

文章编号: 0258-7025(2008)08-1235-05

基于连续小波变换的瞬态位移干涉仪信号处理

刘寿先^{1,2} 李泽仁¹ 吴建荣³ 王德田¹ 刘俊¹ 蒙建华¹

(¹ 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; ² 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)
³ 中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230026)

摘要 提出一种连续小波变换(CWT)用于频率急剧变化的瞬态位移干涉仪信号处理的方法。连续小波变换利用对不同频率具有不同分辨本领的特性,对信号进行时频分析,计算出信号频率,进而恢复出信号的速度。当在可变时间窗口宽度内小波的中心频率和信号局部频率相等或接近时,小波变换系数幅值最大,据此能判断出信号的频率。用连续小波变换方法对计算机模拟的位移干涉信号进行处理,恢复的速度相对误差在 3%,从爆轰实验的光纤位移干涉仪信号中也能够准确地恢复出物体的速度历史。

关键词 测量与计量;信号处理;小波变换;位移干涉仪;频率分析;速度

中图分类号 TN 911.74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083508.1235

Signal Processing of Displacement Interferometer Based on the Continuous Wavelet Transform

Liu Shouxian^{1,2} Li Zeren¹ Wu Jianrong³ Wang Detian¹ Liu Jun¹ Meng Jianhua¹

¹ Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
² Beijing Postgraduate Department, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China
³ School of Information Science and Technology,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A transient displacement interferometer signal processing method based on the continuous wavelet transform (CWT) is proposed. The interference signal is analyzed by CWT, and the frequency and the velocity of the signal can be deduced. One main characteristic of CWT is its adaptive nature for signals with large variations in frequency. In the flexible time window, if the varying central frequency is equal or close to the instantaneous frequency of local signals, the modulus of CWT is maximal, so the local frequency is determined. The processing results of simulated interference signals show that the relative error is less than 3%. Similarly, velocity history can be precisely recovered from signals of fiber displacement interferometer in detonation experiment.

Key words measurement and metrology; signal processing; wavelet transform; displacement interferometer; frequency analysis; velocity

1 引言

在冲击波物理和爆轰波物理中,自由面速度或者粒子速度是一个重要的物理量。自 20 世纪 70 年代以来,一直是使用任意反射面速度干涉仪(VISAR)^[1]和法布里-珀罗干涉仪进行测量^[2]。随着光纤通信技术和高带宽探测器及数字示波器的发

展,逐渐发展了一种新型的超高速瞬态光纤位移干涉仪,应用于冲击波和爆轰波物理中的速度参量测量^[3,4],并且在物体表面振动和微位移^[5]的测量方面也有重要的应用前景。

光纤位移干涉仪记录信号的频率随着物体运动速度变化而变化。在冲击或爆轰物理实验中,由于

收稿日期:2007-09-10;收到修改稿日期:2008-01-10

基金项目:中国工程物理研究院基金(20050434)资助项目。

作者简介:刘寿先(1979—),男,广西人,硕士研究生,主要从事光电测试技术和图像及信号处理方面的研究。

E-mail: pion55@163.com

导师简介:李泽仁(1961—),男,四川人,研究员,博士生导师,主要从事光电技术方面的研究。E-mail: zeren109@21cn.com

冲击波或爆轰波是一个强间断波,当它们与被测靶作用时,靶的运动速度变化十分急剧(时间分辨为亚纳秒量级)。如何高精度地提取信号频率,是超高速瞬态光纤位移干涉仪中的难题。在传统的信号分析理论中,时频分析通常采用傅里叶变换方法,能将信号分解成各种频率成分,却无法判断出其中的某一个频率的产生,因此比较适用于长时间平稳信号的频率分析。对于非平稳信号,通常采用窗口傅里叶方法,它克服了傅里叶变换的缺点,能分析出某个时刻信号的具体频率,但由于窗口宽度固定,无论对于高频还是低频信号,它的分辨本领都是一样的。而从 20 世纪 80 年代发展起来的小波变换理论克服了以上缺点,小波是一个满足容许性条件的函数,具有可变的时间窗口和中心频率,即它对信号具有自适应性,可用不同分辨率来分析信号在某个时刻的频率,这使得小波变换理论在信号处理领域得到了广泛的应用^[6~10]。冲击波或者爆轰波物理中的位移干涉信号是急剧变化的非平稳信号,小波变换方法是此类信号时频分析的有力工具。

本文介绍光纤位移干涉仪理论和连续小波变换(CWT)理论,用小波变换理论对计算机模拟的位移干涉信号进行处理,并将其用于爆轰物理实验中的光纤位移干涉仪信号的处理。

2 光纤位移干涉仪理论

光纤位移干涉仪原理框图如图 1 所示。它利用梯度折射率透镜端面反射回来的一路光作为参考光,而从目标靶面漫反射回来的光为信号光,两者相干涉从而形成干涉信号。由于多普勒效应,当被测靶面运动时,干涉信号频率将发生变化。干涉原理为图 1 右下角方框所示。图中 GRIN 为梯度折射率透镜。

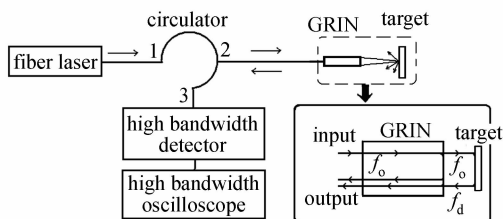


图 1 光纤位移干涉仪系统原理框图

Fig. 1 Principle and build-up of fiber displacement interferometer

设参考光强为 I_0 , 频率为 f_0 , 波长为 λ_0 , 信号光强为 I_d , 频率为 f_d , 物体运动速度为 $v(t)$, 由多普勒效应和光混频相干原理, 可得

$$I = I_0 + I_d +$$

$$2 \sqrt{I_0 I_d} \cos \{ 2\pi \int_0^t [f_d(t) - f_0(t)] dt + \varphi_0 \} =$$

$$I_0 + I_d + 2 \sqrt{I_0 I_d} \cos \left[4\pi \int_0^t \frac{v(t)}{\lambda_0} dt + \varphi_0 \right], \quad (1)$$

式中 φ_0 为两光束的初始相位差, 第二个等式中的积分项表示物体运动位移。

由多普勒效应, 信号频率可表示为

$$f(t) = f_d(t) - f_0(t) = 2v(t)/\lambda_0, \quad (2)$$

因此物体的运动速度可以表示为

$$v(t) = \frac{\lambda}{2} f(t). \quad (3)$$

从(2),(3)式可见, 信号的频率与物体的运动速度成正比, 因此要从光纤位移干涉仪记录信号中恢复出速度信息, 关键要求解出信号频率随时间的变化过程。

在爆轰波和冲击波物理中, 物体运动速度变化从 0 到几千米每秒, 当使用的激光波长为 1550 nm 时, 由(2)式可知, 相对应的频率变化从 0 到几吉赫兹, 信号频率跨越 8~9 个量级, 是典型的非平稳信号, 特别适宜于用小波变换方法来处理。

3 连续小波变换用于信号时频分析

用于信号时频分析的小波, 需满足容许性条件^[11]。根据经验, 通常采用复值 Morlet 小波, 它可以表征为一个高斯包络的复值函数, 其数学表达式为

$$\psi(t) = \exp(-t^2/2\sigma^2) \exp(i\omega_0 t), \quad (4)$$

式中 σ 为时间域高斯窗口长度, ω_0 为中心频率。当 $\sigma = 1, \omega_0 > 5$ 时, 复值 Morlet 小波满足容许性条件。对于满足容许性条件 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ 的母小波 $\psi(t) \in L_2(R)$, 小波族可表示为

$$\psi_{(b,a)}(t) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (5)$$

式中 b 为小波在时间轴的平移量, a 为小波的比例因子, 对应于小波时间窗口宽度和中心频率变化。当比例因子为 a 时, 时间窗口变化为 $a\sigma$, 中心频率变化为 ω_0/a 。比例因子 a 越大对应的时分辨本领越低, 而频率分辨本领越高。

信号 $s(t)$ 的连续小波变换系数表示为

$$W_s(b,a) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi_{(b,a)}^*(t) dt, \quad (6)$$

式中 $*$ 为复共轭符号。当相应比例因子小波函数的频率与对应时间窗口宽度内信号的局部频率相同或者相接近时, 其小波变换系数 $W_s(b,a)$ 的幅值最大。在时间轴、比例因子轴和小波变换幅值轴的三维坐

标系中,小波变换幅值最大值位置的连线定义为小波变换的脊 $a_r(b)$,当计算出时间轴上的脊 $a_r(b)$,就可以根据

$$\omega(b) = \frac{\omega_0}{a_r(b)}, \quad (7)$$

得到各个时刻信号的频率信息,从而可以计算出各个时刻的速度信息。

4 计算机模拟

为了检验连续小波变换方法用于瞬态位移干涉仪信号处理的可行性,根据(1)式,模拟一个位移干涉信号,其速度曲线 $v(n)$ 为

$$v(n) = 400 \exp\left[-\frac{(n-9200)^2}{3000^2}\right] + 40 \exp\left[-\frac{(n-6100)^2}{180^2}\right] + 60 \exp\left[-\frac{(n-7200)^2}{500^2}\right], \quad (8)$$

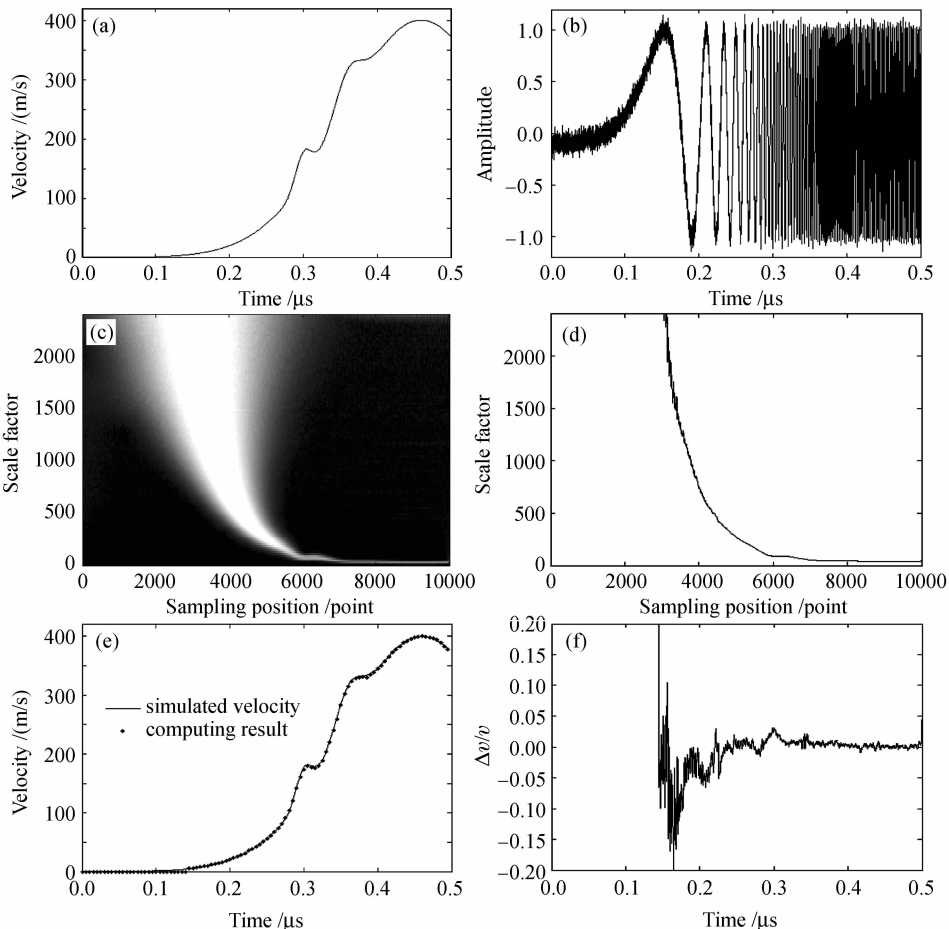


图2 基于小波变换的模拟干涉信号处理。(a) 模拟的速度;(b) 模拟的信号幅值;(c) 小波变换幅值;(d) 幅值脊曲线;(e) 计算的速度;(f) 相对误差

Fig. 2 Signal processing of simulated data based on the continuous wavelet transform. (a) simulated velocity; (b) simulated amplitude; (c) wavelet transform modulus; (d) ridge; (e) calculated velocity; (f) relative error

记录时间为 $0.5 \mu\text{s}$, 采样时间间隔 dt 为 50 ps , 初始相位 φ_0 为 0 , 采用归一化幅度, 并加上幅度为 0.1 的随机噪声。

模拟的速度曲线和位移干涉信号如图 2(a), (b) 所示。根据连续小波变换用于时频分析的理论, 干涉信号的处理流程如下: 对图 2(b) 中信号进行连续小波变换, 得到图 2(c) 所示的小波变换系数的幅值, 横坐标是采样点, 纵坐标是小波函数的比例因子 ($a_r(b)$), 图中灰度较亮的区域代表小波变换系数幅值较大。每对应一个采样点位置 b , $W_s(b, a)$ 的幅值都有一个最大值。通过极大值寻找算法, 可以得到 b 与 $a_r(b)$ 的曲线, 如图 2(d) 所示。由该曲线可以确定各个时刻的频率或周期, 从而可以计算出物体的速度曲线, 如图 2(e) 所示, 模拟的速度曲线和用小波变换方法处理出的结果吻合得较好。小波变换方法用于模拟位移信号处理的相对误差如图 2(f) 所示, 可见, 在 $5 \sim 20 \text{ m/s}$ 的速度范围内, 相对误

差大约在 20% 以内, 在 20~400 m/s 速度范围内, 相对误差大约在 3% 以内。速度较低时误差较大的原因是为了兼顾速度上升阶段及最终速度的测量, 在较低的频率时也采用了较高的采样率。

5 实 验

实验测量对象的装置如图 3 所示, 使用雷管起爆传爆药柱, 传爆药柱产生的冲击波经过一个空腔后驱动铜飞片使之加速运动。使用如图 1 所示的光纤位移干涉仪测量铜飞片的速度, 光纤位移干涉仪标示了梯度折射率透镜。实验采用高带宽的探测器和数字示波器。

实验干涉信号和处理结果如图 4 所示。图 4(a) 为整个记录时间段内的信号, 图 4(b) 为图 4(a) 信号中方框部分的局部放大, 可见信号强度受到飞片表面漫反射光强度大小的调制, 同时飞片的位移使信号呈现正弦干涉信号。采用模拟部分的处理流

程对该信号进行处理, 得到的小波变换的幅值和脊如图 4(c), (d) 所示, 时间-速度曲线如图 4(e), (f) 所示。由于实验装置采用的是传爆药柱通过空腔驱动飞片的方式, 因此飞片运动的加速度比较小, 速度上升过程相对平缓, 最终飞片运动速度达到 1000 m/s 左右, 如图 4(e) 所示。在局部速度曲线图 4(f) 中, 飞片加速阶段的两个拐点有较好的反映, 如图中方

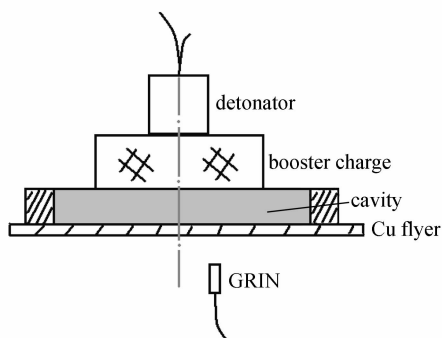


图 3 实验测试对象示意图

Fig. 3 Schematic of testing target

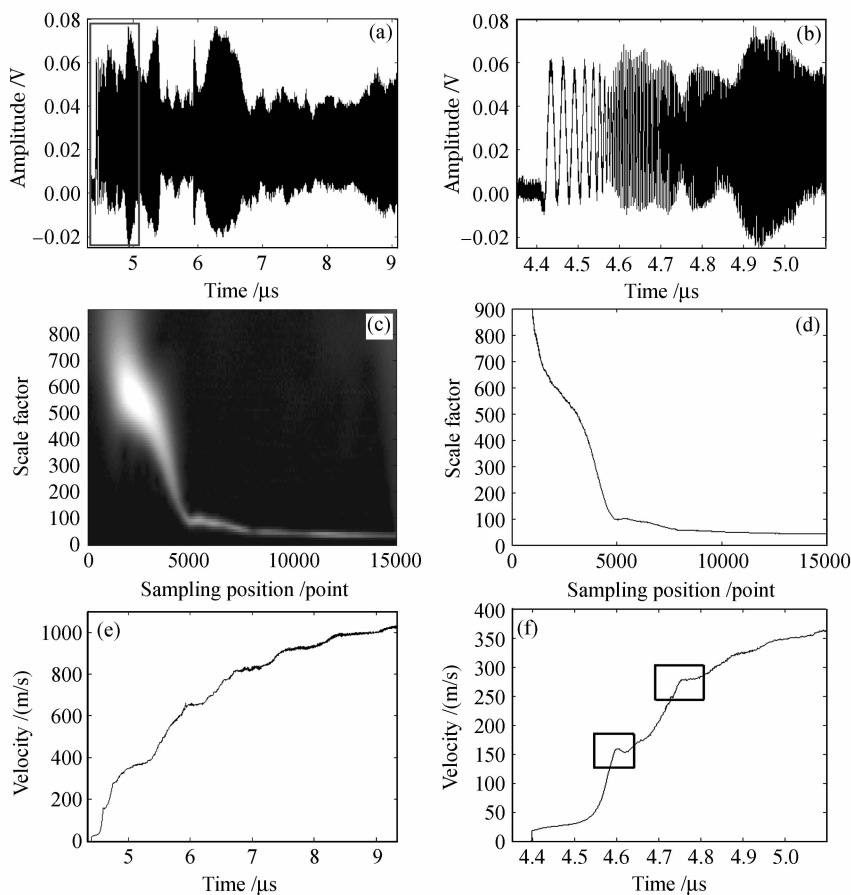


图 4 基于小波变换的位移干涉仪信号处理。(a) 原始信号; (b) 原始信号局部放大; (c) 小波变换幅值; (d) 幅值脊曲线; (e) 速度曲线; (f) 局部速度曲线

Fig. 4 Signal processing of displacement interferometer based on the continuous wavelet transform. (a) original signal; (b) partial enlarged signal; (c) wavelet transform modulus; (d) ridge; (e) velocity; (f) partial enlarged velocity

框所示。因此,基于小波变换的信号处理方法具有较高的速度分辨本领。

6 结 论

提出一种连续小波变换用于频率急剧变化的瞬态位移干涉仪信号处理的方法,利用连续小波变换对不同频率具有不同分辨本领的特性,对信号进行时频分析,进而恢复出研究对象的速度历史。用连续小波变换方法对模拟的位移干涉信号进行处理,在关心的速度范围内,恢复的速度相对误差在 3% 以内。同时,对铜飞片运动速度测量实验的信号进行处理,速度历史符合理论预期,且速度拐点的微小变化也有很好反映。因此,连续小波变换理论用于瞬态位移干涉仪信号处理是可行的。

参 考 文 献

- 1 L. M. Barker, R. E. Hollenbach. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(11):4669~4675
- 2 C. F. McMillan, D. R. Goosman, N. L. Parker *et al.*. Velocimetry of fast surfaces using Fabry-Perot interferometry [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(1):1~20
- 3 O. T. Strand, D. R. Goosman, C. Martinez *et al.*. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(8):083108
- 4 A. R. Valenzuela, G. Rodriguez, S. A. Clarke *et al.*. Photonic Doppler velocimetry of laser-ablated ultrathin metals [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, **78**(1):013101
- 5 Liu Yingming, Wang Xiangzhao. Analysis of modulation frequency in sinusoidal phase modulating interferometry for displacement measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1574~1579
刘英明,王向朝. 正弦相位调制位移干涉测量技术中调制频率的优化选择[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1574~1579
- 6 S. G. Mallat. A Wavelet Tour of Signal Processing [M]. 2nd ed.. San Diego: Academic Press, 1999. 1~637
- 7 Sun Juan, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Study the measurement range of wavelet transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):647~653
孙娟,陈文静,苏显渝等. 小波变换轮廓术的测量范围研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):647~653
- 8 Song Muping, Ma Zhigan. Optical signal processing in Brillouin optical time domain reflector based morlet wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):819~823
宋牟平,马志刚. 基于经典小波变换的布里渊光时域反射计光信号处理[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5):819~823
- 9 Deng Yuqiang, Xing Qirong, Lang Liyin *et al.*. Wavelet transform in terahertz time domain spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(11):5224~5227
邓玉强,邢岐荣,郎利影等. THz 波的小波变换频谱分析[J]. *物理学报*, 2005, **54**(11):5224~5227
- 10 Wang Yuangan, Yu Honglin, Huang Liangming. Grating signal quality assessment based on wavelet analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):336~340
王远干,喻洪麟,黄良明. 基于小波分析的光栅信号质量评估方法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):336~340
- 11 M. Todorovska. Estimation of instantaneous frequency of signals using the continuous wavelet transform [R]. University of Southern California, Los. Angeles, Tech. Rep. CE 01-07, 2001

《中国激光》主编周炳琨院士当选国际光学联合会副主席



自左向右: 龚旗煌教授; 母国光院士;
金国藩院士; 周炳琨院士

2008年7月9日,在悉尼召开的第21届国际光学联合会(ICO)全体大会上,中国光学学会理事长、《中国激光》主编周炳琨院士当选 ICO 副主席。任期三年。为了保证选举工作的顺利进行和促进中国光学学会与国际组织的交流与合作,中国光学学会派出前任理事长和前任 ICO 副主席、《光学学报》和《中国激光》顾问母国光院士、理事长周炳琨院士、ICO 副主席、《光学学报》编委金国藩院士和常务理事、Chinese Optics Letters 副主编龚旗煌教授四位作为中国代表参加会议。会议期间,除了参加 ICO 各项活动外,代表团还参加了亚太地区光学学会高峰论坛,并与美国光学学会代表团就双方进一步合作及近期工作计划进行了深入的协商。

《中国激光》编辑部