

数字像面全息显微技术的降噪方法

曾雅楠^{1*}, 卢钧胜², 常新宇², 刘源¹, 胡晓东^{2*}, 卫勇¹, 王艳艳³

1. 天津农学院 工程技术学院, 天津 300384;
2. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300110;
3. 天津职业技术师范大学 天津市信息传感与智能控制重点实验室, 天津 300350)

摘要: 数字像面全息显微技术中, 记录过程引入的噪声限制了轴向测量的精度和可靠性。目前对于抑噪方法的研究, 主要针对高频噪声。因此提出了一种针对数字像面全息显微技术的降噪方法, 不仅抑制高频噪声, 对噪声的低频部分也有抑制作用, 提高重构相位的信噪比。这种降噪方法对数字像面全息显微图进行优化, 实现途径为利用二维经验模态分解中, 第一层本征模态函数与全息图干涉条纹灰度信息契合的特点, 提取第一层本征模态函数实现优化。应用优化后的像面全息图, 实现重构, 求解相位, 测量样本表面形貌。应用优化方法对标准纳米台阶的表面形貌进行测量, 对比并分析优化前后全息图的频谱以及测量的高度图, 证明优化方法在保证对微结构表面形貌实现可靠测量的基础上, 降低了数字像面全息显微技术的重构相位噪声。

关键词: 数字全息; 像面全息; 噪声; 经验模态分解

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0524003

Method to suppress noises in digital image-plane holographic microscopy

Zeng Yanan^{1*}, Lu Junsheng², Chang Xinyu², Liu Yuan¹, Hu Xiaodong^{2*}, Wei Yong¹, Wang Yanyan³

1. College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300110, China;
3. Tianjin Key Laboratory of Information Sensing and Intelligent Control, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300350, China)

Abstract: In digital image-plane holographic microscopy (DIPHM), the precision and reliability of measurement are limited by noises introduced in recording process. Until now, the noise reduction research was focused on noise with high frequency. Here, a method was proposed to reduce noises not only with high frequency, but also with low frequency. By using the denoising method, the signal-to-noise ratio (SNR) of reconstructed phase was improved at the same time. The denoising method was realized by optimizing the digital image-plane microscopic hologram. The characteristics of the first intrinsic mode function (IMF1) in bi-dimensional empirical mode decomposition (BEMD) were in good

收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2019-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(51775381); 天津市教委科研计划项目(2017KJ812, JWK1612); 精密测试及仪器国家重点实验室(天津大学)开放基金(pilab1704); 天津市自然科学基金(18JCQNJC05600); 天津市本科教学质量与教学改革研究计划重点项目(171006101C); 天津市科技计划项目(17YFCZZC00330)

作者简介: 曾雅楠(1988-), 女, 讲师, 博士, 主要从事微纳光学检测技术方面的研究。Email: ynzeng@tju.edu.cn

accordance with that of gray value information of interference fringes in digital image-plane hologram. Hence, the digital image-plane hologram was decomposed by BEMD to extract the IMF1, utilizing the IMF1 as the optimized digital image-plane hologram. After that, the optimized digital image-plane hologram was reconstructed to retrieve phase to measure the surface profile of tested samples. The surface profile of a standard nano-step was measured by DIPHM with BEMD. By comparing and analyzing the frequency spectrum and measured height profile with and without BEMD, the optimizing method was proved to realize the correctness in surface profile measurement and noise suppression of reconstructed phase.

Key words: digital holography; image-plane holography; noise; empirical mode decomposition

0 引言

数字像面全息显微技术 (Digital Image-plane Holographic Microscopy, DIPHM) 是数字全息显微技术 (Digital Holographic Microscopy, DHM) 的一种特例^[1-2]。通过在显微物镜的成像面记录全息图, 得到数字像面全息显微图。相对于传统数字全息显微图, 重构像面全息显微图不需要进行衍射计算, 因此具有噪声低、效率高以及真正全视场重构的优势^[3-4]。对于像面全息图, 虽然重构过程避免传统数字全息衍射计算所引入的噪声, 但是对于记录过程中, 记录环境以及记录器件引入噪声, 导致重构相位可靠性及精度下降的问题并无改善。

国内外学者优化数字全息显微技术抑噪的研究, 主要集中于抑制零级像、像差^[5]的方法以及针对重构图噪声的数字图像处理方法, 例如频域滤波法^[6]、相移法^[7]、全息图相减法^[8]等抑制零级像, 高斯滤波方法^[9]、小波法^[10-11]等抑制散斑噪声等方法。然而对于离轴数字全息技术, 通过控制离轴角度, 可实现零级像与实虚像的分离, 使重构像免受零级像的影响; 而数字图像处理方法多施加于重构后的相位或者强度图, 通过对相位或强度图进行一定的平滑处理实现对噪声的抑制, 提高信噪比, 是在全息技术的最后阶段对重构像的优化, 主要消除的是高频噪声^[12-13]。

二维经验模态分解 (Bi-dimensional Empirical Mode Decomposition, BEMD) 方法^[14]是一种新型自适应信号时频处理方法, 依据数据自身的时间尺度特征来进行信号分解。BEMD 方法在 DHM 消除散斑噪声方面已有应用, 然而在目前的研究中, BEMD 仍

然作为一种数字图像处理方法, 起平滑高频噪声的作用^[15-16]。利用 BEMD 方法直接对含噪图像进行处理, 存在两个问题: 第一, 对于存在阶跃结构的被测样本, 仅平滑高频噪声易造成阶跃结构的边缘产生模糊或者错误的现象; 第二, BEMD 方法是一种基于信号本身特征的一种处理方法, 在操作过程中无法明确区分信号与噪声, 因此容易造成“误去噪”的问题。

文中针对以上问题, 利用 BEMD 方法, 但并非将其简单应用于含噪的重构相位图中, 而是在全息技术的初始阶段, 对记录的像面全息图进行优化, 利用二维经验模态分解方法对像面全息图中与物光波复振幅直接相关的干涉信息进行强化, 弱化记录过程和记录器件引入的有损信噪比的背景信息。相对于国内外研究, 文中分析了噪声源的复杂性, 在高频和低频领域均对噪声加以抑制, 从底层提高 DIPHM 的重构相位信噪比。通过对标准纳米台阶 VLSI 的测量, 分析应用优化方法前后, 频谱图中各项成分的频谱分量, 验证像面全息图优化方法在抑制噪声方面的有效性。

1 基本原理

1.1 数字像面全息显微图的记录与噪声的分析

数字像面全息显微图是数字全息显微系统中, 在显微物镜聚焦成像面记录的全息干涉图。像面全息图的强度为:

$$I(x,y)=$$

$$O(x,y)^2 + R(x,y)^2 + I_{\text{noise}}(x,y) + O^* R(x,y) + OR^*(x,y) \quad (1)$$

式中: $O(x,y)$ 为物光波的复振幅; $R(x,y)$ 为参考光波的复振幅; $O(x,y)^2 + R(x,y)^2$ 为零级像; $I_{\text{noise}}(x,y)$ 为记录

在 CCD 上的由于环境噪声带来的强度变化; $O^* R(x,y)$ 和 $OR^*(x,y)$ 表示实像和虚像。零级像、实像和虚像在像面全息图的频谱图中分别占据三部分。参考光在全息干涉的过程中,通过引入载频使实虚像与零级像分离。实际上,频域中带有载频的实虚像频谱信息在空域中的表现即为全息图中细密的干涉条纹。干涉条纹携带有全部的物光和参考光复振幅信息。通过对干涉条纹进行解析,拟合参考光并校正物光中的相位畸变,即可获取具有正确相位信息的物光波复振幅,得到相位和样本的高度信息。

记录像面全息图时,记录环境中必然引入噪声,如公式(1)中 $I_{noise}(x,y)$ 项。但环境噪声是复杂的,噪声源主要包括环境杂散光、光电记录器件的热噪声以及被测样本自身的散斑噪声等。记录环境中的环境杂散光强度相对于激光光源较弱,所引发的噪声属于低频噪声;光电记录器件的热噪声以及样本的散斑噪声属于高频噪声。因此,应在高频和低频两方面对噪声进行抑制,才能更加全面地提高相位信噪比。

实际上,在全息图中,干涉条纹已携带全部的物光复振幅信息,而上述分析的噪声存在于除去干涉条纹的全息图背景中。因此,强化干涉信息,提取干涉条纹,弱化非干涉的背景部分,是优化像面全息图,抑制噪声的关键。

1.2 数字像面全息显微图的优化方法

二维经验模态分解 (Bi-dimensional Empirical Mode Decomposition, BEMD) 理论认为,在物理上,如果瞬时频率有意义,那么函数必须是对称的,局部均值为零,并且具有相同的过零点和极值点数目。而本征模函数任意一点的瞬时频率都是有意义的,一个信号都可以包含若干个本征模函数, BEMD 分解的目的就是为了获取本征模函数。因此本征模函数 (Intrinsic Mode Functions, IMF) 必须满足以下两个条件:

(1) 函数在整个时间范围内,局部极值点和过零点的数目必须相等,或最多相差一个;

(2) 在任意时刻点,局部最大值的包络(上包络线)和局部最小值的包络(下包络线)平均必须为零。通过实践可知,干涉条纹的可见度恰好是本征模函数的理想情况,如图1所示。

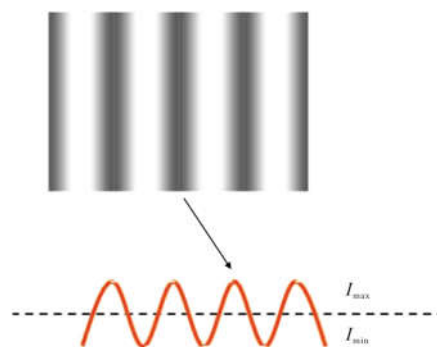


图 1 干涉条纹的强度图

Fig.1 Intensity of interference fringes

因此,文中利用提取第一层本征模函数 IMF1 的方法提取像面全息图中的干涉条纹,实现对像面全息图的优化。优化方案为:

(1) 将像面全息图的像素灰度值存入矩阵,矩阵的 i 行记为 h_i ;

(2) 计算 h_i 数组的上下包络线,求上下包络线的数值平均值 M_i ;

(3) $h_i - M_i = IMF1_i$, 将所有行的 IMF1 $_i$ 按照原行的位置组合成矩阵 IMF1, IMF1 即为优化后的数字像面全息显微图。

1.3 解析经优化的数字像面全息显微图相位

对优化后的数字像面全息显微图进行频谱滤波,获得携带参考光载频的实像频谱:

$$R(x,y)O^*(x,y) = \text{IFT}\{W(\zeta, \eta)\text{FT}[I_{\text{IMF1}}(x,y)]\} \quad (2)$$

式中: $R(x,y)O^*(x,y)$ 为含参考光载频的实像复振幅; $I_{\text{IMF1}}(x,y)$ 为优化后的像面全息图; FT 和 IFT 为傅里叶变换和逆傅里叶变换; $W(\zeta, \eta)$ 为圆形窗函数,实现频谱滤波。

直接在全息图中提取的实像频谱含有相位畸变,需要进行畸变校正,校正后的物光波复振幅为:

$$u(x,y) = \Gamma(x,y)[R(x,y)O^*(x,y)] \quad (3)$$

式中: $\Gamma(x,y)$ 为校正相位畸变并拟合参考光的因子。求解不含畸变的正确相位 $\phi(x,y)$ 为:

$$\phi(x,y) = \arctan \left[\frac{\text{Im}u(x,y)}{\text{Re}u(x,y)} \right] \quad (4)$$

被测样本的形貌高度为 $h(x,y)$:

$$h(x,y) = \frac{\phi(x,y)\lambda}{4\pi} \quad (5)$$

式中: λ 为光源波长。

2 实验系统及实验结果

数字像面全息显微系统示意图如图 2 所示。

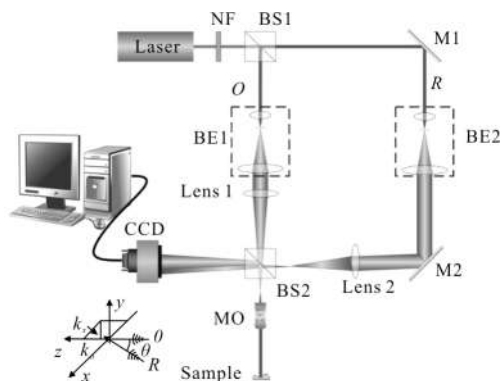
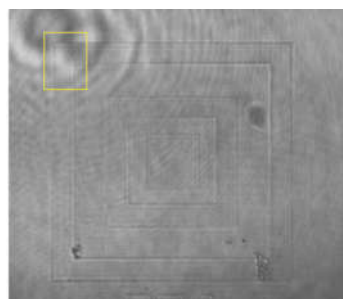


图 2 数字像面全息显微系统光路图

Fig.2 Schematic of digital image-plane holographic microscope

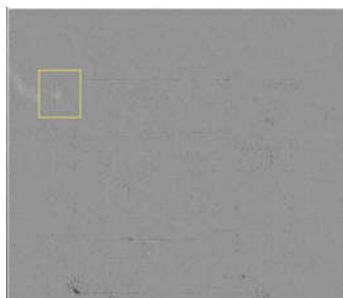
单波长反射式数字全息显微系统光路设计如图 2 所示, 为 Mach-Zehnder 反射式光路。激光器 Laser (XPERAY, 波长选择为 690 nm) 发出的光经过中灰滤光片 NF 进行衰减后, 通过分光棱镜 BS1 分成两束相干光束, 物光 O 和参考光 R 。物光臂中物光束经过准直扩束器 BE1 扩束。透镜 Lens1 与显微物镜 MO (Mitutoyo, 50 \times , N.A.=0.42) 共同作用, 使物光 O 保持准直平行的状态照射到被测样本 Sample 上, 经过样本反射的反射光被显微物镜 MO 收集并形成球面波, 被光电传感器 CCD (PX-2M30-L, Imperx) 所接收。参考光 R 经过反射镜 M1 折转方向, 准直扩束器 BE2 对其进行扩束。反射镜 M2 负责调节参考光 R 与物光 O 之间的离轴夹角, 在满足记录的条件, 尽可能地扩大载频, 有利于对全息图的实像信息进行提取。参考光 R 经过透镜 Lens2 形成球面波, 与物光波 O 在 CCD 接收面发生干涉, 此干涉图被 CCD 记录, 即为数字全息图。当记录面正好位于重构距离为 0 的像面, 即 MO 的样品聚焦面时, 形成的全息图即为数字像面全息图。

文中被测样本为一标准纳米台阶 (VLSI, SHS-440-QC), 其标准高度为 43.2 ± 0.6 nm。利用图 2 所示系统, 记录的数字像面全息显微图如图 3(a) 所示。对图 3(a) 进行二维经验模态分解获取第一层本征模态函数 IMF1, 根据文中 1.2 节的理论, 即为优化信噪比的数字像面全息显微图, 如图 3(b) 所示。图 3(c) 和 3(d) 分别为图 3(a)、(b) 中黄方框部分的放大图像。



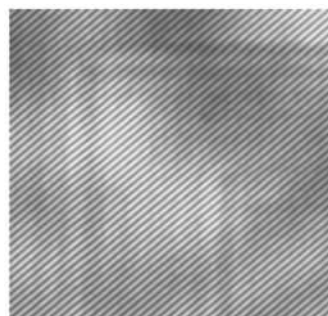
(a) 原始的数字像面全息图

(a) Original digital image-plane microscopic hologram



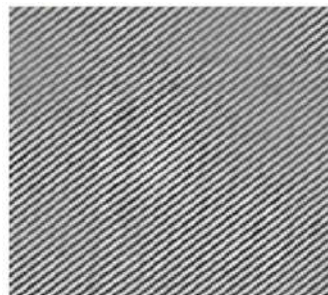
(b) 优化后的数字像面全息图

(b) Digital image-plane microscopic hologram after optimization



(c) 图 3(a) 中黄方框内放大部分

(c) Magnified part in Fig.3(a) in yellow rectangular



(d) 图 3(b) 中黄方框内放大部分

(d) Magnified part in Fig.3(b) in yellow rectangular

图 3 优化前后的标准纳米台阶数字像面全息图

Fig.3 Digital image-plane microscopic hologram of standard nano-step before and after optimization

由图 3(d)与图3(c)的对比可知,优化后,干涉条纹对比度更高,全息图的背景部分强度下降,因此干涉信息更为突出,强化了携带有物光复振幅的干涉部分,弱化了引起噪声的背景部分。通过对频谱的分析,这种结论更为显而易见,如图 4 和图 5 所示。

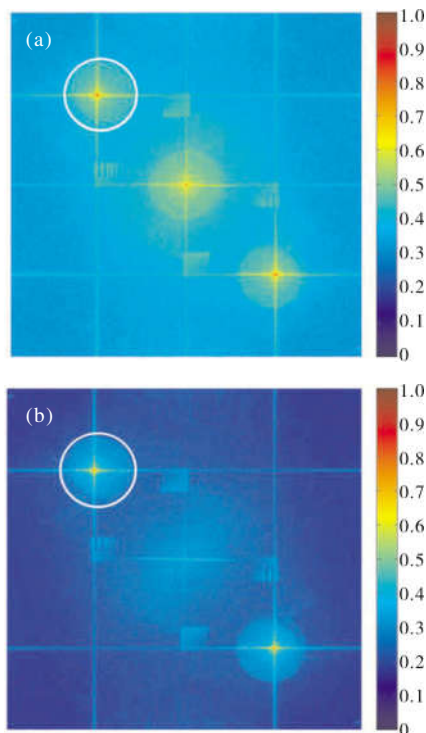


图 4 优化前(a)后(b)的频谱图

Fig.4 Frequency spectrum before (a) and after (b) optimization

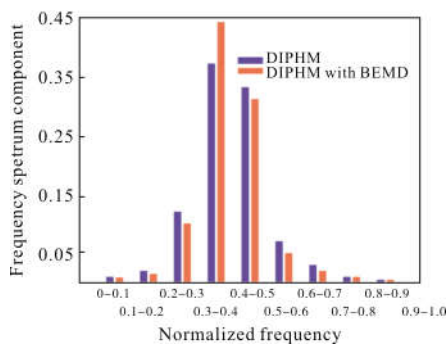


图 5 优化前后频谱图圆形窗内频谱分量-归一化频谱统计图

Fig.5 Relationship between frequency spectrum component and normalized power of frequency in circle window in frequency spectrum before and after optimization

图 4 为优化前后, 归一化的像面全息图的频谱图。图中不同颜色代表在频谱图的分量分布中,各频谱分量能量的大小,由 0~1 逐渐增强。图 5 为实像滤波圆形窗(即图 4(a)、(b)中白色的圆形窗部分,公式(2)

中 $R(x, y)O^*(x, y)$ 内,归一化频谱与频谱分量的统计图。图 5 统计的是圆形窗内,不同频谱带中,频谱分量的大小。

对优化后标准纳米台阶的像面全息图进行重构,重构高度图如图 6 所示。测量图 6 中某一行的高度,对比优化前,以及小波去噪方法(Coiflet5, 第三层),其高度轮廓线如图 7 所示。

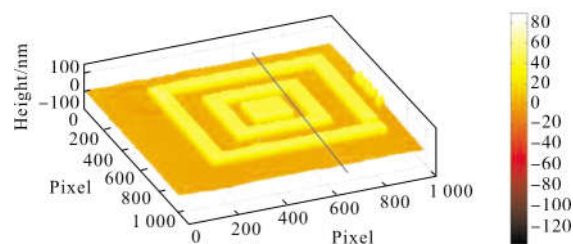


图 6 优化后标准纳米台阶的高度图

Fig.6 Height of standard nano-step measured after optimization

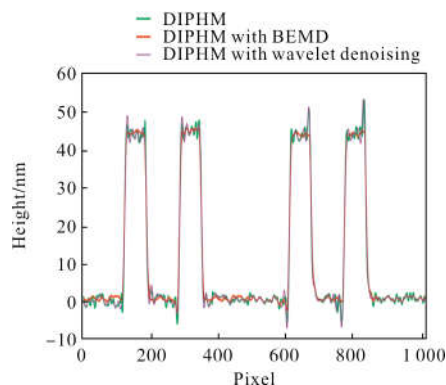


图 7 优化前后以及小波去噪后的纳米台阶轮廓线高度图

Fig.7 Height profile line of nano-step measured before, after optimization and with wavelet denoising

3 分析与讨论

图 4 所示的二维频谱图能够表示频谱分量,图中心点表示零频,越靠近中心,频率越低,越向图边缘靠近,频率越高。频谱图中,不同颜色代表不同频率值的频谱分量,即能量大小,具体数值见右侧颜色条。在全息图中,零级像占据低频部分,实像及其共轭像占据中间频带,噪声分布于整个频谱图中,既包含高频信息又包含低频信息。通过对图 4 和图 5 分析,可得出以下结论:

(1) 对比图 4(a)和(b)可知,优化后实像频谱的中心点,即实像滤波圆形窗——白色圆形窗的中心点,包含有大部分实像复振幅信息,对比优化前,其频谱

分量并未减弱,说明实像复振幅的重构能力并未因为分解优化而下降,保证了优化后相位重构的正确性。

(2) 对比图 4(a)和(b)可知,除去实像滤波窗中心点及虚像频谱中心点外,其余频率的频谱分量均有所下降,以零级像的频谱分量下降最为明显,因此引起噪声的无论高频还是低频分量均得到能量方面的抑制,实现抑制噪声的目的。

(3) 图 5 中,根据统计的结果,实像滤波圆形窗中心点频谱分量最高,在保证频谱窗内中心点频谱分量不变的条件下,除去频谱窗中心点其他部分频谱分量整体向低移动,使得频谱窗中心点相对于窗内其他频谱分量更加突出,减弱无用频谱分量对中心点频谱重构的影响力,实现重构过程的优化。

根据图 7 的对比高度图,小波去噪方法虽然也有去噪效果,但是在阶跃结构的边缘,使用小波去噪方法易导致边缘高度值错误性地扩大,这也印证了引言中,对于阶跃结构,直接利用起平滑作用的去噪方法容易造成阶跃结构边缘出现错误的分析。不同于直接对重构高度图去噪的机理,BEMD 方法优化全息图,充分利用了包含于干涉条纹中的有效信息,因此不会造成阶跃结构边缘错误的问题。同时,利用 BEMD 优化后,高度的测量噪声得到明显抑制。优化前,纳米台阶平均高度为 (43.7 ± 2.1) nm,优化后平均高度为 (43.2 ± 0.9) nm。优化前,纳米台阶平均高度的测量信噪比为 20.77 dB,优化后,测量信噪比为 27.61 dB。

4 结 论

文中分析了全息技术中记录过程的噪声来源,得出噪声不仅有高频部分,还存在低频噪声致使重构相位信噪比降低。全息图中,干涉条纹含有全部的物光复振幅信息,因此利用经验模态分解方法对数字像面全息显微图进行优化。通过对优化前后归一化频谱与频谱分量关系的分析,证实优化过程实现了对全息图中包含物光复振幅的干涉信息的强化,对含有高频以及低频噪声的背景信息的弱化,提高相位及高度测量的信噪比。优化前,纳米台阶高度测量信噪比为 20.77 dB,优化后为 27.61 dB。相比较已有研究工作,文中不仅降低高频噪声,消除零级像的

影响,对环境背景光造成的低频噪声亦实现抑制,提高测量的稳定性和可靠性。文中优化方法虽可从源头降低全息图的记录噪声,但主要针对于系统噪声,若存在属于粗大误差的噪声,还应结合带有判别功能的数字图像处理方法进行剔除。

参考文献:

- [1] Zeng Yanan, Wang Fei, Lei Hai, et al. Surface profile measurement of microstructures based on dual-wavelength digital microscopic image-plane holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1009001. (in Chinese)
- [2] Chen Zhu, Jiang Hongzhen, Chen Xu, et al. Measurement of surface defects of optical elements using digital holography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25 (3): 576-583. (in Chinese)
- [3] Zeng Y N, Chang X Y, Lei H, et al. Phase noise suppression by dual-wavelength digital image-plane holographic microscopy[J]. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*, 2016, 34(1-3): 43-56.
- [4] Zeng Y N, Chang X, Lei H, et al. Characteristics analysis of digital image-plane holographic microscopy [J]. *Scanning*, 2016, 38(4): 288-296.
- [5] Asundi A, Zuo C, Chen Q, et al. Phase aberration compensation in digital holographic microscopy based on principal component analysis [J]. *Optics Letters*, 2013, 38 (10): 1724-1726.
- [6] Wang Yonghong, Li Junrui, Sun Jianfei, et al. Frequency domain filtering for phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 389-395. (in Chinese)
- [7] Coskun A F, Ozcan A, Su T W, et al. Lensfree on-chip microscopy over a wide field-of-view using pixel super-resolution[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11181-11191.
- [8] Tang Chunming, Zhang Hongke, Yu Xiang, et al. Noise suppression in reflective off-axis digital holographic reconstruction [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35 (4): 745-748. (in Chinese)
- [9] Uzan A, Rivenson Y, Stern A. Speckle denoising in digital holography by nonlocal means filtering [J]. *Applied optics*, 2013, 52(1): A195-A200.
- [10] Zhang Xiangchao, Zhang Xiaolei, Yuan He, et al. Accurate reconstruction in digital holographic microscopy using Fresnel dual-tree complex wavelet transform [C]//Seminar on Novel

- Optoelectronic Detection Technology and Application, 2018:49.
- [11] Cui Shanshan, Li Qi. De-noising research on terahertz digital holography based on wavelet transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1836–1840. (in Chinese)
- [12] Wang Hao, Zhang Ye, Shen Honghai, et al. Review of image enhancement algorithms [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438–448. (in Chinese)
- [13] Zhang Xiaolei, Zhang Xiangchao, Xiao Hong, et al. Speckle removal in phase reconstruction of digital holography for structured surfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0726002. (in Chinese)
- [14] Ren Zhiying, Gao Chenghui, Luo Dehai, et al. Application of bidimensional empirical mode decomposition in error evaluation for engineering surface texture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 425–432. (in Chinese)
- [15] Paturzo M, Ferraro P. Multilevel bidimensional empirical mode decomposition: a new speckle reduction method in digital holography [J]. *Optical Engineering*, 2014, 14(11): 139–152.
- [16] Jing Juanjuan, Xiangli Bin, Li Ran, et al. Interferogram filtering method based on empirical mode decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 62–67. (in Chinese)