

## 激光与光电子学进展

## 基于 Fourier 频谱分析的白光干涉信号解算方法

杜海龙<sup>1\*</sup>, 段照斌<sup>1</sup>, 孙晓东<sup>2</sup><sup>1</sup>中国民航大学工程技术训练中心国家级实验教学示范中心, 天津 300300;<sup>2</sup>天津工业大学电气与电子工程学院, 天津 300387

**摘要** 采样噪声对白光干涉信号 Fourier 频谱的各个频率均有影响, 选用合适的滤波方法进行滤波将有助于提高白光干涉信号信噪比并获得更加准确的解算结果。构建了特定能量比例条件下的能量最集中约束条件, 并建立了选取带通滤波器的代价方程。实验给出了白光 LED 照明条件下代价方程的部分计算过程和结果, 代价方程取得最小值时表面粗糙度测量标准差仅为 0.02 nm。最后在所选参数条件下对银膜反射镜和台阶结构进行了测量, 结果表明所提方法具有较好的测量重复性和分辨率。

**关键词** 傅里叶光学; 白光干涉信号; Fourier 变换; 包络线; 代价函数

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0907001

## White Light Interference Signal Processing Method Based on Fourier Frequency Spectrum Analysis

Du Hailong<sup>1\*</sup>, Duan Zhaobin<sup>1</sup>, Sun Xiaodong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Engineering Techniques Training Center National Experimental Teaching Demonstrating Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

<sup>2</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China

**Abstract** Sampling noise affects each frequency of white light interference signal Fourier frequency spectrum. Selecting an appropriate filter method will help improve the signal-to-noise ratio of a white light interference signal and obtain highly accurate solution results. In this study, an energy concentration constraint under a certain energy ratio is constructed, and a cost function for selecting the bandpass filter is established. The part calculation process and results of the cost equation under white light LED illumination are given in the experiment. When the cost function reaches its minimum value, the standard deviation of surface roughness is only 0.02 nm. Finally, a silver mirror and a step structure are measured under the selected parameters. The results show that the proposed method has good performances with respect to repeatability and resolution.

**Key words** Fourier optics; white light interference signal; Fourier transform; envelope curve; cost function

**OCIS codes** 070.2025; 120.3180; 300.6300

## 1 引言

白光扫描干涉术是一种非接触的高精度光学

测量方法, 具有数百纳米的水平分辨率和低至十分之一纳米的垂直分辨率, 是微观表面形貌测量方法中重要的检测技术手段, 在光学、传感器、半导体、

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-09-21; 录用日期: 2020-09-30

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61605144)

\*E-mail: hldu@cauc.edu.cn

机械等领域均有应用<sup>[1-3]</sup>。

可根据相干峰定位方式将白光干涉信号解算方法分为两类,一类是白光干涉信号包络峰值检测方法,另一类是白光干涉信号条纹峰值检测方法<sup>[4-5]</sup>。条纹峰值位置受白光干涉信号的初始波前相位影响,而该相位信息中所包含的色散、扫描器运动控制误差、相机噪声和环境振动等因素造成的相位偏移是制约测量精度和稳定性的重要原因<sup>[6]</sup>,近年来对白光扫描干涉术的研究也主要集中在这些方面。Luo等<sup>[7]</sup>通过对光学系统中的色散进行分析,提出了一种具有较高解算精度的空间-频域分析方法,测量误差能够保持在4 nm以内。Chen等<sup>[8]</sup>设计了一种使用额外干涉仪测量扫描器位置的白光轮廓仪,该轮廓仪能够实时修正扫描器运动误差,从而降低扫描器位置误差对解算结果的影响。此外,Mun等<sup>[9]</sup>还考虑了扫描器运动过程中的残余振动问题,设计了运动控制信号输入整形器,使得测量系统能够快速精确采样。相比而言,包络峰位置虽受初始波前相位影响较小,一些文献也报道了使用包络峰完成表面形貌解算的方法<sup>[10-11]</sup>,但其系统性的理论分析难度较大,至今尚未有研究提出被广泛接受的包含噪声影响分析的包络峰理论模型。

本文提出了一种能够更加准确定位包络峰位置的方法,该方法通过选取逆变换频谱区间来提高包络曲线频域信号信噪比,从而降低了噪声对包络线的影响。从设备的实际采样能力出发,白光干涉信号的Fourier频谱分布区间应当在白光光源频谱和相机感光能力的范围内,但事实上通过Fourier变换得到的白光干涉信号频谱在各频点均分布有一定的信号强度。为降低噪声影响,提高结果解算精度,采用带通滤波器建立了一种频谱的选取和评价方法,通过实验确定了最佳的频谱信号区间,表面算术平均高度的测量标准差仅为0.02 nm。

## 2 白光干涉信号解算原理

### 2.1 基于Fourier变换的解算方法

图1是一种采用Mirau干涉物镜的白光轮廓仪成像原理图。光源发出的光束通过准直透镜后成为平行光,平行光进入分束器再经反射后进入Mirau干涉物镜,光束被干涉物镜的分光镜分为两束,两束光分别被干涉物镜内的反射镜和样品表面反射后返回并在分光镜表面位置产生干涉,所产生

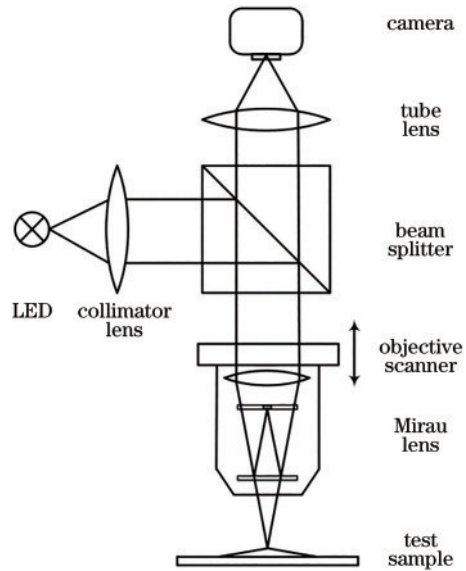


图1 白光轮廓仪成像原理图

Fig. 1 Schematic of white light interferometer imaging

的干涉信号通过光路传播并最终被相机捕获。白光轮廓仪采样时物镜扫描器带动物镜垂直运动,使得相机能够捕获不同焦平面高度时对应的白光干涉信号。

白光干涉信号可以通过对白光干涉信号的光源频谱进行积分的方式进行描述,表达式为

$$I(z, z_0) = \int_0^{+\infty} P(\sigma) \cos[4\pi(z - z_0)\sigma + \varphi] d\sigma, \quad (1)$$

式中: $z$ 为干涉物镜焦平面高度位置; $P$ 为干涉信号的光谱分布函数; $z_0$ 为被测样品位置高度; $\varphi$ 为白光干涉信号的相位偏置; $\sigma$ 为波数, $\sigma = 1/\lambda$ , $\lambda$ 为光源波长。图2是采用白光LED作为照明光源的白光干涉信号及其频谱分布形式。白光干涉信号可以看作一个被余弦载波调制的包络信号,该包络信号的峰值位置可视为零光程差点,从而得到的白光干涉信号表达形式为

$$I(z) = I_0 + g(z - h) \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda_0}(z - z_0) + \varphi\right], \quad (2)$$

式中: $I(z)$ 为物镜焦平面高度在 $z$ 处时的白光干涉信号强度; $I_0$ 为干涉信号平均强度; $g$ 为干涉信号包络函数; $\lambda_0$ 为光源等效波长。

事实上,受扫描器运动精度、环境振动、相机噪声、被测样品表面形貌特征等多种因素影响,白光干涉信号采样结果中不可避免地存在噪声。考虑噪声对采样结果带来的影响,可建立白光干涉信号采样形式,表达式为

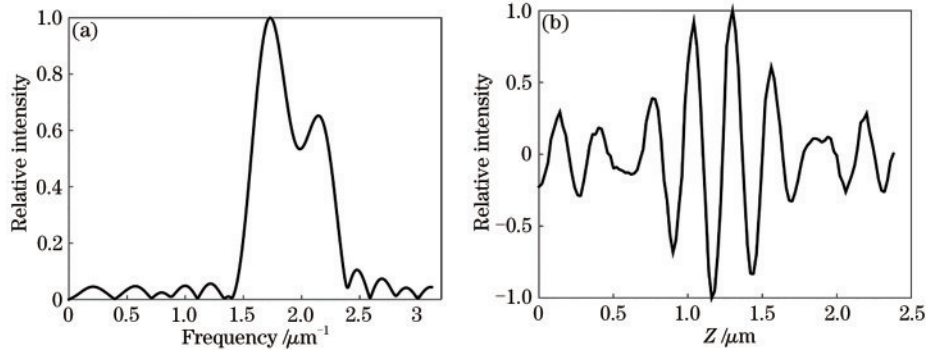


图 2 白光 LED 照明下的白光干涉信号。(a) 干涉信号频谱; (b) 白光干涉信号

Fig. 2 White light interference signal under illumination of white light LED. (a) Frequency-spectrum of interference signal; (b) white light interference signal

$$I(n) = I_0 + I_{cam,n} + g(z_n - h) \cos \left[ \frac{4\pi}{\lambda_0} (z_n - z_0) + \varphi \right], \quad (3)$$

式中:  $n$  为扫描过程中的采样序数;  $I(n)$  为第  $n$  次采样时从相机读到的白光干涉信号灰度值;  $I_{cam,n}$  为相机噪声和环境亮度变化带来的干涉信号灰度变化;  $z_n$  为第  $n$  次采样时焦平面的位置高度。受扫描器运

动精度和环境振动影响, 采样时焦平面的位置高度在设置值附近波动, 可记为  $z_n = z_{nom,n} + \delta z_n$ , 其中  $\delta z_n$  是采样位置与设置值间的偏差,  $z_{nom,n}$  是第  $n$  次采样时所设定的扫描器名义位置, 通常可描述为采样数与扫描步长的乘积。

对采样得到的白光干涉信号进行 Fourier 变换, 可得到其频域表达式:

$$\{\mathcal{F}[I(n)]\}(\sigma_m) = \mathcal{F}[I_{cam,n}](\sigma_m) + \frac{1}{2} G(4\pi\sigma_m - \frac{4\pi}{\lambda_0}) e^{-j[\sigma_m(4\pi z_0 + \tau_m) - \varphi]} + \frac{1}{2} G(4\pi\sigma_m + \frac{4\pi}{\lambda_0}) e^{-j[\sigma_m(4\pi z_0 + \tau_m) + \varphi]}, \quad (4)$$

式中:  $\mathcal{F}$  为 Fourier 变换运算符;  $m$  为白光干涉信号的频域信号序数;  $\sigma_m$  为频域序数  $m$  对应的波数;  $G$  为包络函数  $g$  经 Fourier 变换后的表现形式;  $\tau_m$  为采样位置与设置值间的偏差对波数为  $\sigma_m$  的频域信号造成的影响;  $\mathcal{F}[I_{cam,n}](\sigma_m)$  为相机噪声和环境亮度变化对波数为  $\sigma_m$  的频域信号产生的影响。但由于噪声的随机性,  $\tau_m$  和  $\mathcal{F}[I_{cam,n}](\sigma_m)$  均不可度量。

在实验中, 所采用的白光 LED 光源频谱分布在  $1.25 \sim 2.5 \mu\text{m}^{-1}$  的波数范围内, 所采用的单色光相机对波数为  $1 \sim 2.5 \mu\text{m}^{-1}$  的光产生的光电响应可忽略, 但从图 2(a) 可以看出, 白光干涉信号在任意波数均分布有一定强度的频谱信号, 其中处于光源频谱和相机感光能力范围外的干涉信号 Fourier 频谱主要由噪声产生。

对正频波数区间  $[\sigma_1, \sigma_2]$  内的白光干涉信号频谱进行 Fourier 逆变换并取模, 得到逆变换后的干涉信号包络函数, 表达式为

$$g_{inv}(z_{nom,n} - z_0) = \left| 2 \times \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}_{[\sigma_1, \sigma_2]} [I(n)] \right\} \right|, \quad (5)$$

式中:  $z_{nom,n}$  为第  $n$  次采样时所设定的扫描器名义位置;  $\mathcal{F}^{-1}$  为 Fourier 逆变换运算符。正频波数区间  $[\sigma_1, \sigma_2]$  是带通滤波器的通频带区间, 涵盖了白光干

涉信号频谱的主要能量分布范围。

图 3 为采样得到的白光干涉信号和使用不同频段信号所求得的信号包络。带十字标记线为白光干涉信号, 连续曲线为对干涉信号正频频谱进行 Fourier 逆变换得到的包络线, 双划线为对波数大于  $0 \mu\text{m}^{-1}$  小于  $3 \mu\text{m}^{-1}$  的干涉信号的频谱进行 Fourier 逆变换得到的包络线, 点虚线为对波数大于  $1 \mu\text{m}^{-1}$  的干涉信号的频谱进行 Fourier 逆变换得到的包络线, 点划线为对波数大于  $1 \mu\text{m}^{-1}$  小于  $3 \mu\text{m}^{-1}$  的干涉信号的频谱进行 Fourier 逆变换得到的包络线。显

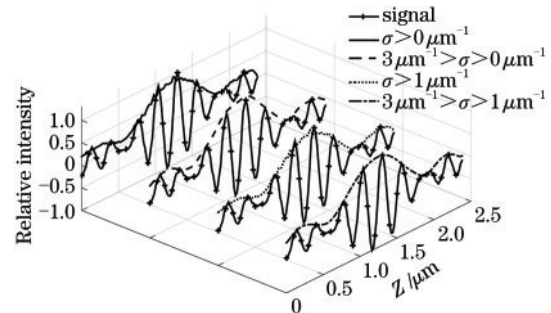


图 3 白光干涉信号及不同频段信号求得的包络曲线  
Fig. 3 White light interference signal and envelope curves of signals in different frequency bands

然, 逆变换频谱中包含低频信号, 使线型局部走势发生改变; 而逆变换频谱中包含高频信号, 使包络曲线不够光滑。因此选择合适的频谱区间进行逆变换将有助于减小干涉信号包络线噪声, 进而提高白光干涉信号解算精度。

## 2.2 频谱参数选取方法

正频波数区间 $[\sigma_1, \sigma_2]$ 的选取方法直接关系到被测表面三维形貌解算精度。以表面算术平均高度 $S_a$ 作为评价指标, 并结合能量最集中约束条件建立了代价函数方程, 给出了 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 的一种选取方法。

将白光干涉信号频谱的平方定义为信号的能量谱密度, 表达式为

$$S(\sigma) = \{\mathcal{F}(\sigma) [I(n)]\}^2. \quad (6)$$

记波数区间 $[a, b]$ 内的能量比例为 $w$ , 并定义为

$$w = \frac{\int_a^b S(\sigma) d\sigma}{\int_0^{+\infty} S(\sigma) d\sigma}. \quad (7)$$

则能量比例为 $w$ 时的能量最集中约束条件为: 当能量比例为 $w$ 时, 存在能量比例为 $w$ 的波数区间 $[\sigma_1, \sigma_2]$ , 对任意满足能量比例为 $w$ 的波数区间 $[a, b]$ , 均有 $\sigma_2 - \sigma_1 \leq b - a$ , 即波数区间 $[\sigma_1, \sigma_2]$ 为满足能量

比例为 $w$ 的最短波数区间。

使用试样表面同一位置区域多次测量结果的表面算术平均高度 $S_a$ 作为评价测量结果的参数, 建立以能量比例 $w$ 为变量的代价方程:

$$J(w) = \frac{1}{M} S_{a, \text{avg}}(w) \sum_k^M [S_{a, k}(w) - S_{a, \text{avg}}(w)]^2, \quad (8)$$

式中:  $M$ 为重复测量的次数;  $S_{a, k}(w)$ 为能量比例为 $w$ 时第 $k$ 次测量求得的表面算术平均高度;  $S_{a, \text{avg}}$ 为 $M$ 次测量求得的表面算术平均高度的平均值。方程求解过程满足能量最集中约束条件。为保证代价方程求解结果的有效性, 不同能量比例条件下的求解过程须采用相同的采样数据。

## 3 实 验

### 3.1 频谱参数选取实验

实验以金属膜平面反射镜作为测量对象, 采集了 10 组同一位置区域的扫描数据。采样过程中扫描步长为 20 nm, 扫描范围为 0~2.4  $\mu\text{m}$ , 测量区域大小为 87  $\mu\text{m} \times 87 \mu\text{m}$  (100 pixel  $\times$  100 pixel)。表 1 给出了一些能量比例下的参数计算结果, 其中 $S_{a, \text{avg}}$ 为 10 次测量求得的表面算术平均高度的均值,  $S_{a, \text{var}}$ 为 10 次测量求得的表面算术平均高度的方差。

表 1 几种能量比例下的实验数据

Table 1 Experimental data of several energy ratios

Energy ratio	Lower limit of wavenumber / $\mu\text{m}^{-1}$	Upper limit of wavenumber / $\mu\text{m}^{-1}$	$S_{a, \text{avg}} / \text{nm}$	$S_{a, \text{var}} / \text{nm}^2$	Cost function value
0.600	1.5951	1.9043	3.5598	0.0123	0.0439
0.704	1.5592	1.9987	3.0979	0.0114	0.0221
0.800	1.5885	2.1289	2.2792	0.0028	0.0063
0.904	1.5723	2.2168	1.8976	0.0005	0.0010
0.984	1.4681	2.3535	1.7200	0.0004	0.0007
0.992	0.9505	3.1348	2.6348	0.0128	0.0338
1	0	25	3.4832	0.0907	0.3161

图 4 更全面地描述了参数随能量比例的变化情况, 能量比例变化步长设置为 0.008。图 4(a) 中实线和虚线分别为 Fourier 逆变换时波数区间的上界和下界随能量比例的变化情况。图 4(b) 为表面算术平均高度 $S_a$ 的均值 $S_{a, \text{avg}}$ 和方差 $S_{a, \text{var}}$ 随能量比例的变化情况。受能量最集中条件约束, 在能量比例小于 0.984、各波数区间均处于可见光频谱范围内时, 表面测量结果的算术平均高度的均值和方差具有收敛趋势; 在能量比例大于 0.984 后, 波数区间快速扩大并超过可见光频谱范围, 表面测量结果的算术

平均高度的均值和方差随能量比例的增大而增大。图 5 给出了代价函数值随能量比例的变化曲线。当能量比例为 0.984 时, 代价函数取得最小值, 由表 1 数据可知, Fourier 逆变换过程中所使用的波数区间为 $[1.4681 \mu\text{m}^{-1}, 2.3535 \mu\text{m}^{-1}]$ , 采用该波数区间能够使表面粗糙度测量结果标准差降为 0.02 nm。需要指出的是, 在照明光源和仪器结构发生改变时, 干涉信号能量谱可能发生变化, 因此需要重新对各参数进行计算。

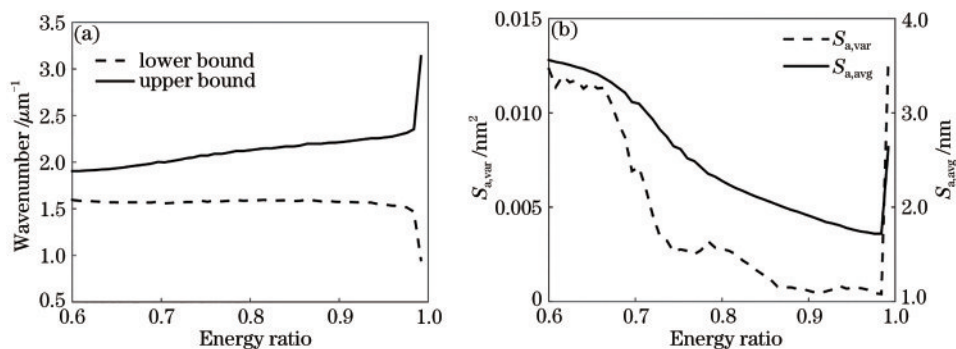


图 4 不同能量比例下频谱参数和粗糙度测量结果的变化曲线。(a)波数区间与能量比例的关系;(b)表面算术平均高度与能量比例的关系

Fig. 4 Frequency-spectrum parameters and surface roughness under different energy ratios. (a) Relationship between wavenumber interval and energy ratio; (b) relationship between surface arithmetic mean height and energy ratio

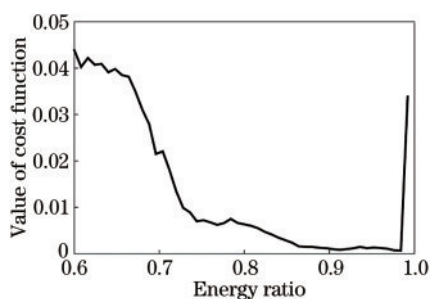


图 5 代价函数值和能量比例的关系

Fig. 5 Relationship between cost function value and energy ratio

### 3.2 测量实验

图 6 为银膜反射镜表面三维形貌测量结果。使用上述频谱参数区间对表面进行了两次连续测量,扫描步长为 20 nm。从图 6(a)和图 6(b)可以看出两次测量结果具有较高的一致性。图 6(c)为  $Y=174 \mu\text{m}$  处两次测量结果的轮廓线对比图,图 6(d)为  $Y=174 \mu\text{m}$  处轮廓线偏离两次测量结果平均值的偏差曲线,其最大偏差未超过 2 nm。将整个表面的两次测量结果中各像素点对应高度差的均值作为测量结果的平均误差,则两次测量结果的高度平均误差为 1.77 nm,

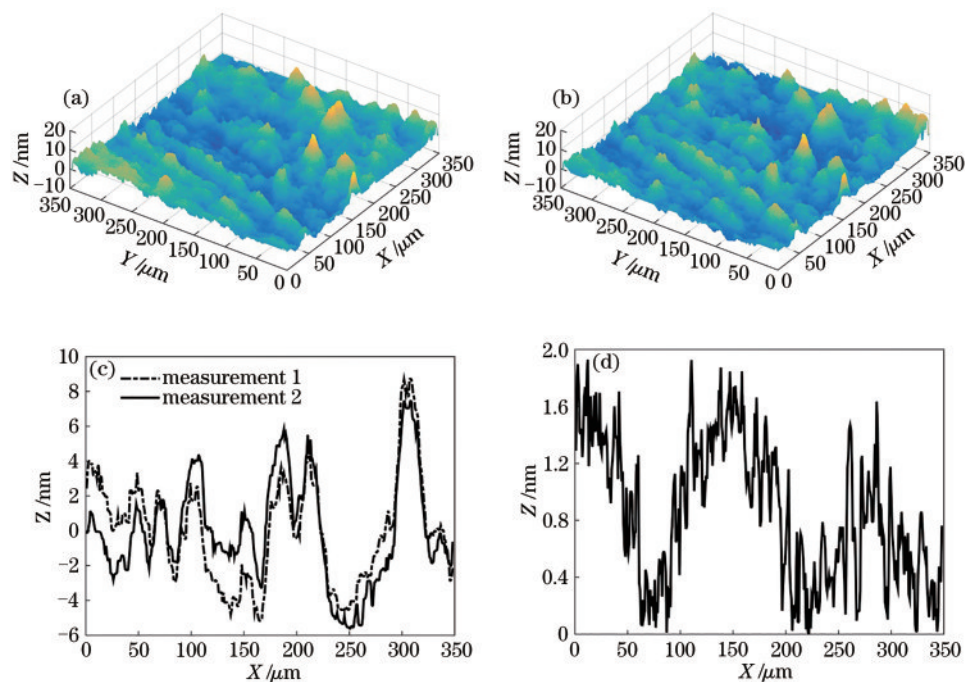


图 6 银膜反射镜表面测量结果。(a)(b)同一区域的两次测量结果;(c)  $Y=174 \mu\text{m}$  时,两次测量结果的轮廓线;(d)  $Y=174 \mu\text{m}$  时,轮廓线偏离两次测量结果平均值的误差曲线

Fig. 6 Surface measurement results of silver mirror. (a)(b) Twice repeated measurements of the same area; (c) profile of two measurements at  $Y=174 \mu\text{m}$ ; (d) deviation curve between the average value and the profile at  $Y=174 \mu\text{m}$

表明所提算法对平面结构具有较好的重复性测量能力。

此外还对表面镀铬的标准台阶结构进行了测量,其证书标称值为  $19.43\ \mu\text{m}$ 。图 7(a)给出了台阶结构的三维形貌测量结果,其高度测量值为  $19.361\ \mu\text{m}$ ,

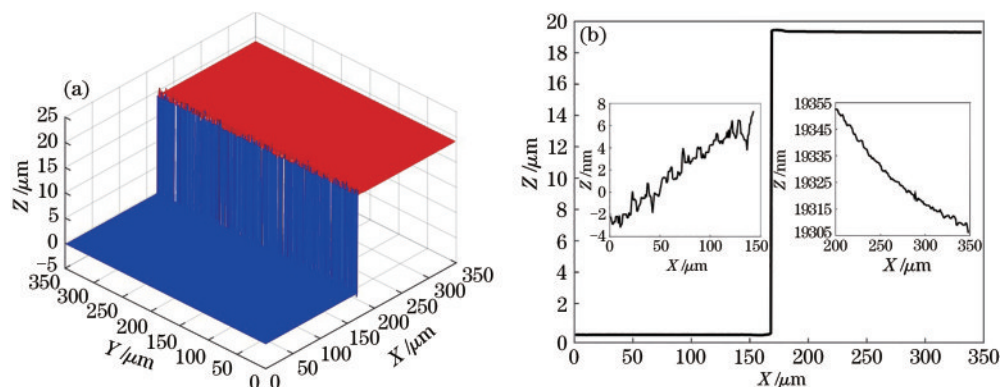


图 7 台阶结构测量结果。(a)台阶结构三维形貌测量结果;(b) $Y=174\ \mu\text{m}$ 处,台阶结构轮廓线

Fig. 7 Step structure measurement result. (a) Three-dimensional topography of step structure; (b) profile of step structure at  $Y=174\ \mu\text{m}$

## 4 结 论

选用带通滤波方法对白光干涉信号的 Fourier 频谱进行处理,能够有效提高信噪比,进而获得较高的解算精度。通过构建能量最集中约束条件,建立以能量比例为变量的代价方程,给出了选取最佳逆变换频谱区间的方法。该方法通过实验测试的方式完成频谱参数的选取,测试结果还证明,该方法能够有效降低表面粗糙度的测量重复性误差。最后,对银膜反射镜和标准台阶结构进行测量,结果表明所提算法在测量平面和台阶结构时均具有较高的重复性和分辨率水平。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Kassamakov I, Tureanu A, Heikkinen V, et al. Transfer standard for traceable dynamic calibration of stroboscopic scanning white light interferometer [J]. Applied Optics, 2017, 56(9): 2483-2488.
- [3] Zou Y B, Li Y N, Kaestner M, et al. Low-coherence interferometry based roughness measurement on turbine blade surfaces using wavelet analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 82: 113-121.
- [4] Park M, Kim S. Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning interferograms [J]. Optical Engineering, 2000, 39(4): 952-959.
- [5] de Groot P, de Colonna Lega X, Kramer J, et al. Determination of fringe order in white-light interference microscopy [J]. Applied Optics, 2002, 41(22): 4571-4578.
- [6] Lehmann P. Vertical scanning white-light interference microscopy on curved microstructures [J]. Optics Letters, 2010, 35(11): 1768-1770.
- [7] Luo S, Sasaki O, Chen Z, et al. Exact surface profile measurement without subtracting dispersion phase through Fourier transform in a white-light scanning interferometer [J]. Applied Optics, 2018, 57(4): 894-899.
- [8] Chen D, Schmit J, Novak M. Real-time scanner error correction in white light interferometry [J]. SPIE of Proceedings, 2014, 9276: 92760I.
- [9] Mun J I, Jo T, Kim T, et al. Residual vibration reduction of white-light scanning interferometry by input shaping [J]. Optics Express, 2015, 23(1): 464-470.
- [10] 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.
- [11] Harasaki A, Schmit J, Wyant J C. Improved vertical-scanning interferometry [J]. Applied Optics, 2000, 39(13): 2107-2115.