}{dK} + D_r = K_0 h_r + \gamma_r, \quad (10)$$

式中:  $\varphi_r(K)$  为提取的局部对称信号的傅里叶相位;  $D_r$  为线性拟合过程中的相位截距;  $h_r$  为零光程差点

的相对位置;  $\gamma_r$  为由样品表面反射引起的相位偏移。根据(10)式,再结合先前包络信号分析中对称干涉信号的相对起始位置  $N_{start}$ ,被测结构的总体形貌可以表示为

$$h = h_{start} + h_r = N_{start} \cdot \Delta_{step} + h_r. \quad (11)$$

### 2.3 仿真分析

本文利用 MATLAB 软件对上述相关理论方法进行了仿真分析。首先,我们选取经典的 peaks 函数生成仿真所需的样品原型,如图 5(a) 所示。考虑到样品倾斜的影响,在样品原型的基础上添加了适当的倾斜基面,如图 5(b) 所示。仿真采样间距设置为 80 nm,采样帧数为 256,采样图如图 5(c) 所示。仿真过程中的样品形貌表达式为

$$z = z_{slope} + 100 \times \text{peaks}(300), \quad (12)$$

其中

$$z_{slope} = -12 \times (x - 150) + 12 \times (y - 150), \quad (13)$$

式中:  $z$  为被测结构表面形貌;  $z_{slope}$  为倾斜基面。为了便于分析,本文采用 rad 作为测量单位,其换算关系为

$$z_{phase} = K_0 z. \quad (14)$$

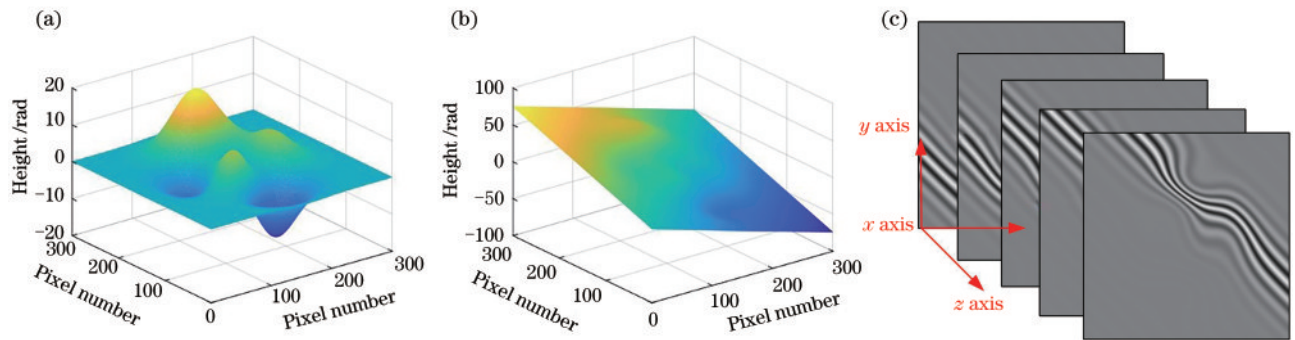


图 5 仿真样品及干涉采样图。(a)原始形貌;(b)含倾斜基准形貌;(c)干涉图

Fig. 5 Simulation sample and interferograms. (a) Original surface; (b) surface with a tilted datum; (c) interferograms

图 6 分别展示了传统空间频域算法以及本文提出的包络信号辅助分析算法对于倾斜样品的测量结果。可以直观看出,传统空间频域算法所得测量结果在移除倾斜基准面之后仍然存在较大的相位误差,而且该相位误差的变化趋势同时与倾斜基准和形貌起伏变化呈负相关关系,如图 6(b)、图 7(a) 所示。相比之下,本文提出的包络信号辅助分析算法不仅有效抑制了基准倾斜和形貌起伏变化所导致的相位误差累积,而且还将整体相位误差限制在

较小范围,如图 6(d)、图 7(b) 所示。

为了对仿真结果中的相位误差进行量化分析,本文提取了图 6(c) 的中间截面曲线 AA',如图 7 所示。分别计算残差曲线的均值、峰谷(PV)值以及标准差  $\sigma$ ,得到表 1 中数据。可以看出,与传统空间频域算法相比,本文包络信号辅助分析算法在均值和 PV 值上能提升两个数量级,而标准差也有一个数量级的提升。

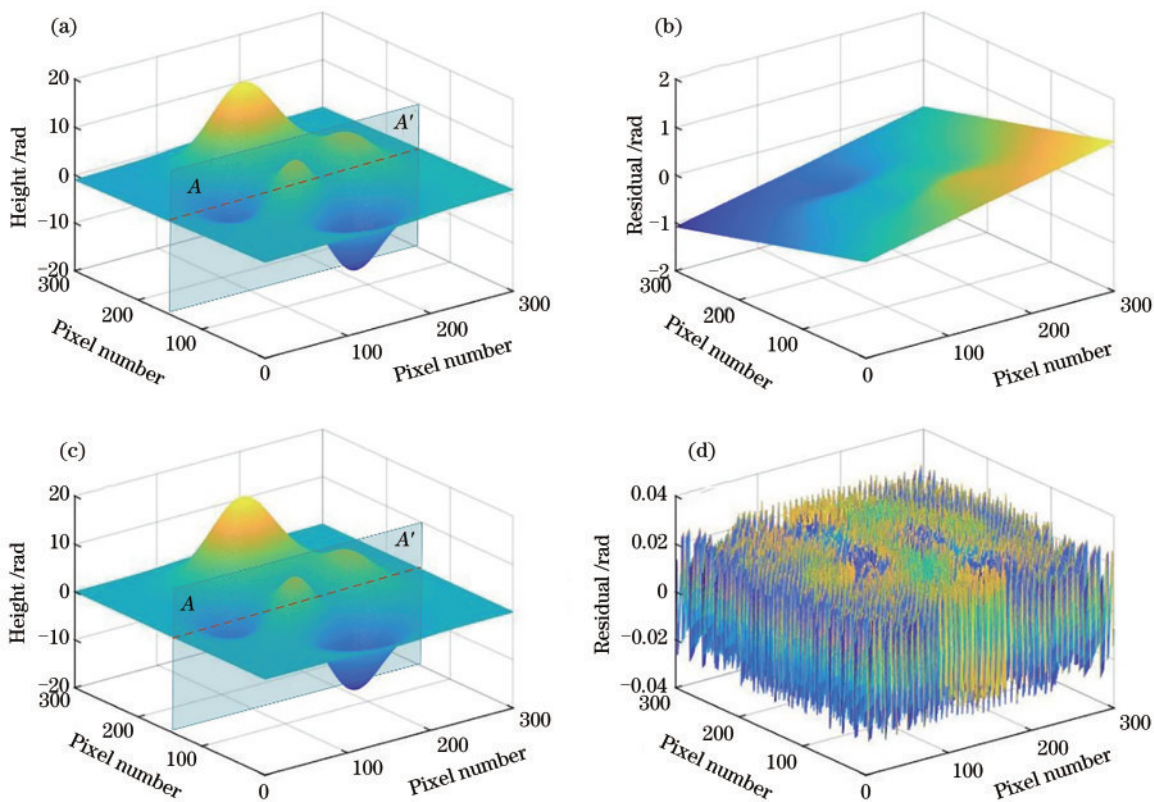


图 6 仿真结果。(a)(b)传统空间频域算法测量表面形貌和残差；(c)(d)包络信号辅助分析算法测量表面形貌和残差  
Fig. 6 Simulation results. (a)(b) Surface topography and residual error measured by traditional FDA method; (c)(d) surface topography and residual error measured by ESAA method

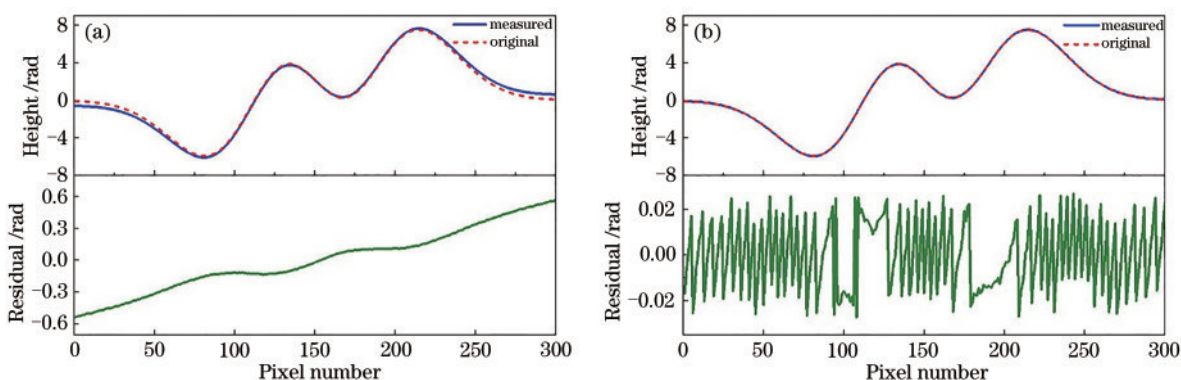


图 7 截面曲线对比。(a)传统空间频域算法；(b)包络信号辅助分析频域算法  
Fig. 7 Comparison of cross-section profiles. (a) Traditional FDA method; (b) ESAA method

表 1 两种仿真结果残差分析

Table 1 Residual analysis for two simulation results unit: rad

Algorithm	Mean value $\mu$	PV value $\Delta$	Standard deviation $\sigma$
FDA	$2.6 \times 10^{-3}$	1.100	0.290
ESAA	$-7.2 \times 10^{-5}$	0.054	0.015

### 3 实验结果与分析

为了验证本文方法在实际测量过程中的表现，

按照图 8 中的实验装置进行白光干涉采样实验。该实验装置采用中心波长约 600 nm 的 LED 灯作为白光光源，采用 20 倍率的 mirau 型干涉物镜产生相干光路，选择步进电机对干涉物镜进行驱动扫描，并结合精密光栅尺进行纵向定位，定位精度为 1 nm，采样步距设置为 50 nm。本文分别针对光栅结构和球面结构进行了干涉采样，并获得如图 9 所示采样条纹。

首先，对图 9(a)中的光栅结构采样条纹进行分

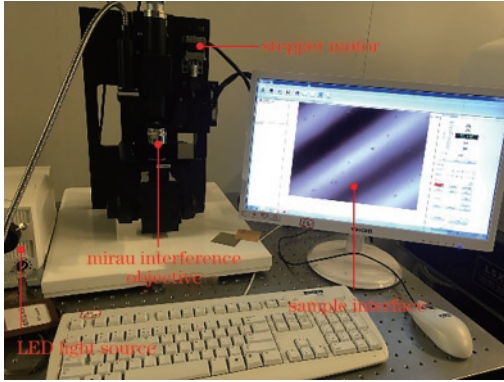


图 8 实验装置图

Fig. 8 Experiment setup

析。为了验证传统空间频域算法测量中的相位误差累积效应,本文在实际采样过程中对样品引入一个小角度的倾斜,从而增加结构表面的高度落差。

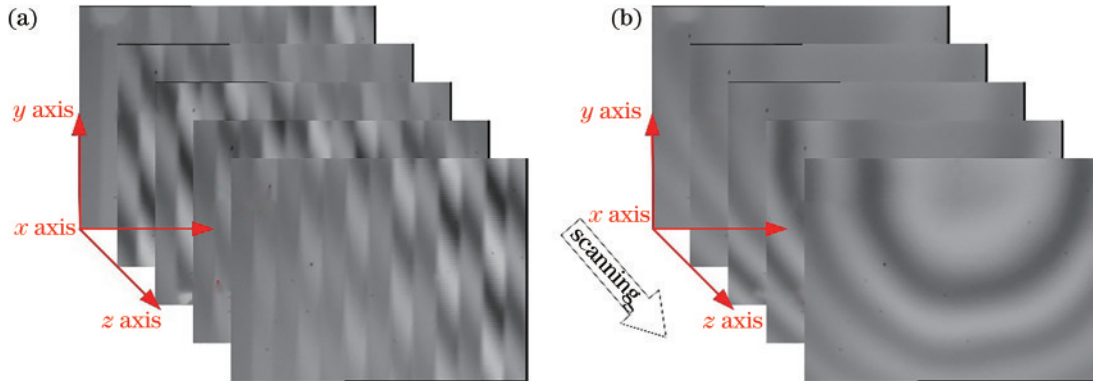


图 9 干涉图。(a)光栅结构;(b)球面结构

Fig. 9 Interferograms. (a) Grating structure; (b) spherical structure

为了量化分析两种测量算法的相位误差累积表现,本文分别提取了不同测量结果的截面曲线,如图 11(a)~(c)所示。显然,在消除了倾斜基准之后,传统空间频域算法测量结果在相位误差累积效应作用下,光栅结构整体呈现倾斜分布,而本文方法测量结果基本未包含较大的倾斜误差,光栅结构整体呈现水平分布。利用残差曲线[图 11(c)]对传统空间频域算法的累积相位误差进行大致评估表示为

$$\Delta_{\text{residual}} = \frac{k_{\text{slope}} \cdot L_x}{2k_0}, \quad (15)$$

式中: $k_{\text{slope}}$ 为图 11(c)中拟合虚线的斜率, $L_x$ 为横坐标长度, $k_0$ 为中心波长波数,分别为 0.0014 rad、512 和 0.0105 rad/nm。根据(15)式计算得到 $\Delta_{\text{residual}} = 34.13 \text{ nm}$  (0.71 rad),由此可以看出,传统空间频域算法累积相位误差将对测量结果产生较

图 10(a)、(b)分别为带有倾斜基准的表面形貌测量结果。为了观察两种测量算法在抑制相位累积误差效应方面的表现,我们需要提前知道测量结构的倾斜基准。然而,在实际测量过程中,被测结构的倾斜基准很难直接测量。为此,本文采取平面拟合的方式提取一个合适的倾斜基准。根据前文仿真分析结论,本文所提包络信号辅助分析方法包含倾斜累积相位误差较小,对于测量结果不会产生较大影响,故而此处同样以本文方法的测量结果[图 10(b)]为参考,拟合出一倾斜基准面,如图 10(c)所示。图 10(d)、(e)分别展示了消除倾斜基准后两种测量算法的结果,图 10(f)则展示了两种测量结果的残差。可以看出,两种测量算法的残差同样呈现倾斜分布,其变化趋势与倾斜基准相反,这一点正好与仿真结论相符。

大影响,而且随着高度落差增加,该累积相位误差也将进一步加大。此外,为了对比本文测量方法与实际台阶高度的差别,本文采用台阶仪对光栅结构进行了验证测量,如图 11(d)所示。根据台阶扫描仪的测试数据和本文方法的测量结果数据,分别提取四个台阶的高度值,并计算了其平均高度,如表 2 所示。可以看出,本文测量方法的台阶高度平均值与台阶仪测试平均值非常接近,相对误差为 3.57 nm。以上结果表明,本文方法能有效抑制传统空间频域算法中存在的相位误差累积效应,实验结果表现与仿真分析相符。然而,从图 11(b)中的测试结果来看,本文方法的测量光滑度却不如传统空间频域算法,我们将在球面结构的测量结构中做进一步分析。

利用上述方法同样对球面结构进行表面形貌恢复,消除倾斜基准后,得到了如图 12 所示结果。

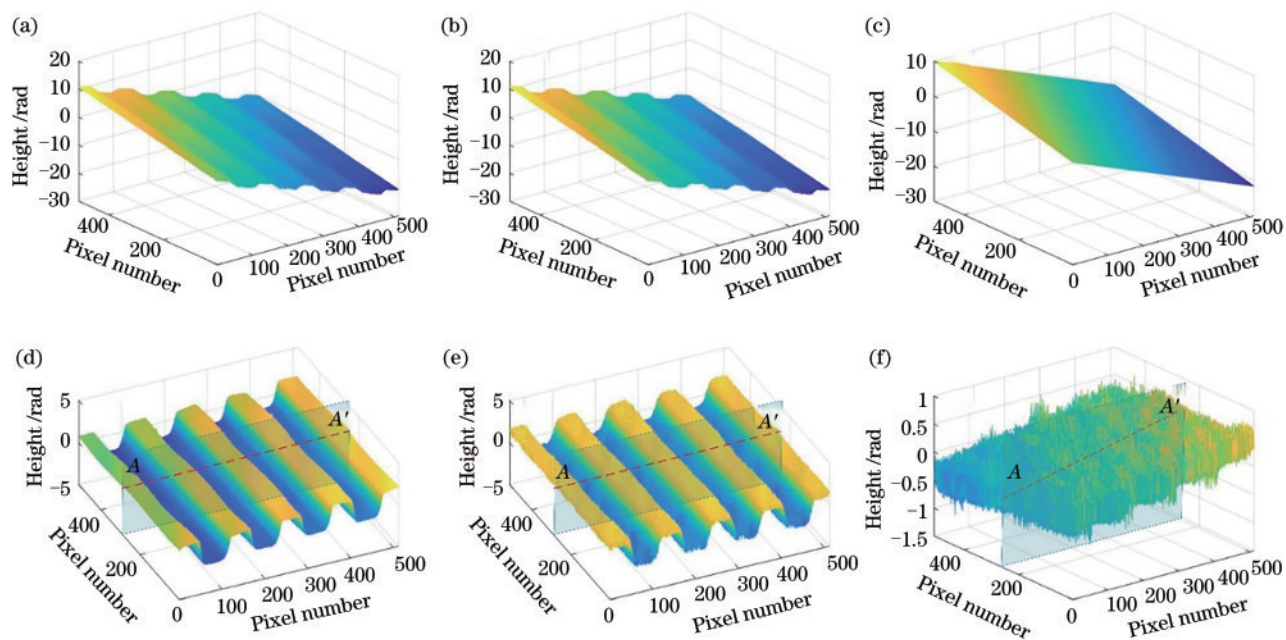


图 10 光栅结构测量结果。(a)(b)含倾斜基准的传统空间频域算法和包络信号辅助分析算法测量表面形貌;(c)由图(b)提取的倾斜基准;(d)(e)图(a)和(b)移除倾斜基准后的表面形貌;(f)图(d)与图(e)间的残差  
 Fig. 10 Grating structure measurement results. (a)(b) Surface topography containing the same inclined datum, measured by traditional FDA method and ESAA method; (c) inclined datum extracted from Fig. (b); (d)(e) surface topography after removing inclined datum from Fig. (a) and (b), respectively; (f) residual error between Fig. (d) and (e)

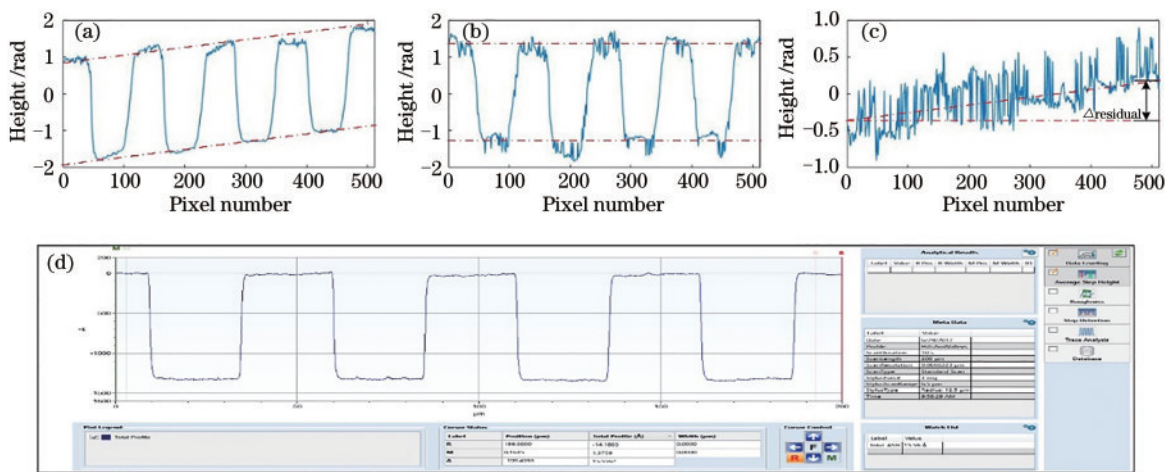


图 11 光栅结构截面轮廓。(a)传统频域算法截面轮廓;(b)包络信号辅助分析算法截面轮廓;(c)残差截面轮廓;(d)台阶仪测量截面轮廓。  
 Fig. 11 Cross-section profile for grating structure. (a) Cross-section profile measured by traditional FDA method; (b) cross-section profile measured by ESAA method; (c) cross-section profile of residual error; (d) cross-section profile measured by stylus profiler

表 2 光栅结构台阶高度

Table 2 Step height of grating structure

unit: nm

Method	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Average
ESAA	125.43	134.69	124.04	126.21	127.59
Stylus profiler	131.35	129.32	131.98	131.99	131.16



对比图 12(d)、(e)两组截面曲线可以看出,本文方法的测量结果平滑性的确不如传统空间频域算法,相邻点之间的波动相对比较剧烈。从残差图[图 12(c)]以及残差曲线[图 12(f)]来看,传统空间频域算法的测量结果中包含了与倾斜以及表面形貌变化相关的累积相位误差,而且该累积相位误差的变化趋势与被测结构本身形貌变化趋

势相反[见图 12(f)虚线],这与仿真分析结果以及光栅结构测量结果表现一致。表 3 显示了球面结构的残差[图 12(f)]分析结果,对比表 1 中 FDA 方法的测试数据可以看出,实验结果与仿真分析结果基本相符。此外,为了评估两种测量方法的粗糙度差异,本文两种面型的表面粗糙度<sup>[17]</sup>计算公式为

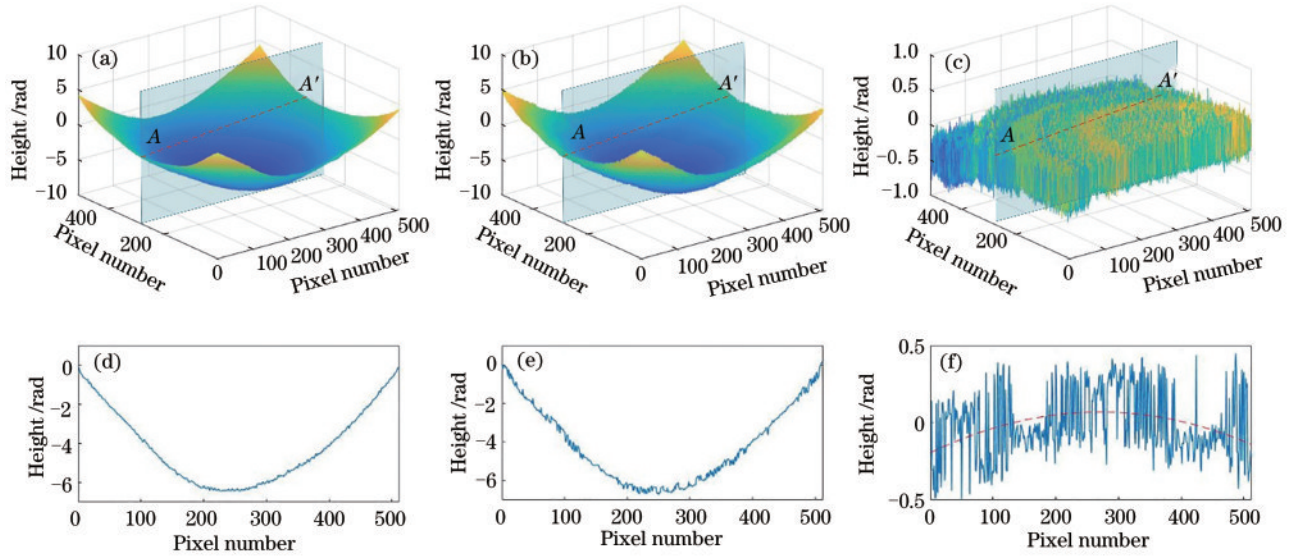


图 12 球面结构的测量结果。(a)传统空间频域算法;(b)包络信号辅助分析算法;(c)图(a)与(b)之间的残差;(d)~(f)图(a)~(c)分别在 250 行处的截面轮廓

Fig. 12 Spherical structure measurement results. (a) Traditional FDA method; (b) ESAA method; (c) residual error between Fig. (a) and (b); (d)-(f) cross-section profiles of Fig. (a)-(c) at 250th row, respectively

表 3 球面结构的残差分析结果

Table 3 Residual analysis for spherical structure unit: rad

Mean value $\mu$	PV value $\Delta$	Standard deviation $\sigma$
-0.097	0.97	0.18

$$R_q = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [h(i) - h_{\text{fit}}(i)]^2 \right\}^{1/2}, \quad (16)$$

式中:  $h_{\text{fit}}(i)$  为测量结果拟合曲线。通过(16)式计算得到传统空间频域算法与本文方法测量结果的表面粗糙度分别为 0.08 rad 和 0.15 rad。显然,本文方法虽然能够抑制传统空间频域算法中的累积相位误差,但是其测量结果的粗糙度较传统空间频域算法上升了一个数量级。造成这一结果的主要原因可能有两点:

- 1) 扫描步距  $\Delta_{\text{step}}$  非恒定,存在微小位移偏差  $\Delta_{\text{error}}$ ,导致(11)式中  $h_{\text{start}}$  的计算存在小量误差。
- 2) 对于不同像素点而言,表面高度变化会导致(11)式中  $N_{\text{start}}$  的位置发生改变,这意味着对不同像

素点而言,其频域分析的信号的起始点可能不一致,从而导致频域分析结果  $h_r$  包含由  $N_{\text{start}}$  不一致引入的微小反射相位误差  $\gamma_{\text{error}}$ <sup>[19]</sup>。这可能也是导致图 12(e)中一部分区域波动平缓而另一部分区域又波动剧烈的主要原因。

受测量系统限制,本文很难获得与扫描步距误差  $\Delta_{\text{error}}$  以及与  $N_{\text{start}}$  相关的相位偏差  $\gamma_{\text{error}}$ ,因此很难通过计算的方式消除本文方法中的波动误差。为此,本文考虑将扫描步距误差  $\Delta_{\text{error}}$  以及反射相位误差  $\gamma_{\text{error}}$  当作噪声信号进行处理,通过小波滤波的方式抑制其测量结果的影响。图 13 为小波去噪后的两种结构测量结果。相对于图 11 和图 12 中的测量结果而言,滤波后测量结果的平滑性得到极大改善。通过(16)式再次计算球面结构的表面粗糙度,得到结果为 0.03 rad,较处理前的结果提升了一个数量级。

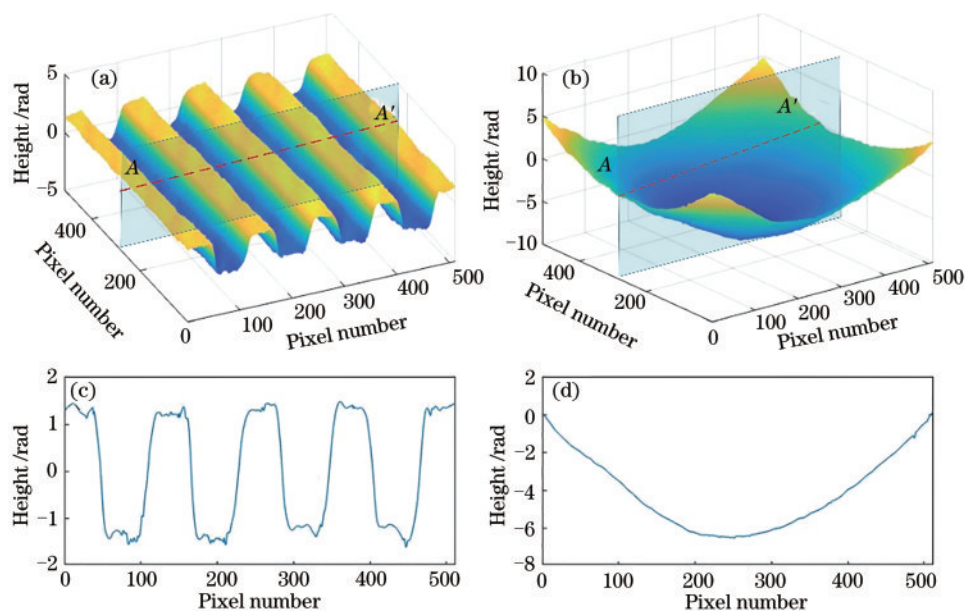


图 13 小波变换去噪后测量结果。(a)光栅结构表面形貌;(b)球面结构表面形貌;(c)光栅结构截面曲线;(d)球面结构截面曲线  
Fig. 13 Measurement results after wavelet denoising. (a) Grating structure surface topography; (b) spherical structure surface topography; (c) cross-section profile of grating structure; (d) cross-section profile of spherical structure

## 4 结 论

总而言之,传统白光干涉空间频域算法中存在着由样品倾斜以及表面形貌起伏变化引起的相位误差累积效应。本文首先对该相位误差累积效应的原理进行了分析,并在传统空间频域算法的基础上提出了一种基于包络信号辅助分析的改进算法,通过校正原始扫描信号中零光程差位置的偏移进而抑制频域分析过程中的累积相位误差。仿真分析表明,传统空间频域算法引起的累积相位误差比本文方法高出两个数量级。针对光栅结构的实验测量结果显示传统空间频域算法的平均累积相位误差高达 34.13 nm,而本文方法的台阶测试高度与台阶仪的测试结果仅相差 3.57 nm。仿真分析与实验结果皆表明,本文方法能够有效抑制测量过程中的相位误差累积效应。同时,本文方法存在着由扫描步距误差和反射相位偏移误差引起的测量粗糙度过大的问题。球面结构测试结构显示传统空间频域算法与本文算法的测量粗糙度分别为 0.08 rad 和 0.15 rad。为此,本文采用小波滤波的方法对测量结果进一步处理。实验结果表明,小波滤波后光滑球面结构的表面粗糙度可达 0.03 rad,较处理前提升了一个数量级,一定程度弥补了本文测量方法的不足。后续关于本文方法测量误差的分析仍有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Pavliček P, Hýbl O. White-light interferometry on rough surfaces: measurement uncertainty caused by surface roughness [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(16): 2941-2949.
- [2] Ma S D, Quan C G, Zhu R H, et al. Surface profile measurement in white-light scanning interferometry using a three-chip color CCD [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(15): 2246-2254.
- [3] Ma S, Quan C, Zhu R, et al. Micro-profile measurement based on windowed Fourier transform in white-light scanning interferometry [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(10/11): 2488-2493.
- [4] Leong-Hoi A, Claveau R, Flury M, et al. Detection of defects in a transparent polymer with high resolution tomography using white light scanning interferometry and noise reduction [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9528: 952807.
- [5] Zhou Y, Tang Y, Deng Q Y, et al. Dimensional metrology of smooth micro structures utilizing the spatial modulation of white-light interference fringes [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 93: 187-193.
- [6] Deng Q Y, Liu J B, Tang Y, et al. Spatial modulation-assisted scanning white-light interferometry for noise suppression [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(4): 379-382.
- [7] Kumar U P, Wang H F, Mohan N K, et al. White

- light interferometry for surface profiling with a colour CCD[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8): 1084-1088.
- [8] Gao F, Muhamedsalih H, Jiang X Q. Surface and thickness measurement of a transparent film using wavelength scanning interferometry [J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21450-21456.
- [9] Krauter J, Stark J, Osten W. Topography measurement on disguised microelectromechanical systems using short coherence interferometry [J]. *Tm-Technisches Messen*, 2019, 86(6): 309-318.
- [10] Miklavcic S J, Fung C. Quantifying the force between mercury and mica across an ionic liquid using white light interferometry [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 538: 218-227.
- [11] Zheng Q, Chen L, Han Z G, et al. A non-contact distance sensor with spectrally-spatially resolved white light interferometry[J]. *Optics Communications*, 2018, 424: 145-153.
- [12] Pshenay-Severin E, Setzpfandt F, Helgert C, et al. Experimental determination of the dispersion relation of light in metamaterials by white-light interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(4): 660-666.
- [13] Jiang Y, Gao H C, Jia J S. Fiber optical spectral-domain white-light interferometry[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(3): 31-42.  
江毅, 高红春, 贾景善. 光谱域光纤白光干涉测量技术[J]. *计测技术*, 2018, 38(3): 31-42.
- [14] Guo Z L, Lv W T, Wang W, et al. Absolute single cavity length interrogation of fiber-optic compound fabry-perot pressure sensors through a white light non-scanning correlation method [J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1628.
- [15] Tao C K, Wang W Y, Zhang Y J, et al. Application of white-light phase-shifting in white-light scanning interferometry [C]// *Applications of Digital Image Processing XI*, 2017.
- [16] Larkin K G. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(4): 832-843.
- [17] Harasaki A, Schmit J, Wyant J C. Improved vertical-scanning interferometry [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(13): 2107-2115.
- [18] Moschetti G, Forbes A, Leach R K, et al. Phase and fringe order determination in wavelength scanning interferometry [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8997-9012.
- [19] 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.
- [20] Deng Q Y, Tang Y, Zhou Y, et al. High-resolution surface topography measurement based on frequency-domain analysis in white light interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0604001.  
邓钦元, 唐燕, 周毅, 等. 基于白光干涉频域分析的高精度表面形貌测量[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0604001.
- [21] Ghim Y S, Davies A. Complete fringe order determination in scanning white-light interferometry using a Fourier-based technique[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 1922-1928.
- [22] Debnath S K, Park Y. Real-time quantitative phase imaging with a spatial phase-shifting algorithm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4677-4679.
- [23] Shen M H, Hwang C H, Wang W C. Using higher steps phase-shifting algorithms and linear least-squares fitting in white-light scanning interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 66: 165-173.
- [24] Su X Y, Li J T. *Information optics*[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1995: 88-92.  
苏显渝, 李继陶. *信息光学*[M]. 成都: 四川大学出版社, 1995: 88-92.
- [25] Kino G S, Chim S S C. Mirau correlation microscope [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(26): 3775-3783.
- [26] Kim S W, Kim G H. Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(28): 5968-5973.