

文章编号 2097-1842(2023)05-1089-11

面向空间激光干涉的多通道相位测量系统

张强涛^{1,2,3,4}, 刘河山⁴, 罗子人^{2,4*}

- (1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;
2. 国科大杭州高等研究院, 杭州 310024;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要:空间引力波探测激光干涉系统由多路干涉仪组成, 涉及到多组干涉信号的相位采集和读出, 多通道相位测量系统是空间激光干涉的关键核心技术之一。本文从太极计划及其地基激光干涉实验需求入手, 设计、搭建并测试了多通道相位测量系统。首先, 给出多通道相位测量系统的软硬件设计, 包括硬件架构设计、数字锁相环测相算法、软件架构设计等。其次, 对多通道相位计进行时域功能测试, 包括相位准确度和线性度。测试结果表明多通道相位测量系统在不同工况下的动静态相位线性度和准确度良好。最终, 对多通道相位计进行不同通道、不同频率、不同幅值下的频域噪声测试。测试结果还表明本文设计的多通道相位计, 在 0.1 mHz~1 Hz 频段内, 相位噪声水平平均优于 $2\pi\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$; 不同通道之间具有很好的一致性, 由通道差异或 ADC 芯片差异引入的相位噪声在目标频段内可以忽略不计; 对于频率在 5~25 MHz 之间的任意干涉信号, 相位计在目标频段内均满足需求。因此, 该多通道相位测量系统满足空间引力波探测及地基干涉实验的需求。

关键词:相位计; 空间激光干涉; 太极计划

中图分类号: O439 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0258

Multi-channel phase measurement system for the space laser interferometry

ZHANG Qiang-tao^{1,2,3,4}, LIU He-shan⁴, LUO Zi-ren^{2,4*}

- (1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

* Corresponding author, E-mail: luoziren@imech.ac.cn

Abstract: In the space gravitational wave detection Taiji mission, a heterodyne laser interferometer is used to detect gravitational wave signals in the middle and low frequency bands. In the Taiji mission, the laser interferometry system is composed of multi-channel interferometers, which involves the phase acquisition and readout of multiple sets of the interference signals. Therefore, the multi-channel phase measurement system

收稿日期: 2022-12-29; 修订日期: 2023-02-01

基金项目: 国家重点研发计划资助: “引力波探测”重点专项(No. 2020YFC2200104)

Supported by the National Key Research and Development Program (No. 2020YFC2200104)

is one of the key core technologies of the space laser interferometry. In this paper, a multi-channel phase measurement system is proposed, designed and tested based on the requirements of the Taiji mission and its ground-based laser interferometry experiments. First, the hardware and software design of the multi-channel phase measurement system is given, including hardware architecture design, phase measurement algorithm based on digital phase-locked loop and its implementation on FPGA, software architecture design, etc. Second, a time-domain functional tests of the multi-channel phasemeter are performed, which includes the phase accuracy and linearity. The results show that the dynamic and static phase linearity and accuracy of the multi-channel phase measurement system under different working conditions are good. Finally, the frequency domain noise tests of different channels at different frequencies and different amplitudes are carried out. The results show that the phase noise level of the multi-channel phase meter designed in this paper is better than $2\pi\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ in the frequency band of 0.1 mHz–1 Hz. There is good consistency between different channels, and the phase noise introduced by channel differences or ADC chip differences is negligible in the target frequency band. For any interference signal with a frequency between 5–25 MHz, the phasemeter can meet the requirements within the target frequency band. Therefore, the multi-channel phase measurement system meets the requirements of space gravitational wave detection and ground-based interference experiments. At the same time, the research results of this paper also provide an experimental basis for expanding the phase measurement system with more channels in the future.

Key words: phasemeter; space interferometer; Taiji program

1 引言

空间引力波探测是当前最热门的空间科学探测任务之一,国内外都开展了相关探测计划,主要有:欧美激光干涉空间天线(Laser Interferometer Space Antenna, LISA)计划^[1],我国的太极计划^[2-3]和天琴计划^[4-5]等。这些计划虽然科学目标略有不同,但技术手段及卫星载荷构成均相同。以太极计划为例,其拟采用三星编队,在空间中构建臂长为 300 万公里的外差式激光干涉仪,以捕捉中低频段的引力波信号^[6-7]。激光从本地航天器通过望远镜发出,经百万公里传输后与远端航天器的激光束干涉,干涉信号经光电探测器转为电信号后送入相位计进行相位解调。当引力波信号通过时,测试质量间的微小位移变化将转化为干涉信号的相位变化,通过相位读出即可反演引力波。太极计划要求激光干涉仪在 0.1 mHz~1 Hz 频段内实现 $1\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测距精度,对应相位计测相精度需达到 $2\pi\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。高精度、低噪声相位计系统是空间引力波探测实现该精度要求的关键技术之一。

空间引力波探测激光干涉光路较为复杂^[8-11],

涉及三路干涉仪 12 通道差分干涉信号的相位读出^[2,12]。LISA 相位计已有多年的研究积累,具备完备的高精度多通道测量系统,能够满足空间引力波探测中多路干涉信号的读出需求;然而,太极计划对相位计的研究目前集中于单路干涉仪的 4 通道相位测量,尚无法满足太极计划及其地基干涉实验的需求^[13]。为减少通道间的采样抖动,四通道相位计一般采用单片四通道模数转换器(Analog-Digital Converter, ADC)的设计方案。若需扩充至更多通道,需采用多片 ADC 芯片,但不同 ADC 之间存在差异,会使芯片间的通道引入额外的噪声。此外,针对相位计的噪声测定,大多数研究仅考虑理想情况下的极限水平,这种情况下的测试信号的信噪比较高、幅值较大、频率较低、频率稳定性较好。但在太极计划中,激光经过 300 万公里后与激光器发出的激光进行干涉,远距离传输和轨道运动会导致干涉信号出现峰峰值低、信噪比低、频率波动较大等问题^[14]。衡量相位计在实际工况下的性能是下一阶段相位计研究的主要问题^[15-18]。

针对目前太极计划引力波探测存在的问题,本文设计并构建了多通道相位测量系统(以下简

称多通道相位计), 且对相位计在各种工况下的性能做了较为完整的测试和评估。全文结构安排如下: 第二部分为系统软硬件设计及构建, 主要阐述了多通道相位测量系统的硬件组成以及基于数字锁相环(Digited Phase-Locked Loop, DPLL)的测相方法学原理及其现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)实现框架; 第三部分对多通道相位计进行时域功能测试, 包括准确度、线性度等; 第四部分进行频域噪声测试, 包括

不同峰峰值、不同通道、不同频率下的相位噪声水平的测量和分析。

2 相位计设计及构建

多通道相位计在结构上由硬件和软件两部分组成, 以下将详细介绍软硬件的构成。

2.1 硬件设计

相位计硬件结构示意图如图 1 所示。

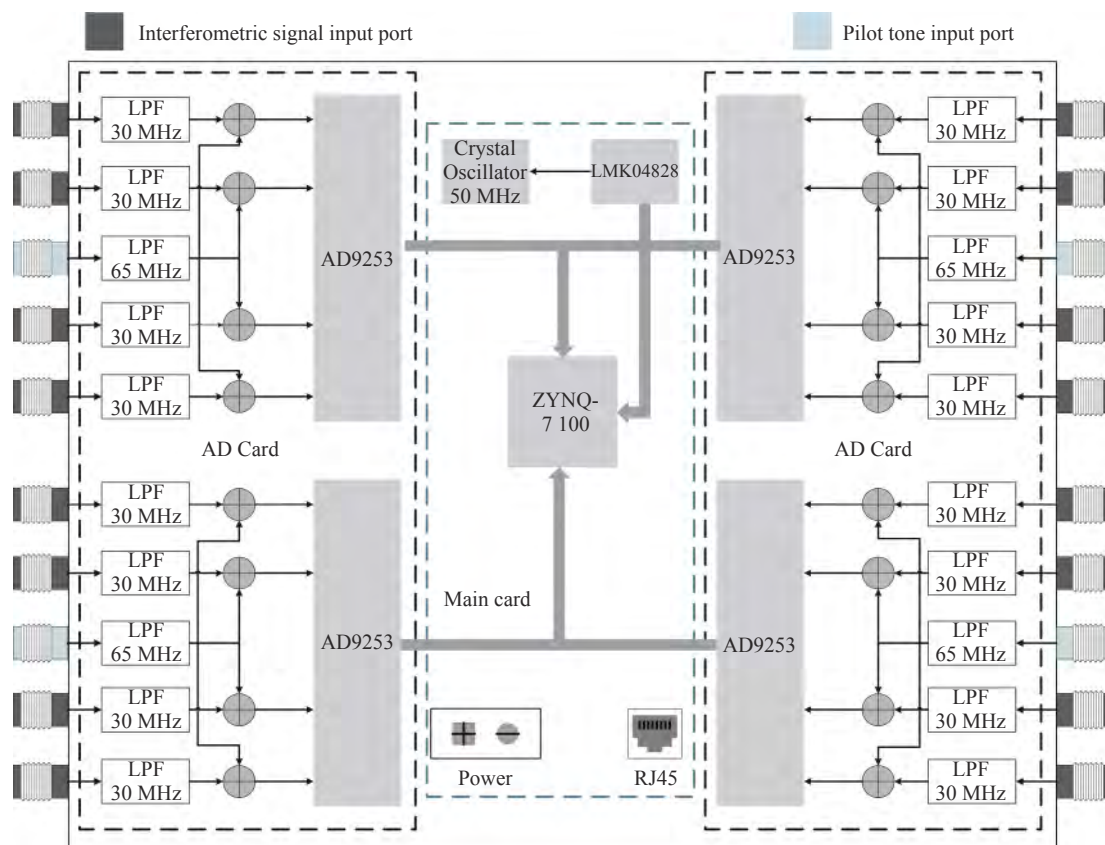


图 1 多通道相位计硬件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hardware structure of multi-channel phasemeter

从图 1 可以看出, 多通道相位计硬件部分由模数转换(Analog to Digital, AD)子卡和 FPGA 母卡组成。AD 子卡主要完成模拟信号采集, 板载 4 片 4 通道高速 ADC(AD9253)芯片, 支持 16 路信号的采集和传输。为减少不同 ADC 间的通道噪声, 板卡选择对称化设计, 前端模拟电路的路径长度相同。同时, 为消除采样抖动噪声, 板卡引入导频信号(Pilot Tone, PT)进行修正^[19], 原理如图 2 所示。

首先对导频信号进行功率均分, 之后与待测

信号进行叠加, 并送入 ADC 进行采样。由 ADC 采样抖动引入的相位误差分别被待测信号与导频信号记录, 此时相位误差与频率大小成正比。最终, 通过以下公式可消除相位差中的采样抖动误差。

$$\varphi_a - \varphi_b = (\phi_{h_a} - \phi_{h_b}) - \frac{f_h}{f_p} \times (\phi_{p_a} - \phi_{p_b}) \quad (1)$$

其中, φ_a 、 φ_b 分别为图中信号 A 和信号 B 经过导频信号修正之后的相位信号; ϕ_{h_a} 、 ϕ_{h_b} 分别为图 2 中信号 A 和信号 B 在导频修正之前的相位信号; ϕ_{p_a} 、 ϕ_{p_b} 分别为导频信号被 ADC 的 A、B 两

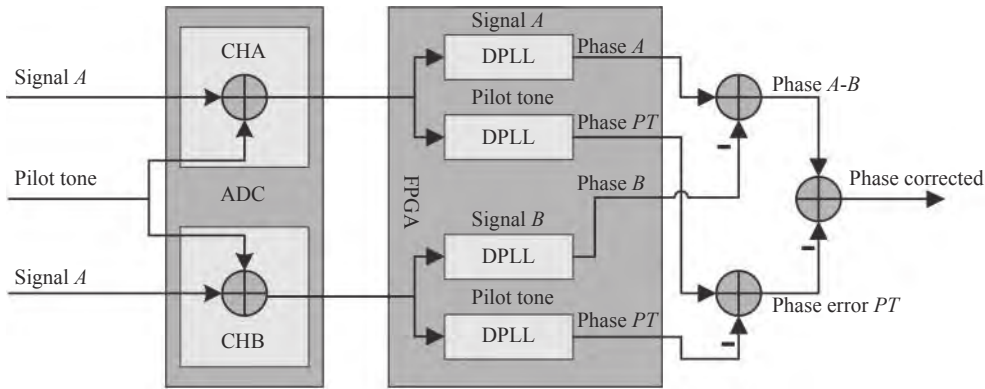


图 2 导频校正原理图

Fig. 2 Pilot tone Correction Schematic

通道采样后的相位信号。 f_h 、 f_p 为待测信号及导频信号的频率。为减少噪声混叠,分别在 ADC 和导频模拟电路前端设置了抗混叠滤波器。考虑到太极计划中干涉信号的频段为 5–25 MHz, 设置 ADC 前端抗混叠滤波器的截止频率为 30 MHz。为放大采样抖动噪声, 进而更好地消除采样抖动, 导频频率一般远高于待测信号, 本项目中导频信号抗混叠滤波器的截止频率设置为 65 MHz。

FPGA 母卡主要完成相位计的算法实现、数据通信控制等功能, 其由 FPGA 处理器、以太网通信物理层 (Physical, PHY) 芯片、板载 50 MHz 时钟及时钟管理芯片等组成。子卡与母卡间采用 FPGA 夹层卡 (FPGA Mezzanine Card, FMC) 连接器连接, 用于完成板间的数据交互、时钟、供电等功能。驱动时钟既可以由板载的时钟给出, 也可以其由外部高精度时钟源给出, 经 FPGA 内部锁相环倍频至 80 MHz 后作为全局时钟使用。整体实物图如图 3 所示。



图 3 多通道相位计硬件实物图

Fig. 3 Hardware prototype of multi-channel phasemeter

2.2 软件设计

软件部分由可编程系统 (Programmable System, PS) 端软件和可编程逻辑 (Programmable Logic, PL) 端软件两部分构成。其中, PS 端运行定制化的 Linux 系统。该系统由 Xilinx 提供的 Petalinux 工具包生成^[20], 且基于 Linux 系统封装了对 PL 侧寄存器的读写命令以及网口驱动等工具便于调试和使用。该部分不属于本文讨论的重点, 不再展开叙述。PL 端则集成了针对外围器件的驱动、通信协议以及相位测量算法, 其中最核心的是基于 DPLL 的相位解调算法^[19]。该算法的原理框图如图 4 所示。DPLL 采用二阶环设计, 待测信号由 ADC 以 80 MHz 的采样速率采样后进入 FPGA, 其与 DPLL 内部的数控振荡器 (Numerical Control Oscillator, NCO) 的输出信号混频并低通滤波后, 得到两混频信号的相位差, 经过比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器后反馈控制 NCO 的输出频率, 最终使得环路达到稳定。输入

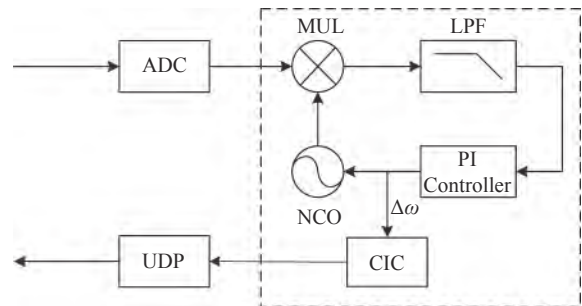


图 4 基于 DPLL 的相位解调算法原理框图。(MUL: 乘法器; LPF: 低通滤波器; UDP: 用户数据报协议)

Fig. 4 Block diagram of phase demodulation algorithm based on DPLL.(MUL: Multiplier; LPF: Low Pass Filter; UDP: User Datagram Protocol)

信号与 NCO 的输出信号同频同相, 用以实现相位锁定。环路中加入 PI 控制器, 旨在改善环路的动态和稳态性能, 由于 PI 控制器的输出直接对应控制 NCO 的频率, 因此在环路锁定之后, 通过提取该信号并积分, 即可得到输入信号的相位信息。

多通道相位测量系统在 PL 侧的部署框图如图 5 所示。信号经 ADC 采样之后, 首先经频率捕获模块进行粗测频, 得到待测信号和导频频率的初始值并将其转化为 DPLL 能够识别的频率控制

字(Frequency Control Word, FCW)以初始化各自 DPLL。不同 DPLL 开始跟踪输入的不同通道的信号, 提取各 NCO 的频率变化值, 经过级联积分梳状滤波器(Cascaded Integrated Comb Filter, CIC)抽取后速率降至 20 Hz。最终, 4 片 ADC 对应的 16 路信号的频率波动将会按照以太网报文格式打包, 通过用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)使用网口上载至 PC(Personal Computer)端。在 PC 端对采集得到的数据进行后处理, 即可得到输入信号的相位信息。

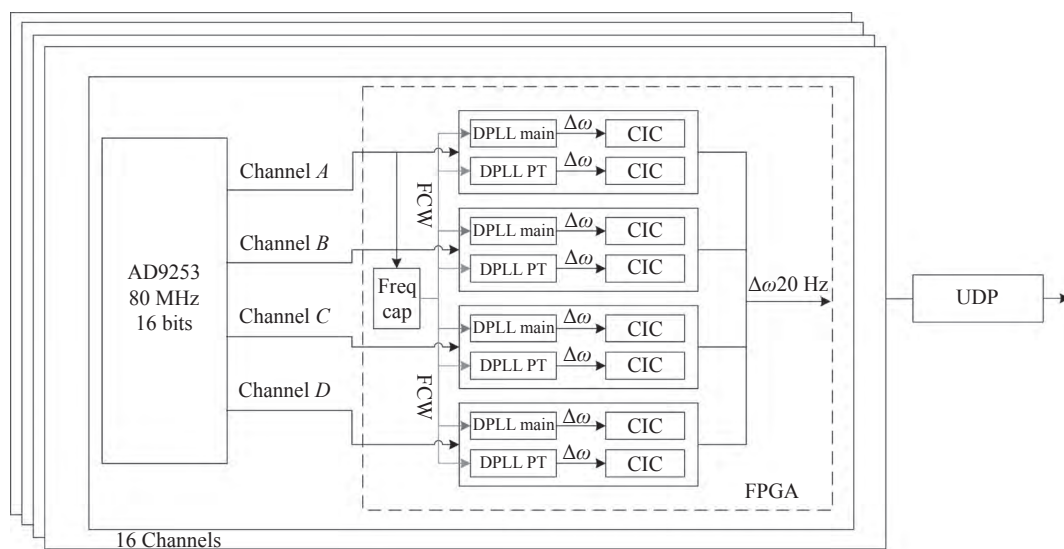


图 5 PL 侧系统部署框图

Fig. 5 Schematic diagram of system arrangement on PL

3 时域功能测试

空间引力波探测中, 相位计主要测量单一通道的相位/频率波动, 或通道间的相位差。相位计测试首先需验证相位测量的准确度和线性度。分为静态和动态两种情况: 静态测试时, 通道间的相位差为固定值; 动态测试时, 两通道输出信号的初始相位保持一致, 输出频率间设定为一个细小差值, 测量随时间变化下两通道的相位差是否呈线性变化, 并评估其线性度。其次, 由于轨道间的多普勒效应会导致干涉信号频率出现大范围漂移。因此, 相位测量系统是否具备跟踪干涉信号大范围频率漂移的能力也是一个重要测试项。实验设备实物图如图 6 所示。

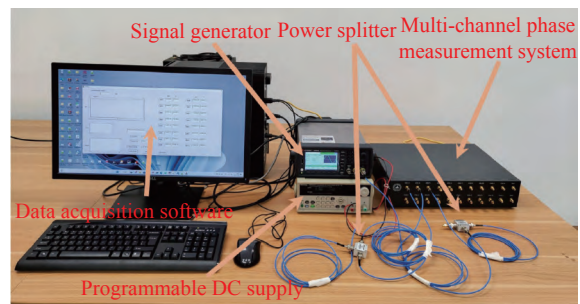


图 6 实验设备实物图

Fig. 6 Physical prototype of experiment set up

3.1 相位静态线性度测试

静态测试时, 使用信号发生器 (KEYSIGHT 33500B) 为标准信号源, 信号发生器的两个输出通道的频率、初始相位和峰峰值均相同。开始测试后, 固定通道 1 的相位不变, 改变通道 2 输出信

号的相位。相位计的目标带宽是 5~25 MHz, 因此, 信号频率分别设定为 5、15、20、25 MHz, 峰峰值为 1 Vpp, 初相均为 0°。相位差以 30°为步长从 0°到 360°变化。为避免信号发生器与相位

计时钟不同步引起的相位偏移, 本文使用信号发生器的时钟同步相位计。为避免环境噪声的影响, 每个点测量 5 s 取平均。测试结果如图 7 所示。

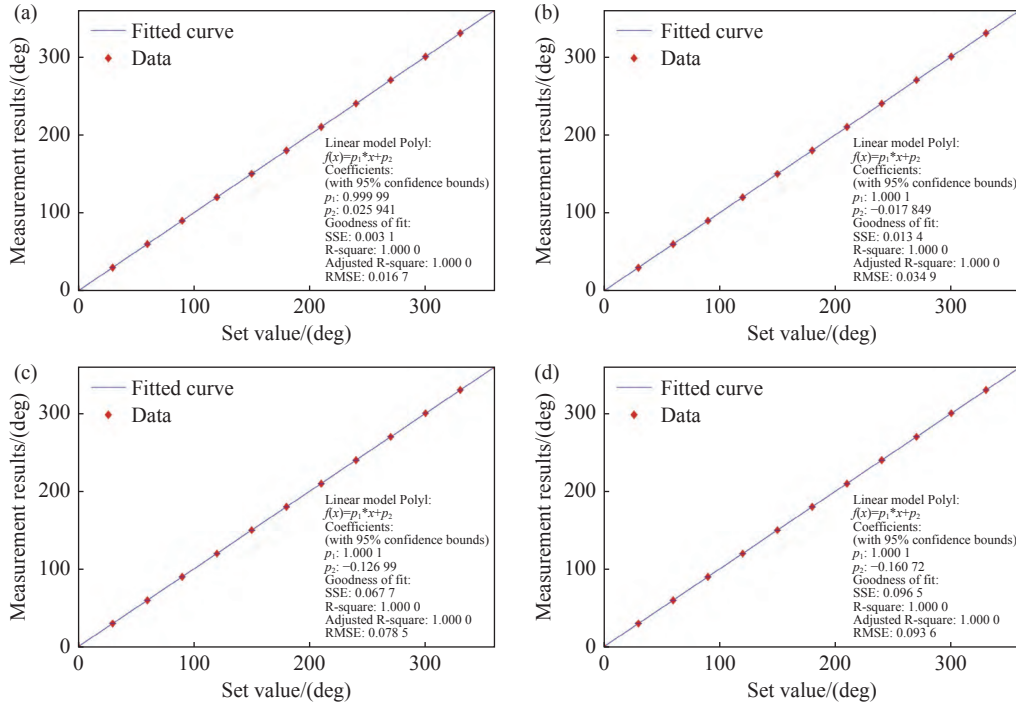


图 7 不同频率下相位静态线性度测试结果。(a) 5 MHz; (b) 15 MHz; (c) 20 MHz; (d) 25 MHz;

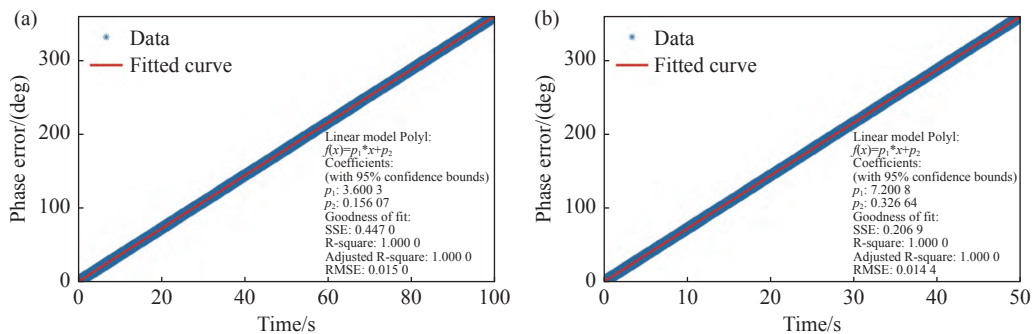
Fig. 7 Phase static linearity test results at different frequencies. (a) 5 MHz; (b) 15 MHz; (c) 20 MHz; (d) 25 MHz;

图 7 表明多通道相位计在不同频率下, 相位计能够准确反映出待测信号的相位变化, 且具有良好的线性度。拟合曲线 R^2 均等于 1 (四位小数), 曲线斜率约等于 1 (四位小数)。

3.2 相位动态线性度测试

动态测试时, 设置信号发生器的两个输出通道的幅值、初相均相同 (KEYSIGHT 33500B), 幅值为 1 Vpp, 初相为 0°。设定每两通道的频率间均有一微小差异, 分别为 0.01、0.02、0.04 和 0.08 Hz。

理论上, 信号发生器的两通道之间存在固定频率差时, 通道之间的相位差将随时间呈线性变化, 为保证每次测量的相位差区间为 0°到 360°, 4 组频率差测量分别计时 100、50、25 和 12.5 s。同时, 为避免时钟不同步引起的相位偏移, 本次测试选用信号发生器的时钟同步相位计。测试信号频率为 5 MHz 的测试结果如图 8 所示, 其它频率的测试结果见表 1 (保留六位小数)。



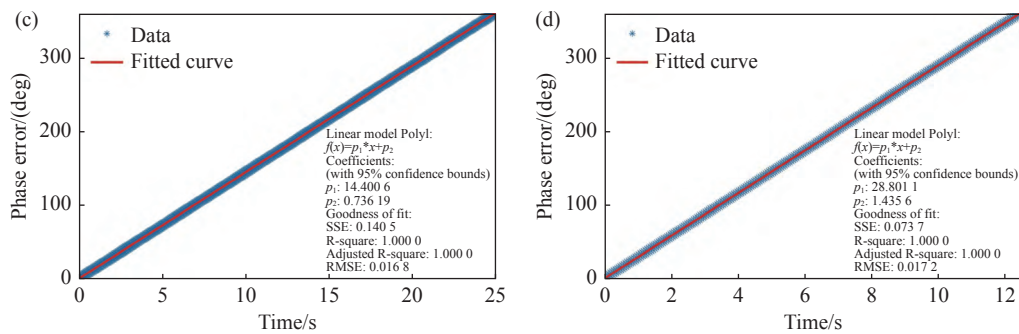


图 8 不同频率差下相位动态线性度测试, 测试信号频率 5 MHz。(a) 0.01 Hz; (b) 0.02 Hz; (c) 0.04 Hz; (d) 0.08 Hz;

Fig. 8 Phase dynamic linearity test results at different frequency differences with signal frequency 5 MHz. (a) 0.01 Hz; (b) 0.02 Hz; (c) 0.04 Hz; (d) 0.08 Hz;

表 1 动态测试下拟合曲线斜率

Tab. 1 The slope of the fitting curve under the dynamic test

	0.01Hz	0.02Hz	0.04Hz	0.08Hz
5 MHz	0.010001	0.020002	0.040002	0.080003
15 MHz	0.010001	0.020004	0.040009	0.080012
25 MHz	0.009999	0.020012	0.039980	0.080045

图 8 和表 1 表明多通道相位计在动态测试时, 能够准确地反映出待测信号的相位变化, 且具有良好的线性度。图 8 拟合曲线 R^2 均等于 1 (四位小数), 曲线斜率均能准确反映相位的变化速率。

3.3 频率跟踪能力测试

进行频率跟踪能力测试时, 使用信号发生器的频率调制 (Frequency Modulation, FM) 调频功能, 载波主频为 5 MHz, 峰峰值为 1 Vpp, 初相为 0° , 调制深度为 1 kHz, 调制速率分别为 2、4、8 mHz, 换算得到的频率漂移速率分别为 4、8、16 Hz/s, 测试时间为 2000 s, 通过读取相位计的频率输出来判断相位计是否能够应对信号频率高速率漂移的科学任务。为避免信号源与相位计之间由于时钟不同步带来的相位 (频率) 偏移, 使用信号发生器的时钟同步相位计后进行测试, 测试结果如图 9 (彩图见期刊电子版) 所示。

图 9 表明, 在 16 Hz/s 的高速频率漂移下, 相位计仍然能够准确跟踪输入信号。而在空间引力波探测中, 前期研究显示, 航天器之间由多普勒频率引起的干涉信号的频率漂移的最大速率小于 10 Hz/s^[21]。综合上述实验结果, 表明本文多通道

相位计完全具备跟踪星间多普勒频移带来的干涉信号频率漂移的能力。

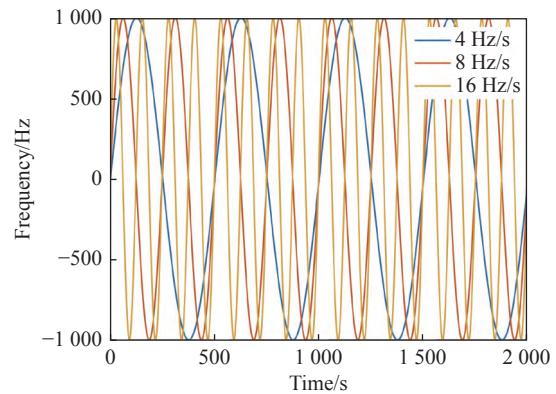


图 9 频率跟踪能力测试结果

Fig. 9 Test results of frequency tracking capability

综合上述 3 组测试结果可知, 本文多通道相位计具备良好的测相线性度和准确度, 能够满足地基激光干涉实验中精准相位读出或频率读出的需要; 针对具有频率漂移的信号, 多通道相位计能够实时跟踪信号的频率变化并输出正确的频率值, 说明相位计能够应对较大范围的频率漂移问题, 能够满足空间引力波探测的需要。

4 频域噪声测试

由于空间引力波探测目标波源具有明显的频率特征, 因此对测试系统的噪声评价常采用频域幅度谱密度的评价方式。

一方面, 空间干涉信号的频率在 5~25 MHz 区间内波动, 且信号幅值变化会引起信号信噪比的改变。另一方面, 多通道相位计共有 4 片 ADC, 可以同时跟踪采集 16 路相位信息, 但同一 ADC

不同通道之间以及不同 ADC 的通道之间存在差异,能否保持目标精度尚有待验证。下文将对相位计不同工况下的相位噪声做测试评估(导频修正后),评估方法为幅度谱密度,并采用德国 Albert Einstein Institute 开发的 LTPDA(LISA Technology Package Data Analysis) 工具箱进行平滑处理^[21]。

4.1 不同 ADC 通道下的相位噪声

本小节主要研究不同 ADC 通道之间(包括同一 ADC 不同通道和不同 ADC 不同通道两种情况)的相位噪声水平。信号源由信号发生器给出,通道 1 为待测信号,频率为 5 MHz,峰峰值为 800 mVpp,初相为 0°;通道 2 为导频信号,频率为 15.1 MHz,峰峰值为 1.6 Vpp,初相为 0°。干涉信号经功分器(ZFSC-2-6+)一分二后接入两个待测通道,为使测量结果不引入功分器噪声,将导频信号也引入一分二功分器,将一端输出接入相位计的功分通道,另一端输出接 50 欧姆阻抗。本次共测试了 7 组不同组合的相位噪声,不同 ADC 之间和同一 ADC 不同通道之间的测试结果如图 10 (彩图见期刊电子版)所示。

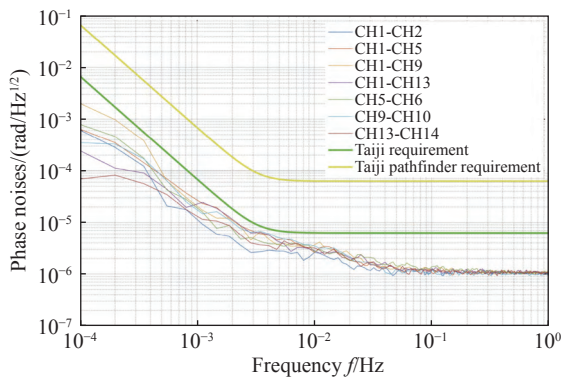


图 10 不同 ADC 通道之间相位噪声

Fig. 10 Phase noise between different ADC channels

图 10 表明,7 组相位噪声均能在全频段优于 $2\pi\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。且在噪声幅度谱密度的高频段 0.1~1 Hz,7 组测试的幅度谱密度基本处于同一量级,具有很好的一致性,这说明本文多通道相位计由 ADC 通道之间和不同 ADC 之间存在的差异所引入的相位噪声可忽略。

4.2 不同频率下的相位噪声

本小节主要研究不同频率的干涉信号的相位噪声水平。由于轨道的运动,干涉信号频率在

5~25 MHz 范围内波动。但信号频率增大,会导致一定程度上的频率(相位)抖动和信噪比降低,因此测试相位计在不同频率下的噪声水平是应用于空间测量的前提。设置干涉信号频率为 5、10、15、20、25 MHz,所有测试信号的幅值固定为 800 mVpp,初相为 0°。除导频信号的频率随待测信号频率的不同而变化外,其余参数设置均与 4.1 节实验相同,测试结果如图 11 (彩图见期刊电子版)所示。

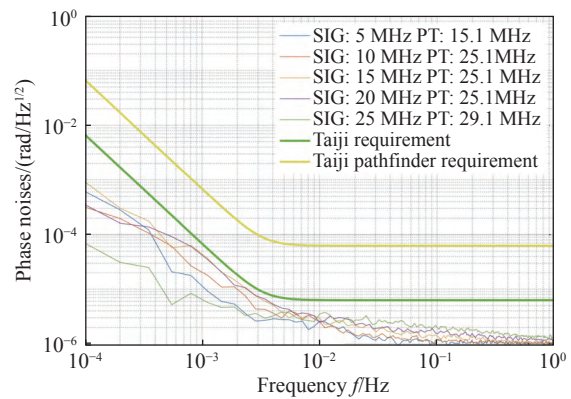


图 11 不同频率下的相位噪声

Fig. 11 Phase noise at different frequencies

图 11 表明,在 10 mHz~0.1 Hz 频段处,能够看到随信号频率的增大,相位噪声随之增大,说明随着频率的增加,信号的信噪比在降低。但 5 组频率不同的干涉信号在经导频信号修正后,敏感频段内噪声均低于 $2\pi\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$,能够满足空间测量的需求。

4.3 不同幅值下的相位噪声

由于光功率及臂长变化会引起空间干涉信号的幅值变化。本小节主要研究干涉信号在不同幅值下的相位噪声水平。幅值是影响信号信噪比最直接的物理量,信号幅值降低必然会导致信噪比降低,进而影响相位噪声本底。本次测试设置待测信号幅值分别为 400 mVpp、600 mVpp、800 mVpp 和 1 Vpp。随信号幅值变化,设置不同导频信号幅值。其余设置均与 4.1 节相同,测试结果如图 12 (彩图见期刊电子版)所示。

图 12 表明,在 0.1 Hz~1 Hz 频段处,随着信号幅值的降低,相位噪声的幅度谱密度曲线随之升高,且曲线之间的差异较为明显,这说明信号的信噪比在很大程度上决定相位测量本底噪声水

平。随着频段的进一步降低,其余噪声如温度漂移噪声、功率波动噪声占主导,曲线噪声水平和信号幅值的相关性较小。经导频信号修正后,4组不同幅值干涉信号的相位噪声水平在0.1 mHz–1 Hz频段内均能低于 $2\pi\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$,均能满足空间测量的需求。

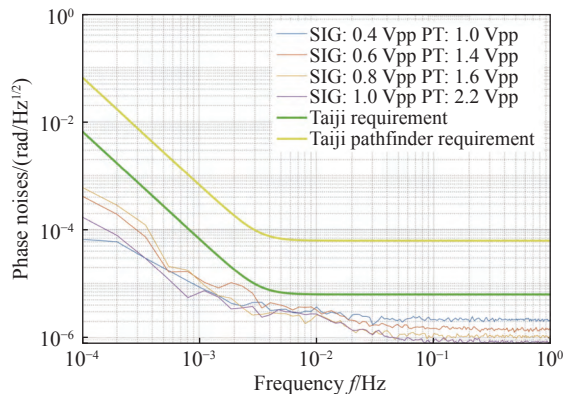


图12 不同幅值下的相位噪声

Fig. 12 Phase noises at different amplitudes

综合以上3组实验可以得出:本文所设计的多通道相位计的不同通道之间具有很好的一致性,由通道差异或ADC芯片差异引入的相位噪声在目标频段内可以忽略不计;对于频率在5~25 MHz之间的任意干涉信号,相位计均能在目标频段内满足需求;对于信号峰峰值在400 mVpp以上的信号,多通道相位计均能够将噪声压制到 $2\pi\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以内。上述实验也印证了信号的相位噪声随其频率和幅值变化的规律,这为进一步提高干涉仪的灵敏度和相位计的测相精度指明了方向。

参考文献:

- [1] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, *et al.*. Sensor noise in LISA pathfinder: in-flight performance of the optical test mass readout[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(13): 131103.
- [2] LUO Z R, GUO Z K, JIN G, *et al.*. A brief analysis to Taiji: science and technology[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102918.
- [3] HU W R, WU Y L. The Taiji Program in Space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. *National Science Review*, 2017, 4(5): 685-686.
- [4] LUO J, BAI Y ZH, CAI L, *et al.*. The first round result from the TianQin-1 satellite[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(18): 185013.
- [5] LUO J, CHEN L SH, DUAN H Z, *et al.*. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035010.

5 结论

本文从太极计划及其地基激光干涉实验需求入手,设计、构建并测试了多通道相位测量系统。首先,给出多通道相位测量系统的软硬件设计,包括硬件架构设计、数字锁相环测相算法、软件架构设计等。其次,对多通道相位计进行时域功能测试,包括相位准确度和线性度的静态和动态测试。测试结果表明:多通道相位测量系统在不同工况下的动静态相位线性度和准确度良好,并且能够应对空间引力波探测较大范围时的频率漂移问题。最终,对多通道相位计进行不同通道、不同频率、不同幅值下的频域噪声测试。测试结果表明本文设计的多通道相位计,在0.1 mHz–1 Hz频段内,相位噪声水平平均优于 $2\pi\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。不同通道之间具有很好的一致性,由通道差异或ADC芯片差异引入的相位噪声在目标频段内可以忽略不计;对于频率在5–25 MHz之间的任意干涉信号,相位计均能在目标频段内满足需求;对于信号峰峰值在400 mVpp以上的信号,多通道相位计均能够将噪声压制到 $2\pi\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。因此,该多通道相位测量系统满足空间引力波探测及地基干涉实验的需求。

在空间引力波探测中,相位计不仅需要完成测频测相的功能,作为干涉系统的配套电子学部分,相位计仍需完成诸如绝对距离测量与通信、时钟噪声传递等功能。因此,未来的相位计系统需集成以上功能,但在此情况下,分析各功能间的相互耦合关系,使相位计仍具备高精度的测量灵敏度是下一阶段解决的主要问题。

- [6] 罗子人, 张敏, 靳刚. 激光干涉引力波空间阵列核心问题的综合讨论[J]. *科学通报*, 2019, 64(24): 2468-2474.
LUO Z R, ZHANG M, JIN G. Overall discussion on the key problems of a space-borne laser interferometer gravitational wave antenna[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(24): 2468-2474. (in Chinese)
- [7] 黄双林, 龚雪飞, 徐鹏, 等. 空间引力波探测——天文学的一个新窗口[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(1): 010404.
HUANG SH L, GONG X F, XU P, *et al.*. Gravitational wave detection in space—a new window in astronomy[J]. *Scientia China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017, 47(1): 010404. (in Chinese)
- [8] 刘河山, 高瑞弘, 罗子人, 等. 空间引力波探测中的绝对距离测量及通信技术[J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 486-492.
LIU H SH, GAO R H, LUO Z R, *et al.*. Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 486-492. (in Chinese)
- [9] 邓汝杰, 张艺斌, 刘河山, 等. 太极计划中的星间激光测距地面电子学验证[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(4): 765-776.
DENG R J, ZHANG Y B, LIU H SH, *et al.*. Ground electronics verification of inter-satellites laser ranging in the taiji program[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 765-776. (in Chinese)
- [10] 高瑞弘, 刘河山, 罗子人, 等. 太极计划激光指向调控方案介绍[J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 425-431.
GAO R H, LIU H SH, LUO Z R, *et al.*. Introduction of laser pointing scheme in the Taiji program[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 425-431. (in Chinese)
- [11] 赵梦阳, 高瑞弘, 张强涛, 罗子人. 太极计划激光链路构建地面模拟控制系统研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(17): 1706003.
ZHAO M Y, GAO R H, ZHANG Q T, *et al.*. Research on simulated laser link construction control system of Taiji program[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(17): 1706003. (in Chinese)
- [12] The Taiji Scientific Collaboration. China's first step towards probing the expanding universe and the nature of gravity using a space borne gravitational wave antenna[J]. *Communications Physics*, 2021, 4(1): 34.
- [13] LIU H SH, YU T, LUO Z R. A low-noise analog frontend design for the Taiji phasemeter prototype[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(5): 054501.
- [14] ZHANG J F, YANG ZH, MA X SH, *et al.*. Inter-spacecraft offset frequency setting strategy in the Taiji program[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(3): 837-843.
- [15] LIU H SH, LUO Z R, JIN G. The development of phasemeter for Taiji space gravitational wave detection[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2018, 30(6): 775-781.
- [16] 韩爽. 空间引力波探测相位计测试系统设计与实现[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.
HAN SH. Design and implementation of phasemeter test system for space gravitational wave detection[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2022. (in Chinese)
- [17] SCHWARZE T S, FERNÁNDEZ BARRANCO G, PENKERT D, *et al.*. Picometer-stable hexagonal optical bench to verify LISA phase extraction linearity and precision[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(8): 081104.
- [18] WISSEL L, WITTCHE A, SCHWARZE T S, *et al.*. Relative-intensity-noise coupling in heterodyne interferometers[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17(2): 024025.
- [19] GERBERDING O, SHEARD B, BYKOV I, *et al.*. Phasemeter core for intersatellite laser heterodyne interferometry: modelling, simulations and experiments[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2013, 30(23): 235029.
- [20] Xilinx Inc. PetaLinux tools documentation: reference guide (UG1144)[DB/OL]. (2022-10-19). <https://docs.xilinx.com/r/en-US/ug1144-petalinux-tools-reference-guide/Overview>.
- [21] HEWITSON M, ARMANO M, BENEDETTI M, *et al.*. Data analysis for the LISA Technology Package[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2009, 26(9): 094003.

作者简介:



张强涛(1997—), 男, 河南三门峡人, 硕士, 现就读于国科大杭州高等研究院, 主要从事引力波探测相位计方面的研究。E-mail: zhangqiangtao20@mails.ucas.ac.cn



刘河山(1988—), 男, 安徽阜阳人, 博士, 副研究员, 2015年于中国科学院大学获得博士学位, 研究领域涉及激光干涉测距、高精度相位测量、精密指向控制、激光锁相等。E-mail: liuheshan@imech.ac.cn



罗子人(1980—), 男, 湖南长沙人, 博士, 研究员, 2010年于中国科学院数学与系统科学研究院获得理学博士, 现为中国科学院力学研究所研究员。太极计划首席科学家助理, 主要从事引力波探测的空间激光干涉测距技术的理论分析和方案设计方面的研究。E-mail: luoziren@imech.ac.cn