

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.05.01

光子多普勒测速系统信号解调方法比较

戴景钊, 张大治, 段小艳

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 光子多普勒测速系统具有抗干扰能力强、测速范围大等优点, 适用于信噪比低、信号质量差的测量场合。介绍光子多普勒测速系统的工作原理, 详细阐述常用的四种信号解调方法——条纹法、相位解调法、短时傅里叶变换法、小波变换法的原理、特点和近几年的研究现状。利用上述四种信号解调方法对简谐振动调制的多普勒信号进行解调仿真, 直观地展示不同信号解调方法的优缺点和适用性。实验结果表明, 相位解调法最适合用于光子多普勒测速系统振动信号解调。最后讨论了采用递归希尔伯特变换的方法减小相位解调法的正交性误差的可行性, 通过仿真实验验证了此方法的有效性。

关键词: 光子多普勒测速系统; 信号解调; 振动测量

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)05-0001-07

Comparison of Signal Demodulation Methods for Photon Doppler Velocimetry System

DAI Jingzhao, ZHANG Dazhi, DUAN Xiaoyan

(Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The photon doppler velocimetry system has the advantages of strong anti-interference ability and wide range of velocity measurement. It is suitable for low signal-to-noise ratio and poor signal quality measurement occasions. The working principle of photon doppler velocimetry system is introduced. Four commonly used signal demodulation methods, fringe method, phase demodulation method, short-time Fourier transform method and wavelet transform method, are described in detail. The four signal demodulation methods mentioned above are used to demodulate the doppler signal modulated by harmonic oscillation, and the advantages, disadvantages and applicability of different signal demodulation methods are shown intuitively. The experimental results show that the phase demodulation method is most suitable for demodulating the vibration signal of photon doppler velocimetry system. Finally, the feasibility of using recursive Hilbert transform to reduce the orthogonality error of phase demodulation method is discussed, and the effectiveness of this method is verified by simulation experiments.

Key words: photon doppler velocimetry system; signal demodulation; vibration measurement

0 引言

机身振动数据的获取与分析可用来可靠评估飞行器的工作状态, 因而对航空航天领域的研究具有重要意义。振动数据的获取方式中最常用的是激光干涉测速。传统的激光干涉测速方法有 VISAR 系统、FVISAR 系统等。2004 年, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 的 O. T. Strand 和 D. R. Goosman 等人提出了全光纤干涉测速 (Heterodyne Velocimetry) 的概念, 也称为光子多普勒测速 (Photonic Doppler Velocimetry, PDV) 系统^[1-2]。相比于传统激光测速系统, 光子多普勒测速系统具有抗干扰能力强、测速范围大、测量结果鲁棒性好等优点, 更加适用于高温、高速、高压等信噪比低、信号质量差的振动、冲击等测量场合^[3]。

信号解调是光子多普勒测速系统的重要组成部分,

其目的是从含大量噪声的多普勒信号中解调出被测物体的速度信息。目前光子多普勒测速系统信号解调方法主要有四种: 条纹法、短时傅里叶变换法、小波变换法、相位解调法。条纹法的思路是先获取多普勒信号的频率信息, 再计算得到速度; 短时傅里叶变换法和小波变换法都属于时频分析方法, 其思路是先获取二维的时频分布图, 提取时频分布曲线得到频率随时间的变化关系, 然后计算得到速度随时间变化的关系^[4]; 相位解调法则是先获取多普勒信号的相位信息, 计算得到位移, 再微分得到速度。不同的信号解调方法适用于不同的测量场景, 选择合适的信号解调方法可以在一定程度上提高测量的准确性、实时性、通用性。本文将从光子多普勒测速系统的原理出发, 讨论条纹法、相位解调法、短时傅里叶变换法、小波变换法四种解调方法的原理、特点和适用条件, 对四种方

法的性能进行仿真对比与实验验证, 归纳出各种方法的特点与适用条件。

1 PDV 系统工作原理

光子多普勒测速技术的理论基础是多普勒效应, 当运动物体和光源、探测器发生相对运动时, 从光源发出的光经运动物体反射被探测器接收会产生多普勒频移, 如图 1 所示。

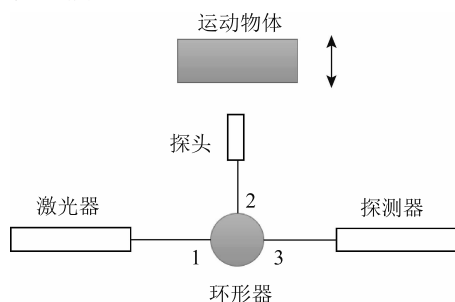


图 1 运动物体多普勒效应原理图

激光器发出的激光经环形器进入探头, 在探头表面一部分光发生反射, 另一部分光发生投射, 反射光经环形器进入探测器, 这部分光称为参考光。发生投射的光被运动物体反射后产生多普勒频移, 再经探头、环形器, 最终被光电探测器接收, 这部分光称为测量光^[5-6]。测量光与参考光发生干涉的差频频率为 Δf , 其与运动速度 u 的关系^[7-14]为

$$u = \frac{\lambda}{2} \Delta f \quad (1)$$

式中: λ 表示激光波长。因此只要得到差频频率 Δf , 就可以计算出物体运动速度^[15-19]。

2 四种信号解调方法原理

2.1 条纹法

多普勒信号本质是一种调频信号, 一个条纹对应多普勒信号的一个正弦周期。条纹法的基本思路: 先确定所有条纹特征点(极大值、极小值或过零点)的位置, 再由相邻条纹特征点的位置信息得到相邻条纹的时间间隔, 此时间间隔的倒数就是差频频率 Δf , 最后根据式(1)计算得到物体运动速度。

条纹法的关键是精准地确定所有条纹特征点的位置, 特征点位置的可靠性主要受高频噪声的影响。为解决这一问题, 可采用低通滤波、领域平滑滤波、小波分解重构、数据拟合等方法或多种方法组合来提高判断条纹特征点位置的准确率。由条纹法解得的速度是一个条纹周期内的平均速度, 为了提高条纹法的精

度, 可根据每个条纹周期内极大值、极小值、过零点的位置, 将一个周期做四细分处理, 得到四分之一周期的大小, 如此求得的速度就是四分之一周期内的平均速度。

2.2 相位解调法

相位解调法常用于激光测距的信号解调, 因为该方法直接得到位移信息而非速度。相位解调法用于光子多普勒测速系统的信号解调, 需要对位移进行微分计算从而得到速度。该方法的基本思路是对多普勒信号做希尔伯特变换得到其正交信号, 将多普勒信号与其正交信号相除并做反正切运算, 即可得多普勒信号的相位。

多普勒信号相位 φ 与运动物体位移 s 的关系式为

$$s(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(t) \quad (2)$$

据此可以计算得到运动物体的位移, 再进行微分运算即可得到运动物体的速度。

正交信号的求解是相位解调法最关键的一步, 正交误差的大小将直接影响解调的效果。由于光子多普勒测速系统的多普勒信号频率较低, 并且频谱分布较为离散, 无法通过数字混频与滤波的方法实现正交化, 因此常用希尔伯特变换的方法求解其正交信号。但是当多普勒信号不能满足 Bedrosian 乘积定理的成立条件时, 希尔伯特变换将引入很大的正交误差。研究发现, 适当增加希尔伯特变换的次数可使信号的正交误差大幅下降, 因此可采用多次希尔伯特变换的方法来提高相位解调的精度。

2.3 短时傅里叶变换法

短时傅里叶变换的基本思想是将非平稳信号假定为分段平稳的信号, 用一个固定宽度的滑动窗截取信号, 分别对每段截得的信号做傅里叶变换, 得到每段信号的频谱, 每段信号的频率就是该段频谱模极大值对应的频率。将频率代入式(1)即可求得该时间段的平均速度。

短时傅里叶变换的基本定义式为

$$STFT(t, f) = \int V(\tau) h(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

式中: $V(\tau)$ 为输入信号; $h(\tau - t)$ 为窗函数。

由于短时傅里叶变换的频谱利用固定宽度的滑动窗口进行计算, 其时频分辨率受到海森堡测不准原理的限制, 不能同时提高时间分辨率和频率分辨率。时间和频率分辨率满足如下关系

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq \frac{1}{4\pi} \quad (4)$$

当采用短窗口时, 频率分辨率低, 时间分辨率高; 采用长窗口时, 时间分辨率低, 频率分辨率高。短时傅里叶变换对相对平稳的信号和变化剧烈的信号都得不到最佳的分辨率, 因此只能取一个合适的窗口来平衡这两种情况。

2.4 小波变换法

小波变换不仅继承和发展了短时傅里叶变换的局部化处理思想, 而且也解决了固定窗口的问题, 其时频窗口宽度随信号频率改变, 因此可以同时兼顾时域和频域上的分辨率, 从而适用于分析非平稳信号。

对于非平稳信号 $V(t)$, 小波变换的定义式可表示为

$$W_v(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} V(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} d\tau = \langle V, \psi_{a,b} \rangle \quad (5)$$

式中: a 为小波比例因子, 影响时间窗口的宽度; b 为小波基函数在时间轴上的平移量, 影响中心频率的位置。比例因子 a 越大对应的频域分辨率越高, 时域分辨率越低。 $\frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为小波基函数, 它需要满足容许性条件

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (6)$$

式中: $\hat{\psi}(\omega)$ 为 $\psi(t)$ 的傅里叶变换; ω 为傅里叶变换的角频率。

对多普勒信号进行时频分析的小波基函数多为修正的 morlet 小波, 它的时域和频域分辨率关系如下:

$$\Delta f \cdot \Delta t = \frac{1}{4\pi} \quad (7)$$

可以看出, 采用修正的“morlet”小波基函数的小波变换不但有可变宽度的窗口, 而且它的时频分辨率也比短时傅里叶变换高。

小波变换后得到的小波系数表示该部分信号与小波的接近程度。在比例因子固定的情况下, 小波系数的幅值越高, 说明小波函数的频率与对应时间窗口内信号的局部频率越接近。在时间轴、比例因子轴、小波系数幅值轴组成的三维坐标系中, 小波变换幅值最大值位置的连线定义为小波变换的脊 $a_r(b)$, 计算出时间轴上的脊 $a_r(b)$, 即可得到对应信号的频率。

$$\omega(b) = \frac{\omega_0}{a_r(b)} \quad (8)$$

式中: ω_0 为小波函数的中心频率。由式(8)得到任意时刻信号的频率, 再根据式(1)计算得到速度信息。

3 信号解调方法的仿真对比

在 MATLAB 仿真平台上, 分别利用上述四种信号解调方法对振动信号进行解调仿真, 直观地展示不同信号解调方法的优缺点和适用性。

首先对简谐振动调制的光子多普勒测速系统信号数学模型进行分析。

已知两个相干光发生干涉的公式

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[2\pi f t + (\varphi_1 - \varphi_2)] \quad (9)$$

式中: I_1, I_2 为两束光的光强; $\varphi_1 - \varphi_2$ 为两束光的相位差。当两束光的频率不同时, 式(9)可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left[2\pi \int_0^t \Delta f(t) dt + (\varphi_1 - \varphi_2)\right] \quad (10)$$

根据平方检测原理, 光电探测器输出的电压信号为

$$V(t) = V_0 + 2R \sqrt{I_1 I_2} \cos\left[2\pi \int_0^t \Delta f(t) dt + (\varphi_1 - \varphi_2)\right] \quad (11)$$

式中: V_0 为直流偏置; R 为光电探测器的灵敏度。

因此, 本仿真的多普勒信号的数学模型为

$$V(t) = B \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t v(t) dt + \varphi_0\right] + V_0 \quad (12)$$

式中: B 为多普勒信号的幅值; $v(t)$ 为振动速度。

本仿真是简谐振动调制的光子多普勒信号, 其中, 振动频率为 200 Hz, 振动速度幅值为 0.25 m/s, 多普勒信号幅值为 200 mV, 激光波长为 1550 nm。为了模拟真实测量环境, 加入高斯白噪声以模拟光电探测器和数据采集设备引入的高频电子噪声, 加入低频正弦噪声以模拟环境振动引入的低频噪声。图 2、图 3 分别为仿真的多普勒信号波形和速度信号波形。

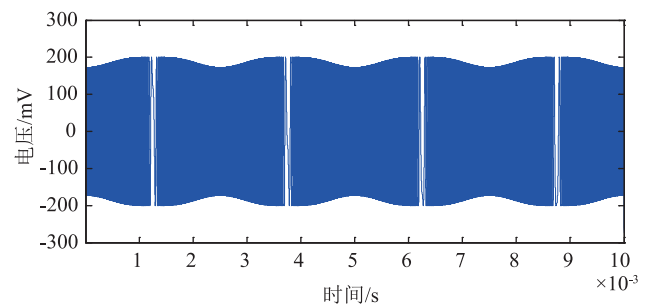


图2 仿真的多普勒信号

分别用条纹法、相位解调法、短时傅里叶变换法、小波变换法对多普勒信号进行处理。针对上述信号的

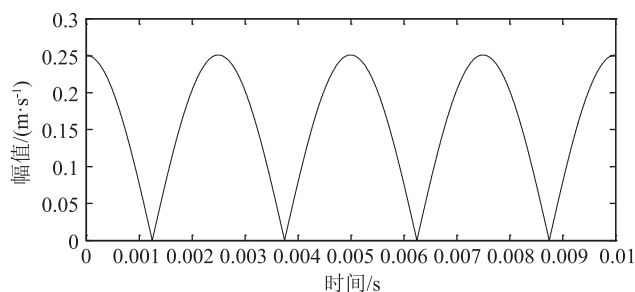


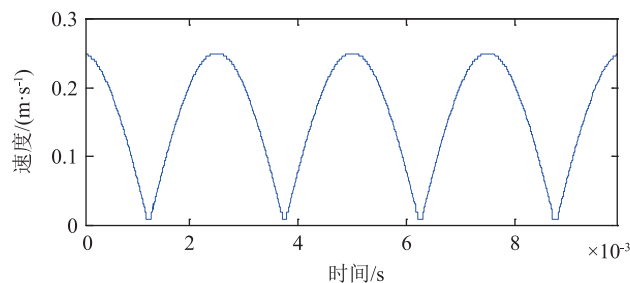
图3 仿真的振动速度波形

特征,短时傅里叶变换法采用 0.1024 ms 宽度的汉明窗,每段的重叠样本为 0.1 ms,做 FFT 的长度为 0.1024 ms;小波变换采用“cmor2-1”小波基函数,尺度为 2048;条纹法和相位解调法为通用算法,不需要做参数设置。图 4 中的(a)~(d)图分别为短时傅里叶变换法、小波变换法、条纹法、相位解调法的解调结果。

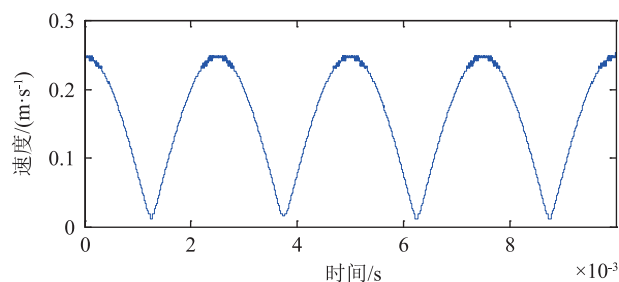
为了更加清晰地辨别四种信号解调方法的效果,将解调得到的速度与设定的速度做差,通过绝对误差随时间变化的曲线来考察四种信号解调方法的精度。图 5 中的(a)~(d)图依次为短时傅里叶变换法、小波变换法、条纹法、相位解调法的处理结果对应的绝对误差曲线。

对比绝对误差幅值可以看出,短时傅里叶变换法的解调结果绝对误差小于 0.01 m/s;小波变换法的解调结果绝对误差也小于 0.01 m/s,但略小于短时傅里叶变换法的绝对误差;条纹法和相位解调法的绝对误差均小于 0.005 m/s。直观比较绝对误差曲线可以看出,条纹法和相位解调法最优,其次是小波变换法,最后是短时傅里叶变换法。

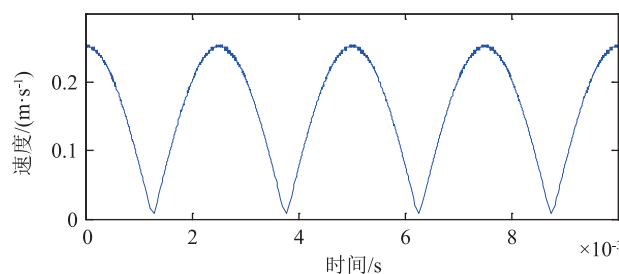
对比绝对误差波形形式可以看出,当速度接近于零时,短时傅里叶变换法、小波变换法、条纹法的解调结果绝对误差都比较大,而相位解调法则不存在这一问题。针对此现象,下面分别从四种方法原理的角度给出解释:对于短时傅里叶变换法,为了准确解调出速度幅值,选择了 0.1024 ms 宽的固定时间窗口,这种窄窗口在中高速情况下比较适用,但对于速度接近于零的情况基本无法适用;对于小波变换法,虽然在低速时窗口宽度可以增大,但是增大幅度有限,尤其是速度接近于零时误差也急剧增大;对于条纹法,在速度越接近于零的位置,条纹越稀疏,四分之一差频周期内的平均速度与实际瞬时速度的误差也就越大;相位解调法不存在速度接近零时绝对误差增大的问题,这是因为相位解调法是从多普勒信号中解调出



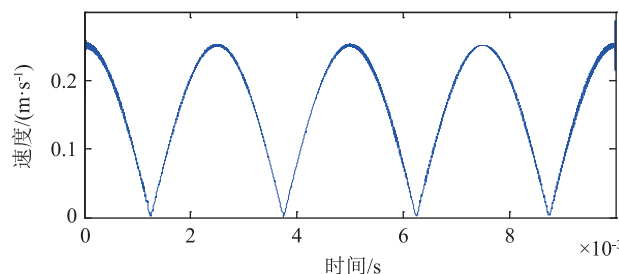
(a) 短时傅里叶变换法



(b) 小波变换法



(c) 条纹法



(d) 相位解调法

图4 四种信号解调方法得到的速度曲线

相位信息,每个数据点都代表一个相位信息,即使是在速度接近于零时差频周期不完整的情况下,该方法也能保证很高的分辨率。

四种信号解调方法的优缺点可总结如下:条纹法原理简单,解调过程可靠性好,但计算步骤繁琐,当条纹稀疏时的解调结果误差较大;短时傅里叶变换法算法复杂度最低、运算速度最快,但解调结果的误差也最大,另外由于窗口宽度固定,导致时间和频率分辨率相互限制;小波变换法的窗口宽度可调,时频分辨率高,在冲击等非平稳信号的解调中占有优势,缺

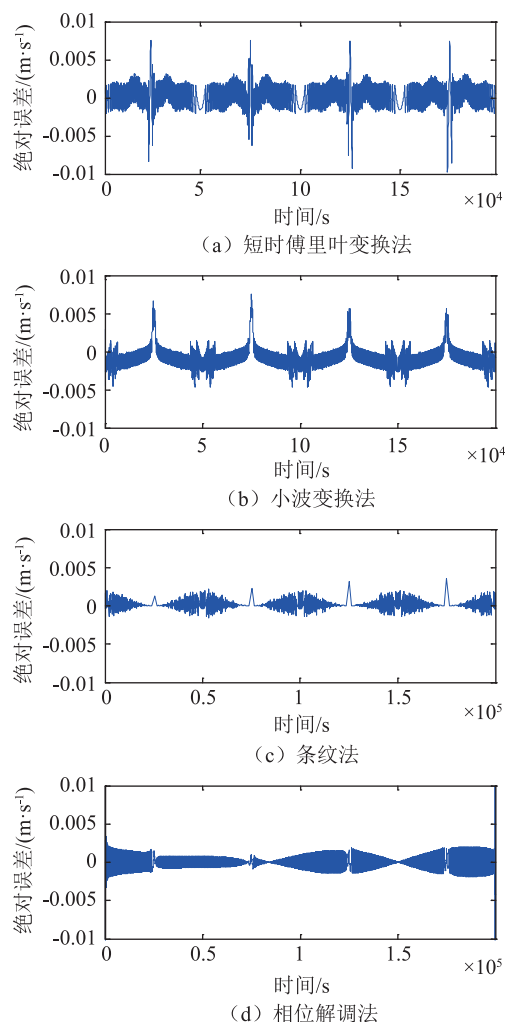


图5 四种信号解调结果的绝对误差曲线

点是小波基函数确定后不能更改,而且小波基函数的选择全凭实验与经验判断,不确定性较大;相位解调法的分辨率高,对于低速运动的解调效果最好,但是

容易引入正交误差。

综上,相位解调法在速度接近零时的结果绝对误差最小,解调效果最佳,最适合用于光子多普勒测速系统的信号解调。不过该方法也具有局限性:信号做希尔伯特变换的结果并非严格等于其正交信号,其正交误差会使速度解调精度降低,尤其当信号条件不能满足 Bedrosian 乘积定理时,正交误差会快速增大。为解决这一问题,可采用递归希尔伯特变换的方法,用上一步希尔伯特变换获得的信号作为目标信号,递归地进行希尔伯特变换计算出新的目标信号,该递归过程收敛速度快,最终得到的目标信号可近似等于原信号的正交信号。

对递归希尔伯特变换的递归步数与表示正交误差大小的正交误差函数能量之间的关系进行仿真。从图6中可以看出,当递归步数大于10步之后,正交误差函数的能量低于 10^{-10} ,此时的正交误差可以忽略不计。由此可知,递归希尔伯特变换的收敛速度较快,在实际实验中可根据数据精度需求适当选择递归步数。

为了进一步验证递归希尔伯特变换处理的有效性,分别采用递归希尔伯特变换和普通希尔伯特变换对一组实测数据进行处理。图7、图8分别为两种处理方法的李萨如图。

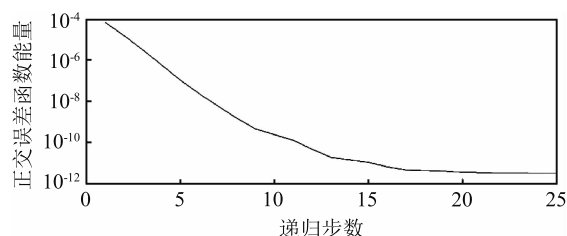


图6 正交误差函数能量与递归步数的关系

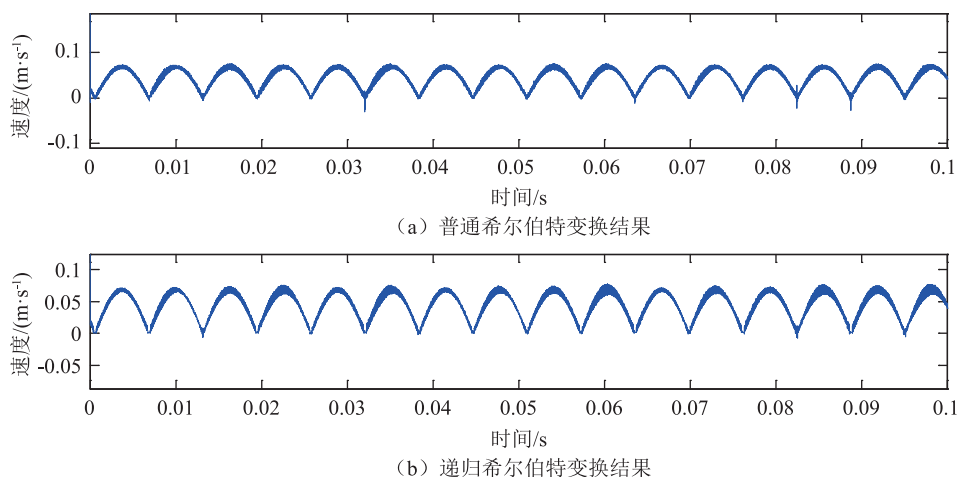


图7 两种处理方法的速度结果

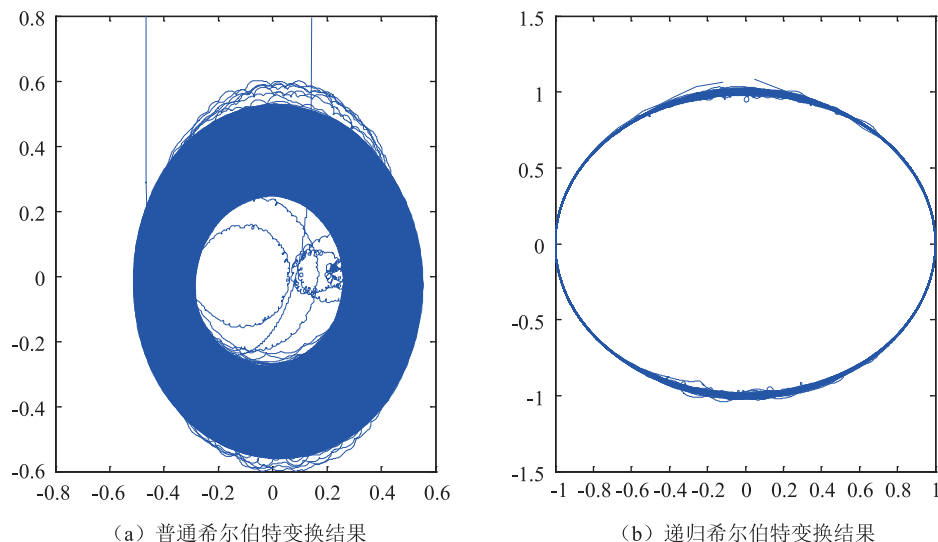


图 8 两种处理方法的李萨如图

图 7(a) 为普通希尔伯特变换处理的结果, 图 7(b) 为递归希尔伯特变换处理的结果; 图 8(a) 为普通希尔伯特变换处理的结果, 图 8(b) 为递归希尔伯特变换处理的结果。通过两图对比可以看出, 递归希尔伯特变换能够有效降低正交误差给测量结果带来的影响。

4 总结

本文从光子多普勒测速系统的原理出发, 介绍了条纹法、相位解调法、短时傅里叶变换法、小波变换法四种常用的信号解调方法。对四种信号解调方法的基本原理、优缺点和近几年的研究现状进行了详细阐述。以简谐振动调制的多普勒信号为目标信号, 分别对四种信号解调方法进行仿真实验, 对比发现: 条纹法、短时傅里叶变换法和小波变换法对于速度接近于零时的解调结果绝对误差骤升, 而相位解调法分辨率较高, 解调结果最好, 因此相位解调法更适用于光子多普勒测速系统振动信号的测量。最后讨论了采用递归希尔伯特变换的方法减小相位解调法的正交误差的可行性, 通过仿真实验验证了该方法的有效性。

目前的光子多普勒测速系统在振动、冲击等测量场合应用越来越广泛, 其信号解调方法越来越完善, 不过仍有需要提高和改进之处:

(1) 提高信号解调的实时性, 实现在线测量。提高解调实时性有两个主要思路: 一个是优化算法本身, 在保证解调精度的前提下, 降低算法复杂度或减少参与运算的数据量; 另一个是通过硬件实现解调算法的并行运算, 从而提高解调算法的运行效率, 其中最具代表性的就是基于 FPGA 的信号采集处理系统。

(2) 改进降噪方法, 提高信号信噪比。为了提高低信噪比光电信号的解调精度, 需要进一步研究更有效的降噪方法, 以降低噪声对光电信号相位和频率的影响。

参考文献

- [1] Strand O T, Goosman D R. Velocimetry using heterodyne techniques[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2005, 5580: 593 - 599.
- [2] 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): 083108.
- [3] Dolan D H. Accuracy and precision in photonic doppler velocimetry [J]. The Review of scientific instruments, 2010, 81(5): 053905.
- [4] 刘海燕, 田钢, 石战结. 几种时频分析方法的比较和实际应用[J]. CT 理论与应用研究, 2015, 24(02): 199 - 208.
- [5] Gallegos C H, Marshall B, Teel M, et al. Comparison of triature doppler velocimetry and visar[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 244(3): 032045.
- [6] Liu S, Wang D, Li T, et al. Analysis of photonic doppler velocimetry data based on the continuous wavelet transform[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(2): 023103.
- [7] 石晓. 全光纤多点激光干涉速度测量系统的研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [8] 唐雯雯. 光子多普勒二维速度测量系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [9] 覃锦程. 凝聚炸药爆轰反应区结构研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2018.
- [10] 武颖丽, 吴振森. 基于希尔伯特变化的微小振动激光多普勒信号处理[J]. 中国光学, 2013, 6(03): 415 - 420.

- [11] 张雄星, 郝冬杰, 张梦娇. 低信噪比激光多普勒信号相位分析算法[J]. 西安工业大学学报, 2017, 37(08): 571-576.
- [12] 张雄星, 张梦娇, 杨宇祥, 等. 激光多普勒信号相位解调算法误差分析[J]. 西安工业大学学报, 2016, 36(12): 954-958.
- [13] 胡志祥, 任伟新. 基于递归希尔伯特变换的振动信号解调和瞬时频率计算方法[J]. 振动与冲击, 2016, 35(07): 39-43.
- [14] 吴立志, 陈少杰, 叶迎华, 等. 用于瞬态高速飞片速度测量的光子多普勒测速系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 263-267.
- [15] 杨军, 李焰, 张德志, 等. 光子多普勒测速仪与压杆相结合的冲击波反射压力测试技术[J]. 兵工学报, 2017, 38(07): 1368-1374.
- [16] 张敏, 杨军, 史国凯, 等. 基于双光源干涉的 PDV 数据补偿方法[J]. 高压物理学报, 2019: 1-6.
- [17] 项红亮, 王健, 毕重连, 等. 光子多普勒速度测量系统的数据处理方法[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(02): 52-56.
- [18] 宋宏伟, 吴先前, 王健, 等. 光纤激光干涉测量激光冲击强化自由表面速度[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2012, 42(08): 861-868.
- [19] 倪佳敏, 王健, 傅迎光, 等. 基于 LabVIEW 与 Matlab 的实时在线光子多普勒测速系统[J]. 光电技术应用, 2014, 29(03): 65-70.

收稿日期: 2019-08-30; 修回日期: 2019-09-04

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2016YFF0100600)

作者简介



戴景钊(1994-), 男, 硕士研究生, 2017年毕业于天津大学, 获工学学士学位; 现于航空工业 304 所攻读硕士学位, 主要研究方向为信号处理与 FPGA 实现。

2019 年华东地区计量工作会议召开

2019 年 10 月 10 日上午, 由华东国家计量测试中心(上海市市场监管局)牵头组织的华东一市六省年度区域计量工作会议在合肥召开。省市场监管局党组书记、局长韩永生出席会议。上海市市场监管局副局长徐徕主持会议。市场监管总局计量司计量管理与技术规范处主要负责人, 华东一市六省市场监管局分管领导、计量处和省计量院负责人等参加会议。

韩永生在致辞中向嘉宾们介绍了安徽省经济社会发展情况以及安徽省市场监管局工作, 特别是计量工作情况, 并对华东和长三角地区区域计量工作提出了期望: 一是进一步推动完善华东和长三角区域计量保障体系; 二是促进华东和长三角区域计量检测能力提升、计量检测互认及信息共享; 三是探索建设华东和长三角区域最高计量基标准; 四是推动华东和长三角区域产业计量体系建设。

会议期间, 与会代表交流了 2019 年前三季度各地计量重点工作, 围绕当前计量监管和机构改革中存在的主要问题和对策开展了研讨, 对《非法定计量单位限制使用管理办法》、《计量校准管理办法》、《华东国家计量测试中心关于加强长三角计量专家资源共享的指导意见》、《华东国家计量测试中心关于加强长三角地区计量技术规范共建互认的通知》、《关于构建区域发展计量支撑体系的指导意见》等意见稿进行了研讨。会议还组织参会代表赴中国科学技术大学、科大讯飞股份有限公司、安徽省计量院等单位进行了调研。

(摘自 计量测控)