

doi: 10.3788/gzxb20184703.0312001

基于经验小波变换及核概率密度的物体表面变形测量

肖启阳¹, 李健¹, 吴思进², 杨连祥^{2,3}, 董明利², 曾周末¹

(1 天津大学 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

(2 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

(3 奥克兰大学 机械工程系, 罗切斯特 48309)

摘 要:采用 CCD 相机采集物体变形前后的散斑图片, 利用一维经验小波变换对散斑图片进行逐行分解, 获得一系列的固有分量. 根据分解后分量的核概率密度函数提出基于核概率密度的自适应降噪法, 去除噪声干扰, 提取跟变形信息相关的分量并重构, 利用重构后的每一行获得变形前后重构散斑图. 采用 Hilbert 法计算重构后散斑图的相位, 对变形前后散斑图相位进行相减, 根据相位差进行解包裹获得物体表面变形信息. 实验结果表明该方法能够有效地对物体表面变形进行测量, 且测量精度较经验模态分解提高 4 倍.

关键词:数字散斑干涉; 相位提取; 经验小波变换; 表面变形; 核概率密度估计

中图分类号: TH744.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)03-0312001-10

Measurement of Objects Surface Deformation Using EWT and Kernel Probability Density

XIAO Qi-yang¹, LI Jian¹, WU Si-jin², YANG Lian-xiang^{2,3}, DONG Ming-li², ZENG Zhou-mo¹

(1 State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Science and
Technology University, Beijing 100192, China)

(3 Department of Mechanical Engineering, Oakland University, Rochester, MI 48309, USA)

Abstract: In order to accurately measure the surface deformation information, a surface deformation measurement method based on Empirical Wavelet Transform (EWT) and kernel probability density was proposed. Firstly, the CCD camera was used to collect the digital speckle pattern interferometry (DSPI) maps, the DSPI maps were decomposed to obtain a series of intrinsic components by EWT. According to the kernel probability density of the decomposed component, an adaptive de-noising method was proposed to extract the components with the deformation information, the components were reconstructed DSPI maps; Finally, using Hilbert method to calculate reconstructed DSPI phase, the DSPI phase before and after deformation was subtracted, and the surface deformation information was obtained by decoupling according to the phase difference. The experimental results showed that the method can effectively measure the object surface deformation, and the accuracy is improved by 4 times compared with the EMD method.

Key words: Digital speckle pattern interferometry; Phase retrieval; Empirical wavelet transform; Surface deformation; Kernel probability density

OCIS Codes: 120.5050; 350.4600; 140.3295; 120.4290; 120.6165

基金项目: 国家自然科学基金(No.61374219), 天津市项目(No.15JCZDJC39200)和国家重点研究发展计划(No.2016YFF0101802)资助

第一作者: 肖启阳(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无损测量. Email: yisuoyanyu058@126.com

导师(通讯作者): 李健(1974—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为无损测量. Email: tjupipe@tju.edu.cn

收稿日期: 2017-09-25; 录用日期: 2017-11-24

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近年来,随着航空航天的发展,各种复合材料获得广泛应用.然而,这些复合材料在加工制造和服役过程中由于变形、位移等缺陷导致构件性能显著下降,减少服役时间^[1-2].为此,需要对这些复合材料进行检测及评估,为后续抢修提供方案,保障航空航天设备的健康运行.研究表明,当被相干光照射的物体表面发生形变或者位移时,物面的形变就转化为成像面上散斑的相位变化,即散斑干涉^[3-4].数字散斑干涉是一种非接触式全场测量技术,它可以对复合材料的位移、形变、表面缺陷等进行测量^[5-6].利用变形前后的相位变化可以获得物体表面变形信息^[7],因此,如何从散斑图中提取高质量相位信息是数字散斑干涉技术的重点研究内容.目前相位提取方法主要分为两类:单幅散斑图相位提取;多幅散斑图相位提取^[8-9].与多幅散斑图相位提取方法相比,基于单幅散斑相位提取方法只需要采集变形前后两幅图片,受环境扰动小,更适用于动态测量.

针对单幅散斑相位提取方法,国内外学者做了不少研究工作,包括傅里叶变换法^[10]、小波变换^[11]、经验模态分解等^[12].传统傅里叶变换和小波变换法由于不具有自适应性而不能获取准确相位信息.经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)是经典的非平稳信号处理方法,它可以将一个复杂的多分量信号自适应地分解为若干个模态分量(Intrinsic Mode Function, IMF)之和,利用 IMF 计算其瞬时频率和瞬时幅值^[11-12].由于 EMD 分解过程中完全基于信号本身特性,无需人为选择基函数,因此获得广泛应用.但该方法也存在一些缺点,如模态混叠、缺乏理论支撑等^[13-14].Gilles 等人在 EMD 分解基础上提出一种新的自适应信号分解方法——经验小波变换(Empirical Wavelet Transform, EWT)^[15-16].该方法自适应地对信号的傅里叶谱进行分割,通过构造正交小波滤波器组获取具有紧支撑傅里叶谱的单分量信号^[17].与 EMD 分解相比, EWT 是在小波框架内对信号进行处理,因此, EWT 理论充分,分解过程中避免 EMD 方法产生的模态混叠现象,可以提取信号的固有模态,进而得到精确的相位信息.

本文将 EWT 引入散斑干涉领域对采集的散斑图片进行处理,并提出基于核概率密度的自适应降噪法滤除散斑图片中的噪声,采用 EWT 及 Hilbert 计算物体变形前后散斑图的相位.

1 经验小波变换

1.1 EWT 基本原理

经验小波分解方法是 Gilles 等人于 2013 年提出的一种新的自适应信号处理方法,该方法是通过将信号的频谱自适应分割,构造合适的正交小波滤波器组以提取具有紧支撑傅里叶频谱的调频调幅成分来实现信号的分解^[16-17].任意信号 $f(t)$ 可以写成

$$f(t) = \sum_{k=0}^N f_k(t) \quad (1)$$

式中 $f_k(t)$ 为分解后的分量, $f_k(t)$ 被定义为调频调幅信号.

为了对信号进行分解, Gilles 利用 Meyer 小波的重构方法获得经验尺度函数 $\hat{\phi}_n(\omega)$ 和经验小波函数 $\hat{\psi}_n(\omega)$, 然后通过 Fourier 谱自适应分割选取合适的滤波器组, 并采用传统的小波变换来构造 EWT. 重构后的原信号数学表达式为

$$f(t) = W_f^e(0, t) * \phi_1(t) + \sum_{n=1}^N W_f^e(n, t) * \psi_n(t) = F^{-1} [\hat{W}_f^e(0, \omega) \hat{\phi}_1(\omega) + \sum_{n=1}^N \hat{W}_f^e(n, \omega) * \hat{\psi}_n(\omega)] \quad (2)$$

式中 $W_f^e(0, t)$ 和 $W_f^e(n, t)$ 为权值系数, 他们的 Fourier 变换为 $\hat{W}_f^e(0, \omega)$ 和 $\hat{W}_f^e(n, \omega)$, 由此可得调频调幅信号 $f_k(t)$ 的数学表达式为

$$f_0(t) = W_f^e(0, t) * \phi_1(t) \quad (3)$$

$$f_k(t) = W_f^e(k, t) * \psi_k(t) \quad (4)$$

通过经验小波变换实现复杂信号的自适应分解, 获取一系列的调频调幅分量, 然后这些分量处理获得瞬时频率和瞬时幅值.

1.2 仿真信号分析

为了验证算法的有效性, 采用仿真信号进行分析, 仿真信号的数学表达式为

$$\begin{cases} f_1(t) = 6t^2 \\ f_2(t) = \cos(10\pi t + 10\pi t^2) \\ f_3(t) = \begin{cases} \cos(80\pi t - 15\pi) & t > 0.5 \\ \cos(60\pi t) & \text{else} \end{cases} \\ f(t) = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $f_3(t)$ 分别表示三个不同频率的成分; $f(t)$ 表示前三个信号的混合信号. 分别采用 EMD 方法和 EWT 方法对仿真信号进行处理, 仿真信号及其频谱如图 1 和图 2. EWT 和 EMD 分解结果如图 3 和图 4.

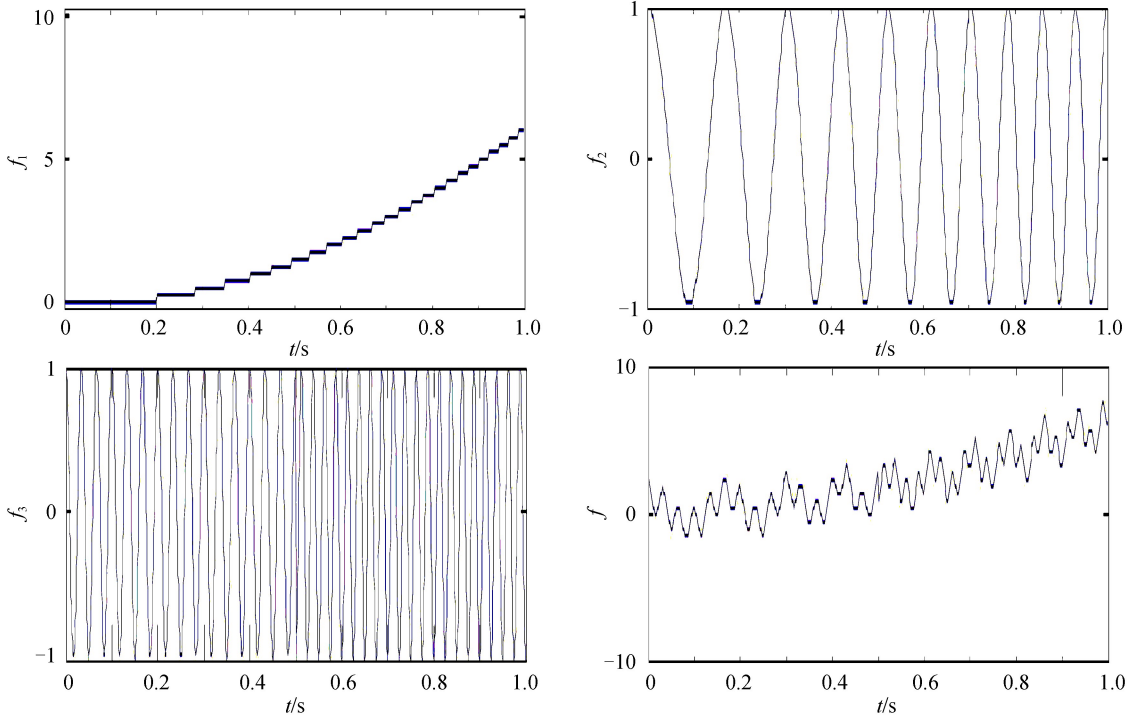


图 1 仿真信号及其各组成成分

Fig.1 Simulated signal with three components

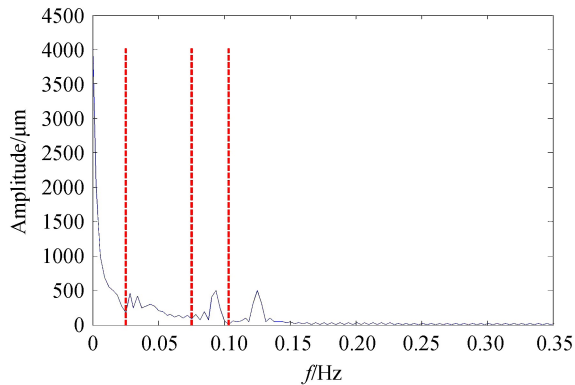


图 2 仿真信号频谱图及支撑边界

Fig.2 Spectrum and support boundary of simulated signal

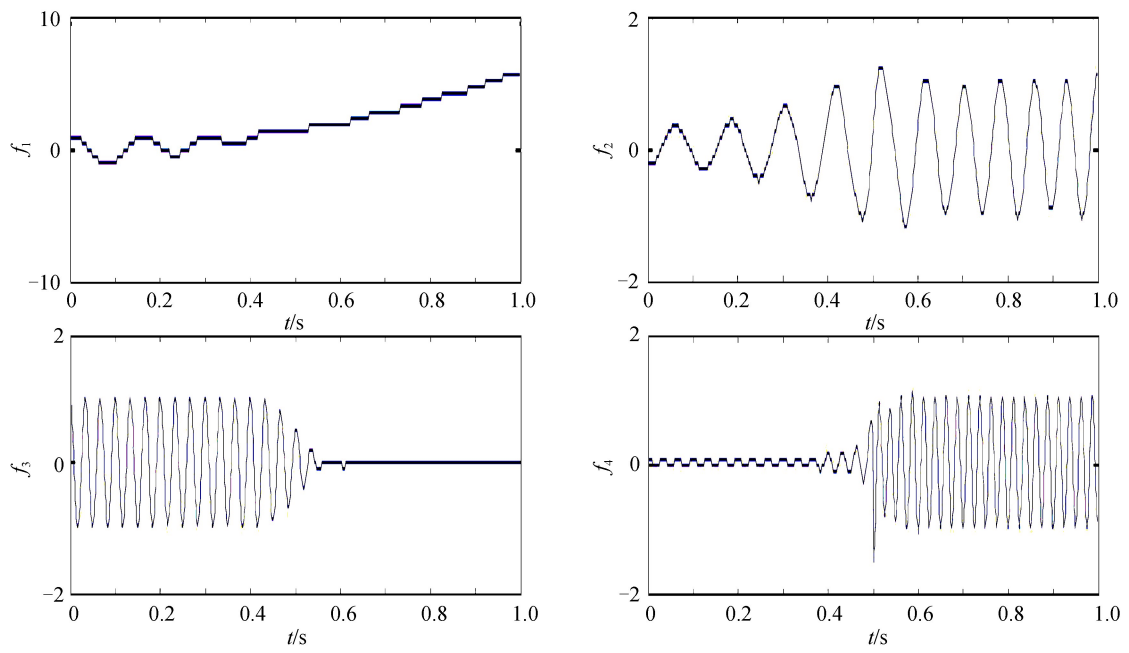


图3 仿真信号 EWT 分解结果
Fig.3 EWT result of simulated signal

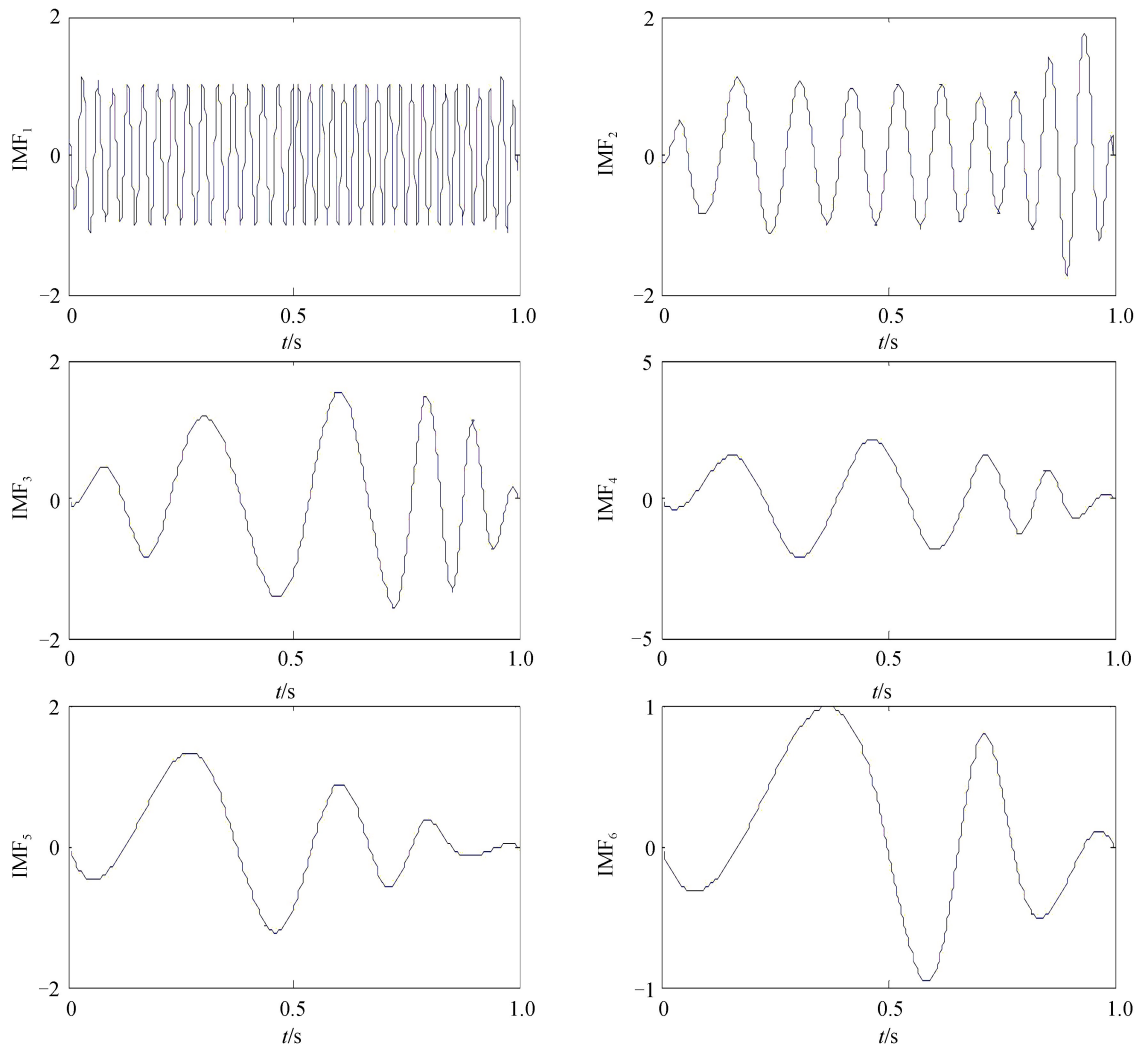


图4 仿真信号 EMD 分解结果
Fig.4 EMD result of simulated signal

观察图 1~图 4,图 3 中 EWT 将同一信号中的两个不同频率都分离出来,因为频率不同、能量不同,可被看成不同的模式;而图 4 的经验模式分解未能分解开,且出现冗余信息和虚假信息.由此可得,与 EMD 分解方法相比,EWT 能有效地对信号进行分解,准确地分离出不同的频谱的分量.

2 EWT 自适应降噪原理

CCD 相机采集的散斑图片中包含有背景光和噪声,这些背景光和噪声常常干扰相位提取,导致相位特征不明显.因此,为了准确提取相位信息,需要对经 EWT 分解后的分量进行处理,降低噪声干扰,提高信噪比^[15].研究表明一维信号的幅值包含信号的特征信息,通过分析幅值特性可以提取主要相关分量,去除噪声干扰^[18].概率密度函数可以用来对一维信号的幅值进行统计,根据统计特性区分噪声分量.为此,本文结合 EWT 和概率密度函数提出 EWT 自适应降噪法.首先对采集的图片逐行进行 EWT 分解,对每行分解的分量进行处理,获得概率密度函数,算法具体步骤为:

1)对每行分解的分量 $\{X_i, i=1\dots n\}$,计算它的概率密度函数 $\hat{f}_h(x)$,即

$$\mu_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_{nk}^A \hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k \left(\frac{x-x_i}{h} \right) \quad (6)$$

式中 $k(\cdot)$ 为高斯核函数, h 为带宽,为防止过大的方差和偏差,通常带宽 h 取变量 x 预测置信区间的 0.15 倍^[17].

2)计算原信号 $x(t)$ 和经 EWT 分解后分量 $\{X_i, i=1\dots n\}$ 的概率密度函数,即

$$P = \text{PDF}(X(t)) \quad (7)$$

$$Q_k = \text{PDF}(f_k(t)) \quad (8)$$

式中 P 和 Q 分别为概率密度函数, k 为分解后的分量个数.

3)计算两个概率密度函数的距离 $L(k)$,即

$$L(k) = \text{dist}(\text{PDF}(x(t)), \text{PDF}(f_k(t))) \quad (9)$$

$$L(k) = \|P - Q\|_2 = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (P(z) - Q(z))^2 dz} \quad (10)$$

4)根据距离选取无噪声分量.

$$N_{\text{th}} = \underset{1 \leq k \leq K}{\text{argmax}} \{L(k)\} \quad (11)$$

由式(11)可得前 $N_{\text{th}} - 1$ 分量为无噪声分量,其余为噪声分量.

3 相位提取

希尔伯特变换在信号处理领域获得广泛应用,它可以将信号在频域实现 90° 相移^[19].对于任意信号 $I(x, y)$ 表达式为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + \phi_0] \quad (12)$$

经过希尔伯特变换后为 $C(x, y)$,其数学表达式为

$$C(x, y) = H[I(x, y)] \quad (13)$$

由此可得散斑图的相位 $\phi(x, y)$ 的数学表达式为

$$\phi(x, y) = \arctan\{\text{Im}[C(x, y)]/\text{Re}[C(x, y)]\} \quad (14)$$

式中 $\text{Re}[C(x, y)]$ 和 $\text{Im}[C(x, y)]$ 分别为 $C(x, y)$ 的实部和虚部.

同理可得散斑变形前后的相位 Δ 为

$$\Delta = \phi_1(x, y) - \phi_0(x, y) \quad (15)$$

式中 $\phi_1(x, y)$ 和 $\phi_0(x, y)$ 分别为变形前后散斑图的相位,根据相位 Δ 可以获得物体的变形信息.

利用反正切函数获得的相位处于 $(-\pi, \pi)$ 之间,实际中的相位是连续分布的,为此,文中采用质量导向相位解包裹算法对相位进行解包裹,获得实际相位信息.

4 实验结果与分析

搭建数字散斑干涉测量系统,数字相机采用日本的 SENTECH 生产的 STC-CL152A,相机的 CCD 靶面

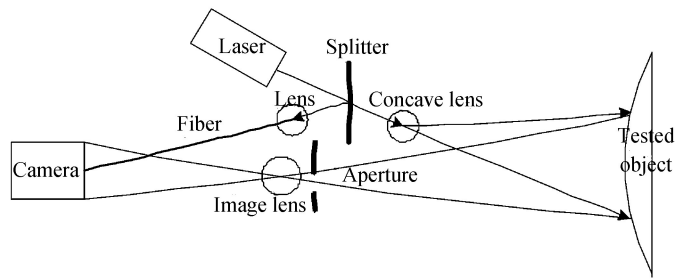


图 5 物体变形测量光路原理图

Fig.5 Schematic of object deformation measurement

尺寸为1.27 cm(1/2 英寸), $h \times v = 6.4 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$, 成像镜头采用日本腾龙公司的焦距 f 为8 mm的镜头(镜头规格为 2/3 英寸)即可实现测量,光源采用一个波长为 532 nm 的单纵模绿光激光器,圆盘被测面板的材料是铜片.物体变形测量光路如图 5,被测量的物体如图 6.

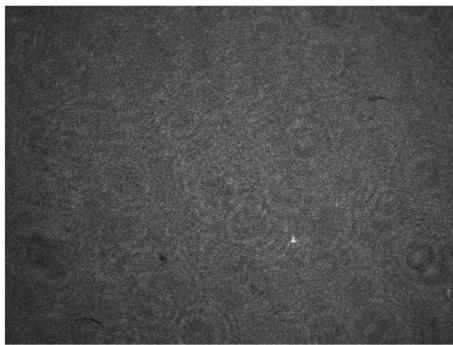
利用 CCD 相机采集铜片变形前的干涉散斑图,然后对被测铜片施加精确的变形力,使其发生变形,打开光源,利用 CCD 相机采集铜片变形后的干涉散斑图,变形前后的散斑图为图 7.

采用一维 EWT 法对散斑图片进行逐行处理,以铜片变形前的散斑图为例,取散斑图的每一行进行分解,散斑图的某一行时域图如图 8,分解结果如图 9.



图 6 被测量的圆盘

Fig.6 Tested object



(a) Before



(b) After

图 7 铜片变形前后的散斑图

Fig.7 Specklegram before and after deformation

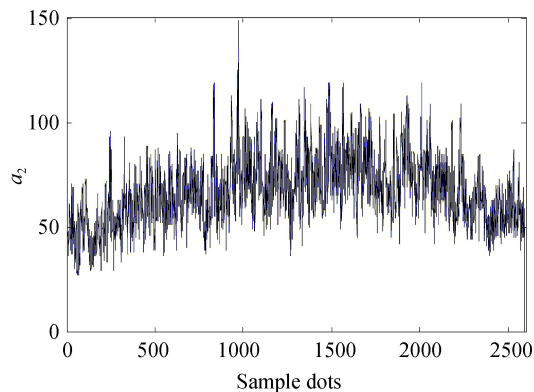


图 8 散斑图的时域图

Fig.8 Time domain of specklegram

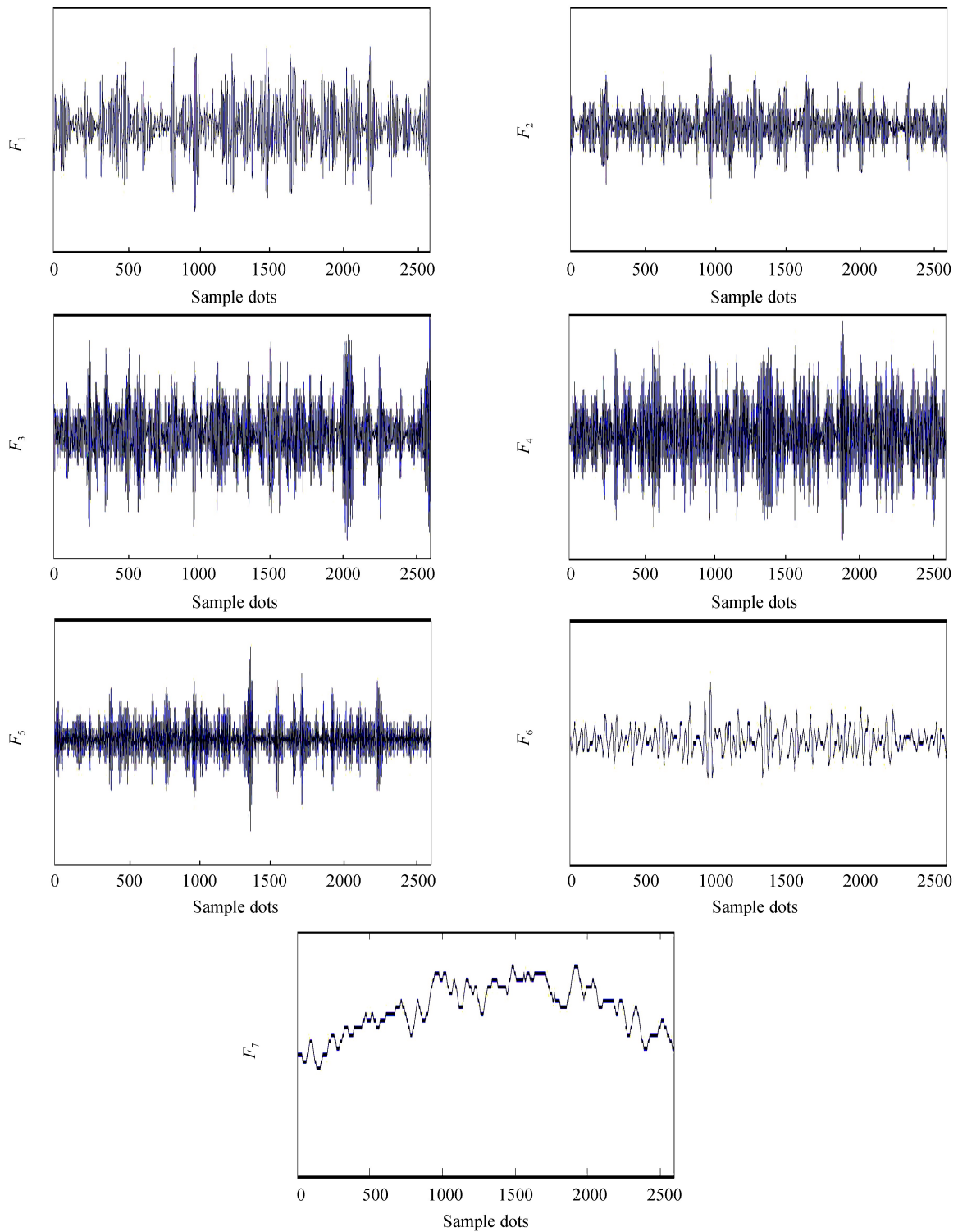


图9 EWT 分解结果

Fig.9 The result of EWT

计算每行分解后分量的概率密度,并根据概率密度计算分解后分量与原信号的概率密度距离,结果如图10所示.分析图10可得,不同分量的概率密度距离最大值为第三个分量,因此选取前三个分量进行重构,获得重构后时域信号,再对每一行重构后的时域信号进行相加获得重构后的散斑图,图11为变形前后重构的散斑图.

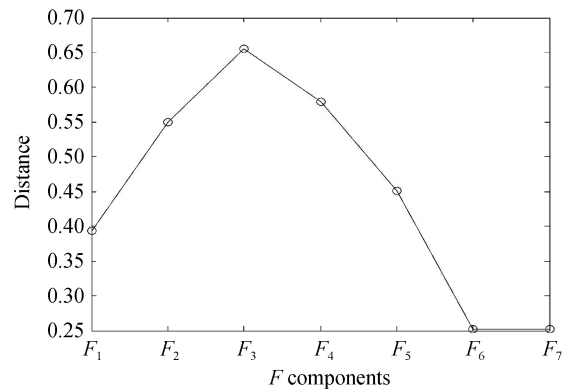
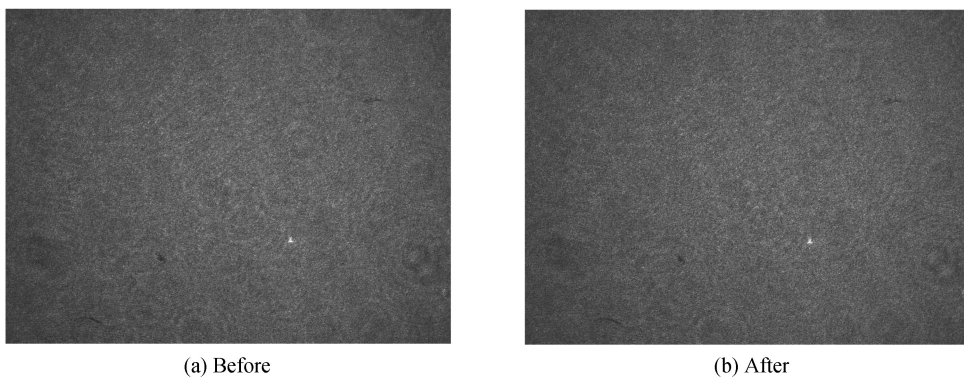


图 10 不同分量的概率密度距离

Fig.10 PDF distance between different components



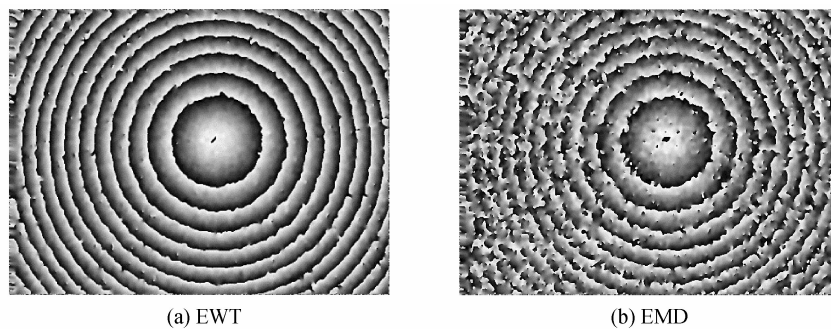
(a) Before

(b) After

图 11 变形前后重构的散斑图

Fig.11 Reconstructed specklegram before and after deformation

利用希尔伯特法计算变形前后重构的散斑图相位,并对变形前后相位进行相减,得到变形相位图,为了对比,分别采用 EWT 和 EMD 计算相位信息,结果如图 12 所示.



(a) EWT

(b) EMD

图 12 散斑变形相位图

Fig.12 Deformation phase map

分析图 12 可得,采用一维 EMD 对散斑图进行处理,由于 EMD 分解过程中存在模态混叠现象,无法分解出正确的分量,因此,采用 EMD 计算的变形相位图对比度低、质量差;一维 EWT 在小波框架内对信号进行精确分解,提取出信号的固有模态分量,获得的变形相位图条纹质量较好,对比度高.利用变形相位图进行解包裹,计算物体三维变形信息,图 13 为两种方法计算的物体三维变形信息.

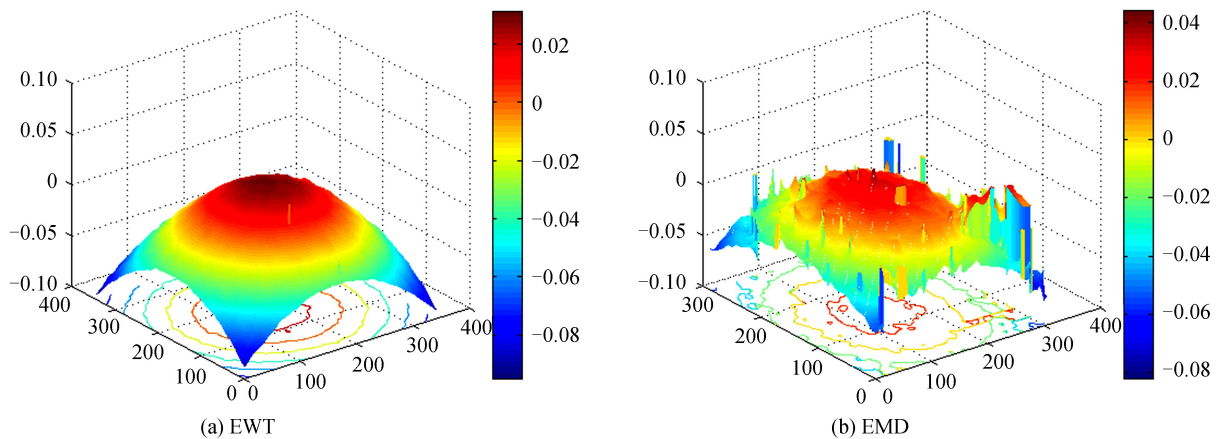


图 13 物体三维变形图

Fig.13 3D deformationmap

观察图 13 可得,被测物中心位置变形最大,变形量由中心向边缘逐渐减小,相对最大变形量约为 $0.1 \mu\text{m}$.与 EMD 方法相比,EWT 可以对散斑图进行精确分解,获取准确的相位信息,因此,得到的三维变形图对比度高,质量好.

5 结论

数字散斑测量过程中提取的相位精度低,导致测量误差大,为此,本文提出一种基于 EWT 及概率密度估计的散斑变形测量方法.该方法采用 EWT 对变形前后散斑图进行分解,分析分解后的分量,根据概率密度对散斑图进行自适应降噪,滤除噪声干扰,最后利用希尔伯特法计算降噪后散斑图的相位,提取散斑图相位信息.对 CCD 相机采集的变形圆盘图进行分析,该方法可以有效地降低噪声干扰,提高测量精度,且精度较 EMD 方法提高 4 倍.

参考文献

- [1] MA Bao-quan, ZHOU Zheng-gan. Progress and development trends of composite structure evaluation using noncontact nondestructive testing techniques in aviation and aerospace industries[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, **35**(7): 1787-1803.
马保全,周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势[J]. *航空学报*, 2014, **35**(7):1787-1803.
- [2] BALASKÓ M, SVÁB E, MOLNÁR G, *et al.* Classification of defects in honeycomb composite structure of helicopter rotor blades [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, **542**(1): 45-51.
- [3] ZHU Xin-jun, DENG Yao-hui, TANG Chen, *et al.* Variational mode decomposition for phase retrieval in fringe projection 3D shape measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(9): 2318-2324.
朱新军,邓耀辉,唐晨,等. 条纹投影三维形貌测量的变分模态分解相位提取[J]. *光学精密工程*, 2016, **24**(9):2318-2324.
- [4] XIONG Liu-dong, JIA Shu-hai, DU Yan-fen. Anovel algorithm for phase retrieval from a single carrier-frequency fringe pattern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 123-126.
熊六东,贾书海,杜艳芬. 单幅载频条纹图的相位恢复新算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1):123-126.
- [5] GUO Yuan, MAO Qi, CHENG Xiao-tian, *et al.* Applied research of dual-wavelength shearography for flaw detection of composite material[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0312001.
郭媛,毛琦,陈小天,等. 双波长剪切散斑干涉法在复合材料缺陷检测中的应用[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3): 0312001.
- [6] LI Xiang-yu, HUANG Zhan-hua, ZHANG Hao, *et al.* Phase analysis method based on Hilbert transform in dynamic speckle pattern interferometry[J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2015(6): 1111-1117.
李翔宇,黄战华,张昊,等. 动态散斑相位的希尔伯特变换分析方法[J]. *光电子·激光*, 2015(6):1111-1117.
- [7] SUN Hai-bin, SUN Ping. Out-of-planedisplacement measurement using optical vortex Phase Shifting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(11): 1112001.
孙海滨,孙平. 基于光学涡旋相移技术的离面位移测量[J]. *光子学报*, 2016, **45**(11):1112001.
- [8] ZHU Meng, LI Xiang-Yu, HUANAG Zhan-hua, *et al.* Dynamic deformation measurement using speckle shearography with carrier frequency generated by double-aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(7): 1701-1706.
朱猛,李翔宇,黄战华,等. 双孔载频剪切散斑干涉法测量表面动态形变[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(7):1701-1706.

-
- [9] ZUO C, CHEN Q, GU G, *et al.* High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(17): 19493-19510.
- [10] ZUO C, SUN J, CHEN Q. Adaptive step-size strategy for noise-robust Fourier ptychographic microscopy[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(18): 20724-20744.
- [11] ZHOU X, YANG T, ZOU H, *et al.* Multivariate empirical mode decomposition approach for adaptive denoising of fringe patterns[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 1904-1906.
- [12] SUN J D, XIAO Q Y, WEN J T, *et al.* Natural gas pipeline leak aperture identification and location based on local mean decomposition analysis[J]. *Measurement*, 2016, **79**: 147-157.
- [13] BEGUM D, SARP E. Empirical mode decomposition of hyper spectral images for support vector machine classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(11): 4071-4084
- [14] XIAO Q Y, LI J, BAI I L, *et al.* A small leak detection method based on VMD adaptive do-noising and ambiguity correlation classification intended for natural gas pipelines[J]. *Sensors*, 2016, **16**(12): 1-16.
- [15] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, **61**(16): 3999-4010.
- [16] KUMAR R, SAINI I. Empirical wavelet transforms based ECG signal compression[J]. *IETE Journal of Research*, 2014, **60**(6): 423-431.
- [17] LI Zhi-nong, ZHU Ming, CHU Fu-lei, *et al.* Mechanical fault diagnosis method based on empirical wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, **35**(11): 2423-2432.
李志农, 朱明, 褚福磊, 等. 基于经验小波变换的机械故障诊断方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, **35**(11): 2423-2432.
- [18] NGUYEN P, KANG M, KIM J M, *et al.* Robust condition monitoring of rolling element bearings using de-noising and envelope analysis with signal decomposition techniques[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, **42**(22): 9024-9032.
- [19] TRUSIAK M, PATORSKI K, WIELGUS M. Adaptive enhancement of optical fringe patterns by selective reconstruction using FABEMD algorithm and Hilbert spiral transform [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(21): 23463-23479.