

# 基于能量分布识别干涉条纹相位畸变的方法

王一, 宋宝根\*, 赵延军

华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山 063200

**摘要** 在基于条纹投影的物体表面形貌测量中, 条纹相位畸变是影响物体测量精度的主要因素。为了准确判断条纹相位是否发生相位畸变, 在相位矫正算法中借助傅里叶变换, 从频域中分析条纹图样, 形成了一种基于频域分析辨别干涉条纹相位畸变的技术。利用迈克耳孙干涉的基本原理搭建平行光束干涉投影装置, 将干涉条纹投射到光屏上, 通过 CCD 相机进行图像采集, 并将得到的干涉条纹图像传输到计算机上, 再利用小波滤波对图像进行滤波, 噪声和干扰通过傅里叶变换将空域图像转换为频域图像, 分析频域图像中的基频临近位置的能量分布信息, 判断是否发生相位畸变。实验结果表明, 该方法能够准确判别采集条纹图像是否发生相位畸变, 识别灵敏度为 60 mrad。

**关键词** 傅里叶光学; 干涉投影; 相位畸变; 频域分析; 傅里叶变换; 小波滤波

中图分类号 TN249; O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.010701

## Identifying Phase Distortion of Interference Fringe Based on Energy Distribution

Wang Yi, Song Baogen\*, Zhao Yanjun

School of Electrical Engineering, North China University of Technology, Tangshan, Hebei 063200, China

**Abstract** In the measurement of surface topography of objects based on fringe projection, the fringe phase distortion is the main factor affecting the accuracy of object measurement. In order to accurately determine whether the fringe phase has phase distortion, the fringe pattern is analyzed from the frequency domain by means of Fourier transform in the phase correction algorithm, and a technique for discriminating the phase distortion of the interference fringe based on frequency domain analysis is formed. Using the basic principle of Michelson interference, the parallel beam interference projection device is built, the interference fringes are projected onto the light screen, the image is collected by the CCD camera, and the obtained interference fringe image is transmitted to the computer, and then the image is filtered by wavelet filtering. The noise and interference are transformed into a frequency domain image by Fourier transform, and the energy distribution information of the adjacent position of the fundamental frequency in the frequency domain image is analyzed to determine whether phase distortion occurs. The experimental results show that the method can accurately determine whether the fringe image has phase distortion, and the recognition sensitivity is 60 mrad.

**Key words** Fourier optics; interference projection; phase distortion; frequency domain analysis; Fourier transform; wavelet filtering

**OCIS codes** 070.2025; 070.4790; 100.3175; 100.7410

## 1 引言

三维形貌测量技术是精密检测中的先进技术, 在 CAD/CAM、逆向工程、视觉检测、医疗复原、服装生产设计和机载导航等领域占有重要地位, 是分析科学、工业控制、生物工程、生物医学和材料制造

等方面进行科学研究的重要手段<sup>[1-2]</sup>。相位测量轮廓<sup>[3]</sup>术(PMP)在三维形貌测量中占有重要的地位。但由于环境的变化和投影设备原因, 例如干涉投影装置附近工作人员走动或机械设备工作都会产生一定的震动、不可避免的空间滤波器的针孔衍射、空气流动和电子噪声干扰(主要来源于光源和电子器

收稿日期: 2018-04-14; 修回日期: 2018-05-14; 录用日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51505125)

\* E-mail: 474102509@qq.com

件)<sup>[4]</sup>、环境干扰(主要来源于杂散光、空气的扰动)等,都会造成投影条纹的变化,导致条纹空间频率或相位发生偏移,使得提取到错误的相位变化,无法真实反映物体本身的三维形貌信息,造成形貌还原失败。李岩等<sup>[5]</sup>针对成像系统与投影装置及接收屏的空间三角位置关系、投影仪的发散照明和系统蕴含的光学畸变所形成的采样条纹相位和空间坐标不再呈线性分布,从而引起相位失真的情况,根据反向条纹投影的思想,计算采样条纹图片的非线性相位分布与理想线性分布之间的关系,反算出一个新的投影条纹,从而使采样条纹图像呈线性分布的相位变化。伯恩等<sup>[6-7]</sup>利用峰值检测电路对干涉信号相位进行提取,简化了相位提取的过程,但是在系统中添加了更多的外部检测模块,增加了系统的复杂性。运用旋转坐标数字机进行快速反正弦计算,在相同的测量精度下运算迭代次数更少,相位稳定技术具有更好的实时性。这两种方法均是对整体条纹进行相移或相位变化的检测,而没有检测局部条纹相位变化。

本文使用激光源经过迈克耳孙干涉基本原理所搭建的投影装置投影出平行光束干涉条纹,将条纹投影在接收光屏上,通过 CCD 相机进行条纹图像采集,并将得到的干涉条纹图像传输到个人计算机(PC)上,利用小波滤波滤除图像上的噪声和干扰,保留条纹有效的相位信息,通过傅里叶变换将空域图像转换为频域图像,并对频域图像进行图像移位处理,找出基频所在位置,根据频域图像中的基频临近位置的能量分布集中程度,判断是否出现相位畸变。这种方法可以应用于只存在局部条纹相位发生畸变的情况。

## 2 畸变识别原理

### 2.1 傅里叶变换

条纹图像是空间领域上的二维函数,包括多种复杂的数据信息,如周期性数据、非周期性数据、噪声及背景等。在空间领域中,因为不同的数据信息通常紧密叠加在一起,所以在空间领域中分离和处理这些紧密叠加数据信息,有时甚至是不可实现的<sup>[8-10]</sup>。依靠傅里叶变换原理可以将空间领域的图像二维函数转变为复频域的二维频谱函数图,再从得到的复频域图像数据中分析图像信息。

设图像数据矩阵的行、列均为  $N$ , 这里  $x$  轴的数值对应为矩阵列标号,  $y$  轴的数值对应矩阵行标号, 则其二维离散傅里叶变换形式为

$$F(f_x, f_y) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot \exp[-j2\pi(xf_x + yf_y)/N], \quad (1)$$

对(1)式进行化简分离,得到:

$$F(f_x, f_y) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} F(x, f_y) \cdot \exp[-j2\pi \cdot xf_x/N]. \quad (2)$$

即先将待变换的图像函数  $f(x, y)$  沿行进行一维傅里叶变换,再将变换后的结果乘以  $N$  得到行变换后的二维函数  $F(f_x, y)$ ;然后将行变换后的二维变换函数  $F(f_x, y)$  沿列进行一维傅里叶变换,所得结果就是待变换图像的二维傅里叶变换图像  $F(f_x, f_y)$ 。先进行列变换,再进行行变换也会得到同样的结果,这样变换可以为图像二维傅里叶变换的程序编写提供极大的方便<sup>[11-13]</sup>。

### 2.2 小波滤波

在条纹图像的二维傅里叶变换中,背景光强信息所含零频分量的频谱十分宽泛,因此零频频谱与载有效信息的基频分量频谱时有混叠;较高频频谱局部也可能和基频分量频谱混叠。在这种频带混叠的情况下,难以滤波、区分有用频带和无用频带的截止频率。在进行小波滤波时,主要针对频谱幅度进行滤波,频谱可以重叠。因此,采用非线性滤波的小波变换对图像进行滤波处理<sup>[13]</sup>。

小波分析的主要思想是,将信号  $f(t)$  分解为一系列基函数  $\psi$  的和。对于具有有限能量的信号或平方可积的信号  $f(t)$ , 其小波变换定义为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{a,b}(t) f(t) dt, a > 0, \quad (3)$$

其逆变换为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db, \quad (4)$$

式中  $a$  为尺度缩放参数,  $b$  为中心时间定位参数, 函数  $\psi_{a,b}(t) = 1/\sqrt{a} \psi[(t-b)/a]$  即为小波函数。改变尺度缩放参数  $a$ , 对函数  $\psi(t)$  具有伸展( $a > 1$ )和收缩( $a < 1$ )作用;改变中心时间定位参数  $b$ , 可完成函数  $\psi_{a,b}(t)$  对信号  $f(t)$  的平移和扫描。随着尺度缩放参数  $a$  的减小,小波基  $\psi_{a,b}(t)$  的支撑区也变窄,而其傅里叶变换  $\psi_{a,b}(\omega)$  的频谱则向高频端展宽;反之亦然。这就实现了窗口大小自适应变化。当输入信号频率升高时,视窗宽度将会变窄,同时频

窗高度将会变大,这样有利于检测快变信号,提高时频的分辨率;反之亦然<sup>[14-17]</sup>。

图像信号经小波变换后,可以认为有用的基频信号产生的小波系数包含信号的重要信息,此频段的幅值较大,而噪声和背景光场未含有有效信息,对应的幅值较小。通过在不同尺度上进行对比衡量,选择一个适当的设定阈值,将小于设定阈值的各个小波系数幅度进行置零,而保留大于设定阈值的各个小波系数,以此有效抑制图像信号中分离处理的噪声信号。最后进行小波逆变换,将各层处理后的信号进行重组,得到滤波后的重构图像信号。小波滤波在一定程度上解决了频谱混叠的问题,降低了噪声及背景信息对傅里叶变换的影响。

### 2.3 能量分布分析

对经过小波滤波的条纹图像进行傅里叶变换,得到复频域的条纹图像。此时得到的频域图像相对于滤波前的图像能量信息更加清晰,但是能量信息分布于图像的4个边角处,不便于进行信息处理识别。对频域图像进行移位操作,将图像信息全部移位至图像中央,以便于进行图像分析。对标准条纹图像的傅里叶变换移位图分析可以得出,标准条纹

图像的傅里叶变换移位图基频附近的能量分布密集,不会出现能量弥散的情况;而畸变条纹图像的傅里叶变换移位图基频附近的能量会随着相位畸变出现不同程度的能量弥散。通过对比标准条纹图像的傅里叶变换移位图与畸变条纹图像的傅里叶变换移位图之间的能量分布集中程度和弥散程度,可以判别条纹图像是否发生相位畸变。

## 3 实验分析

实验分为两部分,一是仿真图像的畸变识别实验,验证该理论的可行性,二是针对实际条纹图样的畸变识别实验,将理论用于实际分析,得到该方法在实际应用中的数据,分析其识别效果。

### 3.1 仿真分析

利用 Matlab 编写运行杨氏双缝干涉的仿真程序,仿真出标准的正弦干涉条纹图样,并加入不同的相位畸变数据得到两幅相位畸变的干涉条纹图样,分别如图 1(a)、2(a)、3(a)所示。

图 1(b)为仿真标准条纹图像经傅里叶变换移位后的频域图,可以看出,在基频位置附近的能量集中分布在一条线上,零频附近的能量全部集中在一点上,没有出现任何的能量弥散。

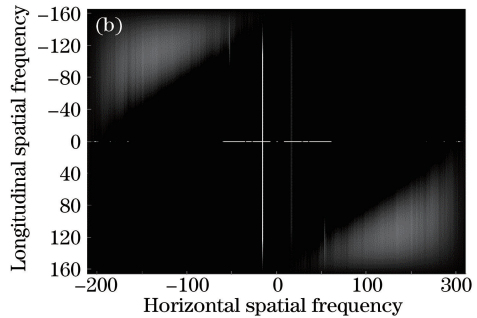
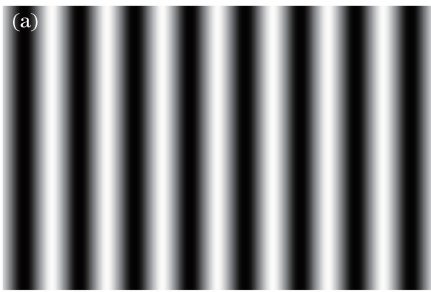


图 1 (a)标准正弦干涉条纹;(b)傅里叶移位变换图

Fig. 1 (a) Standard sinusoidal interference fringe; (b) Fourier transform diagram

图 2(a)和图 3(a)分别为加入不同相位畸变的仿真图,同样经过傅里叶变换移位之后,得到了

图 2(b)和图 3(b)的频域图像。根据两幅傅里叶变换移位图像基频附近的能量分布情况,发现有

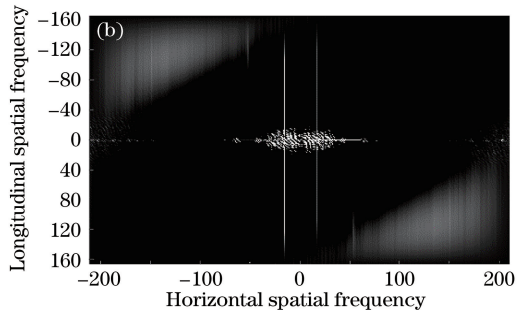
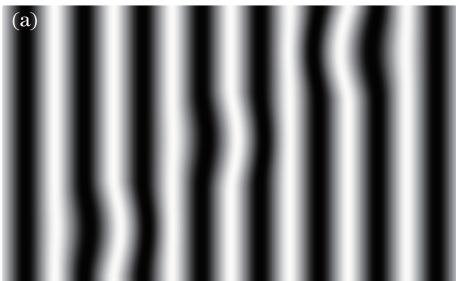
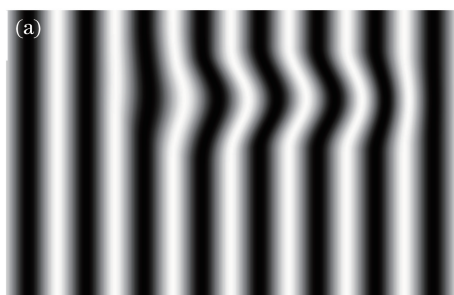


图 2 (a)相位畸变图样 1;(b)傅里叶移位变换图

Fig. 2 (a) Phase distortion pattern 1; (b) Fourier transform diagram

相位畸变存在时,能量分布弥散,不会集中在一条线上。对比两幅畸变图像的傅里叶变换移位图可



以看出,相位畸变量相对较大时,能量弥散程度会更大。

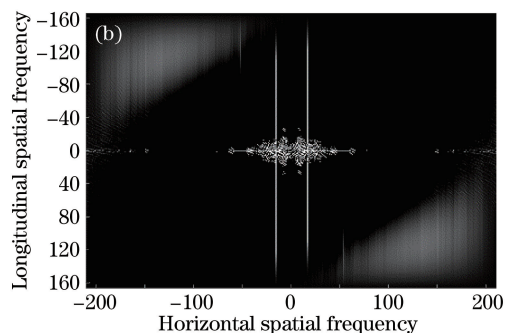


图3 (a)相位畸变图样2;(b)傅里叶移位变换图

Fig. 3 (a) Phase distortion pattern 2; (b) Fourier transform diagram

### 3.2 实际图像分析

本文所用的测量系统在形成干涉条纹后,在投影测量物体形貌前添加了分光镜,将投影条纹分为两路光,并分别投影在测量物体的载物测量台和无物体的测量平台上。用于进行畸变识别的图像来自无物体的测量平台的投影条纹图像,因此本文方法的相位畸变均为外界因素所造成的,并没有自身三维形貌造成的条纹变化。实际条纹投影使用自由偏振氦氖激光器 25LHR171-230 作为激光发射源,利用迈克耳孙干涉的原理搭建投影装置投影干涉条纹,并用 Baumer 工业黑白相机 VLG-12M 对投影

条纹进行图像采集,以千兆网线传输到 PC 机上。

图 4(a)为实际采样的标准条纹,图 4(b)为经过小波滤波和傅里叶变换得到傅里叶变换移位图。实际图像的频域变换图 4(b)中会有能量弥散情况,这是实际采样图像中残余噪声经傅里叶变换形成的。虽然经过小波滤波,除去多数的背景信息和高频噪声,但是图像中依然存在噪声干扰。在小波滤波时,这部分噪声与基频变换结果相近,滤除效果不好,未能完全除去。不过,傅里叶变换移位图中基频附近的能量分布相对集中,没有出现严重的能量弥散情况。

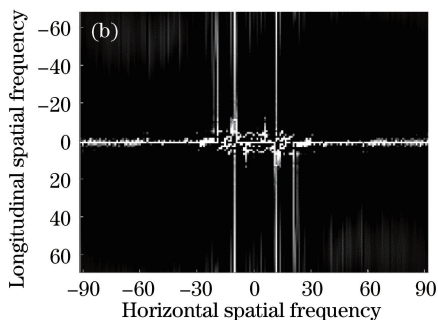
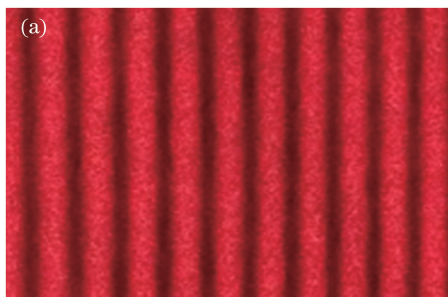


图4 (a)实际标准干涉条纹图;(b)傅里叶移位变换图

Fig. 4 (a) Actual standard interference fringe pattern; (b) Fourier transform diagram

图 5(a)和 6(a)分别为实际相位畸变条纹,经过小波滤波和傅里叶变换得到傅里叶变换移位图分别如图 5(b)和 6(b)所示。对实际条纹加入的相位畸变量与仿真实验中的数据相类似。分析图 5(b)和 6(b)可知,相对于实际标准条纹傅里叶变换移位图,这两幅傅里叶变换移位图在基频附近出现较为严重的能量弥散现象,并且随着畸变量和畸变区域的增多,能量分布更加弥散。

对比图 5 和 6 可知,能量弥散依据相位畸变的不同而出现不同的变化,通过大量实验数据得到图 7 的

相位畸变强度及畸变区域大小与能量弥散的响应关系。图 7 中 4 幅关系图从(a)~(d)依次是由不同能量弥散分析阈值计算出的关系图。图 7(a)中,能量弥散计算值过大,对于极小的数据差依然存在响应。在实际应用中,存在不可避免的电子噪声,并且难以全部通过滤波程序滤除,则能量弥散分析阈值不宜太小。图 7(d)中,当能量弥散阈值过大时,会有较多不识别的区域存在,降低了畸变识别的精度,且响应关系也出现异常。图 7(b)和(c)中,能量弥散响应关系良好,并且数据异常相对较少,识别精度没有下降。



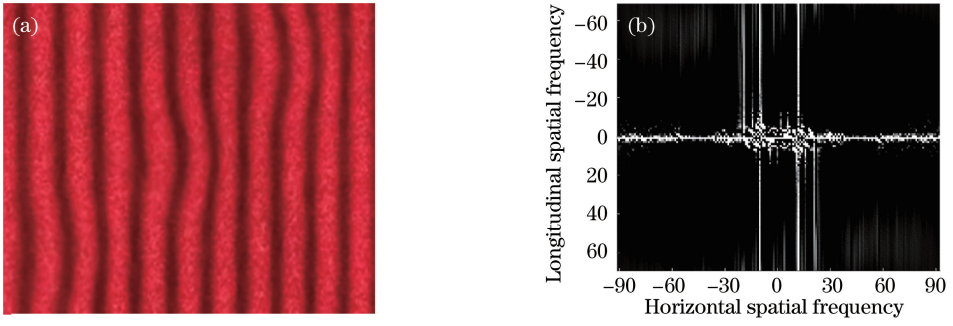


图 5 (a)实际相位畸变图样 1;(b)傅里叶移位变换图

Fig. 5 (a) Actual phase distortion pattern; (b) Fourier transform diagram

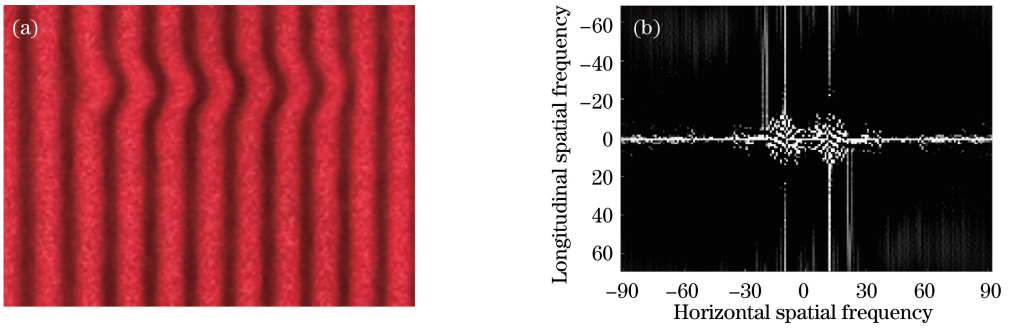


图 6 (a)实际相位畸变图样 2;(b)傅里叶移位变换图

Fig. 6 (a) Actual phase distortion pattern 2; (b) Fourier transform diagram

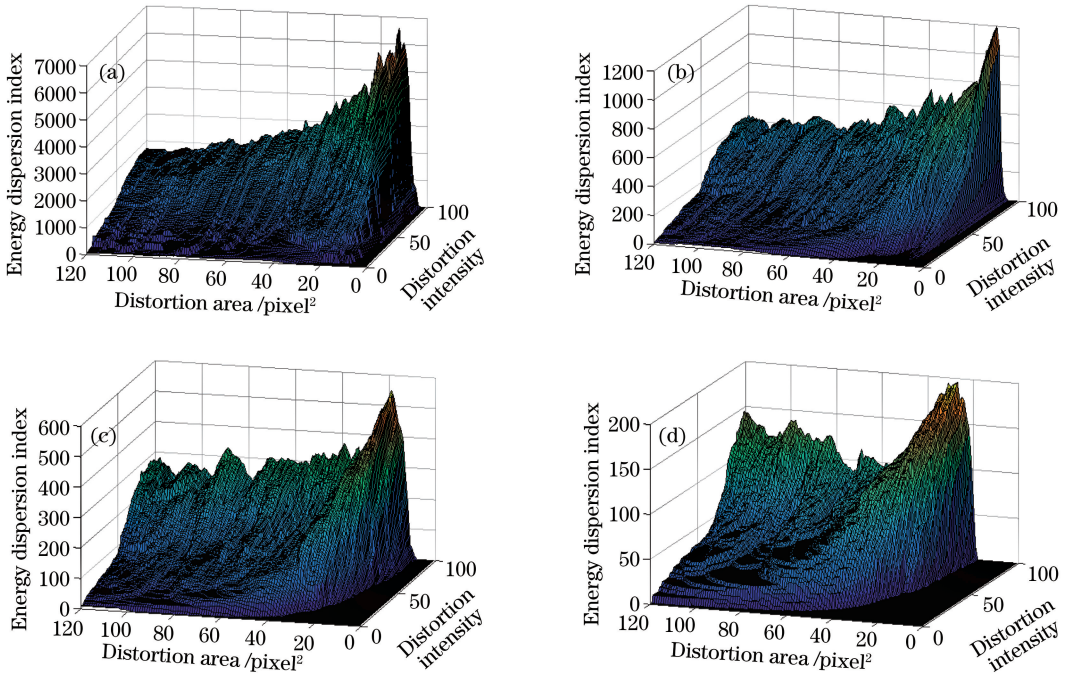


图 7 相位畸变与能量弥散响应图。(a)阈值为 1;(b)阈值为 5;(c)阈值为 10;(d)阈值为 30

Fig. 7 Phase distortion and energy dispersion response. (a) Threshold is 1; (b) threshold is 5;

(c) threshold is 10; (d) threshold is 30

## 4 结 论

基于小波滤波与傅里叶变换,提出了一种辨别干涉条纹相位畸变的方法。利用傅里叶变换将空域的条纹图像转化为条纹频域图像,找出傅里叶变换移位图中基频的所在位置,通过分析基频临近位置的能量分布,可以识别图像中相位是否出现畸变。仿真实验表明,该方法具有理论可行性。对实际条纹畸变识别实验数据进行分析,证明了该方法能够准确地分析出图像的相位是否出现畸变,识别灵敏度为 60 mrad。对畸变区域大小及畸变强度与能量弥散程度的相应关系作出详细分析,为工程应用和后续研究提供了数据支持。后续工作是完成相位矫正,并作出质量评价,得出矫正图像并进行准确的物体三维形貌恢复。

## 参 考 文 献

- [1] Lu M T, Su X Y, Cao Y P, *et al.* 3D shape reconstruction algorithms for modulation measuring profilometry with synchronous scanning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0308006.  
卢明腾, 苏显渝, 曹益平, 等. 同步扫描的调制度测量轮廓术三维面形重建算法[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0308006.
- [2] Zhang Q C, Su X Y. Research progress of dynamic three-dimensional shape measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010001.  
张启灿, 苏显渝. 动态三维面形测量的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010001.
- [3] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3D diffuse objects[J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [4] Huan H, Lu S, Zhang Y, *et al.* The design of high-speed data processing system of laser self-mixing interference signal base on FPGA [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(3): 188-191, 206.  
宦海, 卢松, 张雨, 等. 基于 FPGA 的激光自混合干涉信号高速数据处理系统设计[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(3): 188-191, 206.
- [5] Li Y, Ma K, Zhang Q C. Prior correction method of phase distortion in Fourier transform profilometry[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(1): 22-27.  
李岩, 麻珂, 张启灿. 傅里叶变换轮廓术中相位失真的预矫正方法[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(1): 22-27.
- [6] Bo E, Duan F J, Feng F, *et al.* A new phase stabilization method for interference fringe projection using sinusoidal phase modulation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(8): 27-32.  
伯恩, 段发阶, 冯帆, 等. 一种新的正弦相位调制干涉条纹相位稳定方法[J]. 光电工程, 2014, 41(8): 27-32.
- [7] Bo E, Duan F J, Feng F, *et al.* A phase stabilization method for fiber-optic interference fringes using sinusoidal phase modulating [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(10): 75-80.  
伯恩, 段发阶, 冯帆, 等. 一种正弦相位调制光纤干涉条纹相位稳定方法[J]. 光电工程, 2014, 41(10): 75-80.
- [8] Dong J, Deng G H, Li J W. Research on image transformation based on two-dimensional Fourier transform[J]. Fujian Computer, 2015, 31(9): 102-103.  
董健, 邓国辉, 李金武. 基于二维傅里叶变换实现图像变换的研究[J]. 福建电脑, 2015, 31(9): 102-103.
- [9] Goldberg R R, Hall P, Smithies F, *et al.* Fourier transforms[J]. Physics Today, 1961, 14(10): 52.
- [10] Chen H Y, Chen C, Peng B J, *et al.* Fourier analyses for fringe signals of fiber grating based on Mach-Zehnder interferometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 0906002.  
陈海云, 陈成, 彭保进, 等. 光纤光栅马赫-曾德干涉仪条纹信号的傅里叶分析[J]. 光子学报, 2016, 45(9): 0906002.
- [11] An P. Processing and analysis of regular interference fringe images [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2017.  
安平. 规则干涉条纹图像的处理与分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2017.
- [12] Auslander L, Grunbaum F A. The Fourier transform and the discrete Fourier transform [J]. Inverse Problems, 1989, 5(2): 149-164.
- [13] Feng F, Li C W. Simulation of atmospheric turbulence phase screen based on wavelet analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0101004.  
丰帆, 李常伟. 基于小波分析的大气湍流相位屏模拟[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0101004.
- [14] Bacchelli S, Papi S. Filtered wavelet thresholding methods[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2004, 164/165: 39-52.
- [15] Roberge D, Sheng Y L. Optical wavelet matched filter[J]. Applied Optics, 1994, 33(23): 5287-5293.

[16] Sun G D, Qin L A, Cheng Z, *et al.* Application of wavelet noise reduction for simulated signals of imaging lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090102.

孙国栋, 秦来安, 程知, 等. 小波去噪在成像激光雷达仿真信号中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090102.

[17] Wen J, Zhao J S, Wang C L, *et al.* Decomposition of interference hyperspectral images using improved morphological component analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(1): 254-258.

温佳, 赵军锁, 王彩玲, 等. 基于改进 MCA 的干涉高光谱图像分解[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(1): 254-258.