

基于白光干涉频域分析的高精度表面形貌测量

邓钦元^{1,2}, 唐燕^{1*}, 周毅^{1,2}, 杨勇¹, 胡松¹

¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了一种基于空间频域分析的白光干涉测量算法,该算法通过消除相位信息中的 2π 模糊来实现高精度的表面形貌测量。在频域分析中可以同时提取样品的相干形貌和相位形貌。相干形貌虽然不受 2π 模糊的影响,但是包含测量误差,精度较低。相位形貌虽然能够实现较高精度的表面形貌测量,但存在 2π 模糊问题。因此采用相干信息与相位信息相结合的方式消除相位信息中的 2π 模糊。此外,针对由背景噪声和光源扰动所引起的局部相位突变,提出了相邻像素点差分分析方法,有效消除了局部相位突变,从而提高了测量的稳定性。该方法不需要复杂的计算,工作效率较高。分别从理论和实验两个方面进行分析,以验证提出方法的有效性。

关键词 测量;空间频域;白光干涉; 2π 模糊;相干信息;相位突变

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0604001

High-Resolution Surface Topography Measurement Based on Frequency-Domain Analysis in White Light Interferometry

Deng Qinyuan^{1,2}, Tang Yan¹, Zhou Yi^{1,2}, Yang Yong¹, Hu Song¹

¹State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A white-light interference algorithm based on spatial frequency-domain analysis is described, which permits a high-resolution surface measurement by removing 2π ambiguity contained in phase information. In the frequency domain analysis, we can extract the coherence and phase profiles simultaneously, where the coherence profile is free of 2π ambiguity but contains the measurement errors caused by background noises, while the phase profile is precisely the opposite. By combining the coherence and phase information, we remove the 2π ambiguity contained in phase information successfully. In addition, a differential analysis method between adjacent pixels is adopted to deal with the local 2π phase-jump errors, which are caused by the background noises and the light source fluctuations. This technique is highly efficient since it does not require enormous computation. Both theories and experiments are elaborated in detail to verify the validity and stability of this method.

Key words measurement; spatial frequency domain; white-light interference; 2π ambiguity; coherence information; phase jump

OCIS codes 120.3180; 070.2615; 180.3170; 030.1640

1 引言

干涉测量具有非接触性、高效率、高精度等优

点,被广泛应用于光学元件面型测量^[1]、微弱目标探测^[2]、微小位移测量^[3]等领域。传统的相移干涉算法^[4-6]虽然能够达到亚纳米级精度,但其有效测量范

收稿日期: 2017-11-22; 收到修改稿日期: 2017-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(61675206,61605212,61604154)

作者简介: 邓钦元(1990—),男,博士研究生,主要从事微纳结构光刻加工及其形貌测量方面的研究。

E-mail: dqy_storm@163.com

导师简介: 胡松(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事微电子装备方面的研究。E-mail: husong@ioe.ac.cn

*通信联系人。E-mail: ty0513@163.com

围不能超过波长的 $1/4$, 因此应用领域受限。相比较而言, 白光干涉测量由于其相干长度较短, 测量范围通常可以达到数百微米。将白光干涉与相移算法相结合可以同时满足大量程和高精度的测量需求, 是一种非常有应用前景的微纳结构检测手段^[7-12]。

目前, 白光干涉形貌测量算法主要分为两大类: 基于干涉光强信号分析的时域调制度算法^[13-16]和基于频谱相位分析的空间频域算法^[17-20]。其中, 时域调制度算法是通过提取干涉信号的包络曲线来寻找光强极大值点(即零光程差点), 进而确定零级干涉条纹位置并进行表面形貌恢复。然而, 光强调制度的计算面临许多挑战, 如计算量大、易受背景噪声干扰以及对采样间距要求较高等, 这些都会对测量效率以及精度造成不良影响。空间频域算法由 de Groot 等^[21]提出并成功应用于白光干涉测量。该方法通过分析干涉信号的频谱相位信息来恢复被测结构的表面形貌。与时域调制度算法相比, 空间频域算法不仅计算效率高, 而且只需要合适的采样即可获得可靠的频谱成分, 同时对背景噪声也有一定的抑制作用。在实际空间频域分析中, 利用离散傅里叶变换提取到的实际相位只能介于 $\pm\pi$ 范围内, 其与理论相位之间必然会存在整数级次的 2π 误差, 也就是所谓的 2π 相位模糊问题^[22-24]。此外, 由于背景噪声、光源扰动以及其他外界干扰因素的影响, 在消除 2π 模糊的过程中还可能引入局部 2π 相位突变, 这些都会对最终测量结果产生不利影响。王军等^[25]曾采用白光干涉空间频域算法对压电陶瓷的微小位移进行了高精度测量。谢元安等^[26]也曾利用空间频域分析来消除中心波长相位中的 2π 模糊, 从而实现零光程差的精准定位。虽然上述方法最终都实现了准确测量, 但是只适用于一些相对比较理想的采样情况, 并未考虑外界干扰或者背景噪声可能引起的局部 2π 相位突变。de Groot 等^[27]虽然提出了频域相位差分析的方法来解决 2π 模糊问题, 但是该方法涉及复杂的拟合计算, 并且也未考虑背景噪声可能引起的局部相位突变。

为了实现高效、稳定的 2π 模糊消除, 本文提出了一种基于空间频域分析的白光干涉测量算法, 通过相干信息与相位信息相结合的方式消除相位信息中的 2π 模糊。同时, 针对测量过程中出现的局部相位突变现象, 提出了相邻像素点差分分析方法, 通过分析正常像素点与异常点之间的相位变化, 消除由背景噪声及其他外界干扰因素造成的局部相位突变。分别从理论仿真和实验两方面进行分析, 以验

证所提方法的有效性和稳定性。

2 基本原理

2.1 频域分析

在白光干涉测量中, CCD 采集到的光强信号通常包含背景光强与干涉光强两部分, 可以表示为

$$I(h, \zeta) = I_{DC} + I_{AC} \exp[-(h - \zeta)^2 / L_c^2] \cdot \cos[2k_0(h - \zeta) + \phi_A], \quad (1)$$

式中: I_{DC} 为背景光强; I_{AC} 为与干涉条纹强度有关的系数; h 表示待测样品的表面形貌高度; ζ 为样品相对于干涉计的位置; L_c 表示光源的相干长度; k_0 为对应于中心波长的波数, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为中心波长; ϕ_A 为干涉信号的相干包络中心与零级干涉条纹中心之间的相位偏移, 该偏移主要由背景噪声以及表面反射效应引起。在空间频域分析中, 对(1)式进行傅里叶变换可以提取干涉信号的频谱相位信息, 该相位与波数呈线性关系, 可以表示为

$$\theta = 2kh + (k - k_0)\tau + \gamma, \quad (2)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$, 为波长 λ 对应的波数; 参数 τ 为背景噪声引起的离散误差; γ 为样品表面反射现象引起的相位偏移。在(2)式中, θ 仅代表理论上的初始相位, 在实际的离散傅里叶变换中, 提取的相位 θ' 只能介于 $\pm\pi$ 范围内, 两者之间存在整数级次的 2π 模糊误差, 可以表示为

$$\theta = \theta' + 2\pi m, \quad (3)$$

式中参数 m 代表了实际相位与理论相位之间的 2π 误差级次, m 为整数。

根据(2)式, 可以通过两种方式来评估被测物体的表面形貌。一种是微分法, 表示为

$$h_c = \frac{1}{2} \frac{d\theta'}{dk} \Big| = h + \frac{\tau}{2}, \quad (4)$$

式中 h_c 代表干涉信号的相干包络中心位置, 因此由 h_c 恢复所得的表面形貌称之为相干形貌。值得注意的是, 虽然初始相位 θ' 含有 2π 相位模糊误差, 但是 h_c 却不受影响, 只是包含了一个误差因子 τ , 因此相干形貌不能提供精确的面型。为了消除误差 τ 对测量结果的影响, 另一种方法是通过线性插值提取中心波数的相位来恢复表面形貌。根据(2)式和(3)式, 可得

$$h_p = \theta_0 / (2k_0) = (\theta'_0 + 2\pi m) / (2k_0) = h + \gamma / (2k_0), \quad (5)$$

式中: h_p 为通过中心波数相位计算得到的表面形貌高度, 称之为相位形貌; θ_0 和 θ'_0 分别为理论和实际中心波数相位。只要移除 2π 模糊误差以及反射相

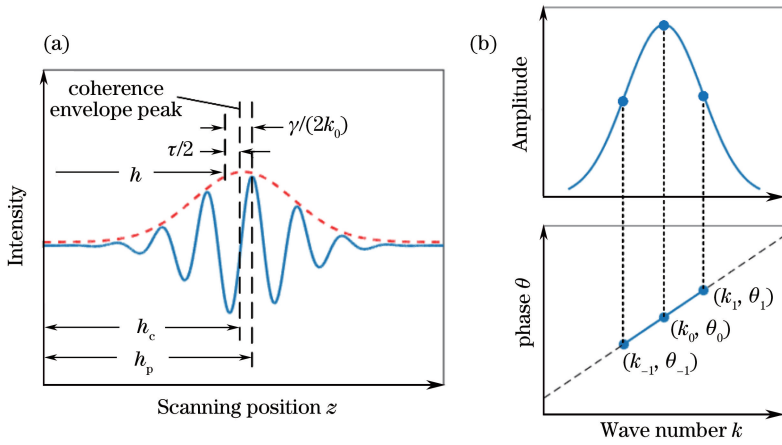


图 1 (a)白光干涉时域光强以及各参数示意;(b)频域空间中相位与波数之间的线性关系

Fig. 1 (a) Time-domain intensity of white-light interference pattern and the meaning of the parameters; (b) linear relationship between the phase and the wave number in frequency domain

位 γ , 即可获得不含误差因子 τ 的高精度测量结果。图 1 所示为白光干涉时域光强信号中各个参数的意义以及频域相位与波数间的线性关系。

考虑到相干形貌 h_c 不受 2π 模糊影响, 可以以其为参考来消除相位 θ'_0 中的 2π 模糊。结合(4)式和(5)式可得

$$m = \text{Round} \left[\frac{1}{2\pi} (2k_0 h_c - \theta'_0 + \gamma - k_0 \tau) \right], \quad (6)$$

式中函数 Round 表示对计算结果取整。由于参数

γ 和 τ 未知, 所以很难直接根据(6)式来计算 m 。可以先假设 $\gamma = \tau = 0$, 只要 γ 与 τ 满足

$$|\gamma - k_0 \tau| < \pi, \quad (7)$$

则可正确计算得到 m 。

2.2 仿真分析

为了验证上述方法的有效性, 在高斯噪声环境下进行相关仿真测试, 结果如图 2 所示。其中, 图 2(a)为待测样品形貌, 图 2(b)为通过(4)式得到的相干形貌, 图 2(c)为通过(5)式得到的相位形貌。

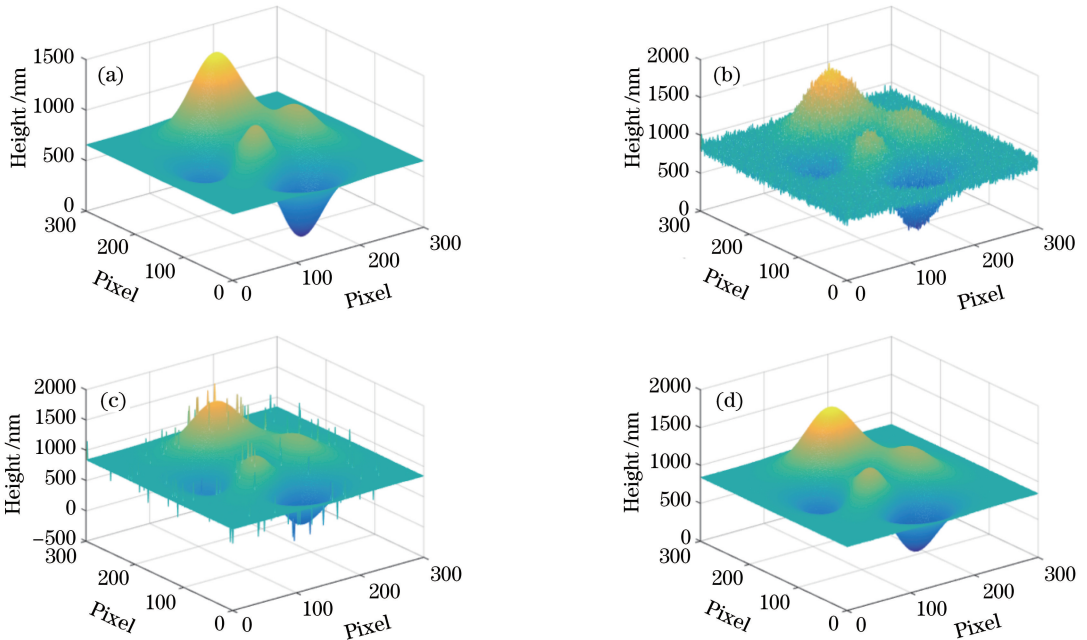


图 2 仿真结果。(a)待测样品形貌;(b)含有误差 τ 的相干形貌;(c)含有局部 2π 相位突变的相位形貌;(d)不含 2π 模糊的最终形貌

Fig. 2 Simulation results. (a) Surface profile of the sample to be measured; (b) coherence surface profile with error τ ; (c) phase surface profile with local 2π phase jump; (d) final surface profile without any 2π ambiguity

可以看出,由于误差因子 τ 的影响,图 2(b)中的相干形貌表面比较粗糙,精度较低。图 2(c)中的相位形貌因为初步消除了 2π 模糊和误差因子 τ ,精度有了明显提高,但图 2(c)中的 2π 模糊并没有完全消除,在局部区域仍然存在许多由相位突变引起的毛刺。这主要是 2π 级次误差 m 计算错误导致。根据之前所述,计算 m 时假设 $\gamma = \tau = 0$,并且满足条件 $|\gamma - k_0\tau| < \pi$ 时才能得到正确的计算结果。然而,由于背景噪声以及外界干扰的影响,在局部的一些点可能存在误差 τ 很大的情况,从而使得(7)式中的条件并不成立,最终导致了局部相位突变。尤其是在表面形貌比较复杂的区域,例如台阶边缘或者粗糙度较大处,这种现象十分明显。

为了解决这一问题,本文提出了相邻像素点差分分析方法。以单行元素为例,首先提取相邻像素点的高度差值并确定相邻像素点之间的 2π 相位突变,依据的公式为

$$p(j) = \text{Round}[\Delta h_p(j) \cdot 2k_0 / (2\pi)], \quad j = 1, 2, \dots, N - 1, \quad (8)$$

式中: $p(j)$ 为前后两个相邻像素点之间的 2π 突变级数, j 表示当前像素点的位置; N 为该行元素的总长度; $\Delta h_p(j)$ 为相邻像素点之间的高度差。通过(8)式可以确定每一行元素中发生相位突变的点,如图 3(a)和 3(b)所示。针对发生了相位突变的区域,

采用如下公式来确定每个点的 2π 误差级次:

$$n(i) = \begin{cases} \sum_{j=n_1}^i p(j), & \text{for } \sum_{j=n_1}^{n_2} p(j) = 0, \\ 0, & \text{for } \sum_{j=n_1}^{n_2} p(j) \neq 0, \end{cases} \quad (9)$$

$$i = n_1, \dots, n_2,$$

式中: $n(i)$ 为第 i 点的 2π 误差级次; n_1 和 n_2 分别为发生相位突变区域的起点和终点位置。(9)式中第一项主要考虑连续面型情形下出现的局部 2π 相位突变;第二项主要考虑台阶高度超过等效波长的情形,此时不对 2π 突变作过多处理,以免影响台阶特征。通过(9)式可以修正带有 2π 相位突变的像素点,同时正常的像素点不会有任何改变。

$$\phi_0(i) = \phi_0(i) - 2\pi n(i), \quad i = n_1, \dots, n_2. \quad (10)$$

接下来只要消除由反射引起的相位偏移 γ ,就能得到真正的表面形貌:

$$h = (\phi_0 - \bar{\gamma}) / (2k_0). \quad (11)$$

此处采用平均反射相位 $\bar{\gamma}$ 代替实际反射相位 γ ,从而简化分析过程。图 2(d)和图 3(c)为消除局部相位突变后的最终表面形貌,由此证明了相邻像素点差分分析方法的有效性。

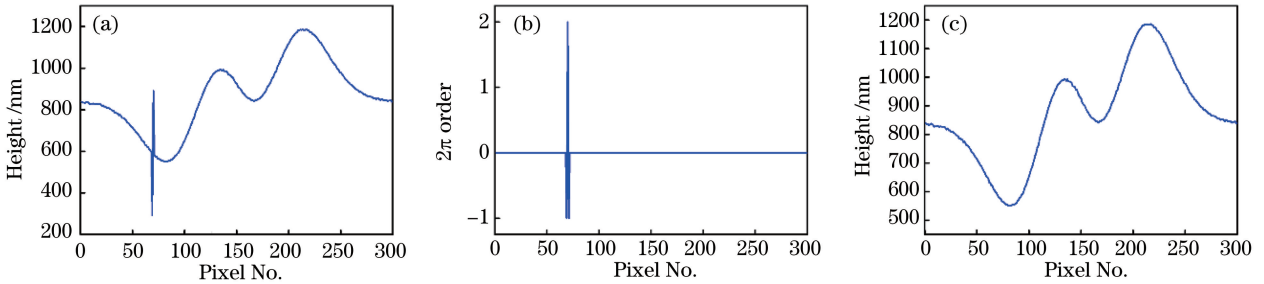


图 3 局部 2π 相位突变消除。(a)带有 2π 突变的截面轮廓;(b)相邻像素点间的 2π 跳变级数;
(c)消除局部相位突变后的最终轮廓

Fig. 3 Elimination of local 2π phase jump. (a) Cross-sectional profile with 2π phase jump; (b) 2π phase-jump order between adjacent pixels; (c) final profile after removing local phase jump

3 实验结果

图 4 为基于 Mirau 干涉物镜的实验装置示意图。装置中采用中心波长为 600 nm 的 LED 灯作为白光光源。待测样品在垂直方向上的扫描运动由一个压电陶瓷驱动器(PZT)来控制,扫描步距设定为 50 nm。用 CCD 相机采集样品在每一个采样步距处产生的干涉图像。利用该实验装置分别对微球

面结构和带有台阶的光栅结构进行实验测试,结果如图 5 和图 6 所示。其中,图 5(a)和图 6(a)是利用(4)式得到的相干形貌,可以看出,由于背景噪声带来的误差,表面形貌非常粗糙。图 5(b)和图 6(b)是根据(6)式消除了 2π 模糊误差 m 后所得的相位形貌,虽然表面精度有所提高,但是仍然存在局部 2π 相位突变,尤其是对于光栅结构,在台阶变化的地方表现得十分明显。图 5(c)和图 6(c)是根据(9)式和

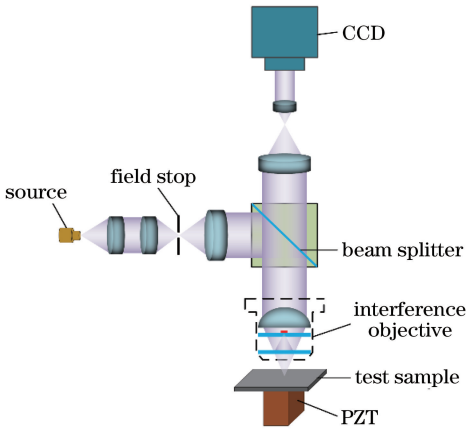


图 4 基于 Mirau 干涉物镜的实验装置示意图
Fig. 4 Experimental setup with a Mirau interference objective

(10)式消除局部相位突变后得到的最终形貌,可以看出,测量结果已经不受 2π 模糊的影响,而且精度也有了极大提升。在图 6(c)中,点(523,300)处有一个明显的凸起缺陷,该缺陷的凸起高度约为 24 nm,这在粗糙的图 6(a)和带有局部相位突变的图 6(b)中很难识别。从实验结果来看,表面形貌的测量结果与仿真测试结果十分吻合,证明了本文所提方法的有效性。

4 分析与讨论

为了评估表面形貌测试结果,首先提取微球面结构的截面曲线,如图 7 所示。从图中可以看出,由相位形貌所得到的截面曲线明显优于由相干形貌所得到的截面曲线。为此,分别计算两种曲线的均方根(RMS)粗糙度:

$$R_q = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [h(i) - h_{fit}(i)]^2 \right\}^{1/2}, \quad (12)$$

式中 h_{fit} 是根据测量结果进行多项式拟合后所得的拟合曲线。根据(12)式计算得到微球面结构的相干形貌与相位形貌的均方根粗糙度 R_q 的值分别为 23.66 nm 和 1.75 nm。可以看出,两种形貌的均方根粗糙度相差一个数量级,说明利用中心波数相位信息得到的表面形貌具备更高的精度。随后,利用台阶仪对光栅结构的台阶高度进行测试,结果如图 8 所示。本文方法的测量结果为 115.54 nm [图 8(a)],利用台阶仪测量的结果为 128.02 nm [图 8(b)]。两种测量方法之间的差值为 12.48 nm。主要原因是计算过程中为了简便对反射现象引起的相位偏差 γ 取均值,造成了一定的实验误差。尽管测量结果与真实结果之间存在差值,但是与通过相

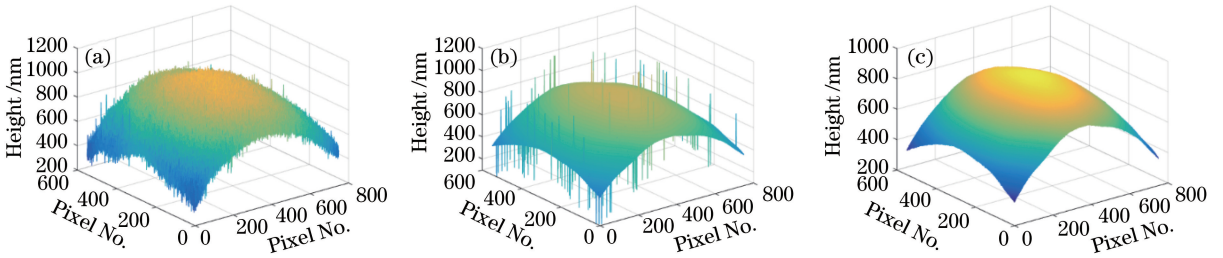


图 5 微球面结构表面形貌测量结果。(a)相干形貌;(b)带有局部 2π 相位突变的相位形貌;(c)不含相位模糊的最终形貌
Fig. 5 Surface profile measurement results of micro-spherical structure. (a) Coherence surface profile; (b) phase surface profile with local 2π phase jump; (c) final surface profile without phase ambiguity

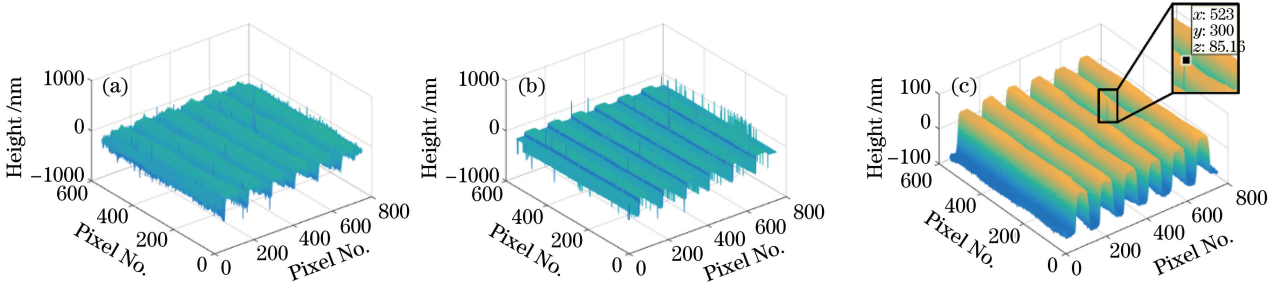


图 6 光栅结构表面形貌测量结果。(a)相干形貌;(b)带有局部 2π 相位突变的相位形貌;(c)不含相位模糊的最终形貌
Fig. 6 Surface profile measurement results of grating structure. (a) Coherence surface profile; (b) phase surface profile with local 2π phase jump; (c) final surface profile without phase ambiguity

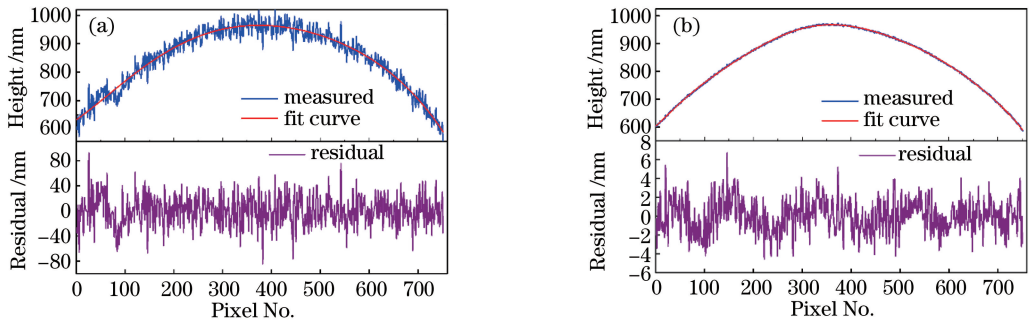


图 7 微球面结构的截面图。(a)相干形貌截面图及其残差曲线;(b)消除 2π 模糊后的相位形貌截面图及其残差曲线
Fig. 7 Cross-sectional profile of micro-spherical structure. (a) Cross-sectional profile of the coherence surface and the residual curve; (b) cross-sectional profile of the phase surface and the residual curve after removing 2π phase ambiguity

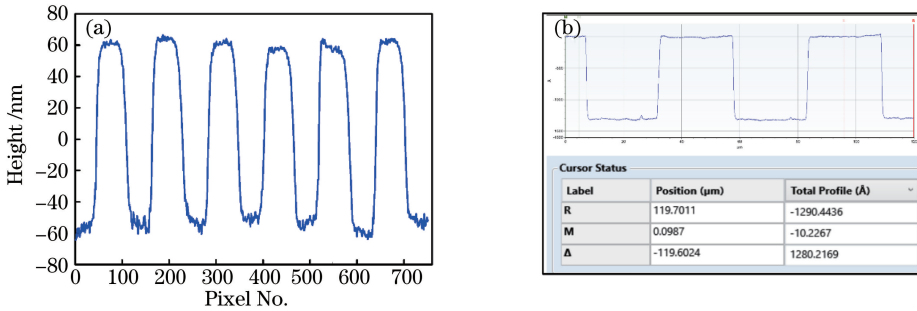


图 8 光栅结构截面图。(a)白光干涉测量结果;(b)台阶仪测量结果($1 \text{ \AA}=0.1 \text{ nm}$)
Fig. 8 Cross-sectional profile of grating structure. (a) Measurement result by white light interferometry;
(b) step height measured by the stylus profiler ($1 \text{ \AA}=0.1 \text{ nm}$)

干信息所得的表面形貌相比,利用相位信息确实能够获得更高的测量精度,尤其是在台阶边缘处,相位信息能够提供更加清晰准确的边缘形貌特征。

5 结 论

提出了一种高效、稳定的白光干涉空间频域分析算法,通过相干信息与相位信息相结合的方式,成功消除了相位信息中普遍存在的 2π 相位模糊,并实现了表面形貌的高精度测量。此外,针对形貌恢复过程中出现的局部 2π 相位突变现象,提出了相邻像素点差分分析方法,有效抑制了由背景噪声、外界干扰以及复杂表面反射引起的局部相位突变,提升了算法的稳定性和有效性。根据实验结果,通过中心波数相位信息恢复的形貌其均方根粗糙度不超过 2 nm 。后续工作将分析表面反射现象对测量精度的影响,从而进一步提升测量精度。

参 考 文 献

[1] Shi T, Zang Z M, Liu D, *et al.* Retrace error correction for non-null testing of optical aspheric surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36 (8):

0812006.

师途, 臧仲明, 刘东, 等. 光学非球面形非零位检测的回程误差校正 [J]. *光学学报*, 2016, 36 (8): 0812006.

[2] 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.

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.

[3] Gao J L, Zong M C. Development of symmetrical double-grating interferometric displacement measuring system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904003.

高金磊, 宗明成. 一种对称式双光栅干涉位移测量系统的研制 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0904003.

[4] Servin M, Estrada J C, Quiroga J A, *et al.* Noise in phase shifting interferometry [J]. *Optics Express*, 2009, 17(11): 8789-8794.

[5] Gao P, Yao B, Lindlein N, *et al.* Phase-shift extraction for generalized phase-shifting interferometry [J]. *Optics Letters*, 2009, 34 (22): 3553-3555.

- [6] Villalobos-Mendoza B, Granados-Agustín F S, Aguirre-Aguirre D, *et al.* Phase shifting interferometry using a spatial light modulator to measure optical thin films[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(26): 7997-8003.
- [7] Lehmann P. Systematic effects in coherence peak and phase evaluation of signals obtained with a vertical scanning white-light Mirau interferometer[C]. *SPIE*, 2006, 6188: 618811.
- [8] 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.
- [9] Pavlíček P, Hýbl O. White-light interferometry on rough surfaces: measurement uncertainty caused by noise[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(4): 465-473.
- [10] Wang Z, Jiang Y. Wavenumber scanning-based Fourier transform white-light interferometry [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5512-5516.
- [11] Zhang H X, Zhang Y M, Jing W C, *et al.* Mirau phase-shifting interferometer for microsurface topography measurement [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2005, 38(5): 377-380.
张红霞, 张以谟, 井文才, 等. 检测微表面形貌的 Mirau 相移干涉轮廓仪[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2005, 38(5): 377-380.
- [12] Kumar U P, Wang H, Mohan N K, *et al.* White light interferometry for surface profiling with a colour CCD[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2012, 50(8): 1084-1088.
- [13] Harasaki A, Schmit J, Wyant J C. Improved vertical-scanning interferometry[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(13): 2107-2115.
- [14] Li Q D, Lu R S. The algorithms for white-light scanning interferometry[J]. *China Instrumentation*, 2008(4): 78-81.
李其德, 卢荣胜. 白光扫描干涉测量算法[J]. *中国仪器仪表*, 2008(4): 78-81.
- [15] 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.
- [16] Zhou Y, Tang Y, Deng Q, *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.
- [17] 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.
- [18] Kim J, Jo T, Kim N, *et al.* Measurement of 3D printed structure using a peak detection method in dispersive interferometry [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(3): 792-796.
- [19] Gao F, Muhamedsalih H, Jiang X. Surface and thickness measurement of a transparent film using wavelength scanning interferometry [J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21450-21456.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Kim S, Kim J, Pak H. Fringe-order determination method in white-light phase-shifting interferometry for the compensation of the phase delay and the suppression of excessive phase unwrapping [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(5): 415-422.
- [23] Debnath S K, Park Y. Real-time quantitative phase imaging with a spatial phase-shifting algorithm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4677-4679.
- [24] Bhaduri B, Popescu G. Derivative method for phase retrieval in off-axis quantitative phase imaging [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1868-1870.
- [25] Wang J, Chen L. Measurement of micro-displacement using white-light interference based on a spatial frequency domain algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 874-877.
王军, 陈磊. 基于空间频域算法的白光干涉微位移测量法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 874-877.
- [26] Xie Y A, Han Z G. Study of spatial frequency domain analysis method based on white light interferometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(7): 81-85.
谢元安, 韩志刚. 基于白光干涉的空间频域算法研究 [J]. *光电工程*, 2011, 38(7): 81-85.
- [27] de Groot P, Colonna D L X, Kramer J, *et al.* Determination of fringe order in white-light interference microscopy [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4571-4578.