

引用格式: JING Ya-dong, WANG Ke-ning, FENG Jia-shuang, *et al.* Digital Correlation Phase Discrimination Algorithm for Doppler Acceleration Measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(12): 1206003

景亚冬, 王可宁, 冯嘉双, 等. 多普勒加速度测量的数字相关鉴相算法[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 1206003

多普勒加速度测量的数字相关鉴相算法

景亚冬¹, 王可宁¹, 冯嘉双¹, 张雄星¹, 王伟^{1,2}

(1 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

(2 陕西省组合与智能导航重点实验室, 西安 710068)

摘 要: 针对激光多普勒加速度测量系统信号信噪比较差的问题, 提出了一种采用数字相关鉴相算法进行加速度解调的方法. 使用数字相关鉴相算法计算激光多普勒加速度测量系统中两路干涉信号的相位差, 再由相位差的变化率来计算目标加速度, 从而实现运动物体加速度的连续测量. 仿真结果表明: 该算法在信噪比为 20 dB 时, 加速度测量的误差为 0.135 m/s^2 , 分辨率为 $7.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$. 搭建了激光多普勒加速度测量系统, 对压电陶瓷振荡器的加速度进行测量, 加速度的测量误差为 0.13 m/s^2 . 测量结果表明, 该算法能够有效减少随机噪声的干扰, 提高加速度的测量精度.

关键词: 光学相干; 加速度测量; 数字相关鉴相; 多普勒效应; 相位解调

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1206003

Digital Correlation Phase Discrimination Algorithm for Doppler Acceleration Measurement

JING Ya-dong¹, WANG Ke-ning¹, FENG Jia-shuang¹, ZHANG Xiong-xing¹, WANG Wei^{1,2}

(1 School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(2 Shaanxi Provincial Key Laboratory of Combination and Intelligent Navigation, Xi'an 710068, China)

Abstract: Aiming at the problem of a poor signal-to-noise ratio in the laser Doppler acceleration measurement system, the digital correlation phase-detection algorithm was proposed for acceleration demodulation. The phase difference between the two interference signals in the laser Doppler acceleration measurement system was calculated by the digital correlation phase discrimination algorithm, and the acceleration of target was calculated from the rate of change of the phase difference, thereby the continuous acceleration measurement of the moving object was realized. The simulation results show that the error of the acceleration measurement is 0.135 m/s^2 and the resolution is $7.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$, when the signal-to-noise ratio is 20 dB. The laser Doppler acceleration measurement system was built to measure the acceleration of the piezoelectric ceramic oscillator, the error of the acceleration measurement is 0.13 m/s^2 . The measurement results show that the algorithm can reduce the interference of random noise and improve the accuracy of acceleration measurement.

Key words: Optical coherence; Acceleration measurement; Digital correlation phase detection; Doppler effect; Phase demodulation

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 040.2840; 280.4788; 050.5080

基金项目: 西安市智能探视感知重点实验室项目(No.201805061ZD12CG45), 陕西省组合与智能导航重点实验室开放基金(No.SKLIIN-20180210)

第一作者: 景亚冬(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: jingydxatu@163.com

通讯作者: 王伟(1973-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电测试技术、光纤传感技术. Email: wangwei@xatu.edu.cn

收稿日期: 2019-05-17; 录用日期: 2019-08-14

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

在工业领域,对设备与仪器工作状态下振动信息的监测主要分为接触式和非接触式.接触式测量技术已十分成熟^[1],但由于需要将传感单元安装在待测物体上,必然影响其运动状态,导致测量结果存在较大误差,所以只能应用于测量精度要求不高的场合^[2-3].相较于接触式测量,非接触式测量应用前景更加广阔,其中基于激光多普勒效应的非接触式测量技术,由于具有测量精度高,空间、时间分辨率高,动态范围大,灵敏度高优点,已得到了广泛应用^[4-6].其测量原理为:将激光束照射到振动物体表面,散射光会携带反映振动物体振动信息的多普勒频移,对多普勒频移解调,完成振动信息的检测.

多普勒信号的解调方法主要包括鉴频算法和鉴相算法,其中鉴频算法主要用于解调目标速度,而鉴相算法则用于解调目标位移.激光多普勒信号的常用鉴频算法为短时傅里叶变换法^[7-8],该算法的主要缺点为无法同时提高解调的时间分辨率和频率分辨率.多普勒信号的鉴相算法主要包括 IQ 正交解调法^[9-10]和希尔伯特变换法^[11-12],这两种算法都是通过将激光多普勒信号移相 90° ,再利用反正切运算得到多普勒信号的相位.这类算法的缺点是:通过反正切运算计算相位受信号噪声影响较大,算法的鲁棒性较差.对于振动物体散射光十分微弱,通过光电探测器探测的多普勒信号信噪比较低^[13-14]的问题,鉴频算法和鉴相算法的解调均存在一定缺陷.

国内外学者对多普勒信号的解调进行了较为深入的研究,杜军等^[15]对相位调制激光多普勒频移测量方法进行改进,引入新的鉴频分量,利用相位调制信号的直流与交流分量中的有用信号完成多普勒信号解调,极大地提高了测量的动态范围和精度;任恩恩等^[16]利用 3×3 光纤耦合器将原始多普勒信号进行分束,3 束信号相位差均为 120° ,由其中两束构造具有 90° 相位差的两路正交信号,根据反正切运算完成多普勒信号的解调;周健等^[17]将多普勒信号进行自相关运算,得到其自相关信号,再对自相关信号进行短时傅里叶变换,计算信号的瞬时频率,有效抑制了噪声信号的干扰.

多普勒信号多为周期性信号,而噪声多为随机信号,两者之间相关性极低,利用相关检测法能够有效抑制噪声对于解调结果的影响.本文提出将数字相关鉴相算法用于多普勒加速度信号的解调,减少了噪声信号的干扰,实现了多普勒加速度信号的直接解调.对不同信噪比下多普勒加速度信号解调过程进行了仿真分析,并搭建了光纤激光多普勒加速度测量系统,对压电陶瓷振荡器的加速度进行测量,验证了方法的有效性.

1 数字相关鉴相算法解调原理

激光多普勒加速度测量原理为:当激光束照射到运动物体表面时,其反射光会携带多普勒频移 $f_d(t)$,其表达式为

$$f_d(t) = \frac{2\nu(t)}{\lambda} \quad (1)$$

式中, $\nu(t)$ 为物体运动速度, λ 为激光器的中心波长.将携带多普勒频移的信号光进行分束,并利用光纤延时器件对一路信号光进行延迟,延迟时间为 τ ,由于运动物体加速度的存在,在 t 时刻探测器探测的两路信号光将具有不同的多普勒频移量 $f_d(t)$ 和 $f_d(t-\tau)$,从而两路多普勒信号产生相位差 $\varphi(t)$,由相位差 $\varphi(t)$ 可实现加速度的测量.

通过数字相关鉴相算法对两路多普勒信号之间相位差 $\varphi(t)$ 进行解调,其原理为:假设两路多普勒信号为

$$\begin{cases} x(t) = A \cos(\omega t + \theta) + N_x(t) \\ y(t) = B \cos[\omega t + \theta + \varphi(t)] + N_y(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 和 B 分别为两路多普勒信号的振幅, ω 为角频率, θ 为初相位, $N_x(t)$ 和 $N_y(t)$ 为随机噪声, $\varphi(t)$ 为相位差,两路信号的互相关函数表示其相关程度,其表达式为

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (3)$$

$$R_{xy}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t)dt \quad (4)$$

式中, $R_{xy}(\tau)$ 表示信号 $x(t)$ 与经过延迟时间 τ 后 $y(t+\tau)$ 信号之间的相关程度, 根据式(4), $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间无延迟时, 由于噪声与信号, 噪声与噪声之间不相关, 有如下关系

$$R_{xy}(0) = \frac{AB}{2} \cos \varphi \quad (5)$$

式中, $A = \sqrt{2R_x(0)}$, $B = \sqrt{2R_y(0)}$, $R_x(0)$ 和 $R_y(0)$ 为两路多普勒信号的自相关函数, 根据式(5), 两路多普勒信号的相位差为

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R_{xy}(0)}{\sqrt{R_x(0)R_y(0)}}\right) \quad (6)$$

利用光电探测器将探测得到的多普勒光信号转换为电信号, 利用示波器完成数据采样, 同一时刻两路多普勒信号的互相关函数为

$$R_{xy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N-1} x(n)y(n) \quad (7)$$

式中, $x(n)$, $y(n)$ 为 N 位采样值, 根据式(6)得到两路多普勒信号的相位差 $\varphi(t)$ 后, 两路多普勒信号之间的频移差 $f_d(t) - f_d(t-\tau)$ 可表示为

$$\Delta f = f_d(t) - f_d(t-\tau) = \frac{d\varphi(t)}{2\pi dt} \quad (8)$$

由式(1)和(8)可知, 运动物体的加速度为

$$a = \frac{\lambda}{2\tau} \Delta f = \frac{\lambda d\varphi}{4\pi\tau dt} \quad (9)$$

2 仿真分析

2.1 光纤激光多普勒加速度测量系统

利用光纤激光多普勒加速度测量系统验证数字相关鉴相算法解调加速度的可行性. 实现加速度测量的光纤激光多普勒测量系统如图1所示, 系统主要包括: 窄线宽激光器、光纤环行器、 1×3 光纤耦合器、光纤准直器、声光移频器 (Acousto-optic Frequency Shifters, AOFS)、光纤延迟线、 1×2 光纤耦合器、2 个 2×1 光纤耦合器和 2 个光电探测器. 窄线宽激光器的出射光耦合进入光纤环行器 1 端口, 从 2 端口出射, 经光纤准直器准直后垂直照射到运动物体表面, 与运动物体方向一致, 运动物体表面的反射光携带多普勒频移耦合进入光纤环行器 2 端口, 从 3 端口出射, 经 1×3 光纤耦合器分为携带相同多普勒频移的 3 束信号光, 一束通过 AOFS 移频, 经 1×2 光纤耦合器分为两束, 一束与经过光路 a 的信号光在 2×1 光纤耦合器 1 中干涉, 利用光电探测器 1 接收, 另外一束与经过光路 c 的信号光在 2×1 光纤耦合器 2 中干涉, 利用光电探测器 2 接收.

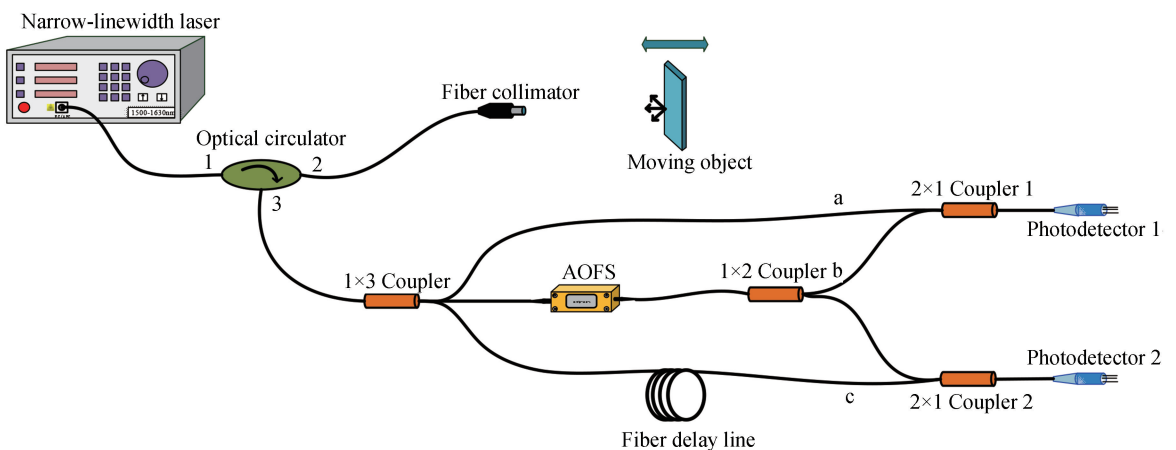


图1 光纤激光多普勒加速度测量系统

Fig.1 Measurement system of fiber laser Doppler acceleration

根据光外差探测原理及光电探测器的平方率公式可知^[18-19],两路光电探测器的输出光电流为

$$i_1(t) = k \left\{ \frac{A_1^2 + A_2^2}{2} + A_1 A_2 \cos [2\pi f_A t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \right\} \quad (10)$$

$$i_2(t) = k \left\{ \frac{A_2^2 + A_3^2}{2} + A_2 A_3 \cos [2\pi(f_A + f_d(t) - f_d(t - \tau))t + (\varphi_2 - \varphi_3)] \right\} \quad (11)$$

式中, k 是光电探测器的灵敏度, f_A 为 AOFS 的频移量, A_1, A_2, A_3 为 3 路信号光场幅度, $\varphi_1(t), \varphi_2(t)$ 和 $\varphi_3(t)$ 为 3 路信号的初相位, 将 t 时刻由多普勒频移差引起的两路光电探测器输出光电流的相位差 $2\pi[f_d(t) - f_d(t - \tau)]t$ 以 $\varphi(t)$ 表示, 则有

$$i_2(t) = k \left\{ \frac{A_2^2 + A_3^2}{2} + A_2 A_3 \cos [2\pi f_A t + \varphi(t) + (\varphi_2 - \varphi_3)] \right\} \quad (12)$$

由式(10)和式(12)可知, 两路光电探测器输出光电流的交流部分频率相同, 相位差为 $\delta\varphi = \varphi(t) + (\varphi_2 - \varphi_3) - (\varphi_2 - \varphi_1)$, 其中 $(\varphi_2 - \varphi_3)$ 与 $(\varphi_2 - \varphi_1)$ 固定不变, 满足数字相关鉴相算法的要求。

2.2 加速度解调过程仿真分析

对数字相关鉴相算法解调激光多普勒加速度测量系统中运动物体加速度的过程在 MATLAB 中进行仿真分析, 根据已有实验条件设置相关参数, 以便于与实验结果进行对比, 设置出射激光中心波长 λ 为 1 550 nm, 频移量 f_A 为 40 MHz, 延迟时间 τ 为 4.833 μ s, 运动物体做频率 f 为 50 Hz, 最大位移量 S 为 6.92 μ m 的简谐运动, t 时刻两路多普勒信号对应的位移分别为 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$, 其表达式为

$$\begin{cases} s_1(t) = S \cos(2\pi f t) \\ s_2(t) = S \cos[2\pi f(t - \tau)] \end{cases} \quad (13)$$

根据式(10)和式(12), 光电探测器输出的两路光电流交流部分频率^[17]相同

$$\begin{cases} I_1(t) = \cos(2\pi f_A t) + n_1(t) \\ I_2(t) = \cos \left\{ 2\pi f_A t + \frac{4\pi}{\lambda} [s_1(t) - s_2(t)] \right\} + n_2(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 为在两路多普勒信号中加入的信噪比 40 dB 的高斯白噪声, 根据式(6), 得到两路信号的相位差, 根据式(9), 计算得到运动物体的加速度. 将解调得到的加速度作为解调值, 对运动物体的位移公式两次求导得到的加速度作为理论值, 两者对比结果如图 2.

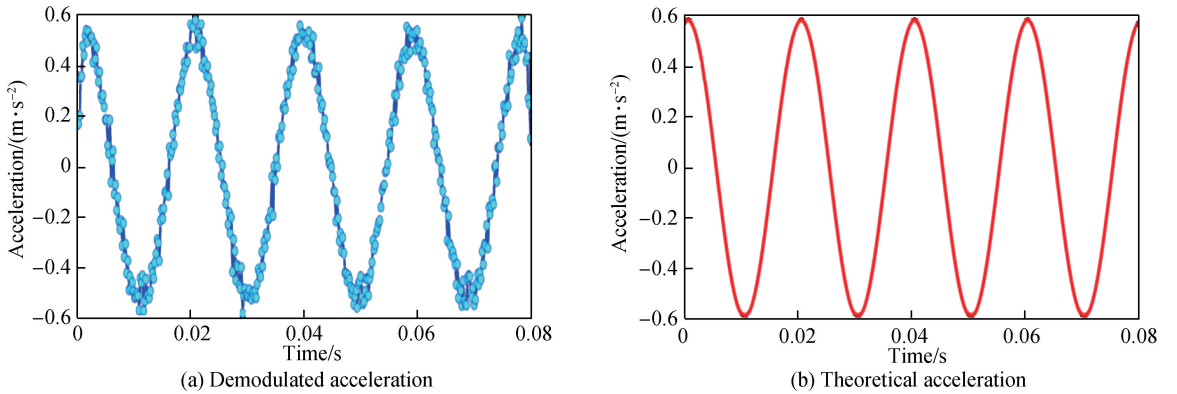


图 2 解调加速度与理论加速度对比

Fig.2 Comparison between demodulated acceleration and theoretical acceleration

从图 2 可以看出, 数字相关鉴相算法解调得到的运动物体加速度曲线与通过运动物体位移方程两次求导得到的加速度理论值曲线具有较好的一致性, 但是仍存在一定偏差. 根据式(9)可知, 加速度的误差传递函数为

$$\Delta a = \frac{\lambda \Delta \varphi}{2\pi \tau \Delta t} \quad (15)$$

式中, $\Delta \varphi$ 为鉴相误差, Δa 为加速度的解调误差. 其中 $\Delta \varphi$ 与多普勒信号的信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 有关, 对不同信噪比下的多普勒信号进行仿真分析, 结果如表 1.

表 1 不同信噪比下的解调误差

SNR(dB)	Phase error/rad	Demodulation error/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
20	5.4×10^{-5}	0.135
30	4.550×10^{-5}	0.114
40	2.879×10^{-5}	0.072

根据仿真结果,加速度的测量误差主要由多普勒信号的信噪比决定,当信噪比为 20 dB 时,加速度测量误差为 0.1325 m/s^2 .加速度的分辨率是由数字相关鉴相算法的分辨率决定,当两路干涉信号的相位差 $\Delta\varphi$ 接近 $\pi/2$ 或者 $3\pi/2$ 时,数字相关鉴相算法所得相位差的分辨率最高,为 10^{-8} rad,加速度的分辨率也最高,为 $7.3\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$;当 $\Delta\varphi$ 接近 0 或者 π 时,数字相关鉴相算法的分辨率最低,为 10^{-6} rad,加速度的分辨率也最低,为 $7.3\times 10^{-3} \text{ m/s}^2$.

3 实验验证

根据光纤激光多普勒加速度测量系统,搭建实验装置,如图 3 所示.窄线宽激光器使用 NKT Photonics 公司生产的 Koheras BASIK 型超窄线宽光纤激光器,中心波长为 1550 nm,最大输出光功率 40 mW,线宽小于 100 Hz,AOFS 由中国电子科技集团公司第二十六研究所生产,频移量为 40 MHz,移频误差为 $\pm 20 \text{ kHz}$,光纤延迟线利用 1 km 的单模光纤代替,延迟时间 $\tau = 4.833 \mu\text{s}$,光电探测器使用 InGaAs 光电二极管,上升时间 3.5 ps,响应灵敏度为 0.65 A/W .以压电陶瓷振荡器作为运动物体,利用任意波形发生器输出余弦形式的模拟信号,经压电陶瓷控制器放大,驱动压电陶瓷振荡器做简谐运动,当其工作在开环状态时,最大位移量为 $9.17 \mu\text{m}$.

通过将压电陶瓷振荡器固定在五维调节架上,调节五维调节架使光纤准直器的出射光垂直照射到压电陶瓷振荡器表面,保证入射光与压电陶瓷振荡器运动方向一致,任意波形发生器输出的频率 50 Hz,峰峰值 8 V 的余弦信号经压电陶瓷控制器放大,驱动压电陶瓷振荡器做简谐运动,两路光电探测器输出的原始多普勒信号通过示波器采集,由于多普勒频移差较小,两路信号频率均接近 40 MHz,对加速度信号解调,结果如图 4.

由图 4 可知,实测加速度曲线接近余弦曲线,周期与压电陶瓷振荡器的运动周期一致,实现了压电陶瓷振荡器加速度信号的解调.对压电陶瓷振荡器在 8 V,50 Hz 余弦信号驱动下的加速度进行多次重复测量,测量结果如表 2.

表 2 压电陶瓷振荡器的解调误差

Group	Demodulation error/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
1	0.138 5
2	0.130 6
3	0.132 5

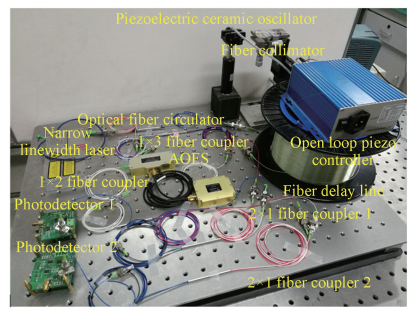


图 3 光纤激光多普勒加速度测量系统装置
Fig.3 Experimental setup of the fiber laser Doppler accelerometer measurement system

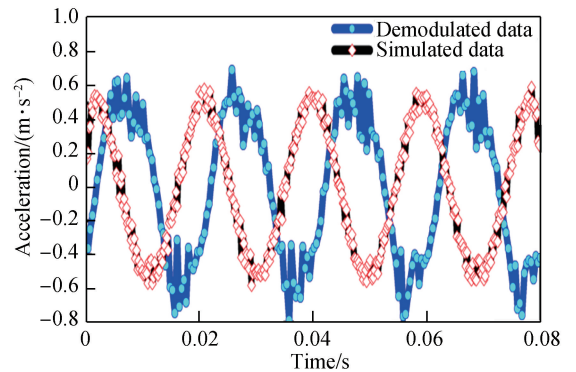


图 4 实测加速度和仿真加速度对比
Fig.4 Comparison between measured acceleration and simulated acceleration

根据表 2 可知,通过对压电陶瓷振荡器同一加速度进行多次测量,其测量误差具有极好的一致性,表明数字相关鉴相算法用于多普勒信号解调具有较好的鲁棒性,能够实现多普勒加速度信号的解调.对于光纤激光多普勒加速度测量系统的测量范围,其主要受限于需要对压电陶瓷振荡器加速度方向的判定,必须保证在相邻两个加速度信号采样间隔内,相位差变化量小于 π ,将加速度采样间隔设置为 0.4 ms 时,具有较好的解调结果,此时光纤激光多普勒加速度测量系统的加速度的测量范围为 $0\sim 200\text{ m/s}^2$.

4 结论

本文提出将数字相关鉴相算法用于激光多普勒加速度测量系统中低信噪比加速度信号的解调,对不同信噪比下的加速度信号的解调过程进行仿真分析,结果表明,在信号信噪比为 20 dB 时,测量误差为 0.135 m/s^2 ,分辨率为 $7.3\times 10^{-3}\text{ m/s}^2$,能够实现低信噪比加速度信号的解调.对压电陶瓷振荡器进行了多次重复测量,测量误差接近 0.13 m/s^2 ,证明了该方法用于低信噪比加速度信号解调的可行性.算法的不足之处主要体现在当两路干涉信号的相位差接近 0 或者 π 时,加速度测量的分辨率变差.相较于传统的多普勒信号解调方法,该方法有效抑制了噪声信号的干扰,提高了信号的解调精度,实现了加速度信号的直接解调.因此,该方法在低信噪比加速度信号的高精度,直接解调等研究领域具有一定的应用前景.

参考文献

- [1] LEDUFF A, PLANTIER G, VALIRE J C, *et al.* Development of an extended Kalman filter and validation in free-field measurement[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2016, **71**(20): 832-852.
- [2] YANG Chun-ping, KANG Mei-ling, WANG Bao-ting, *et al.* New zero-difference laser interferometer vibration measurement system[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2011, **22**(1): 95-98.
杨春平,康美苓,王豹亭,等. 新型零差激光干涉仪振动测量系统[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(1): 95-98.
- [3] ZHANG Shu, YE Zong-min. Laser Doppler vibrometer test analysis of dynamic characteristics of laser gyro[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(7): 0706005.
张澍,叶宗民. 激光多普勒测振仪对激光陀螺动态特性测试分析[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(7): 0706005.
- [4] ZHANG Shu, LI Yu, LU Guang-feng. Research on laser Doppler vibration measurement system based on dual-frequency ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(3): 111-116.
张澍,李玉,卢广锋. 基于双频环形激光器的激光多普勒测振系统研究[J]. *光学学报*, 2016, **36**(3): 111-116.
- [5] SHANG Jian-hua, REN Li-hong, XU Hai-qin, *et al.* Heterodyne laser Doppler vibrometer based on dual optical frequency shifter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1149-1155.
尚建华,任立红,徐海芹,等. 基于双声光移频器的外差式光多普勒测振计[J]. *光学学报*, 2012, **41**(10): 1149-1155.
- [6] WANG Qi, GAO Chun-feng, ZHOU Jian, *et al.* Laser Doppler velocimeter drift data filtering based on metabolic dual time series model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0612001.
王琦,高春峰,周健,等. 基于新陈代谢双时序模型的激光多普勒测速仪漂移数据滤波[J]. *光子学报*, 2018, **47**(6): 0612001.
- [7] LI S N. Super-resolution spectral reconstruction based on minimum variance frequency estimation and linear fitting[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(3): 033602.
- [8] KWOKH K, JONES D L. Improved instantaneous frequency estimation using an adaptive short-time Fourier transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, **48**(10): 2964-2972.
- [9] WANG Z N, ZHANG L, WANG S, *et al.* Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(2): 853-858.
- [10] FU H J, JI R D, HU P C, *et al.* Measurement method for nonlinearity in heterodyne laser interferometers based on double-channel quadrature demodulation.[J]. *Sensors*, 2018, **18**(9): 2768-2777.
- [11] XIONG Liu-dong, JIA Shu-hai, DU Yan-fen. New algorithm for phase demodulation of interference fringes based on Hilbert transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 1678-1681.
熊六东,贾书海,杜艳芬. 基于希尔伯特变换的干涉条纹相位解调新算法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(9): 1678-1681.
- [12] ZHENG Jin-de, CHENG Jun-sheng, YANG Yu. A new method for estimating instantaneous frequency - empirical envelope method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, **31**(17): 86-90.
郑近德,程军圣,杨宇. 一种新的估计瞬时频率的方法—经验包络法[J]. *振动与冲击*, 2012, **31**(17): 86-90.
- [13] ZHANG Xiong-xing, HAO Dong-jie, ZHANG Meng-jiao. Low signal to noise ratio laser Doppler signal phase analysis algorithm[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2017, **37**(8): 571-576.
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**(8): 571-576.
- [14] YERRAMALLI S, STOJANOVIC M, MITRA U. Partial FFT demodulation: a detection method for highly doppler distorted OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, **60**(11): 5906-5918.
- [15] DU Jun, YANG Na, LI Jun-ling, *et al.* Improvement of phase modulation laser Doppler shift measurement method[J].

- Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(6): 129-140.
- 杜军,杨娜,李峻灵,等. 相位调制激光多普勒频移测量方法的改进[J]. *物理学报*, 2018, **67**(6):129-140.
- [16] REN E E, LU H W, ZHANG B G, *et al.* Optimization design of all-fiber 3×3 multiplexer based on an asymmetrical Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(14): 2818-2822.
- [17] ZHOU Jian, LONG Xing-wu, WEI Guo, *et al.* Application of digital correlation technology in laser Doppler velocimeter [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(3): 28-29.
- 周健,龙兴武,魏国,等. 数字相关技术在激光多普勒测速仪中的应用[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(3): 28-29.
- [18] LI Cheng-qiang, WANG Ting-feng, ZHANG He-yong, *et al.* Effect of laser linewidth on the performance of heterodyne detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(8): 174-181.
- 李成强,王挺峰,张合勇,等. 激光光源线宽对外差探测性能的影响[J]. *物理学报*, 2016, **65**(8):174-181.
- [19] PENG Xiang, LIU Bo. Constraint analysis of laser Doppler velocity measurement signal processing method[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, **30**(5): 1927-1934.
- 彭翔,刘博. 激光多普勒测速测振信号处理方法的约束解析[J]. *系统仿真学报*, 2018, **30**(5):1927-1934.