

文章编号:1004-4213(2011)12-1839-6

# 瞬态位移干涉仪信号处理新方法

赵新才<sup>1,2</sup>, 吴云峰<sup>1</sup>, 方亮<sup>1</sup>, 王昱琳<sup>1</sup>

(1 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

(2 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:**利用短时傅里叶变换计算速度快的特点,先对瞬态位移干涉仪信号进行预处理,得到速度的轮廓范围.据此估计小波变换中尺度因子的范围,然后用连续小波变换的方法对信号再次进行处理,用此方法分析计算机模拟出的位移干涉信号,恢复的速度相对误差小于 2%.对高速爆轰实验中的位移干涉信号分别采用短时傅立叶变换、小波变换和二者相结合的方式进行分析,并记录三者的计算速度.实验表明,第三种方法能准确地恢复出物体的速度历史,计算误差在系统要求的范围内.本文综合计算速度和计算误差两方面的考虑,选择了适合于瞬态位移干涉信号处理的方法.

**关键词:**测量; 信号处理; 小波变换; 位移干涉仪; 速度

**中图分类号:** TN 911.74

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114012.1839

## 0 引言

爆轰物理中,自由面速度是一个很重要的观测量.有很多方法能够将飞片驱动到数千米每秒的速度,例如爆炸、激光等.传统测量数千米每秒速度的方法有:可测量任意反射面的速度干涉仪(Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR)<sup>[1]</sup>和法布里-珀罗干涉仪<sup>[2-3]</sup>.随着光纤通信技术和高带宽探测器及数字示波器的发展,逐步发展了一种新型的超高速瞬态全光纤位移干涉仪(All Fiber Displacement Interferometer System for Any Reflector, AFDISAR)<sup>[4-7]</sup>,应用于冲击波和爆轰波物理中的速度参量测量.

全光纤位移干涉仪作为一种新的测量技术,记录了信号频率随物体速度的变化.在爆轰实验中,爆轰波是一个强间断波,当它和被测物体作用时,其速度会急剧上升.如何准确获得信号的频率,是 AFDISAR 的难题,传统的信号分析中,时频分析一般选择傅里叶变换,它是一种全局的分析,不能获得某一频率的出现时刻,仅对平稳信号的分析比较合适;对非平稳信号,通常选择短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT),它通过加窗,可以分析信号某一时刻的频率,但窗口宽度是固定的,对任何信号其分辨率均相同,存在局限性.近几十年发展起来的小波变换弥补了以上的不足,小波变换是一种窗口面积固定不变,时间窗和频率窗形状均可变化的时频局部化分析方法,可用不同的

分辨率对某一时刻的信号进行分析,对信号有自适应能力,可以描述其任意细节,这就使得小波理论在信号处理领域得到了极广的应用<sup>[8-12]</sup>.AFDISAR 采集的信号是急剧变化的非平稳信号,前人在处理此类信号时,要么使用短时傅里叶变换,要么使用小波变换,前者计算精度达不到要求,后者耗时太多以至于影响工作.

本文针对 AFDISAR 信号的频谱范围跨度很大(1MHz~10GHz),采样数据量较大(40 万左右),而 AFDISAR 系统又要求有较高精度计算结果的特点,根据小波变换和短时傅里叶变换各自的优点,将二者结合起来,对 AFDISAR 信号进行有先验知识指导的小波计算,得到了一种既能满足精度要求,又能减小计算量的优化方法.

## 1 光纤位移干涉仪测速系统介绍

光纤位移干涉仪原理图如图 1,将光源发出的光分成两束,一束作为参考光进入干涉仪系统,另一

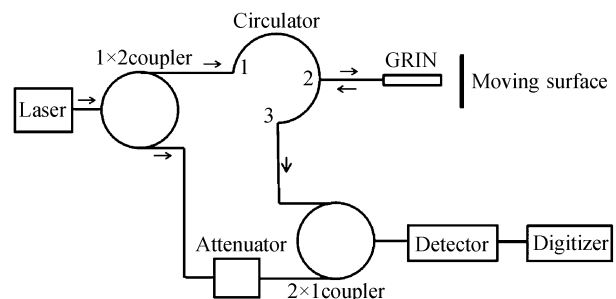


图 1 光纤位移干涉仪系统原理  
Fig. 1 Principle of fiber displacement interferometer

第一作者:赵新才(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电测控及信号处理. Email:zxceric@gmail.com  
导师(通讯作者):吴云峰(1972-),男,副教授,主要研究方向为光电测量与仪器. Email:yfwu\_72@163.com  
收稿日期:2011-04-20;修回日期:2011-06-18

束经过探头入射在被测物体表面,接着携带多普勒频移的反射光,即信号光由探头收集,并进入干涉系统与参考光发生干涉。

干涉后,由探测器探测到的信号可表示为

$$I = A + B \cos \{ 2\pi [\Delta\nu dt] \} \quad (1)$$

式(1)中,  $A$  表示直流部分,  $B$  表示交流部分的系数,  $\Delta\nu$  表示信号光与参考光的频率差。

$$I = A + B \cos \left\{ 2\pi \int \frac{2u(t)}{\lambda_0} dt \right\} \quad (2)$$

由于速度对时间的积分表示位移,因此,可得到探测信号的条纹数  $N(t)$  与位移的关系为

$$S(t) = (\lambda_0/2) N(t) \quad (3)$$

同时,由于位移对时间的微分表示速度,余弦信号的条纹数对时间的微分表示信号频率  $F(t)$ ,因此式(3)两边对时间取微分可得

$$u(t) = (\lambda_0/2) F(t) \text{ 简记为 } u = (\lambda_0/2) F \quad (4)$$

因此,只要记录下干涉信号的频率随时间的变化,通过一定的数据处理,就可以得到被测物体运动速度随时间的变化曲线。

## 2 短时傅氏变换、小波变换用于信号时频分析

设  $\Psi(t) \in L^2(R)$  ( $L^2(R)$  表示能量有限的信号空间),其傅里叶变换为  $\Psi(\omega)$ . 当  $\Psi(\omega)$  满足允许条件

$$C_\Psi = \int_R \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (5)$$

时,称  $\Psi(t)$  为一个基本小波或母小波. 将母函数  $\Psi(t)$  经伸缩和平移后,就可以得到一个小波序列. 对于连续的情况,小波序列为

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in \mathbf{R}; a \neq 0) \quad (6)$$

式中,  $a$  为伸缩因子,  $b$  为平移因子,  $\Psi_{a,b}(t)$  也称为尺度小波。

对于任意的函数  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换 (Continuous Wavelet Transform, CWT) 为

$$W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (7)$$

式中  $\overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$  为  $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  的共轭。

用于信号时频分析的小波,需满足容许性条件. 根据经验以及小波基的选取原则<sup>[13]</sup>,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

$$\Psi(x) = \sqrt{\pi} f_b e^{2i\pi f_c x} e^{-\frac{x^2}{f_b}} \quad (8)$$

式中  $f_b$  是带宽参量,  $f_c$  是小波中心频率. 当  $f_b = 1$ ,  $f_c > 5$  时,复 Morlet 小波满足允许性条件。

自适应算法的流程图如图 2. 首先使用短时傅里叶变换对信号进行预处理,得到被测物体速度的轮廓范围. 然后将数据进行合理分段,通过分段情况确定小波变换中每一段数据的尺度范围,根据经验公式确定小波变换的步长,进而诸段进行处理,得到速度曲线,最后无缝连接分段速度曲线即可得到被测物体的完整速度曲线。

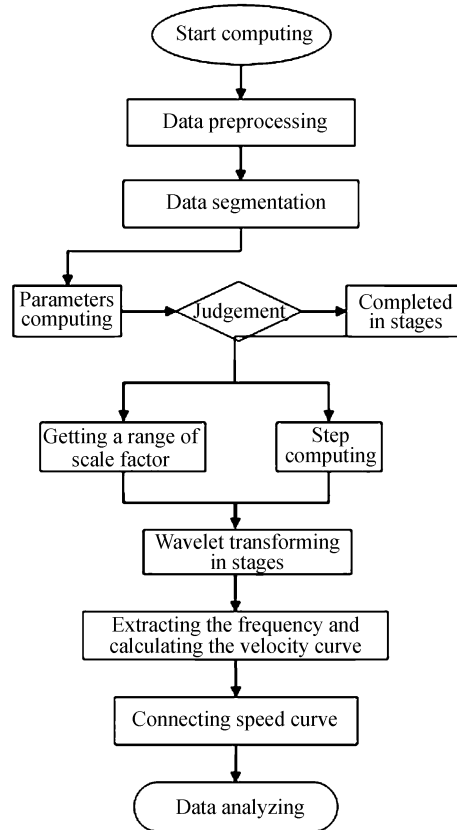


图 2 自适应算法流程

Fig. 2 Adaptive algorithm flow chart

自适应算法的流程中,详细论述分段的标准,设  $v(n_1, n_2)$ 、 $v(n_1, n_3)$ 、 $v(n_1, n_4) \dots v(n_1, n_k)$  等为短时傅里叶变换得到的第 1、2、3... $k$  点的速度. 根据式(9),先计算前两点速度值的参量,判断是否满足式(10)中的条件,然后  $n_2$  增加 1,继续进行判断,直到不满足条件为止,就分出了第一段,接着第二段中的第一个点  $n_1$  取分离第一段的计算中不满足条件的那个点,  $n_2$  增加 1,重复前面的操作,直到再次不满足条件,分出了第二段,以此类推,将所有的速度点遍历一遍即可得到所有的分段参量 ( $v_{\max}(n_1, n_2)$ 、 $v_{\min}(n_1, n_2)$ 、 $n_1, n_2$ ), 根据经验,  $\Delta v$  取为 10%。

$$v_{nd}(n_1, n_2) = v_{\max}(n_1, n_2) - v_{\min}(n_1, n_2) \quad (9)$$

$$\overline{v(n_1, n_2)} = \sum_{i=n_1}^{n_2} v_i / (n_2 - n_1 + 1) \quad (10)$$

$$v_{nd}(n_1, n_2) < \overline{v(n_1, n_2)} \times \Delta v \quad (11)$$

对于小波变换,有

$$F = F_c / a T \quad (12)$$

式中  $F_c$  为母小波的中心频率,  $a$  为尺度因子,  $T$  为记录系统的采样周期, 在实验之前就已经设置完毕, 可以当作已知数.

对于式(4),  $\lambda_0$  为激光波长, 其值为 1 550 nm, 故式(4)可以写为

$$u = F / (1.29 \times 10^6) \quad (13)$$

结合式(12)和式(13)可得

$$u = F_c / (1.29 \times 10^6 a \cdot T) \quad (14)$$

由于选定了母小波以后, 其中心频率  $F_c$  就已确定, 所以令

$$F_c / (1.29 \times 10^6 T) = \text{const} \quad (15)$$

则

$$u = \text{const} / a \quad (16)$$

由式(16)可以看出, 如果得知被测物体速度的范围, 根据  $v_{\min}(n_1, n_2)$ 、 $v_{\max}(n_1, n_2)$  即可确定小波变换中尺度因子的范围 ( $a_{\min}$  和  $a_{\max}$ ), 最后选择步长  $sl$  的大小, 一般情况下, 遵循宽的尺度范围选择大尺

度, 窄的尺度范围选择小尺度, 根据经验(通过多次对 AFDISAR 实验数据的分析), 步长  $sl$  的选择以式(17)为准, 这也是对小波基的优化过程.

$$sl = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{\sqrt{a_{\max} + a_{\min}} \times 10^3 + \sqrt{\frac{1}{a_{\max} - a_{\min}}}} \quad (17)$$

### 3 实验验证

#### 3.1 计算机模拟

为了检验本文提出的算法适合于处理 AFDISAR 信号, 借助 Matlab 仿真工具, 根据式(1), 模拟了一个位移干涉信号, 将其速度曲线  $v(n)$  描述为

$$v(n) = 420 \exp\left[-\frac{(n-9300)^2}{3500^2}\right] + 50 \exp \cdot \left[-\frac{(n-5500)^2}{200^2}\right] + 80 \exp\left[-\frac{(n-7000)^2}{450^2}\right] \quad (18)$$

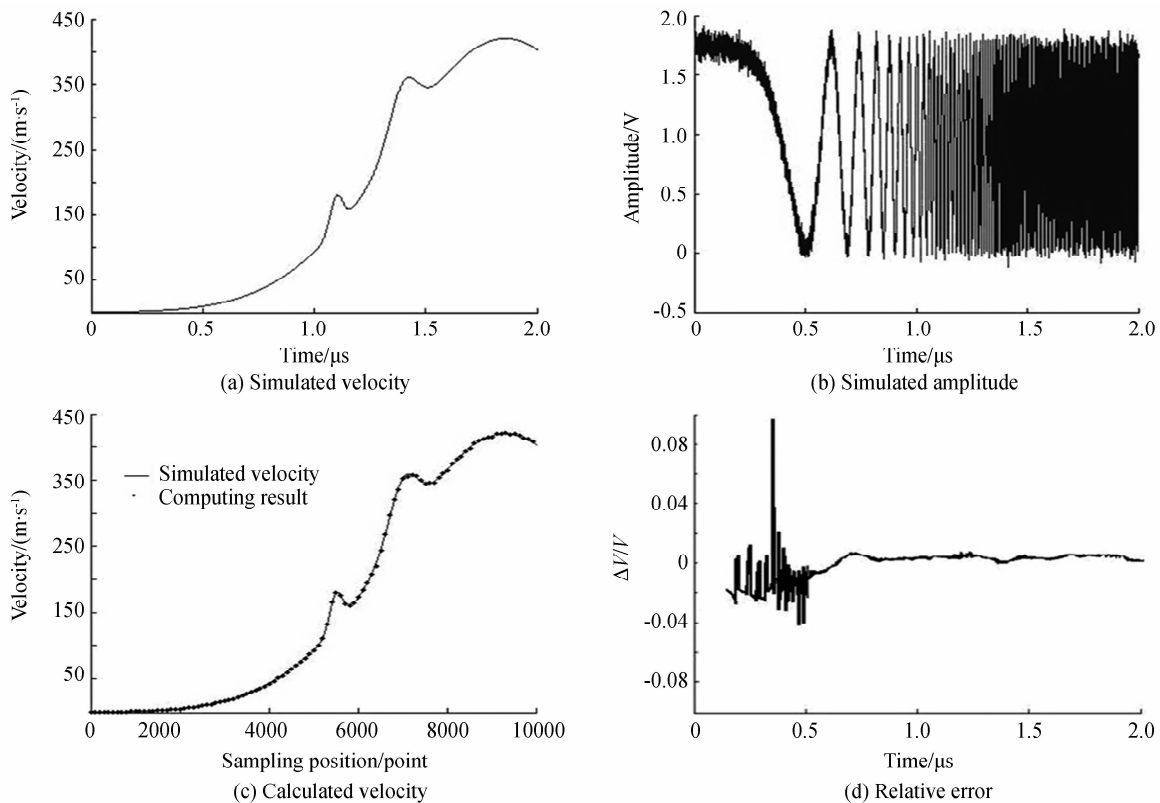


图3 基于 STFT 和 CWT 的模拟干涉信号处理

Fig. 3 Signal processing of simulated data based on the short-time fouries transform and continuous wavelet transform

其中采样的时间间隔是 200 ps, 初始相位为 0, 记录时间是 2  $\mu$ s. 计算机仿真的速度曲线如图 3(a), 速度由 0 上升到 450 m/s. 根据采集信号与速度的关系, 反推得到图 3(b)所对应的采集信号, 并且加入了幅度为 0.1 的高斯白噪音. 采用短时傅里叶变换与连续小波变换相结合的方式对图 3(b)中的信号进行处理, 得到被测物体速度随时间的变化情况. 由

于文献[8]已对小波变换的过程做过详细分析, 此处不再赘述. 我们将计算得到的物体速度曲线与原始速度曲线放在同一坐标系下对比, 如图 3(c), 计算得出的物体速度与模拟的速度曲线吻合得很好. 本文提出的算法用于模拟位移干涉信号处理的相对误差如图 3(d), 可以看出, 在 6~24 m/s 的速度范围内, 相对误差小于 10% (这是由信号的边缘效应所

导致的),在 24~420 m/s 的速度范围内,相对误差小于 1%.算法的计算效果远高于本课题的要求.

### 3.2 高速实验

实验测量的对象为铝制飞片,使用电雷管起爆传爆药柱,传爆药柱产生的冲击波驱动铝飞片使之加速运动.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.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,可以看出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.分别对信号采用短时傅里叶变换(记为方法二)、连续小波变换(记为方法二)以及二者相结合的方式(记为方法三)对信号进行处理,得到的时间-速度曲线如图 4(c)、(d)、(e).由于

实验装置采用的是传爆药柱直接驱动飞片的方式,因此飞片运动的加速度比较大,速度上升过程相对剧烈,最终飞片运动速度达到 1 200 m/s 左右.可以看出,采用方法一对信号进行处理时,得到的速度曲线信噪比很差,只给出了一个速度的大概范围,远远达不到要求,方法二和方法三计算得到的曲线信噪比较好,但是由于方法二计算中大量无效尺度因子的存在,使得计算中将部分噪音信号当作有效信号处理,信噪比差于方法三.另外,在方法三局部速度曲线图 4(f)中,飞片加速阶段的几个拐点处有较好的反映,如图中方框所示.因此,基于短时傅里叶变换与小波变换相结合的信号处理方法具有较高的速度分辨本领.

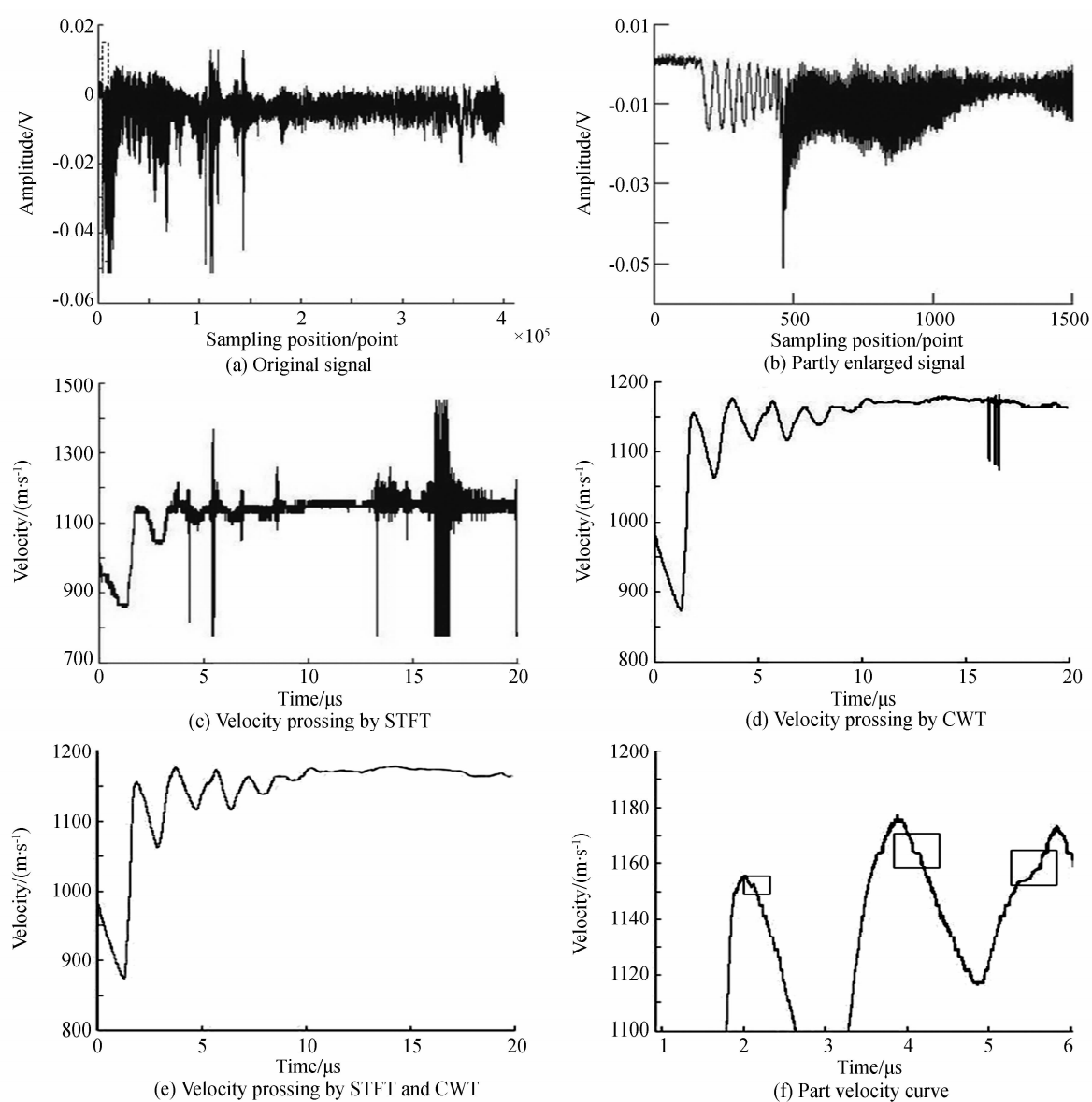


图 4 使用三种方法处理高速信号

Fig. 4 Signal processing of displacement interferometer using three methods

同时分别记录上面三种方法处理信号的时间, 如表 1 所示, 可以看到, 采用方法一处理不同长度数据的计算时间最短, 但是从图 4 中也明显看出, 它的处理效果也最差; 方法二计算速度最慢, 较方法三慢了一倍, 这是工程应用中所不能容忍的; 方法三虽然

计算时间较方法一稍慢, 但是其处理结果是最好的, 而且从计算机模拟的效果来看, 计算误差在系统要求的范围内 (课题要求的系统测速误差为小于 2%), 因此, 采用方法三处理 AFDISAR 信号, 达到了最好的效果。

表 1 计算时间对比

Table 1 Contrast of computing time

No.	Data length	Computing time of STFT	Computing time of CWT	Computing time of STFT and SWT
1	5 000	2.875 908	7.224 374	3.729 352
2	10 000	5.630 122	12.311 678	6.335 916
3	100 000	41.527 465	84.846 490	47.523 180
4	300 000	124.384 967	243.523 545	138.489 138
5	400 000	168.110 572	332.228 565	182.013 243

## 4 结论

提出了一种新的用于频率急剧变化的瞬态位移干涉仪信号处理的方法. 针对 AFDISAR 采样信号的频谱范围跨度较大的特点, 结合短时傅里叶变换与小波变换理论, 对信号进行时频分析, 进而恢复出研究对象的速度历史. 用短时傅里叶变换和连续小波变换相结合的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 1% 以内. 同时, 对铝飞片运动速度测量实验的信号用短时傅里叶变换与小波变换相结合的方法进行处理, 计算的速度历史均符合理论预期, 且速度拐点的微小变化也有很好反映. 另外分别采用三种方法对不同数据长度下的信号进行处理, 记录计算时间, 综合考虑计算速度和计算误差两个方面, 方法三达到了最佳的效果, 其计算速度较快, 而且计算误差在系统要求的误差范围内, 因此, 将短时傅里叶变换理论和小波变换理论结合起来用于瞬态位移干涉仪信号处理是行之有效的, 不仅保证了计算精度, 而且提高了计算速度.

**致谢:** 感谢中国工程物理研究院化工材料研究所黄毅民研究员和韩勇副研究员在高速实验中给予的帮助和指导.

### 参考文献

- [1] BARKER L M, HOLLEN bach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, **43**(11):4669-4675.
- [2] DURAND M, LAHARRAGUE P, LALLE P, et al. Interferometric laser technique for accurate velocity measurement in shock wave physics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1977, **48**:275-278.
- [3] McMILLAN C F, GOOSMAN D R, PARKER N L, et al. Velocimetry of fast surfaces using Fabry-Perot interferometry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1988, **59**(1):1-20.
- [4] JAROSZEWICZ L R, KRAJEWSKI Z. Optical fibre interometric system for Doppler effect measurement[J]. *Opto-*

*Electronics Review*, 2002, **10**(3):185-191.

- [5] STRAND O T, GOOSMAN D R, MARTINEZ C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**(8):83-108.
- [6] WANG De-tian. Research of the fiber doppler velocimeter [D]. Mianyang: China academy of engineering physics, 2008. 王德田. 光纤多普勒差拍干涉测速技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008.
- [7] WENG Ji-dong, TAN Hua, WANG Xiang, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(11):1-3.
- [8] LIU Shou-xian, LI Ze-ren, WU Jian rong, et al. Signal processing of displacement interferometer based on the continuous wavelet transform[J]. *Chinese Lasers*, 2008, **35**(8):5321-9321. 刘寿先, 李泽仁, 吴建荣 等. 基于连续小波变换的瞬态位移干涉仪信号处理[J]. 中国激光, 2008, **35**(8):5321-9321.
- [9] LI Xiao-bing, PAN Hong, XIA Liang-zheng. An image coding algorithm based on binary wavelet transform and modified SPIHT[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2):340-345. 李晓兵, 潘泓, 夏良正. 基于二进制小波变换和改进 SPIHT 算法的图像编码方法[J]. 光子学报, 2010, **39**(2):340-345.
- [10] HU Huang-hua, YUAN Yan, ZHOU Yu, et al. Interferogram compression based on wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12):3307-3311. 胡煌华, 袁艳, 周宇, 等. 基于小波变换的干涉图压缩算法[J]. 光子学报, 2009, **38**(12):3307-3311.
- [11] WU Jin-ling. Fluorescence fiber temperature sensor based on wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5):1149-1152. 武金玲. 基于小波变换技术的荧光光纤温度传感器研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(5):1149-1152.
- [12] HU Hong-li, BAI Tao, MA Cai-wen, et al. An image edge-preserving disposal method for infrared focal plane arrays using wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1):169-172. 胡红利, 白涛, 马采文, 等. 基于小波变换的红外焦平面阵列图形边缘保护处理法[J]. 光子学报, 2010, **39**(1):169-172.
- [13] BIAN Wei. Discuss the method of choice and construction of wavelet bases [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2007. 边威. 小波基的选取与构造方法讨论[D]. 长春: 东北师范大学, 2007.

## New Method for Signal Processing of Displacement Interferometer

ZHAO Xin-cai<sup>1,2</sup>, WU Yun-feng<sup>1</sup>, FANG Liang<sup>1</sup>, WANG Yu-lin<sup>1</sup>

(1 *School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and  
Technology of China, Chengdu 610054, China*)

(2 *Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

**Abstract:** For the fast calculation of the short time Fourier transform, the AFDISAR signal can be preprocessed by the proposed method to get a range of the speed of the slapper, and a range of the wavelet transform scale factor can be estimated. Then, the signal is analyzed by continuous wavelet transform method. The processing results of simulated interference signals suggest that the relative error is less than 2%. The displacement interferometer in high-speed detonation test is analyzed separately by method of short time Fourier transform, of wavelet transform and the method of short time Fourier transform combining with wavelet transform. The third method can recover the velocity history accurately, and calculate error is in the tolerated rang of the system. Taking calculating speed and calculating accuracy into consideration, the third method is chosen to the AFDISAR signal analysis.

**Key words:** Measurement; Signal processing; Wavelet transform; Displacement interferometer; Velocity