

# 快速稳定的白光干涉测量法

董一帆, 万新军, 孟 涵, 解树平

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

**摘要** 为了减少白光干涉法的采样数据和计算成本,提高测量速度,提出了一种快速稳定的白光干涉测量方法。根据白光干涉显微镜模型,对光学干涉法的数学模型进行了推导分析,确定了干涉光强函数与包络函数之间的关系。在此基础上,提出利用加大采样间隔的离散采样点的希尔伯特变换函数提取干涉信号包络算法,并基于采样原理分析确定了符合算法的采样间隔条件。通过仿真实验对该算法的有效性进行了验证。实际样品的白光干涉光强信号存在直流(DC)偏置噪声,影响快速白光干涉测量法的稳定性,因此采用中值滤波法消除背景噪声,分析滤波后干涉光强包络的质量。通过白光干涉显微镜装置进行了实际样品白光干涉图像采集,并对不同倍率采样间隔重构的三维表面形貌图进行比较。结果表明,该快速算法重构三维形貌的速度相比传统方法提高了20倍,同时增强了稳定性。

**关键词** 测量;白光干涉法;三维表面形貌;希尔伯特变换;采样间隔;噪声滤波

**中图分类号** TH744 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.051203

## Fast and Stable White Light Interferometry

Dong Yifan, Wan Xinjun, Meng Han, Xie Shuping

*School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science  
and Technology, Shanghai 200093, China*

**Abstract** To reduce the sampling data and the computational cost of white light interferometry, and improve the measurement speed, fast and stable white light interferometry is proposed. The mathematical model of light interferometry is deduced from the white light interference microscope model, and the relationship between light interference intensity function and envelop function is confirmed. On the basis of these studies, the envelope algorithm of Hilbert transform function extracting interference signal is proposed by increasing the sampling interval of discrete sampling point. And the sampling interval that satisfies the condition of the proposed algorithm is analyzed and determined based on the sampling principle. The algorithm effectiveness is then verified by a simulation test. The white light interference intensity signal of the sample has the direct current (DC) bias noise, which affects the stability of the fast white light interference measurement method. Therefore, median filtering method is used to eliminate background noise. And the quality of the filtered light intensity envelope is analyzed. The white light interference images of the sample are collected by a white light interference microscope, and the three-dimensional surface topographies reconstructed with different sampling intervals are compared. The results show that the envelope algorithm can improve the speed of three-dimensional reconstruction by 20 times compared with the traditional method. Meanwhile, the stability is improved as well.

**Key words** measurement; white light interferometry; three-dimensional surface topography; Hilbert transform; sampling interval; noise filter

**OCIS codes** 120.3180; 120.6650; 110.3010; 110.0180

**收稿日期:** 2016-12-09; **收到修改稿日期:** 2017-01-11

**基金项目:** 国家重大科研仪器专项(2012YQ170004)

**作者简介:** 董一帆(1993—),女,硕士研究生,主要从事光学精密测量方面的研究。E-mail: dyf618@163.com

**导师简介:** 万新军(1981—),男,博士,讲师,主要从事干涉测量、光学设计、立体视觉、光学精密测量等方面的研究。

E-mail: xinjun.wan@usst.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

白光扫描干涉法是一种精密测量物体表面轮廓的技术,可应用于如半导体、液晶显示器、薄膜、精密机械零件等领域。与基于单色光干涉模型测量方法相比,白光干涉法克服了台阶高度测量受限的缺点,能够对非连续结构粗糙表面形貌进行测量;但是白光干涉法在测量精度上还达不到单色光干涉测量法的水平,而且采样数据多,测量速度较慢。到目前为止,针对白光干涉法人们已经提出了多种算法,包括重心法、白光相移算法、空间频域算法以及基于采样定理的平方包络函数估计(SEST)算法等十几种<sup>[1-3]</sup>。重心法是一种简单、快速、抗噪声能力强的白光干涉处理算法,计算方法简单,即使采用大的扫描步长也可以高准确度测量各种粗糙度的表面,但这种方法对噪声比较敏感,而且需要大扫描深度。Larkin等<sup>[4]</sup>将相移算法应用到白光干涉测量中,如3步、4步、5步、7步算法都已在白光干涉法中广泛应用。白光相移算法适用于测量粗糙度在微米或亚微米量级的表面,或者测量具有阶梯结构的微小物体轮廓。空间频域算法可以测量光滑和超光滑的表面,与扫描步长的关系不大,选用此方法作为处理算法要尽量减小环境噪声。传统方法往往需要很窄的图像采样间隔以达到良好的包络计算精度,这一要求的结果是需要大量的采样数据和高计算成本,并且测量速度慢<sup>[5-6]</sup>。为减少采样数据量,在白光干涉测量领域不断有新的算法出现,以提高测量的精度和速度。Hirabayashi等<sup>[7]</sup>提出了SEST算法,通过采样数据直接重建平方包络函数,其采样间隔可以达到传统算法的6~14倍。但是,SEST算法的测量精度相对较低。为了提高SEST算法的测量精度,Hirabayashi等<sup>[8]</sup>又对其进行了修正,使SEST算法可以通过减小采样间隔来提高测量精度,但缺乏稳定性。

本文提出一种快速稳定的白光干涉测量算法,该算法仅需要少量的采样数据和较低的计算成本。当使用具有600 nm中心波长和100 nm带宽的宽带光源时,采样间隔可以达到常规方法的数十倍。通过仿真和实验数据验证了该方法在提高算法稳定性的同时可以极大地提高测量速度。

## 2 白光干涉理论模型

根据白光干涉测量模型,对于波数为 $k$ 的单色光的干涉条纹光强 $I$ 可以表示为:

$$\begin{cases} I = I_S + I_R + 2\sqrt{I_S I_R} \cos \Phi \\ \Phi = 2k(Z - Z_0) + (\varphi_R - \varphi_S) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $I_S$ 、 $I_R$ 分别为物面和反射镜的反射光强, $\Phi$ 为干涉相位, $\varphi_S$ 、 $\varphi_R$ 分别为物面和反射镜的反射光相位<sup>[9-10]</sup>。物体表面位置为 $Z$ ,参考反射镜位置为 $Z_0$ ,则光程差为 $\Delta L = 2(Z - Z_0)$ 。

白光干涉信号是各波数 $k$ 干涉光强信号的叠加,假设零光程差位置 $Z_0 = 0$ ,干涉光强函数可以表示为

$$g(Z) = \frac{G_0}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\lambda_b^2 Z^2}{2\lambda_c^4}\right) \cos(k_c Z), \quad (2)$$

式中 $G_0$ 为光强频谱幅值,对光强进行无量纲化,令 $G_0/\sqrt{2\pi} = 10$ ,中心波长 $\lambda_c$ 为600 nm,中心波数为 $k_c = 2\pi/\lambda_c$ ,带宽 $\lambda_b$ 为100 nm,得到图1所示干涉信号仿真图,其中干涉图中光程长为 $48\lambda_c$ ,即 $28.8 \mu\text{m}$ 。

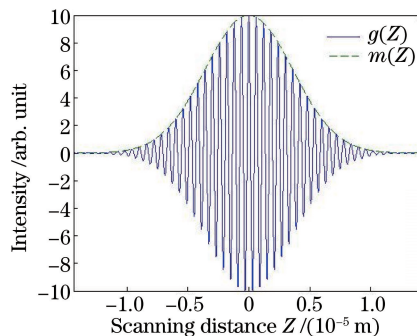


图1  $g(Z)-Z$  和  $m(Z)-Z$  干涉仿真图

Fig. 1 Interferograms of  $g(Z)-Z$  and  $m(Z)-Z$

函数  $f(Z)$  是干涉光强函数  $g(Z)$  的希尔伯特变换。根据采样定理模型, 对干涉光强函数  $g(Z)$  进行离散采样, 采样序列  $g(Z_j)$  进行希尔伯特变换, 求得  $f(Z_j)$ :

$$f(Z_j) = \frac{2}{\pi} \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{g(Z_{j+2n+1})}{2n+1}, \quad (3)$$

式中  $Z_j$  为采样高度位置,  $n$  为希尔伯特离散变换的序列号。函数  $f(Z)$  与干涉光强函数  $g(Z)$  的包络函数  $m(Z)$  有如下关系:

$$m(Z_j) = \sqrt{g^2(Z_j) + f^2(Z_j)}. \quad (4)$$

$g(Z)-Z$  和  $m(Z)-Z$  干涉仿真图如图 1 所示, 白光干涉条纹的光强随光程差变化, 包络函数  $m(Z)$  达到峰值时为零级干涉条纹, 即确定零光程差的位置, 且零级干涉条纹与其他级次的干涉条纹相差明显。

### 3 基于采样定理的高速白光干涉测量原理

在白光干涉测量实验中, 不能实现对干涉光强函数无限长采样, 因此需要一个采样窗对数据进行截断, 求  $f(Z_j)$  近似值  $f_N(Z_j)$ :

$$f_N(Z_j) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} T\left(\frac{1}{n-j}\right) g(Z_n), \quad (5)$$

$$T\left(\frac{1}{n-j}\right) = \begin{cases} \frac{1}{n-j}, & n-j \text{ is odd} \\ 0, & n-j \text{ is even} \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $N$  为采样点总数。

根据(5)式可知, 如果  $f_N(Z_j)$  采样窗外的数据  $n-j$  很大或者  $g(Z_n)$  很小, 则  $T\left(\frac{1}{n-j}\right)g(Z_n)$  与  $f(Z_j)$  相比是一个小量, 那么  $f_N(Z_j)$  与  $f(Z_j)$  之间的误差很小, 可以用  $f_N(Z_j)$  近似替代  $f(Z_j)$ <sup>[11]</sup>。故可以求得采样值包络函数  $m(Z_j)$  的近似值  $m_N(Z_j)$ 。根据白光干涉法测量原理, 包络函数  $m_N(Z_j)$  的最大值位于零光程差位置  $Z_0$  处。

#### 3.1 快速测量算法采样间隔限制条件

理论上, 增加采样间隔, 减少数据采集点, 仍然可以得到准确的光强包络函数, 同时提高测量速度。如图 2

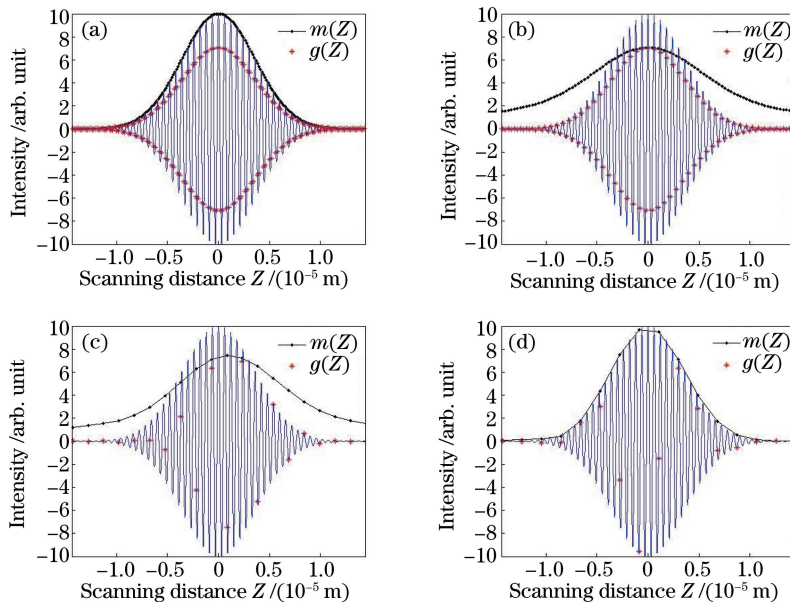


图 2 采样间隔分别为(a) 150 nm、(b) 300 nm、(c) 1516 nm、(d) 1920 nm 的包络计算仿真图

Fig. 2 Envelope simulation diagrams with the sampling intervals of (a)150 nm, (b) 300 nm,

(c) 1516 nm, (d) 1920 nm, respectively

所示,对理想的高斯干涉光强函数进行等间距采样,取不同的采样间隔得到离散采样点  $g(Z)$ ,分别计算出包络函数  $m(Z)$ 。

通过分析图 2 仿真图可以发现,采样间隔的值取在一部分区域内,计算的包络与理想干涉光强不能吻合,如图 2(c)所示,当采样间隔取为 1516 nm 时,零光程差位置较理想干涉光强包络有明显的偏移。为了进一步观察采样间隔对包络函数的影响,求出在不同采样间隔下计算的包络函数与标准包络函数差值的标准方差,如图 3 所示。

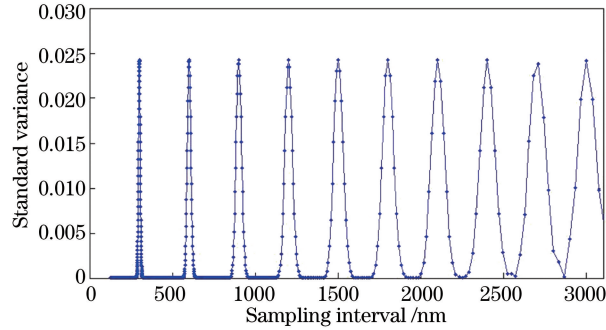


图 3 包络函数差值的标准方差

Fig. 3 Standard variance of envelope functions difference

图 3 的横坐标表示仿真实验中采样间隔宽度,纵坐标中的方差值越大表明所提取的包络与理想干涉光强包络的偏差越大,可以发现当采样间隔等于半波长倍数时,方差曲线位于峰值,此时包络误差最大。采样间隔是半波长的  $n(n=1,2,3,\dots)$  倍时, $n$  值越大,不符合采样条件的采样间隔区间越宽,并且采样间隔区间宽度与  $n$  为正比例关系。

对图 3 进行总结,得到白光干涉法测量实验中的采样间隔有限制条件。当采样间隔  $\Delta$  在下式区间内:

$$n\left(\frac{\lambda_c}{2} - \frac{\lambda_b}{6}\right) \leq \Delta \leq n\left(\frac{\lambda_c}{2} + \frac{\lambda_b}{6}\right), \quad (7)$$

则不符合此采样包络算法。理论上对最大采样间隔是有限制的,但当两个不满足条件的采样间隔区间重合,也就是说当  $n > (3\lambda_c - \lambda_b) / (2\lambda_b)$  时,无法得到满足条件的包络,不能精确判定零光程差的位置。除此之外的采样间隔都可以满足实现大采样间隔白光干涉法。由此可以推断出,光源带宽  $\lambda_b$  的值越小,满足白光干涉快速测量算法条件的采样区间越大。

### 3.2 提高快速测量算法的稳定性

在测量粗糙样品表面时,白光干涉法扫描具有很大的优势,能测量粗糙或有跳跃结构的表面<sup>[12]</sup>。但是,粗糙样品的局部表面起伏造成的杂散光容易引起实际干涉信号出现随扫描位置变化的背景偏置。图 4 是用白光干涉显微镜实际采集到的一组干涉光强信号,横坐标是采样步数,纵坐标是光强。从图 4 中可以看出光强存在起伏波动,直接进行希尔伯特变换得到的包络是不准确的,可能得不到包络信号,或者使包络出现两个或两个以上的峰值,影响零光程差位置的精确判断,这在增大采样间隔的快速测量算法中影响更为明显。

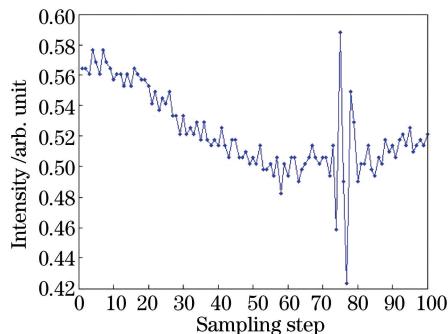


图 4 实际样品的一组白光干涉光强函数

Fig. 4 White light interference intensity function of the sample

为了提高快速测量算法的精确度,需要采用适当的滤波方法对直流偏置信号进行滤除,同时能够保留干涉信号的原有信息。

分别采用均值法、中值滤波法、曲线拟合法得到的光强函数和包络函数的计算结果如图 5 所示。从图 5(b)可以发现中值滤波法和曲线拟合法相比均值法更为精确,中值滤波法和曲线拟合法得到的包络函数基本相同,但中值滤波法相比曲线拟合法运行速度更快,因此最后选用中值滤波算法。

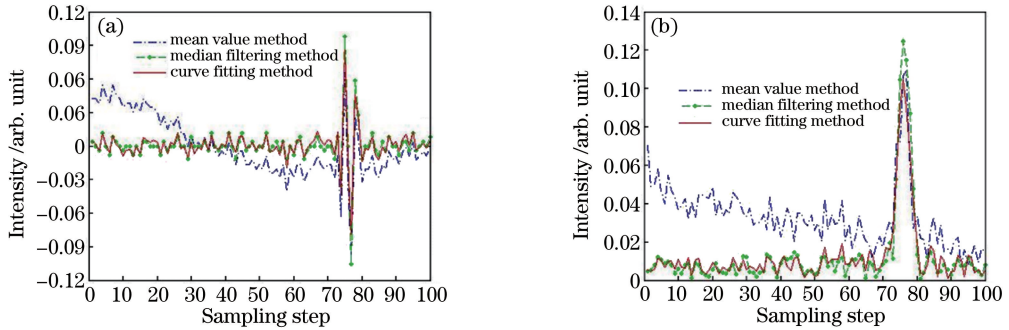


图 5 均值法、中值滤波法和曲线拟合法计算得到的(a)光强函数和(b)包络函数

Fig. 5 (a) Intensity function and (b) envelope function calculated by mean value method, median filtering method and curve fitting method

## 4 实验验证

图 6 是实验中采用的白光干涉显微镜示意图。照明光源先通过照明模块得到准直匀化后,通过分光棱镜的反射进入  $20\times$  Mirau 型干涉显微物镜,在干涉显微物镜中经过分束器形成两束光,分别照射到参考面和物面后反射回来,并且在分束器处合光后从干涉物镜中返回,再次通过分光棱镜,经过筒镜后被探测器接收,就可以得到样品的干涉图像。通过压电扫描器纵向扫描干涉物镜的位置,获取一系列采样图像,应用相应的干涉显微算法就可以重构待测表面的微结构。

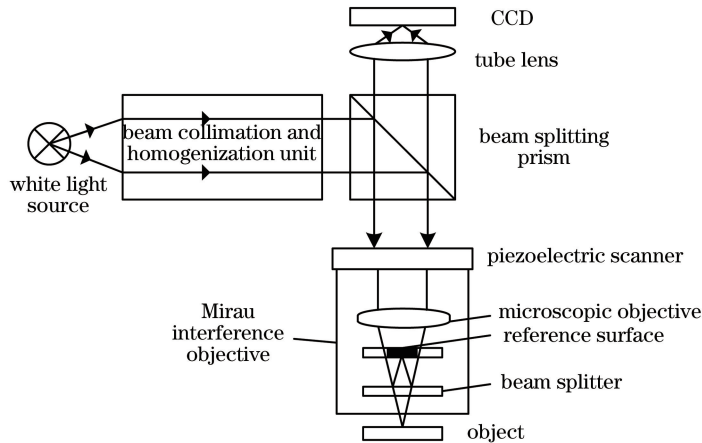


图 6 白光干涉显微镜的实验装置示意图

Fig. 6 Experimental setup of the white light interference microscope

通过该装置测量一个切削金属样品表面,获取 400 张干涉图像。光源的中心波长为  $560\text{ nm}$ ,带宽为  $100\text{ nm}$ 。采取的采样间隔为满足传统要求的  $100\text{ nm}$ 。实验测量得到 400 张不同干涉光强图,其中的 4 张如图 7 所示。

样品分别用 1 倍、4 倍、10 倍、20 倍采样间隔进行等间距采样,1 倍对应于  $100\text{ nm}$  采样间隔及 400 张干涉图像,4 倍对应于  $400\text{ nm}$  采样间隔及 100 张干涉图像。采样干涉图采用前文所述快速稳定包络求解算法,分别得到 4 个倍率的包络函数分布,之后再行拟合得到包络峰值点位置,即为这个像素的零光程差位置,把  $400\times 600$  个零光程差点连接起来就形成了样品表面形貌。

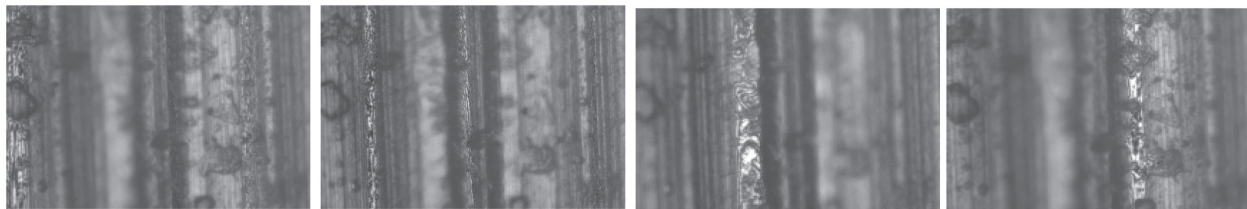


图 7 样品干涉光强图

Fig. 7 Interference intensity of the sample

图 8 是该样品三维表面沿 Y 方向同一个横截面重构结果的比较图,从上至下分别是 1 倍、4 倍、10 倍、20 倍时的重构横截面,纵坐标为三维表面形貌图相对高度。为了更好地比较各个采样间隔倍数的横截面,曲线经过了人为纵向偏置。从图 8 中可以发现,不同倍率采样间隔的形貌图基本一致,误差较小。随着采样间隔增大,表面形貌噪声也会增加。

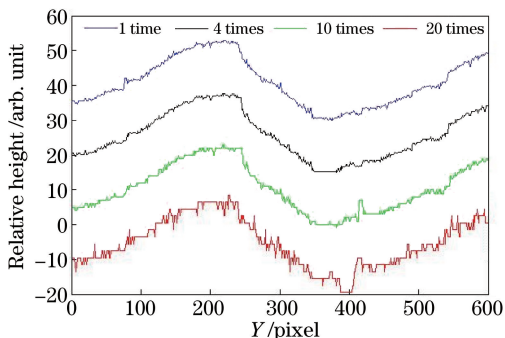


图 8 样品三维表面形貌的 Y 轴横截面

Fig. 8 Y-axis cross-section of three-dimensional surface topography of the sample

图 9 为采用 4 种不同采样间隔重构的样品三维表面形貌图。如图 9(d)所示,当采样间隔放大至 20 倍时,仍然可以快速稳定地观察到样品的表面形貌,得到的三维图可以明显观察到样品表面的车刀纹划痕。但随着采样间隔增大,重构表面形貌图的毛刺噪声增多,得到的三维图分辨率降低。用户可以根据自己的需求以及样品的特性,选择合适的采样间隔。

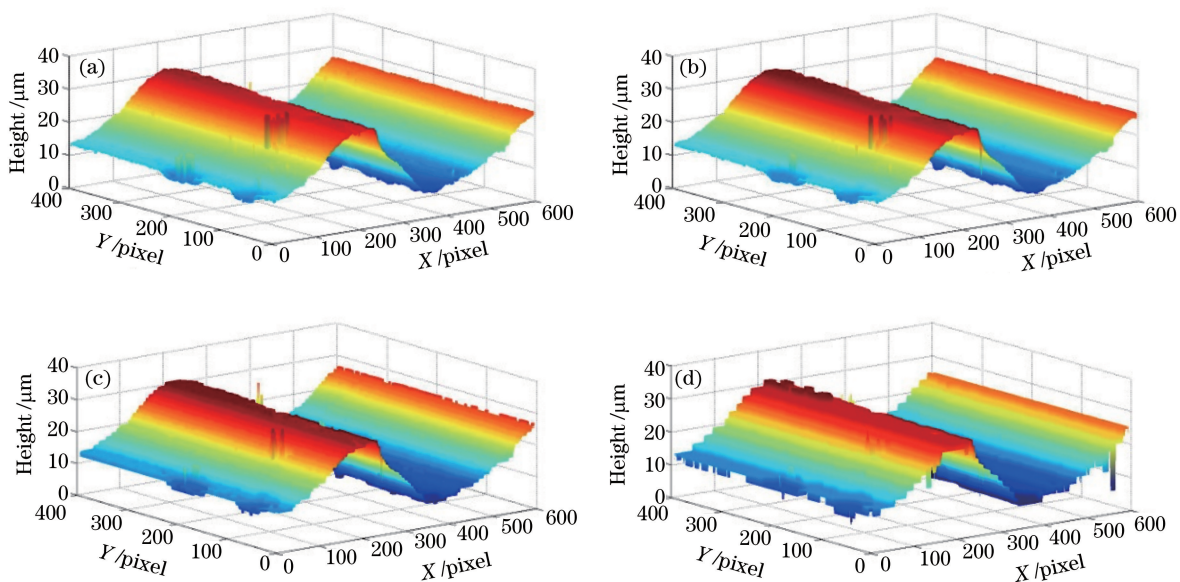


图 9 不同采样间隔时的样品表面形貌。(a) 1 time; (b) 4 times; (c) 10 times; (d) 20 times

Fig. 9 Surface topography of the sample with different sampling intervals. (a) 1 time; (b) 4 times; (c) 10 times; (d) 20 times

## 5 结 论

白光干涉法是一种基于光学干涉原理的表面形貌测量方法,相对于传统的三维表面形貌测量技术,白光干涉法具有非接触、灵敏度高、无损伤、精度高等特点。由于采样间隔条件的限制,很难达到高速白光干涉测量。本研究提出一种快速稳定的白光干涉测量方法。利用离散采样点的希尔伯特变换函数提取干涉信号包络算法,并通过中值滤波法滤除样品白光干涉光强信号的直流偏置噪声,同时提高算法速度及信号稳定性。实验中重构三维形貌的速度可以达到传统速度的20倍。随着采样间隔增大,也会导致重构三维形貌的分辨率降低,但却大大地提高了运行速率。用户可以根据自己的需求选择合适的采样间隔。仿真和实验结果都表明,本研究提出的算法不拘泥于采样间隔的限制,适用范围广,运行时间短,是一种高效的白光干涉算法,具有一定的应用潜力。

## 参 考 文 献

- [1] Conroy M, Armstrong J. A comparison of surface metrology techniques[C]. SPIE, 2006, 6188: 61880B.
- [2] Tian Ailing, Wang Chunhui, Jiang Zhuangde. Study on key algorithm in scanning white-light interferometry [J]. Optical Technique, 2008, 34(S1): 74-79.  
田爱玲, 王春慧, 蒋庄德. 扫描白光干涉测量技术的算法比较[J]. 光学技术, 2008, 34(S1): 74-79.
- [3] Zou Wendong, Huang Changhui, Zheng Qiang, *et al.* Measurement of microscopic surface topography of alloy dimple fracture by scanning white-light interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1612-1619.  
邹文栋, 黄长辉, 郑 瑜, 等. 用扫描白光干涉术检测合金韧窝断口微观三维形貌[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(7): 1612-1619.
- [4] 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.
- [5] Adachi M. Phase-shift algorithm for white-light interferometry insensitive to a linear error in phase shift increment[C]. SPIE, 2005, 6048: 604806.
- [6] Fleischer M, Windecker R, Tiziani H J. Theoretical limits of scanning white-light interferometry signal evaluation algorithms[J]. Applied Optics, 2001, 40(17): 2815-2820.
- [7] Hirabayashi A, Ogawa H, Kitagawa K. Fast surface profiler by white-light interferometry by use of a new algorithm based on sampling theory[J]. Applied Optics, 2002, 41(23): 4876-4883.
- [8] Hirabayashi A, Nakayama Y, Ogawa H, *et al.* Algorithm with optimum noise suppression for surface profiling by white-light interferometry[C]. SPIE, 2003, 5180: 365-376.
- [9] Harasaki A, Schmit J, Wyant J C. Improved vertical scanning interferometry[J]. Applied Optics, 2000, 39(13): 2107-2115.
- [10] Liu Zhaodong, Bian Jiang, Wang Jun, *et al.* Computer simulation and application of white light interference color[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(S1): 303-307.  
刘兆栋, 边 疆, 王 军, 等. 白光干涉色的计算机仿真及应用[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 303-307.
- [11] Wang Haishan. Key technologies on microscopic interferometry for micro-nano structure profilometry measurement [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.  
王海珊. 微纳结构形貌干涉显微测量关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [12] Guo Tong, Li Feng, Ni Lianfeng, *et al.* Microstructure surface topography measurement based on color images of white light interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0212003.  
郭 彤, 李 峰, 倪连峰, 等. 基于白光干涉彩色图像的微结构表面形貌测量[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0212003.