

基于 S/PDIF 信号解码的数字加速度计校准方法*

王朝¹, 蔡晨光², 杨明³, 孔明¹

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州, 310018) (2. 中国计量科学研究院 北京, 100029)

(3. 北京化工大学信息科学与技术学院 北京, 100029)

摘要 Polytec 公司的外差激光干涉仪可输出 24 位精度、固定输出延时与量化采样率的索尼/飞利浦数字接口格式 (sony/philips digital interface format, 简称 S/PDIF) 数字信号。常规外差激光干涉法的数字加速度计动态校准存在处理数据量较大、导致时间开销或系统成本增加的问题。利用现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, 简称 FPGA) 对 Polytec 外差激光干涉仪输出 S/PDIF 数字信号的实时解码, 实现了以 S/PDIF 数字信号对其他传输协议的微机电系统 (micro electromechanical systems, 简称 MEMS) 数字加速度计的振动台动态校准。通过与常规外差激光干涉法校准结果对比, 证实了该方法具有较高的校准精度。本方法有效减少了校准系统的数据处理量, 使其适用于低频振动校准, 且具有较强的抗干扰能力。

关键词 数字加速度计; 振动台动态校准; 外差激光干涉法; S/PDIF 数字信号; 现场可编程逻辑门阵列

中图分类号 TH825; TB934

引言

由于 MEMS 数字加速度计具有体积小、功耗低、噪声低等特点, 广泛用于航空航天、惯性导航、汽车工业等各个领域^[1-2]。MEMS 数字加速度计作为上述领域中重要的信息转换器件, 需要对其进行校准以保证测量结果的准确性^[3-5]。

根据校准装置产生的环境因素及可提供的标准加速度的情况, 数字加速度计校准方法分为动态校准方法与静态校准方法^[6-7]。静态校准方法具有操作简单、对实验设备和环境要求较低的优势, 但其无法对加速度计的灵敏度幅值与灵敏度相位等参数进行校准。相对于静态校准方法, 动态校准方法可以准确地实现加速度计的灵敏度幅值与灵敏度相位等参数的校准。对于应用于捷联惯导等系统中的加速度计, 已知其灵敏度相位可显著减小捷联惯导系统的速度误差^[8], 因此对于动态校准方法的研究十分重要。外差激光干涉仪具有检测灵活、抗干扰能力强、结构简单等优势, 被广泛用于各种精密测量领域^[9-10]。基于奈奎斯特采样 (Nyquist sampling, 简称 NS)、混频器与低通滤波器采样 (mixer and low-pass filter, 简称 MLPFS)、带通采样 (bandpass sampling, 简称 BPS)^[11] 的常规外差激光干涉校准方法可以精

确地得出被校模拟量输出加速度计的灵敏度幅值与灵敏度相位。对于数字加速度计, 若使用常规外差激光干涉法校准, 需要数字加速度计输出信号与解调后的外差激光干涉信号进行相应的对齐补偿, 以得出准确的灵敏度相位校准结果。上述方法均需通过解调外差激光干涉信号的方式来获取振动激励信号, 采集干涉信号所需采样率均为兆赫兹以上, 采集与处理数据量较大, 可能导致数据处理所需时间较长或硬件内存不足, 在需要较长采集时间的低频校准中, 此问题尤为明显。

Polytec 外差激光干涉仪可输出包含振动速度信息的 S/PDIF 数字信号, 其具有输出 24 位高精度、固定延时、抗干扰的特点。通过对 S/PDIF 信号的解码可以准确地获得被校加速度计的振动激励信号。笔者提出了一种以 S/PDIF 信号对其他数字输出协议加速度计振动台动态校准的方法。利用 FPGA 的高速并行处理能力^[12], 对 Polytec 外差激光干涉仪输出的 S/PDIF 信号与数字加速度计输出数字信号实时解码。S/PDIF 信号输出延时为固定值, 通过简单算法对由此造成的相位延时进行补偿, 同时在信号采集过程中完成了与加速度计输出信号的对齐处理, 保证了灵敏度相位校准精度。S/PDIF 信号量化采样率为固定的 48 kSa/s, 数据量较小且

* 国家重点研发计划资助项目 (2017YFF0205003)

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-12-05

解码过程交由FPGA进行,减少了上位机内存占用与处理时间。通过与常规外差激光干涉校准方法进行对比,证明了本方法具有较高的校准精度。

1 校准系统及原理

本方法搭建了如图1所示的校准系统,标准直线振动台为被校数字加速度计提供所需振动激励。Polytec外差激光干涉仪利用外差干涉原理,通过测量振动激励,输出外差激光干涉信号,高精度速度译码器将干涉信号解调为包含振动速度信息的S/PDIF信号并输出。PXIe-5172负责同步采集并处理S/PDIF信号与加速度计输出信号,经PXIe-5172处理成功后的信号传递至上位机,由上位机做进一步数据处理并显示振动波形与校准结果。

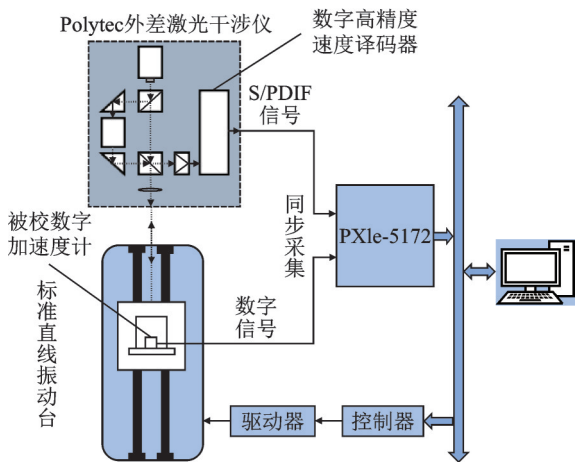


图1 数字加速度计校准系统结构图

Fig.1 The structure diagram of digital accelerometer calibration system

对于数字加速度计,其解码后的输出信号(二进制数转换为十进制数)值除以其标度因数即为输出加速度值,对其灵敏度幅值的校准可转换为对其标度因数的校准。实际标度因数可由加速度计输出加速度值与输入激励加速度(解码S/PDIF信号获得)之比,并乘以理论标度因数获得。灵敏度相位为数字加速度计解码信号的拟合初相与对应输入激励加速度的拟合初相之差。可由灵敏度相位计算加速度计输出延时。笔者将对数字加速度计标度因数与灵敏度相位进行校准。

2 基于S/PDIF信号解码的数字加速度计校准方法

笔者将以校准RS422数字信号输出的加速度

计为例,来证明提出方法的正确性与可行性。RS422信号解码后为加速度计输出信号,S/PDIF信号解码后为振动激励信号(二进制数转换为十进制数)。通过相位补偿算法实现加速度计振动激励信号与输出信号的相位补偿,达到两信号对齐的效果。基于四参数正弦逼近算法分别对两信号进行拟合,获得其相应的峰值与初相,以计算被校加速度计标度因数修正值与灵敏度相位。

2.1 S/PDIF及RS422信号解码与相位差补偿

Polytec外差激光干涉仪由ELECTRICAL数字接口输出S/PDIF数字信号。S/PDIF信号传输结构如图2所示,其分为左右声道进行连续传输,每个声道大小为32位,因不同声道头码编码模板不同,故头码可以用来区分左右声道起始位置。信号数据位最多可传输24位有效数据,其他数据位功能及作用详见文献[13-14]。S/PDIF信号右声道信号数据为0,解码过程中只需匹配左声道头码以获取左声道信号数据。

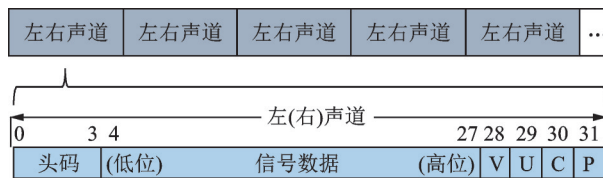


图2 S/PDIF信号传输结构图

Fig.2 The structure diagram of S/PDIF signal transmission

S/PDIF信号编码格式为双相符号编码(biphase mark code,简称BMC),BMC编码原理如图3所示,BMC码10或01代表数据1,BMC码00或11代表0,每组代表数据的BMC码之前必须产生一次跳变以区分其边界。

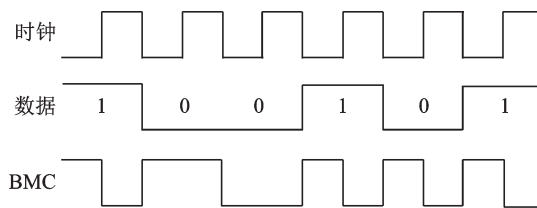


图3 BMC编码原理图

Fig.3 The principle diagram of BMC coding

为获取完整的BMC码数据,则必须以至少2倍的时钟速率采集信号。本方法所使用的S/PDIF信号数据量化采样率 F_k 为48kSa/s,所需采样率 F_s 至少为

$$F_s = 2F_k B_b S_u \tag{1}$$

其中： B_s 为信号声道位数； S_n 为信号声道数量。

RS422 数字信号编码及传输规则如图 4 所示，其输出形式为非连续有效的数字信号。RS422 数字信号数据包数据被拆分为每 8 位(1 个字节)为 1 组，每组包含起始位、奇偶校验位和停止位。为采集完整的 RS422 信号，所需采样率最小为其波特率。

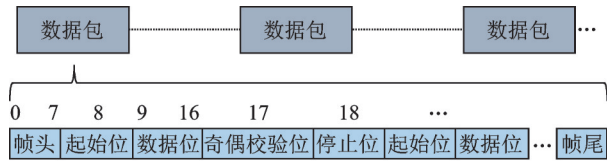


图4 RS422信号传输结构图

Fig.4 The structure diagram of RS422 signal transmission

为实现两不同协议数字信号的采集、解码与对齐补偿，本方法所使用的采集与处理系统为 NI PX-Ie-5172 示波器，其内置 4 通道最高采样率 250 MSa/s 的精度为 14 bit 的模数转换器(analog-to-digital converter, 简称 ADC)，以及一个可重新编程的 FPGA 芯片，可通过使用 LabVIEW FPGA 模块对示波器内置 FPGA 芯片编程。

信号处理流程如图 5 所示，ADC 负责同步采集 S/PDIF 与 RS422 信号，并将采集数据传递至 FPGA。根据 S/PDIF 信号与 RS422 信号编码的特点，利用 FPGA 高速并行处理能力实现对两信号的并行采集与解码。为采集到完整周期的数字信号，排除信号输出端与接收端的相位漂移及时钟不同步的影响，保证灵敏度相位校准精度，两通道所使用采样率 F_s 均为 125 MHz。依据两信号所需最低采样率不同，对采集到的信号进行降采样处理以完整恢复原始数字信号波形。

两信号对齐补偿原理如图 6 所示，由于 S/PDIF 信号为连续输出有效信号，RS422 为非连续输出，且两者信号输出速率不同，即使同步采集，也无法保证两信号解码后完全对齐。为提高灵敏度相位校准精度，将 RS422 解码信号升采样，使其与 S/PDIF 信号量化采样率同为 48 kSa/s，并在采集开始阶段对两信号进行对齐补偿，即在采集开始后，当 FPGA 对第 1 个完整 RS422 数据包成功解码后，才允许最近的 S/PDIF 解码数据与 RS422 解码数据通过 FPGA FIFO 同步传递至上位机。采集过程中，在成功解码下一个 RS422 数据包之前，当前 RS422 解码数据值将重复随新的 S/PDIF 解码数据传递至上位机。此补偿方法有效避免了由加速度计输出信号速率变化对后续正弦逼近算法的影响，增加了笔者提出的

校准方法对不同型号数字加速度计校准的适应性。

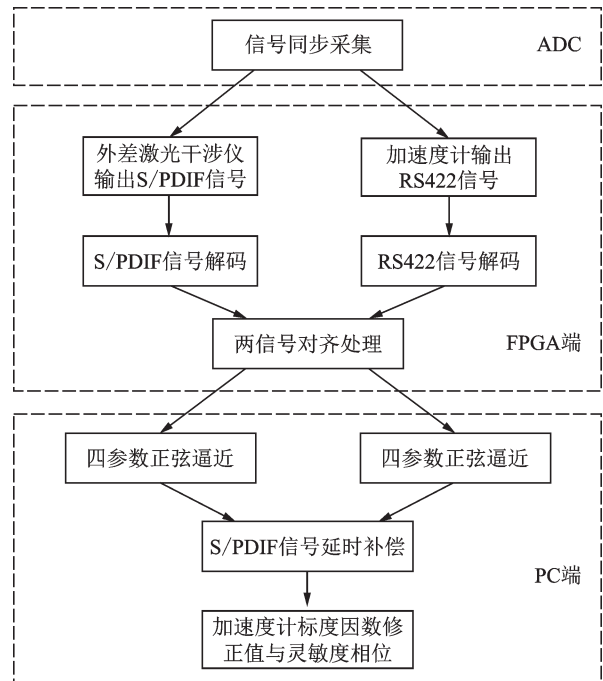


图5 信号处理流程图

Fig.5 The flow chart of signal processing

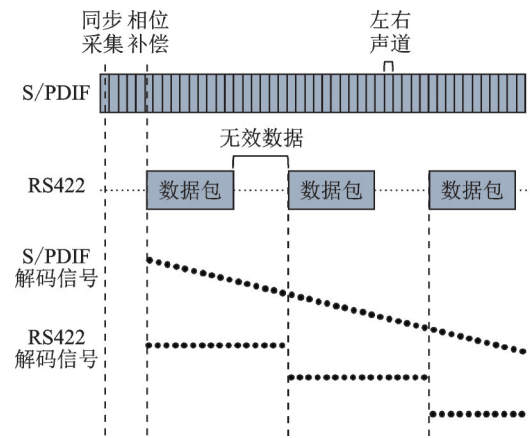


图6 S/PDIF信号与RS422信号对齐补偿原理图

Fig.6 The schematic diagram of signal alignment compensation

外差激光干涉仪输出 S/PDIF 信号有固定 1 ms 时间延时^[15]，通过式(2)补偿由此造成的相位延时

$$\Delta\varphi = 2\pi f\Delta t \quad (2)$$

其中： Δt 为 S/PDIF 信号输出延时。

2.2 加速度计振动激励信号与输出信号的幅值与初相求解

对于加速度计振动激励信号与输出信号，需分别使用四参数正弦逼近法拟合为正弦曲线以获得相应的幅值与初相。使用正弦逼近法拟合振动激励速

度信号 $v(t_i)^{[16-17]}$ 及矩阵形式表达式

$$v(t_i) = A_L \cos(\omega t_i) - B_L \sin(\omega t_i) + C_L t_i + D_L \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\omega t_1) & -\sin(\omega t_1) & t_1 & 1 \\ \cos(\omega t_2) & -\sin(\omega t_2) & t_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\omega t_n) & -\sin(\omega t_n) & t_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_L \\ B_L \\ C_L \\ D_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: t_i 为采集时刻, $i=0, 1, \dots, n-1, n$ 为采样数目。

通过对式(4)超定方程组的求解,得到参数 A_L, B_L, C_L 及 D_L ,则振动激励速度信号拟合峰值 v_p 与初相 φ_v 分别为

$$\begin{cases} v_p = \sqrt{A_L^2 + B_L^2} \\ \varphi_v = \arctan \frac{B_L}{A_L} \end{cases} \quad (5)$$

同理,使用正弦逼近法拟合被校加速度计输出信号,得到的信号峰值 b_s 与初相 φ_u 分别为

$$\begin{cases} b_s = \sqrt{A_s^2 + B_s^2} \\ \varphi_u = \arctan \frac{B_s}{A_s} \end{cases} \quad (6)$$

加速度计标度因数修正值为

$$L = \frac{b_s g}{2\pi f v_p} \quad (7)$$

其中:重力加速度 $g=9.801\ 226$ 。

灵敏度相位为

$$\varphi_s = \varphi_u - (\varphi_v + \Delta\varphi + \frac{\pi}{2}) \quad (8)$$

3 实验结果与分析

为验证基于S/PDIF信号解码的数字加速度计校准方法的精度,搭建了如图7所示的校准装置。选用频率范围为0.01~200 Hz的标准直线振动台、Polytec OFV-5000外差激光干涉仪、PXIe-5172及上位机。被校数字加速度计为MSI3200G微惯性测量组合中的内置数字加速度计,理论标度因数为60 000 LSB/g。依据1/3倍频程选择校准频点,每个频点校准10次。1~20 Hz频率范围内的校准结果如图8所示,表1给出了校准结果的标准差。表2给出了5~20 Hz常规外差激光干涉方法校准的校准结果。

1~20 Hz频率范围内标度因数修正值的最大相对标准差与灵敏度相位的最大标准差分别为0.612%与0.047°。标度因数修正值与理论标度因数的差值在允许误差范围内。由灵敏度相位计算

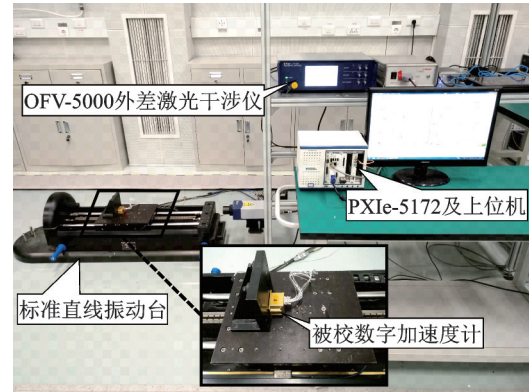
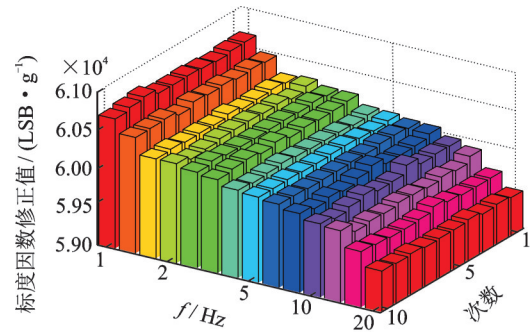


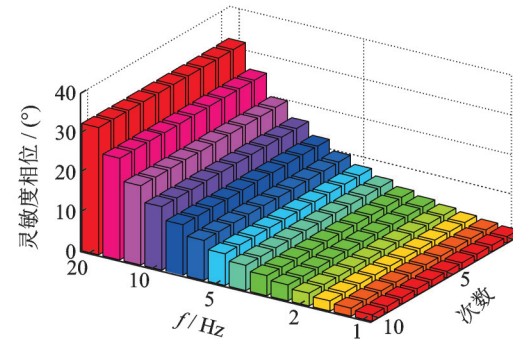
图7 校准系统实物图

Fig.7 The physical diagram of calibration system



(a) 1~20 Hz频率范围内标度因数的校准结果

(a) The scale factor calibration results at frequencies between 1~20 Hz



(b) 1~20 Hz频率范围内灵敏度相位的校准结果

(b) The sensitivity phases calibration results at frequencies between 1~20 Hz

图8 1~20 Hz频率范围内标度因数与灵敏度相位的校准结果
Fig.8 The sensitivity calibration results at frequencies between 1~20 Hz

1~20 Hz频率范围内的加速度计输出时间延时,结果均在 4.47 ± 0.025 ms 范围内,符合相位延时线性变化特征^[8]。本研究提出方法的校准结果与常规校准方法校准结果相比,标度因数修正值最大误差为2.170%,灵敏度相位最大误差为23.718%,证明了本方法具有较高的校准精度。

由于常规校准方法采集与处理数据量较大,致

表1 1~20 Hz 频率范围内标度因数修正值与灵敏度相位的标准差

Tab.1 The standard deviations of the calibrated scale factor correction and sensitivity phases in the frequency from 1~20 Hz

f/Hz	标度因数修正值平均值/ (LSB·g ⁻¹)	标度因数修正值相对标准差/%	灵敏度相位平均值/ (°)	灵敏度相位标准差/ (°)
1.00	60 692.2	0.040 9	1.602 1	0.013 1
1.25	60 505.7	0.028 1	2.016 5	0.011 8
1.60	60 295.1	0.020 0	2.563 7	0.010 7
2.00	60 279.3	0.033 7	3.209 5	0.013 2
2.50	60 252.1	0.017 8	4.024 0	0.031 7
3.15	60 229.6	0.027 9	5.052 6	0.013 3
4.00	60 126.9	0.022 4	6.415 5	0.007 8
5.00	60 109.4	0.014 1	8.023 4	0.008 1
6.30	60 079.6	0.017 3	10.107 0	0.013 2
8.00	60 026.2	0.056 3	12.832 3	0.047 0
10.00	59 969.7	0.061 0	16.029 9	0.027 7
12.50	59 850.6	0.061 2	20.020 0	0.024 8
16.00	59 700.4	0.036 4	25.663 9	0.029 4
20.00	59 517.6	0.023 6	32.111 1	0.027 3

表2 5~20 Hz 常规外差激光干涉法校准结果

Tab.2 The sensitivity calibration results of conventional heterodyne interferometry at frequencies between 5~20 Hz

f/Hz	标度因数修正值平均值/(LSB·g ⁻¹)	灵敏度相位平均值/ (°)
5.0	60 219.6	8.147 0
6.3	60 172.4	10.334 4
8.0	59 896.0	13.021 5
10.0	59 963.5	16.306 7
12.5	59 908.9	20.494 8
16.0	59 590.3	26.097 5
20.0	59 616.6	32.729 2

使校准系统内存不足,故无法进行更低频率的对比。本研究提出的方法仍可进行振动频率在1 Hz 以下的数字加速度计校准,但由于所使用加速度计性能的限制,没有进行更低频率的校准实验。

4 结束语

笔者提出了一种基于Polytec 外差激光干涉仪输出S/PDIF 数字信号对数字加速度计动态校准的方法,利用FPGA 高速并行处理两路不同协议的数字信号,减少了上位机的数据处理量,使本方法适用于更低频率的数字加速度计校准。在信号采集过程中进行对齐处理,并在采集完成后进行相位补偿,保证了加速度计灵敏度相位校准精度。实验结果证明,本方法具有较高的数字加速度计标度因数与灵敏度相位校准精度,抗干扰能力强,能够更好地满足实际工程需求。

参 考 文 献

- [1] 林伟俊, 胡世昌, 郑旭东, 等. 电容式加速度计的数字化处理电路及其与模拟电路的比较[J]. 传感技术学报, 2009, 22(11): 1562-1567.
LIN Weijun, HU Shichang, ZHENG Xudong, et al. A comparison between analog and digital capacitive accelerometer [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(11): 1562-1567. (in Chinese)
- [2] 张斌, 王昊, 张霞, 等. 改善数字式加速度计处理电路温度稳定性的一种方法[J]. 传感技术学报, 2010, 23(12): 1722-1727.
ZHANG Bin, WANG Hao, ZHANG Xia, et al. One method to improve the temperature stability of processing circuit of digital accelerometer [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(12): 1722-1727. (in Chinese)
- [3] YANG M, CAI C G, WANG Y, et al. A novel low frequency vibration measurement method based on single camera [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1065: 222016.
- [4] 占伟伟, 蔡莉. 一种减小加速度计重力法标定中安装误差影响的方法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 249-252.
ZHAN Weiwei, CAI Li. A method reducing effect of installation error in accelerometer gravimetric calibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(13): 249-252. (in Chinese)
- [5] 彭孝东, 张铁民, 李继宇, 等. 三轴数字MEMS 加速度计现场标定方法[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(3): 544-548.
PENG Xiaodong, ZHANG Tiemin, LI Jiyu, et al. Field calibration of three-axis MEMS digital acceleration [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(3): 544-548. (in Chinese)

- [6] 董雪明,何懿才,关伟. 加速度计校准技术综述[J]. 测绘技术, 2014, 34(4): 5-9.
DONG Xueming, HE Yicai, GUAN Wei. Review of linear accelerometer calibration techniques[J]. Metrology & Measurement Technology, 2014, 34(4): 5-9.(in Chinese)
- [7] 李永光. 高精度加速度计标定与补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [8] 邵会兵,王彬,申亮亮. 一种捷联惯导系统加速度计时间延迟参数标定方法[J]. 宇航学报, 2018, 39(1): 60-66.
SHAO Huibing, WANG Shan, SHEN Liangliang. A time-delay parameter calibration method for accelerometers in strapdown inertial navigation system[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(1): 60-66.(in Chinese)
- [9] 乐燕芬,句爱松. 外差激光干涉仪非线性误差分析及测量[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 209-218.
LE Yanfen, JU Aisong. Analysis and measurement of the nonlinear errors in heterodyne interferometers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 209-218. (in Chinese)
- [10] 赵思维,严利平,杨涛,等. 基于DSP的激光外差干涉信号处理方法[J]. 浙江理工大学学报, 2011, 28(2): 217-220.
ZHAO Siwei, YAN Liping, YANG Tao, et al. Laser heterodyne interference signal processing based on DSP[J]. Journal of Zhejiang Science Technology University, 2011, 28(2): 217-220. (in Chinese)
- [11] YANG M, ZHU H J, CAI C G, et al. Bandpass-sampling-based heterodyne interferometer signal acquisition for vibration measurements in primary vibration calibration [J]. Applied Optics, 2018, 57(29): 8586-8592.
- [12] 易志强,韩宾,江虹,等. 基于FPGA的多通道同步实时高速数据采集系统设计[J]. 电子技术应用, 2019(6): 70-74.
YI Zhiqiang, HAN Bin, JIANG Hong, et al. Design of multi-channel synchronous real-time high-speed data acquisition system based on FPGA [J]. Application of Electronic Technique, 2019(6): 70-74.(in Chinese)
- [13] 刘家桐,葛芬. 基于FPGA的S/PDIF接收机数据解码系统的实现[J]. 电子器件, 2018, 41(3): 194-198.
LIU Jiatong, GE Fen. The design of S/PDIF receiving and decoding circuit[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2018, 41(3): 194-198.(in Chinese)
- [14] 吕江波,虞露. S/PDIF数字音频接口和接收机中的数据译码实现[J]. 电声技术, 2002, 9(4): 15-20.
LÜ Jiangbo, YU Lu. Implementation of data decoding in S/PDIF digital audio interface and receiver[J]. Audio Engineering, 2002, 9(4): 15-20.(in Chinese)
- [15] Polytec GmbH .Datasheet OFV-5000[EB/OL].[2018-11-03].<https://www.polytec.com/cn/>.
- [16] ISO 16063-41—2011 Methods for the calibration of vibration and shock transducers/part 41: calibration of laser vibrometers[S].
- [17] 杨明,蔡晨光,王颖,等. 外差式激光干涉信号的采集与解调方法综述[J]. 激光杂志, 2018, 39(1): 20-24.
YANG Ming, CAI Chenguang, WANG Ying, et al. Review of acquisition and demodulation method of heterodyne interferometer signal[J]. Laser Journal, 2018, 39(1): 20-24.(in Chinese)



第一作者简介:王朝,男,1994年4月生,硕士生。主要研究方向为外差激光干涉绝对法数字加速度计校准。
E-mail:498657506@qq.com