

DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2023.09.030

引用格式:薛科,于涛,汪龙祺,等.解调电路相位自动对齐系统设计与实现[J].现代电子技术,2023,46(9):163-167.

解调电路相位自动对齐系统设计与实现

薛科,于涛,汪龙祺,隋延林,陈泳鲲,陈禹竺,刘鑫

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:在空间引力波探测项目中,能否实现高精度电容位移传感技术直接关系到项目的核心指标实现。在电容位移传感链路中,解调电路去除噪声能力限制整条链路性能,其中,参考信号与输入信号之间的相位差影响电路去除噪声能力。为了最大限度地提高系统的信噪比,针对当前研究的局限性,提出一种解调电路相位自动对齐系统。首先,介绍了整个系统的构成;其次,对基于动量下降法的相位对齐方法进行详细介绍,参考信号相位自动移动,移动的步长根据动量梯度下降法动态调整;然后,提出对相敏检测器的波形进行检测;接着结合两个方法提出解调电路相位自动对齐系统,提高了系统的可靠性和抗干扰性;最后用标定平台模拟电容位移传感中的电容差,将文中提出的方法与遍历相位对齐法进行比较,发现该方法能够准确地对齐相位,性能平均提升0.136%,同时在示波器上观察信号相位已经准确对齐。

关键词:引力波探测;电容位移传感;微弱信号;解调电路;相敏检波;动量梯度下降法;波形检测;系统设计

中图分类号: TN710-34; TP29

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2023)09-0163-05

Design and implementation of phase automatic alignment system for demodulation circuit

XUE Ke, YU Tao, WANG Longqi, SUI Yanlin, CHEN Yongkun, CHEN Yuzhu, LIU Xin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In the space gravitational wave detection project, the realization of high-precision capacitive displacement sensing technology is directly related to the realization of the core indicators of the project. In the space gravitational wave detection project, the realization of high precision capacitive displacement sensing technology is directly related to the realization of the core indicators of the project. In capacitive displacement sensing link, the demodulation circuit's noise removal ability limits the performance of the whole link, where the phase difference between the reference signal and the input signal affects the circuit's noise removal ability. Aiming at the limitation of current research, in order to maximize the SNR of the system, a demodulation circuit phase automatic alignment system is proposed. Firstly, the constitution of the whole system is introduced. The phase alignment method based on momentum descent method is introduced in detail. The phase of the reference signal moves automatically, and the moving step is adjusted dynamically according to the momentum gradient descent method. Then, the waveform of phase sensitive detector is detected. Then the phase automatic alignment system of demodulation circuit is proposed by combining the two methods, which improves the reliability and anti-interference of the system. The calibration platform is used to simulate the capacitance difference in capacitance displacement sensing. The proposed method is compared with the ergodic phase alignment method. It is found that the proposed method can accurately align the phase with an average performance improvement of 0.136%.

Keywords: gravitational wave detection; capacitive displacement sensing; weak signal; demodulation circuit; phase sensitive detection; momentum gradient descent method; waveform detection; system design

0 引言

引力波信号是一种极其微弱的信号,在空间中探测引力波是一件极其具有挑战性的任务,而在空间引力波

探测项目中,能否实现超高精度的电容位移传感直接影响到项目的顺利实施^[1-3]。目前在电容位移传感中通常采用的是模拟传感电路,如图1所示^[4],解调电路是整条测量链路中的关键一环,其去除噪声的能力限制电容位移传感的性能^[5]。当前主流的方案是运放型电子开关解调电路,该方案能在噪声背景中提取低频信号信息,并在很大程度上压制噪声。但在测量链路中,输入信号和

收稿日期:2022-10-19

修回日期:2022-11-04

基金项目:国家重点研发计划课题(2020YFC2200604)

参考信号存在相移,且相移大小不可确定^[6]。为了最大程度发挥解调电路去除噪声的能力,需要将输入信号和参考信号的相位进行对齐。目前主流调整相位的方案大致分为两种:一种是阻容移相,文献[7]中通过调节滑动变阻器调整参考信号的相位进行相位对齐,这种方式精度低,同时在航天领域中无法操作;另外一种数字移相,目前已经大范围应用。文献[8]提出通过单片机对参考信号进行时延,从而达到移动参考信号相位的目的,但这种方式仍然需要人员操作,并不能做到参考信号相位自动对齐。文献[9]中提出对参考信号进行360°遍历,将解调结果存储在FLASH中,寻找参考信号相位对齐点,这种方式需要对参考信号相位进行遍历,速度慢,相位对齐后不能锁定相位。

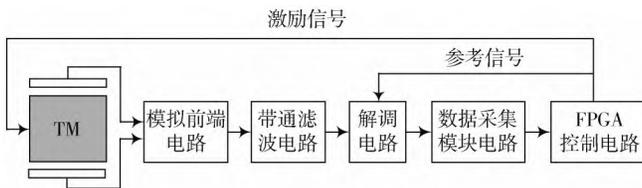


图1 电容位移传感电路工作原理示意图

参考信号与输入信号的相位是否对齐直接影响解调电路的信噪比。本文提出了一种自动相位对齐方案。该方案根据解调电路特性,引入动量梯度下降法对参考信号相位移动步长进行调节,这样既能够快速地将参考信号与输入信号的相位对齐,也能够一定程度上避免由于电路中的干扰而造成的误判。同时,系统实时检测解调电路中相敏检波器的输出波形。当相敏检波器的输出波形相位小于阈值,且解调电路输出是极值时,参考信号和输入信号的相位对齐。这样做提高了系统的可靠性。最后,在相位对齐之后,实时监测解调电路中相敏检测器的输出波形,当相位差大于设定阈值时,再次进行相位对齐,提高了系统抗干扰能力。

1 系统的构成

解调电路相位自动对齐系统由解调电路和FPGA最小系统两个部分组成,其工作原理如图2所示。输入信号 $x(t)$ 输入解调电路相敏检波器;输入信号经相敏检波器输出至低通滤波器,滤波后的解调输出 $u_o(t)$ 由模数转换采集模块1采集;输入信号经相敏检波器输出 $u_p(t)$,由模数转换采集模块2采集;由模数转换采集模块1和模数转换采集模块2采集的数据,在参考信号相位调整算法模块中处理,得出参考信号相位调整信息,传输给参考信号发生模块;参考信号发生模块产生参考信号 $r(t)$ 传输给解调电路中的相敏检波器。

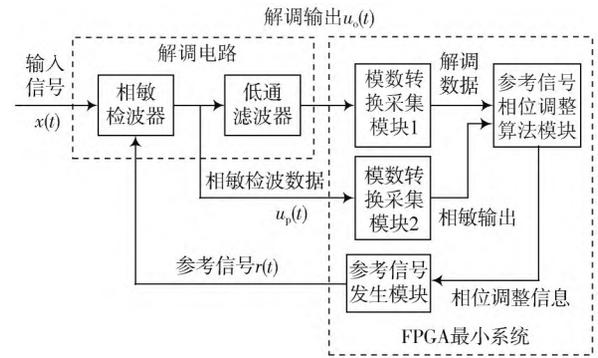


图2 解调数字开关信号相位自动对齐系统原理框图

2 系统设计

2.1 基于动量下降法的相位自动对齐方法设计

2.1.1 解调电路基本工作原理

解调电路的基本结构^[10]如图2所示。设输入信号的幅度为 V_s ,频率为 ω_0 ,相位为 θ 的余弦信号为:

$$x(t) = V_s \cos(\omega_0 t + \theta) \quad (1)$$

参考信号 $r(t)$ 是幅度为 ± 1 的方波,其周期为 T ,角频率为 $\omega_0 = 2\pi/T$,波形如图3所示。将其展开为傅里叶级数:

$$r(t) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos m\omega_0 t + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin m\omega_0 t \quad (2)$$

式中: a_0 为其直流分量; a_m 为其余弦分量的傅里叶系数; b_m 为其正弦分量的傅里叶系数。

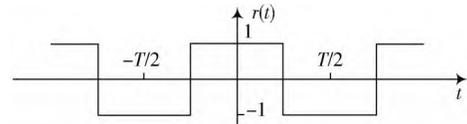


图3 参考信号波形

图3所示的波形是均值为零的偶函数,直流分量 a_0 为零,正弦分量的傅里叶系数 b_m 为零,其余弦分量的傅里叶系数 a_m 为:

$$\begin{aligned} a_m &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} r(t) \cos(m\omega_0 t) d(\omega_0 t) \\ &= \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos(m\omega_0 t) d(\omega_0 t) - \int_{-\pi}^{-\pi/2} \cos(m\omega_0 t) d(\omega_0 t) - \int_{\pi/2}^{\pi} \cos(m\omega_0 t) d(\omega_0 t) \right] \\ &= \frac{4}{m\pi} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

当 m 为偶数时, $\sin(m\pi/2) = 0$; m 为奇数时, $\sin(m\pi/2) = \pm 1$ 。令奇数 $m = 2n - 1$, n 为 $1 \sim +\infty$ 的正整数,则 a_m 为:

$$a_m = \frac{4}{\pi} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \quad (4)$$

由此可以得出参考信号的傅里叶展开式:

$$r(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-1)\omega_0 t] \quad (5)$$

可以得出相敏检波输出 $u_p(t)$ 为:

$$\begin{aligned} u_p(t) &= x(t)r(t) \\ &= \frac{4V_s}{\pi} \cos(\omega_0 t + \theta) \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-1)\omega_0 t] \\ &= \frac{2V_s}{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-2)\omega_0 t - \theta] + \\ &\quad \frac{2V_s}{\pi} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[2n\omega_0 t + \theta] \end{aligned} \quad (6)$$

经过低通滤波后, $n > 1$ 的差频项和所有和频项都被滤除, 解调输出仅剩 $n = 1$ 的差频项为:

$$u_o(t) = \frac{2V_s}{\pi} \cos \theta \quad (7)$$

根据式(7)可以得知, 解调电路的输出与相位差 θ 有关, 当 θ 为 0° 或 180° 时, 解调的输出最大, 整个链路的信噪比最高。

2.1.2 动量梯度下降法的步长确定

在相位对齐的过程中, 相位移动步长的大小直接影响系统的性能。采用固定步长进行相位移动会出现相位对齐速度缓慢、精度低, 甚至会出现相位对齐错误的情况。为了解决这一问题, 本文提出了基于动量梯度下降^[11]的方式来确定相位步长。

在相位对齐的过程中, 由于数据会受到外界因素的干扰或者系统本身的内部影响, 即使解调数据经过了滤波处理, 仍然会发生相位对齐的误判或延迟判别。因此, 提出引进动量梯度下降法对相位移动步长进行确定。动量梯度下降法是梯度下降法的改进方法^[12]。梯度下降法每次迭代都是基于当前位置, 所以当系统处于最优点附近时, 梯度下降法的更新路径较为曲折, 收敛速度慢, 且容易陷入局部最优点。动量梯度下降法为了避免这一现象, 引入历史信息进行迭代, 迭代点的方向由当前的负梯度方向和上一次的迭代更新方向加权组合形成。动量梯度下降法的更新公式如下:

$$v_t = \beta v_{t-1} + (1 - \beta) \frac{dL(t)}{dt} \quad (8)$$

$$\Delta x_t = \eta v_t \quad (9)$$

式中: v_t 为 t 时刻的前进步长; β 为衰减系数, 通常情况下设置为 0.9; Δx_t 为 t 时刻相位移动步长; η 是学习因子。

2.1.3 基于动量下降法的相位自动对齐方法设计

在电容位移传感电路中, 解调电路输出端放置模数转换传感器, 这里采用 AD7712 作为传感器采集解调输出。AD7712 是一款可编程、高精度、适用于低频噪声测量的高精度 24 位 Σ - Δ 型 ADC, 符合电容位移传感电路的高精度要求。

根据 2.1.1 节中得出的结论, 当参考信号与输入信号相位对齐时, 解调电路的输出为最大值或最小值, 依据这一结论设计相位自动对齐方法。为了避免干扰, 对 AD7712 采集的数据进行累加求和, 得到 t 时刻的累加和 L_t 。系统每隔 1 s 对参考信号相位进行调整, 相位移动步长由动量梯度下降法确认。根据式(8)和式(9)计算 t 时刻的前进步长 v_t 和相位移动步长 Δx_t 。

$$\alpha = (L_t - L_{t-1}) / L_t \quad (10)$$

2.2 相敏检测器输出波形相位检测方法设计

在电容位移传感电路中, 相敏检测器输出端放置模数转换传感器, 这里选用 AD9253 作为传感器采集。AD9253 集成了四路 14 位 ADC, 具有采样频率高、分辨率高等特点, 符合相敏检测器输出波形采集的要求。

图 4 反映了解调电路中相敏检测器的输出波形与输入信号相位差的关系。可以得知, 当参考信号与输入信号的相位差为 0° 或 180° 时, 相敏检测器的输出是全波。根据这一现象, 设计相敏检测器输出波形检测模块。

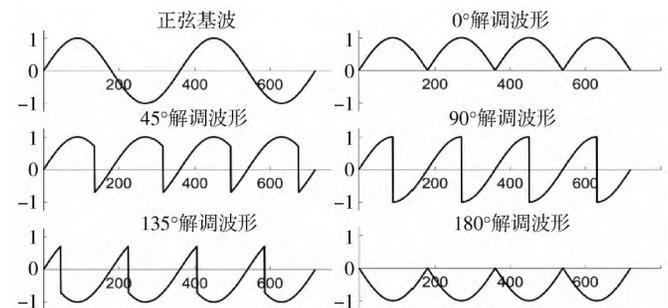


图4 解调输出波形图

当基于动量梯度下降法的相位自动对齐方法判定相位对齐之后, 开始实时检测 AD9253 采集的波形。配合上位机判读, 当相位偏差在阈值 0.72° 之内时, 判别参考信号与输入信号的相位对齐, 否则系统将根据基于动量梯度下降法的相位自动对齐方法对参考信号的相位继续进行调整。这样, 两个方法相互验证相位是否对齐, 极大地提高了系统的可靠性。

当系统判定相位对齐之后, 电容传感系统开始正常工作。与此同时, 相敏检测器输出波形检测模块开始实时监测相敏检测器的输出波形。当参考信号与输入信号之间的相位差大于设定的阈值 1.44° 时, 判定相位没有对齐, 系统开始重新相位自动对齐, 这样提高了系统的抗干扰能力。

2.3 解调电路相位自动对齐系统设计

解调电路相位自动对齐系统流程图如图 5 所示。

根据 2.1 节和 2.2 节内容设计解调电路相位自动对齐系统。具体步骤如下:

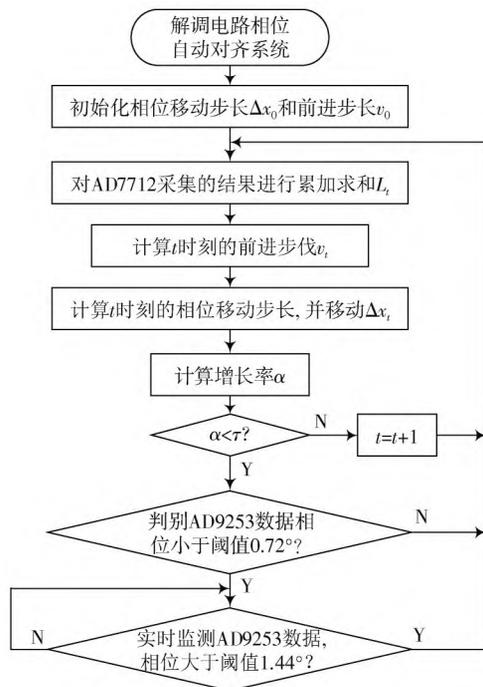


图5 解调电路相位自动对齐系统流程图

步骤1: 开机后,对AD7712和AD9253进行初始化配置和校准;

步骤2: 对解调电路信号进行相位移动,过程为:对参考信号进行相位移动,每1s进行一次相对于输入信号的相位移动;

步骤3: 设置初始相位移动步长 $\Delta x_0=0.225^\circ$,初始前进步伐 $v_0=0.1$;

步骤4: 每次参考信号进行相位移动后,对AD7712采集数据进行累加求和,并保存 t 时刻AD7712采集数据的累加和 L_t ;

步骤5: 根据公式(8)计算 t 时刻的前进步伐 v_t ,其中 β 设置为0.9;

步骤6: 根据式(9)计算 t 时刻相位移动步长 Δx_t ,其中 η 设置为0.1;

步骤7: 根据公式(10)计算采集数据的累加和 L_t 的增长率 α ,当增长率 α 小于阈值 $\tau=0.1$ 时,参考信号与输入信号的相位对齐,跳转至步骤8,否则,跳转至步骤4;

步骤8: 实时检测AD9253采集的波形,当相位偏差在阈值 0.72° 之内时,参考信号与输入信号的相位对齐,跳转至步骤9,否则,跳转至步骤4;

步骤9: 实时监测AD9253采集的波形,当参考信号与输入信号相位差大于设定的阈值 1.44° 时,再次进行相位对齐,跳转至步骤4。

3 实验结果分析

根据第2节设计FPGA软件,其软件系统如图6所

示。激励信号驱动模块生成100 kHz的正弦激励信号,作为整个系统的输入信号。AD7712驱动模块的功能是驱动AD7712芯片,将采集到的解调数据传输给参考信号相位调整算法模块。AD9253驱动模块的功能是驱动AD9253芯片,将采集到的相敏检波数据传输给参考信号相位调整算法模块。参考信号相位调整算法模块根据采集到的数据进行相位调整,并把调整信息传输给参考信号发生模块。参考信号发生模块生成100 kHz方波,并能根据相位调整信息对方波相位进行调整。系统与上位机的通信方式是LVDS (Low - Voltage Differential Signaling),LVDS为异步串行通信,波特率为10 Mb/s,数据位8位,起始位和停止位1位。软件经过仿真测试后功能正常,程序下载后进行测试工作。

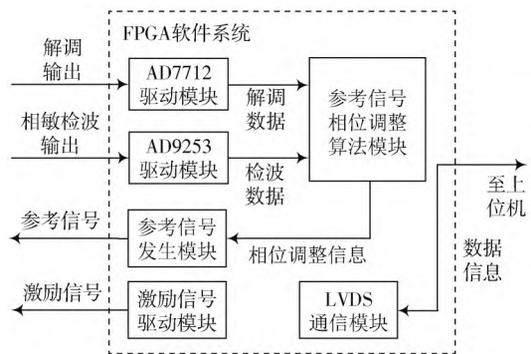


图6 FPGA软件系统结构

根据图7搭建硬件测试平台,其中电容传感链路输入的电容差由标定平台提供。标定平台如图8所示,能够用来模拟电容位移传感中的电容差^[13]。通过示波器观察参考信号与输入信号之间的相位关系,如图9所示,两个信号相位能够自动对齐,并且能够长期追踪相位对齐,符合预期效果。

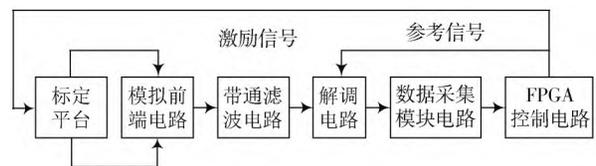


图7 硬件连接示意图

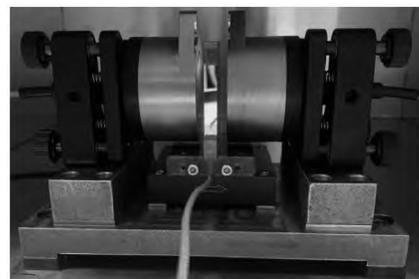


图8 标定平台实物图

根据解调电路输出电压的大小来评价参考信号与

输入信号之间的相位差,解调电路输出的电压值越大,信号的相位差越小,解调电路去除噪声的效果越好。通过改变标定平台位置改变电容差,来比较遍历相位对齐法和本文方法的效果。遍历相位对齐法是指对参考信号进行360°相位遍历,对采集到的结果在上位机进行存储,最后选择解调输出最大值时的相位进行对齐。实验结果如表1所示。

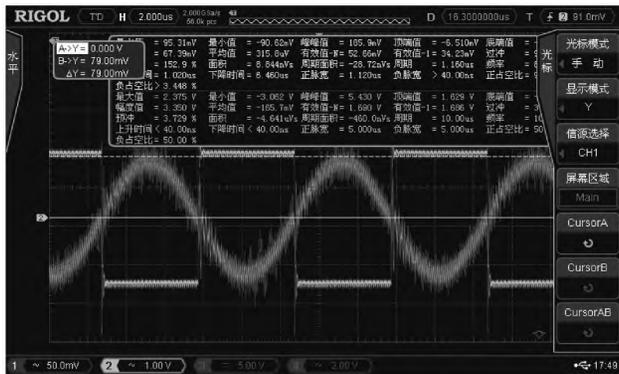


图9 参考信号与输入信号相位对齐示波器图

表1 测试结果

| 序号 | 标定平台位置 | 电容差/pF | 遍历法/mV | 本文方法/mV | 提升比率/% |
|----|--------|---------|--------|---------|--------|
| 1 | 0 | 0.000 7 | 3.732 | 3.737 | 0.134 |
| 2 | 20 | 0.027 | 6.671 | 6.680 | 0.135 |
| 3 | 40 | 0.053 3 | 9.589 | 9.600 | 0.115 |
| 4 | 60 | 0.079 6 | 12.522 | 12.544 | 0.176 |
| 5 | 80 | 0.105 9 | 15.457 | 15.478 | 0.136 |
| 6 | 100 | 0.132 3 | 18.420 | 18.450 | 0.163 |
| 7 | 120 | 0.158 7 | 21.377 | 21.403 | 0.122 |
| 8 | 140 | 0.185 1 | 24.324 | 24.356 | 0.132 |
| 9 | 160 | 0.198 3 | 27.286 | 27.317 | 0.114 |

每个标定平台位置做21次实验,最终取平均得到实验结果。根据表1中的结果可以得知,本文提出的相位自动对齐系统能够自动地将相位对齐,与遍历相位对齐法相比,整体性能优于遍历相位对齐法,将性能平均提高了0.136%,并且能够快速地将相位对齐,同时对齐之后能够继续追踪相位,达到预期效果。

4 结 语

本文提出了一种解调电路相位自动对齐方法,可以准确地将参考信号与输入信号的相位对齐,最大程

度上去除噪声、提高信噪比,有效地提高电容传感的精度。采取动量梯度下降法对相位移动步长进行调节,能够快速地对齐相位,并避免陷入局部最优解,提前判定相位对齐。实时检测AD9253采集的相敏检波器输出波形,当相位差小于阈值时,与AD7712采集的解调输出相互验证参考信号相位对齐,提高了相位对齐的可靠性。相位对齐后实时监测AD9253采集的相敏检波输出波形,当相位偏差大于1.44°时,再次进行相位对齐,提高系统的抗干扰能力。该方法经过地面测试系统验证,能够准确地将参考信号与输入信号的相位对齐,相对于遍历相位对齐法将性能平均提高了0.136%,并在测试的过程中锁定相位,效果符合预期。

注:本文通讯作者为于涛。

参 考 文 献

- [1] 严宇钊,杨明,姜万录.引力波探测器的噪声及噪声处理综述[J].电子测量技术,2019,42(24):108-115.
- [2] 胡越欣,张立华,高永,等.空间引力波探测航天器关键技术分析[J].航天器工程,2022,31(4):1-7.
- [3] 王智,马军,李静秋.空间引力波探测计划-LISA系统设计要点[J].中国光学,2015,8(6):980-987.
- [4] 叶舒扬.高精度数据采集系统及其在电容传感电路研究中的应用[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [5] 范崇锋.基于模拟开关和运放几种组合配置下的解调电路研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
- [6] 吴焕铭,杨海钢,尹韬,等.一款基于解调信号相位矫正技术的低噪声微陀螺接口电路芯片[J].电子与信息学报,2013,35(10):2524-2531.
- [7] 李丹,张学聪,蔡静.一种带移相功能的锁相放大电路设计及仿真[J].计测技术,2020,40(5):22-24.
- [8] 韩团军.基于锁相放大器的微弱信号提取电路设计[J].中国科技论文,2018,13(24):2804-2808.
- [9] 王璐,王红,陈国平.基于全数字移相锁相法的微弱信号检测器[J].山东大学学报(工学版),2019,49(4):24-28.
- [10] 高晋占.微弱信号检测[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [11] 彭先伦.动量梯度下降法的收敛性[D].上海:华东理工大学,2020.
- [12] 史加荣,王丹,尚凡华,等.随机梯度下降算法研究进展[J].自动化学报,2021,47(9):2103-2119.
- [13] 王浩.带保护环的差分式电容位移传感器标定平台研究[D].武汉:华中科技大学,2014.

作者简介:薛科,研究实习员,主要从事空间引力波探测惯性传感器研究。

于涛,硕士生导师,副研究员,主要从事空间引力波探测激光外差干涉测量与惯性传感器研究。

汪龙祺,博士,研究生导师,研究员,主要从事空间遥感、光电探测及微弱信号检测研究。

隋延林,助理研究员,主要从事空间引力波探测关键技术攻关研究工作。

陈泳锬,研究实习员,主要从事惯性传感器控制系统研究。

陈禹竺,研究实习员,主要从事空间引力波探测惯性传感器研究。

刘鑫,研究实习员,主要从事空间引力波探测惯性传感器研究。