

基于小波变换的激光干涉微位移变化量测量方法

李建欣 崔艳军 朱日宏 何勇

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 为了克服传统快速傅里叶频谱分析方法不适用于非平稳信号的缺点, 实现基于全光纤激光干涉微位移信号变化量的精确测量, 研究了基于连续小波变换(CWT)非平稳信号分析的相位解调算法。分析了在信号的频带上如何利用小波脊提取数字信号的瞬时特征, 并在提取的特征基础上, 得到小波脊的相位, 完成对信号相位的提取, 进而得到物体的位移信息。根据处理方法, 进行了理论分析、计算机模拟和相关的验证性实验, 对采集的位移干涉信号进行处理得到待测位移量, 并与傅里叶变换相位提取方法的测试结果进行了比较分析, 证明该方法具有更高的精度, 对各种信号处理都具有很强的稳健性。实验结果表明此算法精确度高、复杂度低, 具有广泛的应用前景。

关键词 测量; 干涉; 微位移; 小波变换; 相位解调

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0808002

Micro-Displacement Variation Measurement by Using Laser Interference Based on Wavelet Transform

Li Jianxin Cui Yanjun Zhu Rihong He Yong

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract To overcome the shortcoming of traditional fast Fourier spectral analysis method that it can't be applied to the nonstationary signal and can not achieve precise measurement of the micro-displacement variation based on all-fiber laser interference, a discussion on the phase demodulation algorithm using the continuous wavelet transform (CWT) for non-stationary signal is presented. In the frequency domain of the digital signal, the transient characteristics extracting based on the wavelet ridge is analyzed, through which the phase of the wavelet ridge is received. And then the micro-displacement of the object is experimentally obtained. According to the proposed method, the theoretical analysis and the computer simulation are realized. Finally, the micro-displacement variation is obtained from the experimental interference signals by using the method. Comparing with traditional fast Fourier transform (FFT) method, the result of method is of higher accuracy. Experimental results show that the algorithm proposed is of high precision, low complexity, good robustness, and will have a broad prospect of application.

Key words measurement; interference; micro-displacement; wavelet transform; phase demodulating

OCIS codes 120.7280; 100.7410; 120.3180

1 引言

随着精密制造和光电子领域例如雷达声纳探测、语音信号处理、机械故障诊断、结构健康监测和损伤识别等的飞速发展及广泛应用, 机械运动部件相关参数的检测对微位移测量技术提出了高精度、实时性的要求^[1,2]。目前, 微位移测量采用的方法主要有机械式测量、电气式测量和光学式测量三类; 机械式的测量方法抗干扰能力强, 但测量的频率范

围、动态范围和线性范围窄, 测量精度不高; 电测方法灵敏度高, 但难于绝缘处理, 易受电磁场干扰, 难以达到安全生产的目的; 光学测量方法精度高、频率范围广、电气绝缘、不会引起电网谐振, 是实现高精度振动测量的主要方法。激光干涉测量法是以激光干涉原理为基础进行测量的一种光学测量方法^[3-5], 与一般的光学测量方法相比, 激光干涉测量法具有更高的测试灵敏度和准确度, 因此在微位移

收稿日期: 2012-03-08; 收到修改稿日期: 2012-04-25

作者简介: 李建欣(1977—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光学精密测量方面的研究。E-mail: ljx@vip.163.com

测量领域得到了广泛的应用。

分析激光干涉测量法获取的微位移信号时,大多采用移相法和傅里叶变换的方法来进行解析。移相法至少要同时采集三组干涉信号,因此在测量动态信号时,需要至少三路探测器同时采集,大大增加了硬件的复杂程度;而傅里叶变换频谱分析在分析平稳信号时比较有优势,对于非平稳信号却不太适用,仅给出时域或者频域信息对于非平稳信号来说信息不够充分,时频分析更适用于非平稳信号的分析^[6]。于是进行了基于小波变换的微位移干涉信号时频分析,具体方法是利用一维连续小波变换(CWT)对微位移信号进行时频分解,通过找出小波脊所在的相位,得到位移信号的相位^[7~13]。本文研究了一种基于小波变换的激光干涉微位移变化量测量仪,该测量仪可以从干涉信号中提取数字信号的瞬时特征,利用小波脊的相位信息得到干涉信号的相位提取,实现高精度微位移测量。

2 干涉微位移测量原理

2.1 测量系统结构

激光干涉微位移变化量测量系统的硬件部分主要包括激光器、隔离器、2×2 光纤耦合器、光纤自准直器、分光棱镜、参考光路角锥棱镜、测试光路角锥棱镜、探测器件等。激光器发出的光经过光纤耦合器,在光纤准直器的出射端被分光棱镜分为两路:测试光和参考光,被测物的微小位移引起被测镜反射光与参考镜反射光之间的光程差,两路光在接收端发生干涉,系统原理的示意图如图 1 所示,其光路部分是一台迈克耳孙干涉仪。

当被测物动态移动时,在探测器端接收到的干

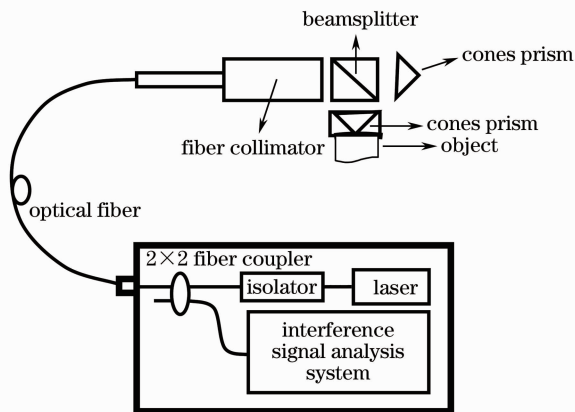


图 1 微位移变化量测量系统原理示意图

Fig. 1 Principle of micro displacement measurement system

涉信号为

$$I(t) = A(t) + B(t)\cos[\phi_0 + \Delta\phi(t)], \quad (1)$$

式中 $A(t)$ 为背景光强, $B(t)$ 为调制度, ϕ_0 为初始相位, $\Delta\phi(t)$ 为微位移变化引起的相位变化量, 而微位移的变化量 $\Delta L(t)$ 与相位的变化量之间的关系为

$$\Delta\phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta L(t). \quad (2)$$

由原理可知,要求得物体微位移变化量,关键在于解出干涉信号随时间变化的相位值。

2.2 小波变换解调方法

采取小波变换的方法来完成微位移干涉信号的解调,其基本思想是:利用一维连续小波变换对微位移干涉信号进行时频分解,通过找出小波脊所在的相位,得到位移信号的相位,从而实现对待测物微位移变化量的测量。

连续小波变换是一种线性变换,为信号与小波母函数的内积。设母小波为 $\psi(t)$, $\psi(t)$ 经伸缩和平移后得到一个子小波序列:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (3)$$

式中 a 为伸缩因子, b 为平移因子。这里采用在空域和频域都具有很好的局部化性能的 Morlet 复小波作为母函数进行分析,其定义为

$$\psi(t) = \frac{1}{(f_b^2\pi)^{1/4}}\exp(2\pi i f_c t)\exp\left(\frac{-t^2}{2f_b^2}\right), \quad (4)$$

式中 f_b 为母小波的包络宽度, f_c 为小波中心频率。一个信号 $f(t) \in L^2$ 经连续小波变换为

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(x)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dx, \quad (5)$$

式中 $\psi^*(\cdot)$ 表示 $\psi(\cdot)$ 的复数共轭。式中不但 x 是连续变量,尺度因子 a 和平移因子 b 也是连续变量。

一维函数 $f(t)$ 的连续小波变换定义式(5)式描述了该函数与小波序列的内积关系,反映了该函数与小波序列函数的相似程度。因此函数 $f(t)$ 的连续小波变换可以理解为将其和小波函数进行比较的结果,幅值 $a_r(b)$ 和小波变换的相位 $\phi(b)$ 综合反映了它们的相似程度。当函数的局部频率与相应尺度的小波函数振荡频率相同或者相近时,其小波变换系数也就是幅值相应较大;相反,当函数的局部频率与相应尺度的小波函数振荡频率相差较大时,幅值相应较小。其中,在各个位置沿尺度轴方向上,小波变换幅值的最大值位置的连线即为小波变换的脊,当小波尺度 a 满足条件

$$a = a_r(b) = \frac{f_c}{\phi(b)} \quad (6)$$

时,小波系数模取得局部极大值,相应的点 $[b, a_r(b)]$ 称为小波脊点。连接时间-尺度平面上相应脊点构成小波脊线。小波脊线所对应的 a 就是最佳尺度。信号的能量主要集中在小波脊线附近,利用模极大值算法提取出小波脊,便得到脊线上的相位:

$$\varphi(a, b) = \arctan \left[\frac{\text{Im } W_f(a, b)}{\text{Re } W_f(a, b)} \right], \quad (7)$$

式中 $\text{Im } W_f(a, b)$ 和 $\text{Re } W_f(a, b)$ 分别指的是小波变换的虚部和实部。找出小波脊所在的相位,也即得到微位移干涉信号的相位,通过表示式

$$\varphi = \frac{4\pi\Delta L}{\lambda} \quad (8)$$

可计算出微位移的变化量为

$$\Delta L = \frac{\lambda\varphi}{4\pi}. \quad (9)$$

3 仿真与实验分析

3.1 原理仿真

为了验证上述方法的有效性及正确性,对有噪声的干涉信号分别用小波变换方法和傅里叶变换方法进行了相应的数值模拟^[8]。模拟光强信号的获取为

$$I(t) = A(t) + B(t)\cos \Delta\phi(t), \quad (10)$$

取背景光强 $A(t)$ 和调制度 $B(t)$ 分别为1,信号包括512个采样点,如图2所示。其中,取相位变化量 $\Delta\phi(t)$ 为

$$\Delta\phi(t) = 2\pi(10t^2 + 20t^3). \quad (11)$$

在模拟光强信号 $I(t)$ 上加以噪声,初始相位 $\Delta\phi(t)$ 以及加噪后的光强信号 $I(t)$ 的曲线分别如图2、3所示。

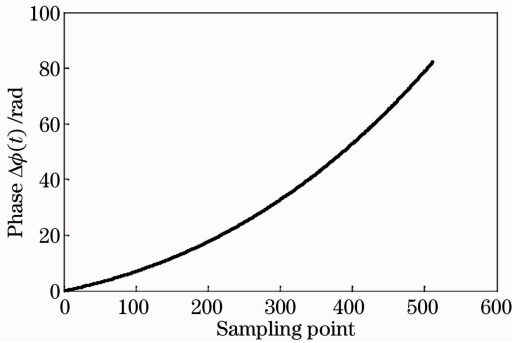


图2 初始相位 $\Delta\phi(t)$

Fig. 2 Original phase $\Delta\phi(t)$

由于噪声及边界效应对光强信号的小波变换会引起较大影响,因此对光强信号进行展宽延拓,处理

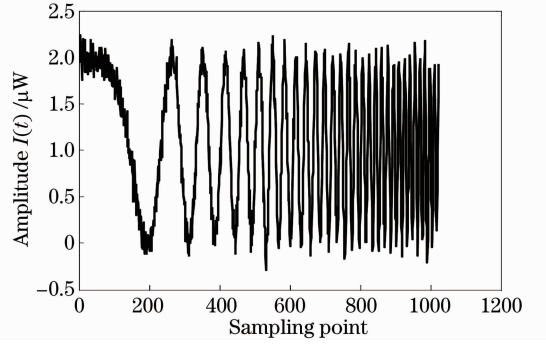


图3 光强信号 $I(t)$

Fig. 3 Original signal $I(t)$

包含初始光强信号在内的1024 pixel点,以消除边界效应,延拓后信号如图4所示。用Morlet复小波分析对上述模拟信号进行一维连续小波变换,得到小波系数的模值分布,如图5所示。

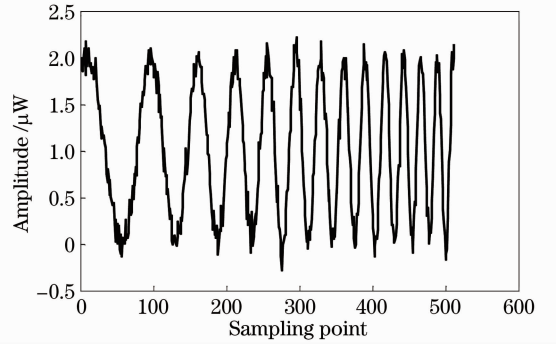


图4 延拓后的光强信号

Fig. 4 Signal after extension

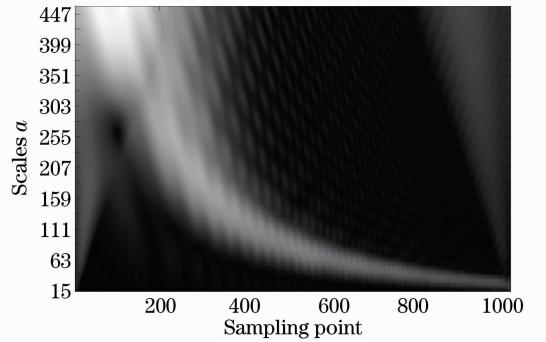


图5 复小波变换系数模值分布

Fig. 5 Modulus distribution of wavelet transform

图5中,灰度越亮表示小波变换系数模的幅值越大,越暗表示小波系数模的幅值越小。利用模极大值算法提取小波变换幅值的最大值,其连线即为小波脊,得出了小波脊所在的相位,便得到干涉信号的压包相位,如图6所示。对压包相位解包裹,得到如图7所示的真实相位 $\Delta\phi(t)$ 。

从延拓光强信号小波分析后得到的相位中截取原始信号的对应该相位 $\Delta\phi(t)$,如图8所示。将小波

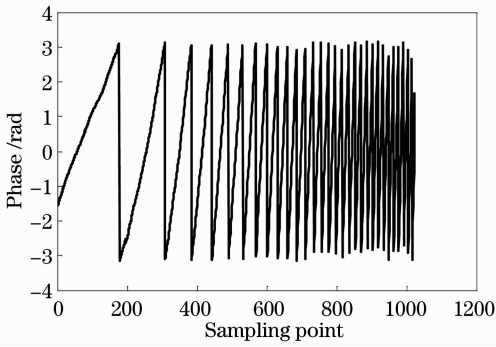


图 6 压包相位

Fig. 6 Wrapped phase

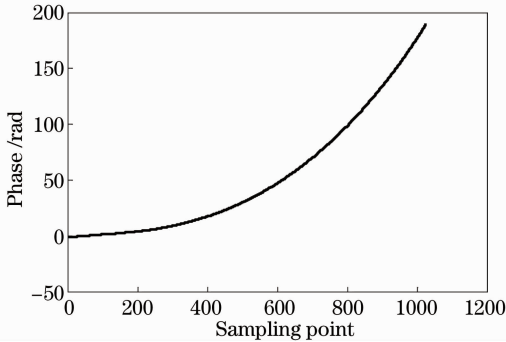


图 7 解包相位

Fig. 7 Unwrapped phase

分析重构的相位与原始相位进行对比分析,得到如图 9 所示的误差。

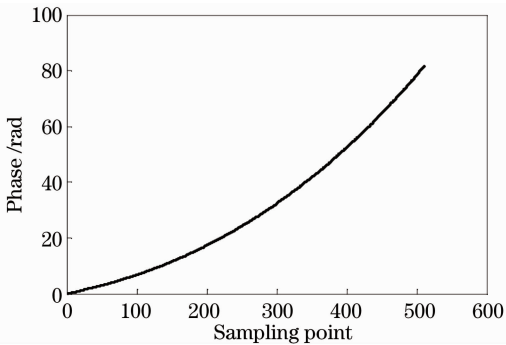


图 8 小波变换后重构的 $\Delta\phi(t)$

Fig. 8 Reconstructed phase $\Delta\phi(t)$ after wavelet transform

由于信号 $I(t)$ 存在一定的噪声,用传统傅里叶变换分析法恢复出的相位分布在边缘和噪声较大区域会有较大的误差。传统傅里叶变换分析法恢复出的相位和误差分布分别如图 10 和 11 所示。

由图 8、9 可以看出,幅度在 $[0, 90]$ 区间内的相位 $\Delta\phi(t)$ 经小波分析重构后,原始相位和小波分析重构之后的相位间的误差能维持在信号幅值的 $\pm 0.2\%$ 范围内;而图 10 和 11 所示的傅里叶变换前后光强信号相位的差别达到 $\pm 0.67\%$,误差比小波

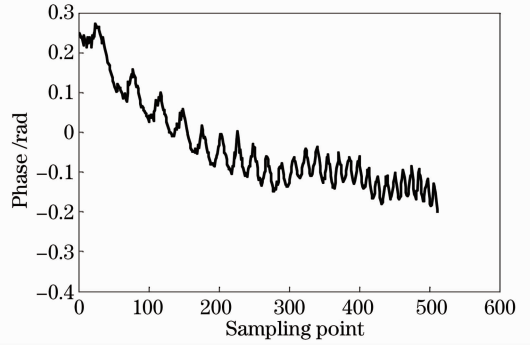


图 9 小波分析后 $\Delta\phi(t)$ 的误差

Fig. 9 Error of phase $\Delta\phi(t)$ after wavelet transform

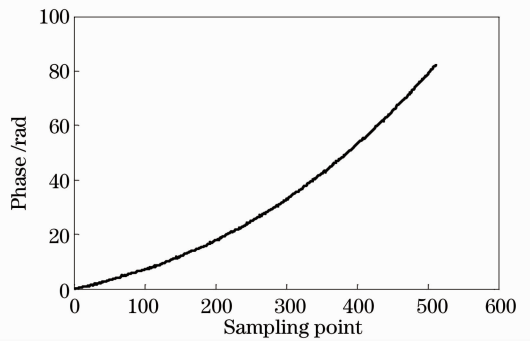


图 10 傅里叶变换后重构的 $\Delta\phi(t)$

Fig. 10 Reconstructed phase $\Delta\phi(t)$ after Fourier transform

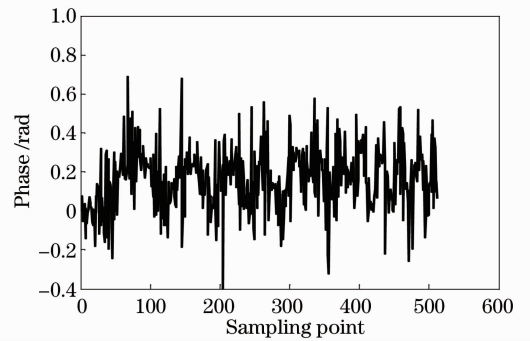


图 11 傅里叶分析后 $\Delta\phi(t)$ 的误差

Fig. 11 Error of phase $\Delta\phi(t)$ after Fourier transform 分析法大。通过小波分析重构相位和傅里叶变换重构相位的对比分析,充分说明了本算法的正确性及有效性。

3.2 实验与分析

为了验证算法的稳健性及实用性,进行了相应实验,搭建了如图 12 所示的实验系统。

图中,激光光源的中心波长为 1550 nm,最大光纤输出功率为 2 mW,隔离器的隔离度大于 35 dB。光纤准直器是直径 15 mm 的格林透镜,角锥棱镜直径为 15 mm。

移动微位移测量器件,使测试光路的角锥棱镜

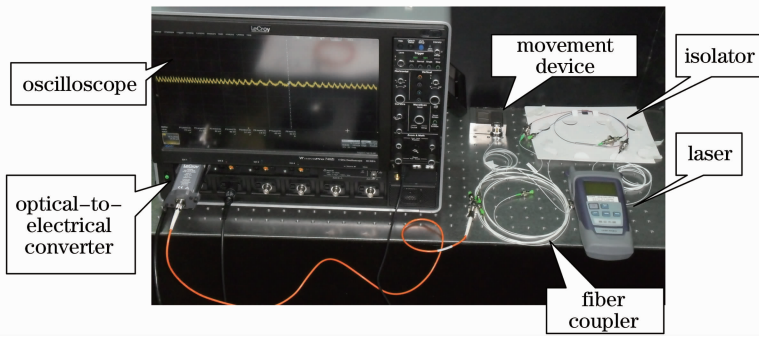


图 12 实验系统

Fig. 12 Experimental system

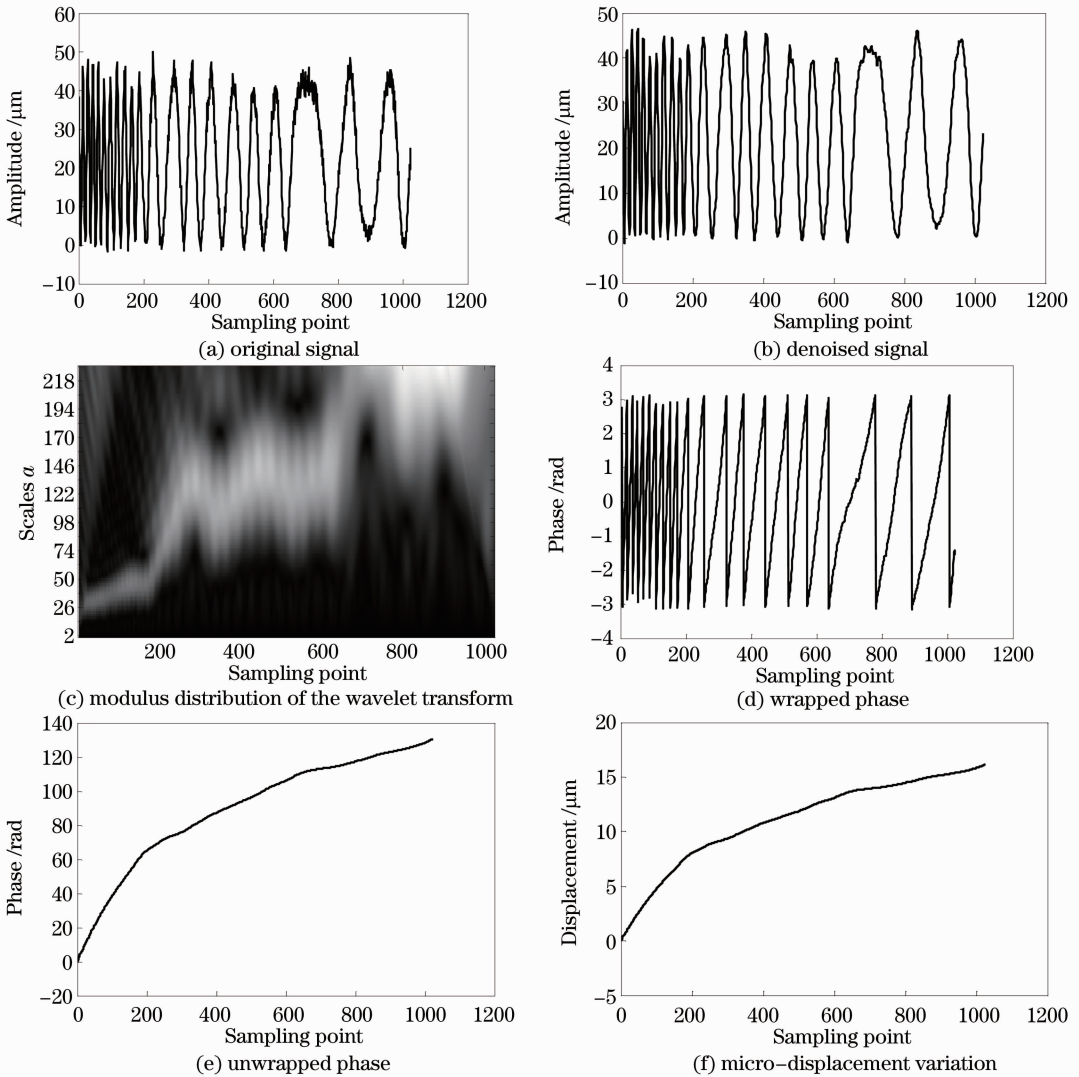


图 13 小波变换解调干涉微位移测量数据

Fig. 13 Interference signal analysis by wavelet transform

产生微位移,给测试光路和参考光路带来光程差,采集干涉信号,选取采样点,对该干涉信号进行处理,如图 13 所示。其中图 13(a)是探测器采集到的原始干涉信号,可见该信号存在比较严重的噪声影响;对图 13(a)中干涉信号进行降噪处理,减小了噪声

带来的影响,如图 13(b)所示;对降噪和延拓预处理后的信号进行 Morlet 复小波分析,产生的小波变换系数模值如图 13(c)所示;利用模极大值法提取小波脊,计算出其压包相位值,如图 13(d)所示;相位解包裹运算后,得到图 13(e)所示的真实相位;利用

(9)式得到微位移随时间的变化量如图 13(f)所示。

为了证明利用小波变化法对微位移干涉信号分析的准确性,对该干涉信号进行了傅里叶变换法相位提取的处理,傅里叶变换得到的微位移变化量如图 14 所示,并将其与小波分析法所得的结果比较如图 15 所示。

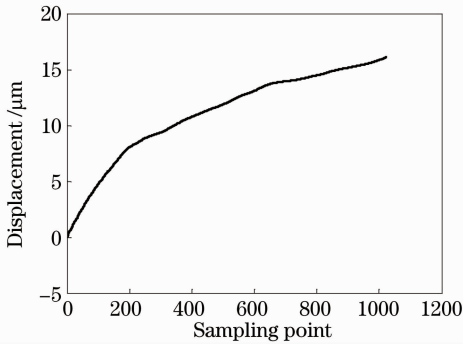


图 14 傅里叶变换法得出的微位移变化量
Fig. 14 Micro-displacement variation by Fourier transform

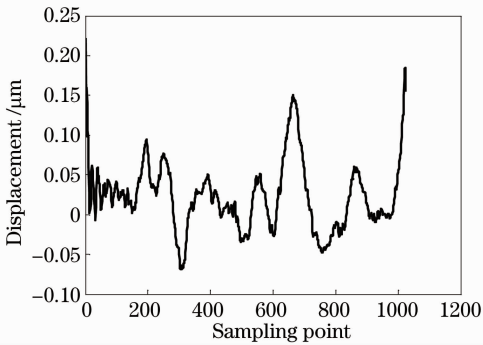


图 15 傅里叶变换法与小波分析法处理结果精度对比
Fig. 15 Accuracy comparison between wavelet transform and Fourier transform

可见,傅里叶变换得到的微位移变化量与小波分析法得到的结果存在着一定的差异,这是因为傅里叶变换法在处理非平稳信号的时候存在一定的局限性,而从干涉信号的连续小波变换成分中可以准确地得到待测信号,实现高精度微位移变化量测量。

4 结 论

本文研究了利用连续小波变换对非平稳干涉微位移信号进行分析的相位解调算法,针对这种方法进行了理论分析和计算机模拟,并与传统的傅里叶变换分析结果进行了对比分析,分析结果证明本文方法精度较高,验证了其可行性和准确性。最后通过实验表明本文方法克服了传统快速傅里叶频谱分析方法不适用于非平稳信号的缺点,在处理含较强

噪声的信号时都具有很强的稳健性,实验结果表明该算法精确度高、复杂度低,具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- Guotian He, Xiangzhao Wang. Real-time micro-vibration measurement in sinusoidal phase-modulating interferometry[J]. *Optik*, 2009, **120**(3): 101~105
- Xiangzhao Wang, Osami Sasaki, Takamasa Suzuki *et al.*. Measurement of small vibration amplitudes of a rough surface using an interferometer with a self pumped phase conjugate mirror [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25): 4593~4597
- Li Min, Xie Fang, Chen Zhimin. Vibration measurement system based on a highly stabilized fiber 3×3 coupler interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 549~553
李敏,谢芳,陈志敏.高稳定的光纤3×3耦合器干涉振动测量系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 549~553
- Li Dongguang, Zhang Guoxiong, Li Guitao. Improving the accuracy of laser interferometry[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2000, **20**(5): 621~625
李东光,张国雄,李贵涛.提高激光干涉测量精度的研究[J]. *北京理工大学学报*, 2000, **20**(5): 621~625
- Li Yanhui, Wu Zhensen, Wu Yingli. Small damping vibration measurement using laser Doppler effect[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 231~235
李艳辉,吴振森,武颖丽.基于激光多普勒法测量微小阻尼振动[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 231~235
- Dong Jianhua, Gu Hanming, Zhang Xing. A comparison of time-frequency analysis methods and their applications[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2007, **114**(14): 312~316
董建华,顾汉明,张星.几种时频分析方法的比较及应用[J]. *工程地球物理学报*, 2007, **114**(14): 312~316
- Ge Zhexue, Sha Wei. The Wavelet Analysis Theory and Its Realization with MATLAB R2007 [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007
葛哲学,沙威.小波分析理论与 MATLAB R2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2007
- Sikun Li, Xianyu Su, Wenjing Chen. Wavelet ridge techniques in optical fringe pattern analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(6): 1245~1254
- Hamid Krim, Dewey Tucker, Stephane Mallat *et al.*. On denoising and best signal representation[J]. *IEEE Trans. Infor. Theory*, 1999, **45**(7): 2225~2238
- Heng Liu, Alexander N. Cartwright, Cemal Basaran. Moire interferogram phase extraction: a ridge detection algorithm for continuous wavelet transforms[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 850~857
- Li Sikun, Chen Wenjing, Su Xianyu. Phase unwrapping guided by amplitude of wavelet ridge coefficients in wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 715~721
李思坤,陈文静,苏显渝.小波变换轮廓术中用小波脊系数幅值引导相位展开的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 715~721
- Zhang Suzhen, Chen Wenjing, Su Xianyu. Phase analysis based on complex Morlet wavelet [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(4): 73~76, 119
郑素珍,陈文静,苏显渝.基于复 Morlet 小波的相位分析[J]. *光电工程*, 2007, **34**(4): 73~76, 119
- Weng Jiawen, Zhong Jingang. Apply wavelet transform to phase analysis of spatial carrier-fringe patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 454~459
翁嘉文,钟金钢.小波变换在载频条纹相位分析法中的应用研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 454~459

栏目编辑:何卓铭