

面向空间激光干涉的相位计自动重锁技术设计与实验验证

王新宇 杨润 刘河山

Design and experimental verification of automatic relocking technology for phasemeter in space laser interferometry

WANG Xin-yu, YANG Run, LIU He-shan

引用本文:

王新宇, 杨润, 刘河山. 面向空间激光干涉的相位计自动重锁技术设计与实验验证[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0033

WANG Xin-yu, YANG Run, LIU He-shan. Design and experimental verification of automatic relocking technology for phasemeter in space laser interferometry[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0033

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向空间激光干涉的多通道相位测量系统

Multi-channel phase measurement system for the space laser interferometry

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1089 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0258>

空间引力波探测中超低附加相噪频综研究

Ultralow residual phase noise frequency synthesizer for space gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 661 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0015>

空间引力波探测“太极计划”星间姿态-光程耦合噪声迭代拟合与高精度抑制方法

Iterative estimation and precision suppression of inter-spacecraft tilt-to-length coupling noise for the Taiji space gravitational wave detection mission

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 583 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0042>

空间引力波探测前向杂散光测量和抑制

Measurement and suppression of forward stray light for spaceborne gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1081 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0251>

低灵敏度空间引力波望远镜光学系统设计

Design of optical system for low-sensitivity space gravitational wave telescope

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1384 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0006>

太极计划中的星间激光测距地面电子学验证

Ground electronics verification of inter-satellites laser ranging in the Taiji program

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 765 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0041>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-11

面向空间激光干涉的相位计自动重锁 技术与实验验证

王新宇^{1,2,3}, 杨润^{1,2,3}, 刘河山^{3*}

(1. 国科大杭州高等研究院基础物理与数学科学学院, 浙江, 杭州, 310024;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190)

摘要: 面向空间激光干涉的相位计, 当锁相环路发生失锁时, 现阶段普遍采用 FFT (Fast Fourier Transform, 快速傅里叶变换) 测频法重新完成信号捕获, 该方法存在测频精度偏低 (100 Hz 量级)、重锁耗时较长 (约 7 ms) 等技术问题。本文提出一种与 FFT 协同部署的自动重锁技术, 该技术采用瞬时频率值与频率变化率相结合的失锁检测策略, 同时选取环路滤波器原始数据与 CIC (Cascaded Integrator-Comb, 级联积分器梳状滤波器) 降采样数据两类数据源完成失锁判断, 失锁发生后通过复位操作清除积分误差, 并接收频率预测算法输出的预测值。该频率预测算法针对周期信号采用波形生成算法, 针对非周期信号采用二阶多项式预测算法, 同时结合插值技术生成对应的频率预测值。该自动重锁技术与 FFT 采用并行部署的方式且形成明确的功能分工, 其中该技术依托信号自身的规律性开展频率预测, 负责处理所有规律信号的失锁场景 (无论失锁时长) 以及短时 (<1 s) 非规律信号的快速重锁, FFT 则负责处理非规律信号以及长时复杂失锁场景下的信号重新捕获, 二者形成优势互补的工作模式。实验验证结果表明, 在规律信号失锁的场景下, 本研究提出的算法平均重锁时间为 32 μ s, 最大重锁时间为 60 μ s, 相较于 FFT 方法提升两个数量级, 且重锁速度与失锁时长无关联, 即在失锁时长达到 10 s 时仍能保持数十微秒量级的重锁速度, 同时在 -10~10 dB 的信噪比范围内, 频率估计误差稳定在 10 Hz 以下, 即使信噪比低至 -10 dB 时仍可实现稳定锁定。这种与 FFT 协同部署的架构在保留 FFT 宽频捕获能力的基础上, 显著提升了规律信号场景下的快速重锁能力, 为空间引力波探测任务提供了高精度、快响应、强稳定性的相位测量技术支撑。

关键词: 相位计; 数字锁相环; 失锁检测; 频率预测; 重锁时间; 空间引力波探测

中图分类号: O439

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2026-0033

CSTR: 32171.14.CO.2026-0033

收稿日期: 2026-03-04; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家重点研发计划资助 (No. 2023YFC2206200)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFC2206200)

Design and experimental verification of automatic relocking technology for phasemeter in space laser interferometry

WANG Xin-yu^{1,2,3}, YANG Run^{1,2,3}, LIU He-shan^{3*}

(1. School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

Abstract: This paper studies the phase meter applied to space laser interferometry. The phase-locked loop will suffer from lock loss in actual operation. Researchers commonly adopt the FFT frequency measurement method to re-acquire the signal at the present stage. This method has obvious technical defects. Its frequency measurement accuracy is low at the order of 100 Hz, and the relocking time is long about 7 ms. This paper proposes an automatic relocking technique deployed in collaboration with FFT. This technique adopts a lock-loss detection strategy that combines instantaneous frequency values and frequency change rates. It selects two data sources to judge lock loss, including the original data of the loop filter and the down-sampled data of CIC. It clears the integration error through the reset operation after lock loss occurs, and it receives the predicted value output by the frequency prediction algorithm. The frequency prediction algorithm uses the waveform generation algorithm for periodic signals. It uses the second-order polynomial prediction algorithm for aperiodic signals. It also combines interpolation technology to generate the corresponding frequency predicted value. The automatic relocking technique and FFT are deployed in parallel, and they form a clear functional division. This technique performs frequency prediction based on the inherent regularity of the signal. It deals with lock-loss scenarios of all regular signals regardless of the lock-loss duration. It also realizes fast relocking of short-time irregular signals within 1 s. FFT is responsible for signal re-acquisition in irregular signal scenarios and long-time complex lock-loss scenarios. The two methods form a working mode with complementary advantages. Experimental verification results show that the algorithm proposed in this study has an average relocking time of 32 μ s and a maximum relocking time of 60 μ s in the scenario of regular signal lock loss. The performance is improved by two orders of magnitude compared with the FFT method. The relocking speed has no correlation with the lock-loss duration. It can still maintain the relocking speed at the order of tens of microseconds when the lock-loss duration reaches 10 s. The frequency estimation error is stably controlled below 10 Hz in the signal-to-noise ratio range from -10 dB to 10 dB. The system can still achieve stable locking even when the signal-to-noise ratio is as low as -10 dB. This architecture deployed in collaboration with FFT retains the wide-band acquisition capability of FFT. It significantly improves the fast relocking capability in regular signal scenarios. It provides high-precision, fast-response and high-stability phase measurement technical support for space gravitational wave detection missions.

Key words: phase meter; digital phase-locked loop; loss-of-lock detection; frequency prediction; relocking time; space gravitational wave detection

1 引 言

空间引力波探测将观测频段拓展至 0.1 mHz~1 Hz 的低频区间, 该频段涵盖超大质量黑洞并合、极端质量比旋近等丰富的天体物理源, 具备不可替代的科学研究价值^[1-3]。其中, 太极计划^[1]、天琴计划^[2] 作为我国代表性的空间引力波探测项目, LISA (Laser Interferometer Space Antenna, 激光干涉仪空间天线) 计划^[3] 作为欧美的代表性项目, 三者均以星间激光干涉作为核心探测手段, 需要在百万公里尺度下实现皮米级的位移测量精度, 这对应着相位读出系统的噪声水平需优于 $2\pi \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ ^[4-5]。近年来, 国内外科学者围绕空间引力波探测的科学目标与关键技术方向开展了系统性的研究工作^[6-7], 为相位计的研制工作奠定了重要的技术基础。

相位计作为激光干涉信号光拍频的数字化读出核心单元, 需应对极为严苛的工况。其对应的光拍频频率动态范围较宽, 为 5 MHz~25 MHz^[4], 且受多普勒效应影响, 频率会实时发生变化, 最大变化速率可达 10 Hz/s^[8-9]。星载应用平台硬件资源较为紧张, 所处空间电磁环境也更为复杂, 激光干涉信号可能因平台姿态调整、指向抖动等因素发生频繁且短暂的中断。这些因素共同对相位计的频率跟踪能力、抗干扰性能以及失锁后的快速恢复能力均提出了极高的技术要求^[10-11]。

为应对上述相位计工作工况带来的挑战, 国内外科学者围绕相位计性能提升开展了大量相关研究。在核心架构层面, 学者们已经建立起以 DPLL (Digital Phase-Locked Loop, 数字锁相环) 为基本框架的理论模型与实验验证体系^[12-13], 太极计划相关研究实现的相位计噪声水平优于 $2\pi \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ ^[5], 多通道拓展和多频率信号捕获等相关技术进一步拓展了相位计系统的工作能力^[14-16], 低功耗相位跟踪技术及光学平台实验为相位计的空间实际应用提供了有力支撑^[17-18]。在噪声抑制方面, 研究人员通过 CIC 滤波器优化、低频噪声抑制^[19-20]、采样抖动直接抑制^[21]、正切鉴相器与二次谐波滤波^[22-23] 及自动增益控制^[24] 等技术手段, 显著提升了相位计的测量精度。在多功能集成方面, 绝对距离测量、通信技术与系统噪声分解^[25-26]、

深度频率调制干涉^[27]、激光链路辅助^[28] 以及皮米级读出系统与光学频率梳新方案^[29-30] 等相关研究, 推动了相位计向系统化、多功能化方向发展。此外, 针对多普勒效应与频偏设置开展的相关研究^[8-9], 为相位计在动态环境下实现稳定工作提供了重要的理论指导。

然而, 传统相位测量技术存在难以规避的固有局限性。快速傅里叶变换 (FFT) 测频方法凭借捕获范围宽、无收敛过程、可对任意波形实现无偏估计等优势, 广泛应用于信号冷启动、大范围频率跳变及非规律调制信号的测频场景^[15-16]。但针对空间引力波探测任务中百微秒至数毫秒级的短时瞬态失锁场景, FFT 的恢复速度无法满足连续观测任务对实时性的核心要求。以 4096 点 FFT、80 MHz 采样率为具体分析案例, FFT 重启恢复时间主要受数据采集长度与傅里叶变换计算延迟两类核心因素制约, 结合相关研究成果^[15] 可知, 该恢复时间典型值约为 7.18 ms。需明确的是, 该恢复时间与 FFT 运算点数及系统采样率直接相关, 不同参数配置下会呈现不同结果。上述研究中采用奎恩算法缩减了所需采样点数, 该技术手段现阶段具备先进性, 因此对应的信号捕获耗时相对更短。若 FFT 运算点数进一步增加, 或系统采样率降低, 信号捕获的整体耗时将进一步增加。此外, FFT 测频精度同样受限于采样点数, 其典型测频精度仅约 100 Hz^[15], 该精度无法满足空间引力波探测对相位计自动重锁的实际应用需求。基于数字锁相环 (DPLL) 的相位计方案自引入空间引力波探测领域以来, 在噪声优化方面已取得显著成效^[13, 17, 20], 但现有研究对失锁检测与快速重锁机制的关注仍存在不足。

为此, 本文提出一种基于 FFT 与自动锁定辅助 DPLL 协同部署的相位计架构。该架构在传统 DPLL 基础上新增失锁检测与频率预测两大功能模块, 其中失锁检测模块以瞬时频率值与频率变化率为两类判断依据, 结合原始数据与 CIC 降采样数据两类数据源实现失锁状态判定。频率预测模块针对周期信号与非周期信号, 分别设计波形生成算法与多项式拟合算法, 结合插值技术生成相应频率预测值。上述两大功能模块与 FFT 采用并行部署模式, 构建基于信号规律性与失锁时长动态切换的协同恢复机制, 该机制在保

留 FFT 宽频捕获能力的前提下,可显著提升规律信号场景下的快速重锁性能。传统 FFT 测频方法的频率估计精度通常为百赫兹量级,该精度已被验证可满足空间引力波探测等场景对频率跟踪的基本需求^[15]。本文所提方法可将频率估计精度提升至 10 Hz,该精度提升进一步保障了高精度相位测量的可靠性。

2 DPLL 相位计基本原理

图 1 呈现了该相位计的原理框图。该相位计以锁相环作为核心架构进行搭建,其鉴相器由乘法器与低通滤波器组成,主要负责提取输入信号与 NCO(Numerically Controlled Oscillator, NCO)输出信号之间的相位差,环路滤波器由数字比例-积分控制器与相位增量寄存器构成,用于调节锁相环路的动态性能并抑制系统噪声,数控振荡器通过相位累加器与查找表的方式实现,可生成频率与相位能够精准调控的正交输出信号^[5, 12-13]。该相位计设计具备锁相环固有的频率跟踪与相位同步功能,同时针对空间引力波探测任务对精度、稳定性与可靠性提出的极端要求,在环路参数选取、滤波器结构设计及数字电路实现等方面开展了专项优化与改进工作^[4-5, 14]。

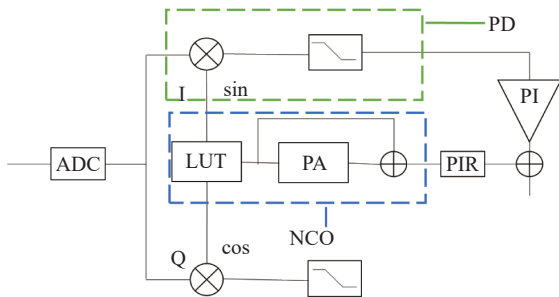


图 1 DPLL 相位计原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of a DPLL phase meter (PD: Phase Detector, NCO: Numerically Controlled Oscillator, PI: Proportional-Integral Controller, ADC: Analog-to-Digital Converter, PIR: Phase Increment Register, PA: Phase Accumulator, LUT: Look-Up Table, Q: Quadrature signal, sin: Sine wave)

该相位测量系统依托全数字化的二阶锁相环(DPLL)实现闭环运行,该系统的核心工作机制为连续的负反馈调节过程^[5, 12]。如图 1 所示,设定系统的待测输入信号为

$$x(t) = A \sin(\omega t + \theta) \quad , \quad (1)$$

数控振荡器产生一组正交本振信号,其表达式为:

$$S_I(t) = B \sin(\omega_0 t), S_Q(t) = B \cos(\omega_0 t) \quad , \quad (2)$$

待测信号首先与 NCO 输出的余弦分量进行数字混频(乘法运算):

$$m(t) = x(t)S_Q(t) = A \sin(\omega t + \theta) B \cos(\omega_0 t) = \frac{AB}{2} [\sin((\omega - \omega_0)t + \theta) + \sin((\omega + \omega_0)t + \theta)] \quad (3)$$

混频后产生一个正比于两信号相位差正弦值的低频误差分量和高频倍频分量^[12]。随后,该信号通过低通滤波器,滤除高频分量,从而提取出瞬时相位差:

$$e(t) \approx \frac{AB}{2} \sin((\omega - \omega_0)t + \theta) \quad , \quad (4)$$

当频率接近锁定时 ($\omega \approx \omega_0$), 上式可简化为:

$$e(t) \approx K_d \sin(\varphi_e) \quad , \quad (5)$$

其中 $K_d = AB/2$ 为鉴相增益, $\varphi_e = \theta - \theta_0$ 为瞬时相位误差。

此误差信号会进入到由 PI(Proportional-Integral, 比例积分)控制器和相位增量寄存器构成的数字环路滤波器进行处理^[13]。PI 控制器的表达式为:

$$u[n] = K_p e[n] + K_i \sum_{k=0}^n e[k] \quad , \quad (6)$$

其中,该 PI 控制器的比例环节能够根据相位差做出迅速的实时响应,这一响应特性反映了系统的即时误差,积分环节则可反映系统累积的历史误差^[12]。该 PI 控制器的输出 $u[n]$ 作为数控振荡器(NCO)的频率控制字,可用于实时调节 NCO 的输出频率。该 PI 控制器的输出本质上对应 NCO 的频率变化量,若对该 PI 控制器的输出进行积分运算,即可得到 NCO 信号的相位^[5, 14]。将该相位信号经 CIC 滤波器降采样处理后,即可用于后续的数据分析工作^[14, 19]。

之后,频率控制字进入相位增量寄存器,然后相位累加器对相位进行累加,其更新方程为:

$$\phi[n+1] = \phi[n] + u[n] \quad , \quad (7)$$

并通过查找表将其映射为正弦与余弦波形

$$S_I[n] = B \sin(\phi[n]), S_Q[n] = B \cos(\phi[n]) \quad , \quad (8)$$

从而更新 NCO 的输出, 完成闭环反馈。

3 相位计自动锁定模块的设计及构建

3.1 技术原理与系统架构

本研究提出的相位计自动捕获模块如图 2 所示。其核心思想是在传统 DPLL 相位计基础上,

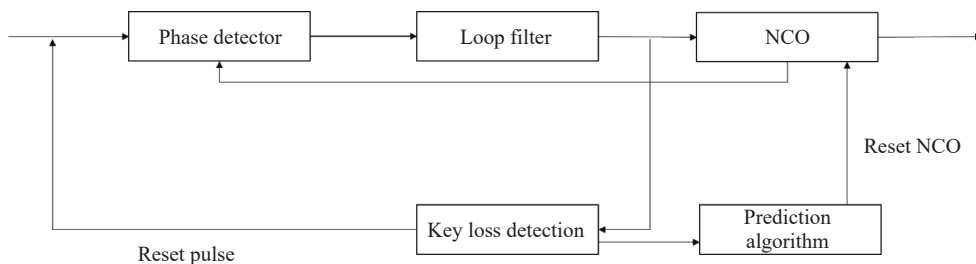


图 2 自动捕获模块架构图

Fig. 2 Architecture diagram of the automatic acquisition module

该失锁检测模块持续监测环路滤波器的输出信号, 以原始数据与 CIC 降采样数据作为判断数据来源, 通过监测瞬时频率值与频率变化率的连续超限状态, 判断系统失锁。系统失锁时, 该模块通过复位清除系统积分误差, 同时接收频率预测算法输出的预测值, 完成频率控制字刷新。频率控制字刷新稳定后, 模块再次检测系统锁定状态, 若系统仍失锁, 则持续执行复位与控制字刷新操作, 直至系统重新锁定。

3.2 失锁检测模块原理

失锁检测是相位计实现自动重锁的前提, 其检测可靠性直接决定了相位计在复杂工作环境下的运行稳定性。为提升失锁检测的准确性与实时性, 本设计采用瞬时频率值和频率变化率两种判断依据, 完成失锁状态的检测工作。

瞬时频率值超出预设阈值为本设计第一项判据的判定依据, 结合本系统相位计等效噪声带宽约 1 kHz 的参数特性^[14], 并参考大量实验观测结果可知, 锁相环路处于正常锁定状态时, 环路滤波器原始数据稳定于系统噪声决定的动态范围之内。若瞬时频率值持续超出预设阈值 TH1, 则表明频率偏差超出锁相环路自身的捕获与跟踪能力, 系统大概率进入失锁状态。设定阈值参数时,

复用现有 FFT 测频模块, 仅为其增加失锁启动功能, 使二者协同工作。FFT 模块作为常驻备用, 负责非规律信号及长时复杂失锁的全局重捕。自动捕获模块则负责所有规律信号的失锁情况(无论短时还是长时)及短时非规律信号的快速重锁。图 2 中, 失锁检测模块持续监控环路状态, 检测到失锁后, 优先接收自动捕获模块的预测值, 实现快速重锁。若信号消失, 或者长时间无法锁定, 则切换为 FFT 模块进行重新捕获。

可直接参考等效噪声带宽数值确定 TH1 的具体取值, 原因在于该数值可准确反映系统锁定状态下可承受的最大频率波动范围。

第二项判据以频率变化率为核心判定依据, 具体为相邻时刻的频率差分绝对值是否超出预设阈值 TH2。瞬时频率未超出预设阈值 TH1 时, 若相邻时刻的频率差分绝对值超过预设阈值 TH2, 说明频率出现剧烈跳变。该类频率跳变在锁相环路稳定锁定状态下较为罕见, 多由突发性强干扰或频率突变引发, 可将其作为环路失锁的早期预警特征, 及时识别环路失锁状态。TH2 的阈值设定过程中, 需遵循统计领域的“ 3σ 原则”, 即该阈值至少应大于由频率漂移最大速率产生的差分值与由系统噪声引发的差分值波动范围的 3 倍标准差之和。这一设定可确保在 99.7% 的置信水平下, 系统的正常频率波动不会触发误报警。在信噪比偏低、噪声幅值较大的应用场景下, 为保障检测算法的稳定性, 可将该阈值适当放宽, 以此降低虚警概率。

本研究采用或逻辑判定失锁状态, 任一判定条件满足且持续一定时长时, 系统生成失锁标志。失锁标志生成后, 该模块同步输出两个控制信号, 其一为全局复位脉冲, 用于清除环路滤波器

中积分器的历史累积误差,其二为预测值接收信号,用于接收预测模块输出的频率预测值。两个控制信号同步触发,分别完成积分误差清除与预

测值接收操作,保障系统失锁后的快速响应能力,为后续锁定恢复奠定基础。

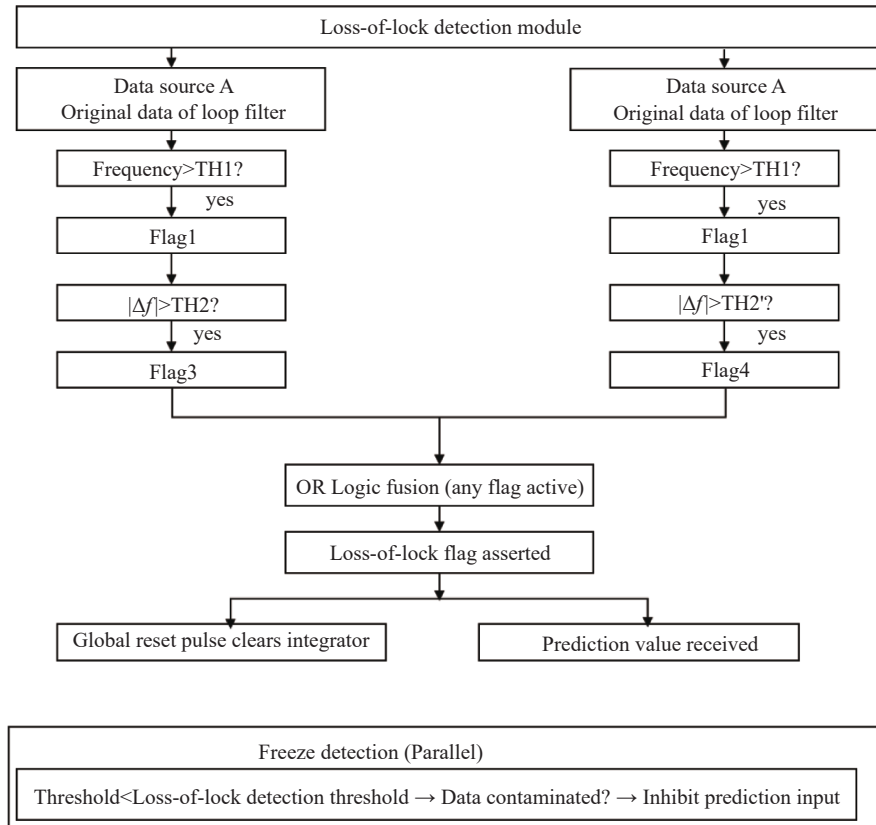


图3 失锁检测模块流程图

Fig. 3 Flowchart of loss-of-lock detection module

模块额外设计冻结功能,该功能可避免预测模块接收异常数据,防止模块生成错误的频率预测值。系统进入失锁状态时,输入信号存在显著异常,需在失锁发生前拦截相关数据,使其无法进入预测模块。冻结检测阈值低于失锁检测阈值,该设置可在失锁发生前屏蔽污染数据输入,确保输入预测模块的数据处于正常状态。

为进一步提升失锁检测的准确度,本研究采用两路数据源协同完成判据计算,该方式可提高检测过程的可靠性。两路数据源分别为原始数据和CIC降采样数据。

为实现快速重锁,在清除失锁状态时仅采用速率更高的环路滤波器原始数据作为判定依据,以此避免CIC降采样数据更新较慢产生的延迟。

3.3 频率预测模块

本设计所提算法依托频率信号特征的收集完成算法选择与频率预测,其核心架构包含参数收

集、信号特征分析、频率预测三个功能模块。参数收集模块的核心功能为提取信号特征参数,信号特征分析模块则对收集到的特征参数开展分析,为后续频率预测模块调用对应预测算法提供依据。频率预测模块基于选定的预测算法生成频率预测值,并结合插值算法实现预测值的高精度、高速率输出。针对工程中的典型应用场景,本研究设计两种预测算法,可满足大多数规律变化信号的失锁恢复需求。

3.3.1 参数收集

环路滤波器直接输出的频率信号存在较大噪声,而参数收集模块仅需获取频率变化的整体趋势,因此本系统复用经CIC降采样处理后的数据作为该模块的信号输入源。CIC数据虽已完成降噪处理,但仍需进一步滤波以提取稳定的特征参数。本文采用五点中值滤波与移动平均滤波两种方法对该信号进行处理,其中五点中值滤波用于

消除尖峰脉冲干扰, 移动平均滤波则用于平滑信号中的残余噪声。一阶差分与二阶差分参数采用相同的处理流程, 仅增大移动平均的窗口尺寸, 以获取更接近真实值的数据。数据的稳定性直接影响信号特征分析模块对预测算法的选择, 同时也决定了多项式拟合模块的预测精度。

模块通过检测滤波后频率信号的斜率符号变化, 定位并记录信号的极小值点与极大值点。信号周期由首个极小值点与下一极小值点之间的时间间隔计算得出。考虑到真实极小值点的数值低于滤波得到的极小值点, 当频率值降至滤波极小值点以下时, 系统即生成相位同步信号, 该信号用于控制周期预测算法从极小值相位开始生成预测波形。

3.3.2 信号特征分析

本模块主要针对滤波后的频率信号, 开展数学特征的提取与分析工作, 为后续预测阶段的算法选择提供可靠依据。该模块的分析工作主要包含两方面内容, 一是对频率信号的周期稳定性进行分析, 二是提取频率信号的一阶差分变化率。

在周期稳定性分析方面, 模块通过极值点检测实现相关分析, 先收集频率信号的斜率变化趋势以确定局部极值点, 再计算相邻极值点的时间间隔作为候选周期。通过分析连续多组候选周期值的一致性与波动幅度, 判断信号的周期稳定性。当周期波动处于设定阈值内时, 判定该信号为周期信号并选用周期信号算法处理, 若超出阈值, 则标记为非周期信号, 选用多项式拟合算法, 该算法可快速有效拟合频率变化, 满足非周期信号的预测需求。

由于本模块的周期信号预测算法包含两种波形查找表, 因此需进一步分析周期信号一阶差分的变化规律。一阶差分的变化规律可直接反映信号的变化特征, 其一阶差分绝对值在周期内保持一致且方差接近零时, 信号呈现匀速变化特征, 频率以固定速率上升或下降, 一阶差分连续渐变且规律波动时, 信号呈现简谐特征, 频率表现为平滑的振荡变化。

本模块最终将分析结果以标志信号形式输出, 为预测模块调用对应预测算法提供依据。该机制可根据信号变化规律选择适配算法, 实现系统对多种频率变化规律的适配。

3.3.3 频率预测算法

本模块可依据信号特征分析模块输出的标志信号, 动态选择适配的预测算法, 并实时或者在信号冻结期间生成频率预测值。本文设计两种核心预测算法, 分别针对含匀速变化、简谐特征的周期信号及非周期信号进行预测。两种算法均采用分阶段计算与线性累加插值相结合的方法, 可在 50 ms 更新周期内实现高精度、平滑的预测输出。

在预测执行阶段, 本模块依据信号特征分析模块输出的标志信号, 动态选择适配的预测算法, 在信号冻结期间生成频率预测值。本文设计两类核心预测算法, 分别适配含匀速变化、简谐特征的周期信号与非周期信号。两类算法均结合分阶段计算与线性累加插值方法, 能在 50 ms 更新周期内输出高精度、平滑的频率预测结果。

对于周期信号, 模块启用周期预测算法。该算法采用相位累加器结构, 结合参数收集模块计算得到的周期, 计算波形的幅度、偏移量与频率调谐字。相位累加器每 50 ms 更新一次, 模块依据标志信号选择对应的波形查找表, 当输入信号为匀速变化特征时调用线性分段波形表, 该表适配频率变化率绝对值恒定的场景, 当输入信号为简谐特征时调用正弦波形表, 该表适配平滑振荡的场景。波形查找表输出归一化波形值后, 经幅度缩放与偏移量调整, 即可得到当前更新点的预测值。为实现更新间隔内的连续输出, 该算法采用插值机制, 模块先计算当前预测值, 再步进相位累加器得到下一更新点的预测值, 随后将两个预测值的差值均匀分配至每次累加过程, 使每 122 个时钟周期增加对应增量, 经累加器线性累加, 以此实现从当前值到下一值的平滑过渡。

针对标记为非周期变化的信号, 本模块将启用多项式预测算法。该算法基于二阶多项式模型, 以冻结时刻的初始频率、速度项(一阶差分)及加速度项(二阶差分)作为预测初始条件。在 50 ms 更新节点处, 算法分别计算当前节点与下一更新节点的预测值, 将二者差值经适当缩放后作为单次累加增量, 由独立累加器在 122 个周期内累加该增量, 形成当前值至下一值的线性插值。

两类算法均采用双状态机架构, 主状态机负责标志信号锁存, 核心计算和模式控制, 独立的累

加器状态机负责 122 周期的计数与累加过程, 确保插值过程可以及时启动与终止。该双状态机架构使系统可依据信号内在规律, 灵活选取适配的预测算法, 在冻结期为系统提供连续, 平滑的频率预测, 且避免预测值产生阶跃跳变, 系统丢失实时观测数据时可提供可靠的频率预测值。此外, 算法在冻结阶段实时输出预测值, 为快速重锁提供支撑。

4 实验结果与讨论

4.1 实验系统设计与构建

本实验的测试硬件环境如图 4 所示。

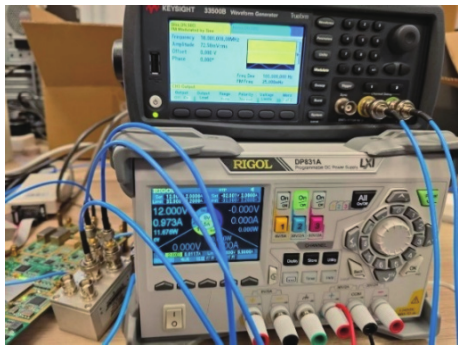


图 4 测试平台连接图

Fig. 4 Test platform connection diagram

高性能信号发生器(Keysight 33500B)被用于分别生成纯净正弦载波与高斯噪声, 经功分器反

向连接实现二者混合, 以此定量控制输入信噪比。待测相位计由可编程线性电源(RIGOL DP831A)供电, 该相位计 ADC(Analog-to-Digital Converter, 模数转换器)输入峰峰值最大值为 2 Vpp。测试前校准信号源输出幅度, 确保混合信号电压处于额定范围, 避免器件损坏。后续实验均基于该系统架构开展。

4.2 信噪比测试

本测试旨在验证算法在真实噪声环境下的稳定性。

通过拔除 BNC(Bayonet Neill-Concelman, BNC 接口 / 卡口式同轴连接器)线缆的方式模拟信号中断, 实现人工失锁。利用信号发生器的 FM(Frequency Modulation, 调频)调制功能, 生成两类典型调制信号——三角波调制与正弦波调制, 频偏设置为 100 Hz, 调制频率为 25 mHz, 对应频率变化速率约为 10 Hz/s。通过独立调节载波与噪声的幅度, 在宽范围内连续改变输入信噪比, 并记录不同信噪比条件下频率估计的精度指标。

图 5 呈现本算法与 FFT 方法在不同信噪比下的频率估计精度对比结果。鉴于 FFT 测频法对各类调制信号的估计性能差异较小, 本实验选取具有代表性的正弦波载波(正弦波内调制)作为测试信号, 为保证对比的合理性, 该测试信号与预测算法所用正弦波调制方式一致, 以此构建对比基准。

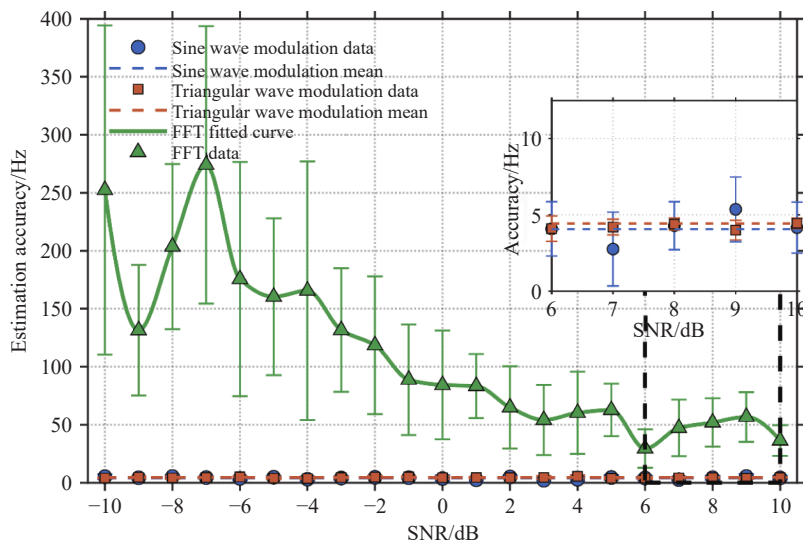


图 5 频率估计误差随信噪比变化散点图

Fig. 5 Scatter plot of frequency estimation error varying with signal-to-noise ratio

由图 5 测试结果可知, 本算法的频率估计误差可控制在 10 Hz 以内, 误差棒幅值较小, 同时具

备较高的估计精度。而 FFT 方法的估计精度显著低于本算法, 对应误差棒幅值更大。

此外, FFT 的估计精度受信噪比变化影响较大, 随信噪比降低而下降, 而本算法的估计精度则能有效适应信噪比恶化场景, 在较低信噪比条件下仍可保持较高的估计精度。该优势源于本算法对信号的多次滤波处理, 本研究先复用 CIC 降采样后的信号, 该信号经滤波后稳定性高, 波动极小, 再通过五点中值滤波器消除脉冲尖峰干扰, 最后利用移动平均滤波器进一步平滑噪声。上述处理措施有效提升了频率估计精度。

4.3 锁定时间测试

重锁速度可体现相位计的快速响应能力。本测试采用 FPGA(Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列)片内高精度计时法完成测量, 系统于失锁标志有效且干扰信号消失时, 即刻启动片内高速计数器进行累加操作。当频率值及其变化率持续低于预设阈值且稳定时长达到 5 ms 时, 判定为重锁成功, 同时终止计数器运行。若重锁稳定阶段再次出现失锁情况, 计数器将持续累加且不执行复位操作, 以保障计时过程的准确性。后续可通过计数值与系统时钟周期, 换算得到对应的重锁时间。

在无噪声的理想正弦波输入条件下, 进行重复测试, 每组实验均记录单次重锁的时间数据。对实验数据进行统计后可知, 系统的平均重锁时间为 32.29 μs , 标准误差为 1.05 μs 。图 6 为其中 10 次的重锁时间数据。

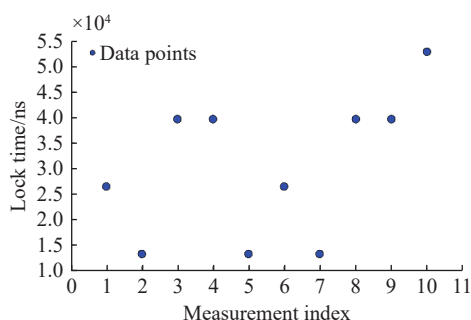


图 6 锁定时间散点图

Fig. 6 Locked time scatter plot

为验证本算法在长时规律信号失锁场景下的重锁能力, 本实验将信号中断时间延长至 10 s。实验结果表明, 失锁时长从百微秒提升至 10 s, 本算法的重锁时间仍稳定在数十微秒量级, 未随失

锁时长增加出现性能劣化。该结果印证了本预测算法的核心优势。针对规律变化信号, 本预测算法可在失锁期间持续外推有效频率轨迹, 重锁速度仅由预测值加载与环路收敛时间决定, 与失锁时长无关联。

作为对照, 传统 FFT 测频方案在信号中断后需重新采集数据并完成频谱运算, 其重启恢复时间典型值达 7.18 ms^[14]。需明确的是, 该对比并非意在证明本算法可全面替代 FFT, FFT 在大范围频率跳变、非规律信号及长时复杂失锁场景下仍具备不可替代的优势。本算法对非规律信号的预测能力存在一定时间限制, 针对变化平缓且时长小于 1 s 的短时非规律信号, 可通过多项式拟合实现有效预测。而当信号出现完全随机跳变, 或失锁时间过长致使预测失效时, 系统仍需依靠 FFT 完成重新捕获。

本次测试明确了两种算法基于信号规律性的分工协同工作模式, 本算法可处理全时长规律信号与短时非规律信号, FFT 则作为非规律信号及长时间复杂失锁场景的后备保障。在规律信号及短时瞬态失锁工况下, 本算法重锁速度较 FFT 方案提升两个数量级, 本算法弥补了 FFT 在快速恢复能力上和精度上的不足, 两种算法协同部署可提升相位计的环境适应能力与任务可靠性。

综合上述测试结果, 本算法在规律信号失锁场景下具备优异的快速重锁能力与稳定的频率估计精度。重锁速度方面, 重复实验的平均重锁时间为 32.29 μs , 标准误差为 1.05 μs , 重锁时间最大值不超过 60 μs , 相较传统 FFT 方案提升两个数量级。本算法重锁速度与失锁时长无关, 即便失锁时长达 10 s, 系统仍可实现数十微秒级的快速恢复。频率估计精度方面, 信噪比处于 -10~10 dB 区间时, 本算法的频率估计误差稳定在 10 Hz 以内, 对信噪比变化不敏感, 而 FFT 方法的估计精度会随信噪比下降显著劣化。该优势源于本算法采用的多级滤波策略。

本算法与 FFT 采用协同部署架构, 可充分发挥二者各自优势。本算法承担规律信号全时长及短时非规律信号的快速重锁任务, FFT 则作为非规律信号及长时复杂失锁场景下的重新捕获方式。二者协同工作, 可提升相位计在空间引力波探测任务中的精度, 响应速度与运行稳定性。

5 结 论

本文提出一种 FFT 与自动锁定 DPLL 协同工作的重锁架构,并完成了该自动锁定 DPLL 的实验验证。本算法依托信号规律性开展预测,可覆盖所有规律变化信号的失锁及短时失锁场景,FFT 模块则作为后备手段,用于应对非规律信号及长时复杂失锁场景下的重新捕获。

实验测试结果表明,规律信号失锁场景下,本算法平均重锁时间为 32 μs ,最大重锁时间不超过 60 μs ,相较传统 FFT 方案(7.18 ms)^[4]提升两个数量级。当失锁时长延长至 10 s 时,本算法重锁速度仍维持在数十微秒量级,该结果印证了重锁速度与失锁时长无关联。信噪比处于-10~10 dB 区间时,本算法的频率估计误差稳定在 10 Hz 以内,且不受信噪比变化影响,即便在-10 dB 低信噪比条件下,仍可保持较高的估计精度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] HU Y M, MEI J W, LUO J. Science prospects for space-borne gravitational-wave missions[J]. *National Science Review*, 2017, 4(5): 683-684.
- [3] CAPRINI C, HEFFERNAN A, BRITO R, *et al.*. Science of the LISA mission: a summary for the European Strategy for Particle Physics[J]. arXiv: 2507.05130, 2025. (查阅网上资料,未能确认文献类型,请确认).
- [4] BARKE S, BRAUSE N, BYKOV I, *et al.*. LISA metrology system-final report[R]. European Space Agency, 2014. (查阅网上资料,未找到出版信息,请确认出版社信息并且补充出版地信息).
- [5] 刘河山. 面向空间引力波探测的激光差分干涉相位计研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
LIU H SH. *Research on laser differential interferometric phasemeter for space gravitational wave detection*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)(查阅网上资料,未找到对应的英文翻译,请确认).
- [6] GONG Y G, LUO J, WANG B. Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(9): 881-889.
- [7] 王娟, 齐克奇, 王少鑫, 等. 面向空间引力波探测的激光干涉技术研究进展及展望[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54(7): 270405.
WANG J, QI K Q, WANG SH X, *et al.*. Advance and prospect in the study of laser interferometry technology for space gravitational wave detection[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2024, 54(7): 270405. (in Chinese).
- [8] 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.
- [9] ZHENG L, YANG SH T, ZHANG X F. Doppler effect in TianQin time-delay interferometry[J]. *Physical Review D*, 2023, 108(2): 022001.
- [10] 刘河山, 王娟, 高瑞弘, 等. 太极二号干涉仪系统噪声与指标分解[J]. 空间科学学报, 2025, 45(4): 1047-1057.
LIU H SH, WANG J, GAO R H, *et al.*. Noise and index decomposition of Taiji-2 interferometer system[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(4): 1047-1057. (in Chinese).
- [11] LUO J, BAI SH J, BAI Y ZH, *et al.*. Progress of the TianQin project[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2025, 42(17): 173001.
- [12] 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.
- [13] GERBERDING O, DIEKMANN C, KULLMANN J, *et al.*. Readout for intersatellite laser interferometry: measuring low frequency phase fluctuations of high-frequency signals with microradian precision[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(7): 074501.
- [14] 张强涛. 面向空间引力波探测的相位计优化研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2023.
ZHANG Q T. *Optimization research of phasemeter for space gravitational wave detection*[D]. Beijing: National Space Science Center, the Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)(查阅网上资料,未找到对应的英文翻译,请确

认).

- [15] 张强涛, 刘河山, 罗子人. 面向空间激光干涉的多通道相位测量系统[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(5): 1089-1099.
ZHANG Q T, LIU H SH, LUO Z R. Multi-channel phase measurement system for the space laser interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1089-1099. (in Chinese).
- [16] ZHANG Q T, LIU H SH, DONG P, *et al.*. Multi-frequency signal acquisition and phase measurement in space gravitational wave detection[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2024, 95(5): 054501.
- [17] SAMBRIDGE C. *Low-power phase tracking in inter-spacecraft laser interferometry*[D]. Canberra: The Australian National University, 2025.
- [18] PIZZELLA A. *LISA optical bench development: experimental investigation of differential-wavefront sensing for a spaceborne gravitational wave detector*[D]. Hannover: Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover, 2025.
- [19] YANG R, LIU H SH, LUO Z R. Optimization design of decimation filter for the phasemeter in the space gravitational wave detection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 7006508.
- [20] YANG R, LUO Z R, LIU H SH. Limitations and improvements in low-frequency performance of phasemeter for space gravitational wave detection[J]. *Measurement*, 2026, 260: 119825.
- [21] LIANG Y R. Note: a new method for directly reducing the sampling jitter noise of the digital phasemeter[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(3): 036106.
- [22] MING M, ZHANG J Y, DUAN H Z, *et al.*. Study on TPD phasemeter to suppress low-frequency amplitude fluctuation and improve fast-acquiring range for GW detection[J]. *Sensors*, 2024, 24(11): 3434.
- [23] FAN ZH, LI ZH, HUANG X Q, *et al.*. Phasemeter based on second harmonic signal filter for space-based gravitational wave detection[J]. *Chinese Physics B*, 2026, 35(1): 010601.
- [24] LI H J, QI H X, PAN M ZH, *et al.*. Automatic amplitude control for phasemeter of spaceborne laser interferometry[J]. *AIP Advances*, 2023, 13(3): 035206.
- [25] 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).
- [26] 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).
- [27] 范习谦, 刘河山, 罗子人, 等. 基于 MHz 深度频率调制激光干涉的相位测量技术[J]. 中国光学(中英文), 2025, 18(3): 622-630.
FAN X Q, LIU H SH, LUO Z R, *et al.*. Phase measurement technique based on MHz-lever depth frequency modulated laser interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 622-630. (in Chinese).
- [28] 张子恒, 范习谦, 靳刚, 等. 太极计划激光链路辅助功能方案设计及验证[J]. 中国激光, 2025, 52(11): 1106001.
ZHANG Z H, FAN X Q, JIN G, *et al.*. Design and verification of a laser link auxiliary function scheme for the Taiji Program[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(11): 1106001. (in Chinese).
- [29] HUANG X Q, WANG G F, YANG M L, *et al.*. Study on picometer-level laser interferometer readout system in TianQin project[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 161: 109185.
- [30] YAMAMOTO K, TOMIO H, ZEHNDER C, *et al.*. Alternative approach to time-delay interferometry with an optical frequency comb[J]. *Physical Review Applied*, 2026, doi: [10.1103/9cdp-rh4j](https://doi.org/10.1103/9cdp-rh4j).

作者简介:

王新宇(2000—), 男, 辽宁葫芦岛人, 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:wangxinyu231@mails.ucas.ac.cn

刘河山(1988—), 男, 安徽阜阳人, 博士, 副研究员。2015年毕业于中国科学院大学, 获博士学位。主要研究方向为激光干涉测距、高精度相位测量、精密指向控制、激光锁相等。E-mail:liuheshan@imech.ac.cn