

光纤多普勒测速仪位移模式数据处理新方法

袁树云 刘寿先* 王德田 陈光华 李涛 李泽仁 彭其先

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 针对窗口傅里叶变换和连续小波变换方法对于低速缓变过程速度分辨不足的缺点,提出了一种基于傅里叶变换的位移模式数据处理新方法。该方法不是通过分析信号频率获得速度,而是采用改进的傅里叶变换方法直接分析信号相位得到位移,进而求导得到速度信息。用新方法对电炮平面碰撞实验数据进行处理,很好地反映了铁样品的低压弹塑性过程。新方法不仅充分利用了原始数据的信息量,而且在低速段具有较高的速度分辨能力,可以作为窗口傅里叶变换方法和连续小波变换方法的有益补充。

关键词 光纤光学;信号处理;多普勒测速仪;干涉信号;傅里叶变换

中图分类号 O436; TN 911.74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.030602

Displacement Mode Analysis Method for Data Processing of Photonic Doppler Velocimetry

Yuan Shuyun Liu Shouxian Wang Detian Chen Guanghua

Li Tao Li Zeren Peng Qixian

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The short time Fourier transform (STFT) and continuous wavelet transform (CWT) cannot resolve slowly varying velocity at low velocity stage in most photonic Doppler velocimetry (PDV) data. A new analysis method based on Fourier transform is presented to overcome this shortcoming. Instead of extracting the frequency of interference signal for velocity analysis, the new method uses a modified Fourier transform to analysis the phase of signal, and converts phase to displacement or velocity. The validity of the proposed method is examined in experimental data of a plate-impact experiment, which distinguishes the elastic-plastic properties of Fe sample. The method not only uses all sampling points of the raw data, but also has a higher velocity resolutions especially for low velocity stage. The method is a supplement to STFT and CWT method.

Key words fiber optics; signal processing; Doppler velocimetry; interference signal; Fourier transform

OCIS codes 060.2840; 070.4790; 120.3180; 120.5050; 120.7250

1 引言

用于瞬态高速过程速度测量的光纤多普勒测速仪^[1]或者瞬态光纤位移干涉仪^[2],由于结构简单、操作简便、数据解读容易,在冲击波物理和爆轰波物理等领域逐渐得到广泛的应用^[3-4]。光纤多普勒测速仪本质上是基于光纤的迈克耳孙干涉仪,从靶面返回的带有多普勒频移信息的信号光与参考光形成差拍干涉信号,信号相位与物体运动位移成正比,信号频率与物体运动速度成正比。通常采用时频分析的方法,如短时傅里叶变换(STFT)^[5]、连续小波变换(CWT)^[2,5-6]等对其进行速度模式的数据处理。速度模式的数据处理方法优点是对噪声不敏感,直接得到速度历史。但是时频分析需要根据信号频率的不同施加不同时间长度的窗口。对于超快速度上升沿过程,速度变化比较大,采用连续小波变换或者变窗口傅里叶变换已经可以较好地恢复出速度信息^[6],但对于上升沿之前的低速慢变过程,条纹周期比较长,相应的频谱分辨能力较差,所以

收稿日期: 2013-10-03;收到修改稿日期: 2013-11-25;网络出版日期: 2014-02-19

基金项目: 中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金(SFZ20110301)

作者简介: 袁树云(1976—),女,助理工程师,主要从事瞬态光电测试技术及信号处理方面的研究。

E-mail: shuyun9700@163.com

*通信联系人。E-mail: pion55@163.com

连续小波变换方法和变窗口傅里叶变换方法都不能准确恢复出速度变化^[6]。峰值搜寻法^[7]通过搜索干涉条纹峰值点,获得一个条纹周期内的平均速度,但其在低速段减少了有效数据点数,容易丢失速度细节。因此需要探索其他方法来实现低速慢变过程的数据处理。

在干涉条纹数据处理中,傅里叶变换可用于载频条纹相位的分析^[8-10],可以解调出叠加在载频上的调制相位。而光纤多普勒测速仪信号非常类似于干涉图中的载频条纹。本文借鉴条纹图像的傅里叶处理方法,研究基于傅里叶变换的位移模式处理新方法,可以直接获得干涉信号的相位,再转换成位移,然后求导获得速度,就能够实现低速慢变过程的速度分析。

2 光纤多普勒测速仪概述

根据双光束干涉理论,光纤多普勒测速仪的干涉信号可以表示为

$$I(t) = I_o(t) + I_d(t) + 2\sqrt{I_o(t)I_d(t)} \cos\left\{2\pi \int_0^t [f_d(t) - f_o] dt + \varphi_0\right\}, \quad (1)$$

式中 $I_o(t)$ 为参考光光强, $I_d(t)$ 为靶面返回信号光光强, f_o 为参考光频率, $f_d(t)$ 为信号光频率。

由多普勒效应,可以得到

$$f_d(t) - f_o = 2v(t)/\lambda_0. \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,得到

$$I(t) = I_o(t) + I_d(t) + 2\sqrt{I_o(t)I_d(t)} \cos\left[2\pi \int_0^t \frac{2v(t)}{\lambda_0} dt + \varphi_0\right], \quad (3)$$

$$I(t) = I_o(t) + I_d(t) + 2\sqrt{I_o(t)I_d(t)} \cos\left[2\pi \frac{2D(t)}{\lambda_0} + \varphi_0\right]. \quad (4)$$

可以看出,干涉信号的频率与速度成正比,相位与位移成正比。靶面每移动半个波长(775 nm),产生一个干涉条纹。常用窗口傅里叶变换方法或者连续小波变换方法对信号进行时频分析,得到频率随时间的变化,进而由(2)式得到速度曲线 $v(t)$,这就是速度分析模式。如果通过对信号的分析直接求解出相位,进而转换成位移 $D(t)$,对其求导,再得到速度曲线 $v(t)$,这就是位移分析模式。峰值法是通过寻找相邻条纹峰值所对应的时间差 Δt_n ,然后用 775 nm 去除以 Δt_n ,获得 Δt_n 时间内的平均速度,它本质上也是一种位移分析模式。

3 基于傅里叶变换的位移模式数据处理方法

傅里叶变换方法主要是用于信号的时频分析,用以获得不同时刻信号的频率。1982年,Takeda等^[8]将其用于干涉条纹相位分析,提取出调制在载频上的相位。1997年,Liu等^[9]将该技术做了调整,能够直接解调包含载频相位和调制相位的相位信息。本文采用的基于傅里叶变换的位移模式数据处理方法即建立在该方法基础之上,原理简述如下。

(4)式的干涉信号可改写为

$$i(t) = a(t) + b(t)\cos[\varphi(t)], \quad (5)$$

式中 $a(t)$ 表示本底光强, $b(t)$ 表示靶面漫反射光光强, $\varphi(t)$ 表示干涉信号相位。(5)式又可以表示为

$$i(t) = a(t) + c(t) + c^*(t), \quad (6)$$

其中

$$c(t) = 1/2b(t)\exp[i\varphi(t)]. \quad (7)$$

(5)、(6)式的傅里叶变换可表示为

$$I(f) = A(f) + C(f) + C^*(f). \quad (8)$$

其频谱分为3个部分,如图1(a)所示,其中 $A(f)$ 为本底信号的频谱, $C(f)$ 和 $C^*(f)$ 为包含信号光幅度与相位信息的频谱。 $C(f)$ 和 $C^*(f)$ 的频谱信息是冗余的,文献[8]将 $A(f)$ 和 $C^*(f)$ 置零,并把 $C(f)$ 移动到零频位置,而文献[9]将 $A(f)$ 和 $C^*(f)$ 置零后只保留 $C(f)$,但并不移动到零频位置,如图1(b)所示。本文采

用文献[9]的方法,然后对 $C(f)$ 做逆傅里叶变换(IFT),得到(7)式的 $c(t)$,对 $c(t)$ 做对数变换,再取虚部,就得到介于 $-\pi \sim \pi$ 之间的不连续的相位分布

$$\varphi_d(t) = \text{Im}\{\lg[c(t)]\}. \quad (9)$$

所得的 $\varphi_d(t)$ 如图 1(c)所示。再对 $\varphi_d(t)$ 进行解包裹,就可以得到真实的相位信息 $\phi(t)$,如图 1(d)所示,而位移则可表示为

$$D(t) = \frac{\varphi(t) \lambda}{2\pi \cdot 2}. \quad (10)$$

最后对位移求导即可得到速度 $v(t)$:

$$v\left(\frac{t_1+t_2}{2}\right) = \frac{D(t_2) - D(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (11)$$

为减少噪声的影响,在实际应用中,在求导之前需要对位移曲线进行滤波处理,滤波器窗口宽度 W 根据信噪比选择,通常选择最短条纹周期的 1~3 倍。为不降低时间分辨本领,数值求导时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 的选择也要控制在最短条纹周期的 1~3 倍。

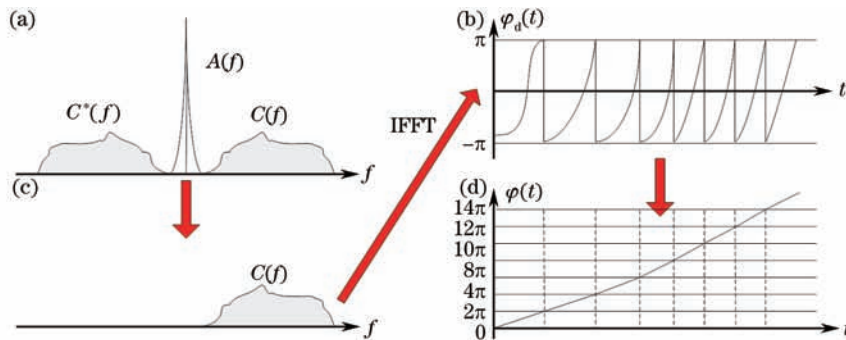


图 1 基于傅里叶变换的位移模式数据处理方法。(a) 傅里叶变换频谱;(b) 载频截取;(c) 包裹相位;(d) 解包裹相位

Fig.1 Procedure of displacement mode method based on Fourier transform. (a) Fourier spectrum; (b) single spectrum selected; (c) discontinuous phase distribution; (d) continuous phase distribution

4 实验数据分析

以电炮平面碰撞实验^[9]为例,分析基于傅里叶变换的位移模式数据处理新方法在低速缓变过程中的处理优势。电炮平面碰撞实验中,脉冲大电流通过铝膜桥箔,使得铝膜气化形成等离子体,等离子体膨胀驱动 0.25 mm 厚的 Mylar 膜, Mylar 膜在炮膛里加速到一定速度然后撞击 1 mm 厚的铁样品。用瞬态光纤多普勒测速仪测量铁样品的自由面速度,得到干涉信号。选取 2.7~3.05 μs 时间段内的信号[如图 2(a)所示,已经减去直流分量]进行数据处理。对其进行傅里叶变换,得到如图 2(b)所示的傅里叶变换频谱,粗看,频谱明显分为 3 个部分,但由于已经减去直流分量,因此对应于图 1(a)的 $A(f)$ 频谱已经消除了,如图 2(b)中的小图所示,零频已经没有了。图 2(b)中的频谱只剩下 $C(f)$ 和 $C^*(f)$,采用矩形窗截取如图 2(b)所示的虚线框中的频谱,将其他频谱置零,再对其做逆傅里叶变换,得到如图 2(c)所示介于 $-\pi \sim \pi$ 之间的包裹相位,然后对其进行解包裹^[9],得到真实的相位分布,再根据(10)式得到位移,如图 2(d)所示。接着根据(11)式得到速度曲线,如图 2(e)所示。从包裹相位曲线中的前两个包裹相位已经明显可以看到相位斜率越来越大,也就意味着速度越来越大。

将新方法得到的速度曲线与用连续小波变换方法得到的速度曲线进行对比,如图 2(f)所示。从小图可看出,两者基本上重合得比较好。但从大图中可看出,在速度起始段,也就是弹性波转塑性波阶段,两者存在较大差别。连续小波变换没有能够反映出 2.86~2.93 μs 这段时间内的两次加速过程,而新方法基本上如实反映出了从 5 m/s 缓慢加速到 30 m/s、从 30 m/s 较快加速到 100 m/s 这两个过程,纠正了小波变换方法在 2.92 μs 产生速度跳变的错误。因此,基于傅里叶变换的位移模式的数据处理新方法在低速缓变过程的数据分析中是具有优势的。

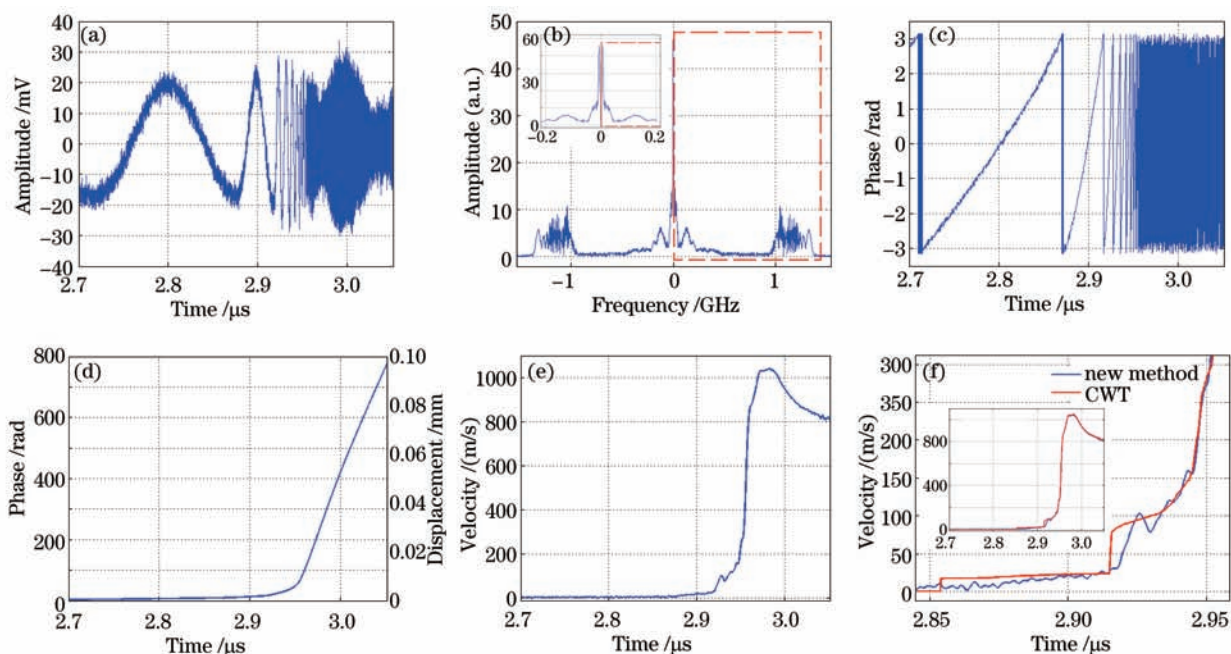


图2 平面碰撞实验的数据处理过程、结果及与连续小波变换方法比较。(a)干涉信号;(b)傅里叶变换频谱;(c)包裹相位;(d)解包裹相位及位移;(e)速度;(f)速度比较

Fig.2 Procedure of processing a signal of impact experiment and comparison between the new method and the CWT method. (a) Interferometer signals; (b) Fourier transform spectra of signals; (c) discontinuous phase distribution; (d) continuous phase distribution or displacement; (e) velocity; (f) comparison between the new method and the CWT method

5 结 论

基于傅里叶变换的位移模式光纤多普勒测速仪数据处理新方法,可以弥补窗口傅里叶变换和连续小波变换的不足,用于50 m/s以下低速缓变过程的速度分析。这种方法充分应用了所有数据点,有效保留速度细节,是窗口傅里叶变换方法和连续小波变换方法的有益补充。

参 考 文 献

- 1 Strand O T, Goosman D R, Martinez C, *et al.*. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [J]. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77(8): 083108.
- 2 Liu Shouxian, Li Zeren, Wu Jianrong, *et al.*. Signal processing of displacement interferometer based on the continuous wavelet transform [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(8): 1235-1239.
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): 1235-1239.
- 3 Jensen B J, Holtkamp D B, Rigg P A. Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry [J]. *J Appl Phys*, 2007, 101(1): 013523.
- 4 D H Dolan, T Ao, O Hernandez. Frequency-conversion photonic Doppler velocimetry with an inverted circulator [J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83(2): 026109.
- 5 Shouxian Liu, Detian Wang, Tao Li, *et al.*. Analysis of photonic Doppler velocimetry data based on the continuous wavelet transform [J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, 82(2): 023103.
- 6 Li Jianxin, Cui Yanjun, Zhu Rihong, *et al.*. Micro-displacement variation measurement by using laser interference based on wavelet transform [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0808002.
李建欣, 崔艳军, 朱日宏, 等. 基于小波变换的激光干涉微位移变化量测量方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0808002.
- 7 Li Xuemei, Zhang Lin, Li Yinghua, *et al.*. Non-linear regression analysis method for velocity profile processing of instantaneous displacement interferometer [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1): 80-84.
李雪梅, 张林, 李英华, 等. 针对瞬态位移干涉仪的非线性回归数据分析方法[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1): 80-84.
- 8 Takeda M, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and

- interferometry [J]. J Opt Soc Am, 1982, 72(1): 156-160.
- 9 J B Liu, P D Ronney. Modified Fourier transform method for interferogram fringe pattern analysis [J]. Appl Opt, 1997, 36(25): 6231-6241.
- 10 Zhang Zhihui, Wang Huaying, Liu Zuoqiang, *et al.*. Phase unwrapping algorithms based on fast Fourier Transform [J]. Lasers & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 120902.
- 张志会, 王华英, 刘佐强, 等. 基于快速傅里叶变换的相位解包裹算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 120902.