中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

太极计划中的不等臂干涉稳频方案设计及实验验证

王绪 高雪荣 李磐 齐克奇 刘河山

Design and experimental verification of unequal-arm interferometric frequency stabilization scheme in taiji program

WANG Xu, GAO Xue-rong, LI Pan, QI Ke-qi, LIU He-shan

引用本文:
王绪, 高雪荣, 李磐, 齐克奇, 刘河山. 太极计划中的不等臂干涉稳频方案设计及实验验证[J]. 中国光学, 2026, 19(4): 887−894. doi: 10.37188/CO.2026−0029
WANG Xu, GAO Xue-rong, LI Pan, QI Ke-qi, LIU He-shan. Design and experimental verification of unequal-arm interferometric frequency stabilization scheme in taiji program[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(4): 887-894. doi: 10.37188/CO.2026-0029

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2026−0029

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于FPGA的PDH激光稳频数字化实现
Digital implementation of PDH laser frequency stabilization system based on FPGA
中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 557 https://doi.org/10.37188/CO.2024−0080

基于MHz深度频率调制激光干涉的相位测量技术
Phase measurement technique based on MHz−lever depth frequency modulated laser interferometry
中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 622 https://doi.org/10.37188/CO.2024−0157

引力波探测中激光干涉量子噪声计算
Calculation of laser interferometric quantum noise in gravitational wave detection
中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 698 https://doi.org/10.37188/CO.2024−0180

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

太极计划时钟噪声传递的地面原理验证
Ground−based principle verification of clock noise transfer for the Taiji program
中国光学（中英文）. 2023, 16(6): 1394 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0012

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

文章编号 2097-1842(2026)04-0887-08

太极计划中的不等臂干涉稳频方案设计及实验验证

王 绪[1,2,3], 高雪荣[3], 李 磐[3], 齐克奇[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: 激光频率噪声是空间引力波探测系统的最大噪声源, 拟采用 PDH (Pound-Drever-Hall) 锁腔预稳、锁臂和时间延迟干涉的方法学可进行逐级压制。但随着皮米测量的发展, 利用空间光不等臂干涉稳频, 特别是可以有效利用现有空间激光干涉仪, 无需额外超稳载体, 是目前替代 PDH 锁腔预稳较为热门的方案。本文在太极计划第一代干涉仪光学平台的基础上, 验证了利用现有干涉光路进行不等臂干涉仪稳频的有效性。实验结果显示, 自由运行激光器频率噪声整体降低约一个量级, 1 Hz 处提升至 3 KHz/Hz$^{1/2}$。通过噪声分析可以发现, 在 0.2 Hz~1 Hz 频段, 主要限制因素是干涉仪的背景噪声; 在 0.1 Hz~1 mHz 频段内, 主要为自由运行激光器的功率噪声。未来将进一步降低干涉仪噪声至 1 pm/Hz$^{1/2}$, 探索利用已有干涉光路稳频替代 PDH 锁腔方案的可能性。

关 键 词: 激光干涉; 不等臂干涉; 激光稳频; PID 控制
中图分类号: O436 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2026-0029 **CSTR:** 32171.14.CO.2026-0029

Design and experimental verification of unequal-arm interferometric frequency stabilization scheme in taiji program

WANG Xu[1,2,3], GAO Xue-rong[3], LI Pan[3], QI Ke-qi[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: Laser frequency noise is the dominant noise source in space-based gravitational wave detection systems, which can be reduced by a multi-stage suppression approach employing PDH (Pound-Drever-Hall) cavity-locking pre-stabilization, arm-locking, and time-delay interferometry. However, with the advancement of picometer-level measurement, unequal-arm interferometric frequency stabilization using free-space laser links has emerged as a popular alternative to the PDH cavity-locking pre-stabilization scheme. This ap-

收稿日期: 2026-03-04; **修订日期:** 2026-03-24
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)

proach can effectively utilize existing space laser interferometers without requiring additional ultra-stable reference cavities. Based on the first-generation interferometric optical platform of the Taiji program, this paper verifies the feasibility and effectiveness of an unequal-arm interferometer frequency stabilization scheme using the existing interferometric optical path. Experimental results show that the free-running laser frequency noise is reduced by approximately one order of magnitude overall, reaching 3 kHz/Hz$^{1/2}$ at 1 Hz. Noise analysis reveals that in the 0.2 Hz–1 Hz band, the main limiting factor is the background noise of the interferometer; in the 0.1 Hz–1 mHz band, the dominant noise source is the power noise of the free-running laser. Future work will focus on further reducing the interferometer noise to 1 pm/Hz$^{1/2}$ and exploring the feasibility of replacing the PDH cavity-locking scheme with frequency stabilization using the existing interferometric optical path.

Key words: laser interferometry; unequal-arm interferometer; laser frequency stabilization; PID control

1 引 言

太极计划是中国科学院提出的空间引力波探测任务，由三颗卫星组成的等边三角形星座构成，臂长三百万公里。该任务采用激光差分干涉的方法对卫星间的皮米级位移进行测量，要求测量精度优于 1 pm/Hz$^{1/2}$，目标频段为 0.1 mHz~1 Hz[1, 2]。已经提出的探测任务还包括我国中山大学提出的天琴计划[3-4]，以及欧洲 LISA(Laser Interferometer Space Antenna) 计划[5]。不同任务的臂长及轨道略有不同，但激光干涉测量系统的基本架构相同。受轨道运动影响，太极计划卫星间干涉臂长差变化较大，最高可达臂长的 1%。由此导致的激光频率噪声是空间引力波探测的第一大噪声源[6-7]。

为抑制激光频率噪声，目前采用三级压制的方式[6]：(1)频率预稳定。即将自由运行激光锁定至更稳定的参考源上，主要包括 PDH (Pound-Drever-Hall) 锁腔、原子分子跃迁谱线及不等臂干涉。预稳后频率稳定性需满足 30 Hz/Hz$^{1/2}$ 要求。(2)锁臂。将预稳激光锁定至更稳定的轨道臂长上，频率波动进一步可达 10^{-4} Hz/Hz$^{1/2}$。(3)时间延迟干涉 (Time Delay Interferometry, TDI)。通过后数据处理，构造形式上的等臂干涉仪，满足太极计划 10^{-6} Hz/Hz$^{1/2}$ 需求。

为适应空间引力波探测的需求，在预稳技术中，腔稳目前发展最为成熟，以法布里-珀罗腔(Fabry-Perot Cavity, F-P 腔)作为参考标准实现稳频，可获得较高的频率稳定度与窄线宽，频率不稳定度可达$10^{-16}@1s$[8-9]。现阶段，针对 F-P 腔稳频技术的研究主要是针对腔的性能进行改进，对腔的结构、参数等进行优化。然而，用作频率参考的高精细度、低噪声谐振腔通常体积较大，且对运行环境高度敏感，对隔振、温控与真空等条件提出苛刻要求，难以实现小型化、低成本化与高集成度[10-11]。以原子/分子跃迁谱线中心频率为基准的光谱参考稳频技术经过了长时间的发展，主流技术包含饱和吸收光谱稳频技术、调制转移光谱稳频技术等。但该方法的适用频率范围相对有限，频率不稳定度水平也较难达到腔稳频方案的量级，通常只能针对特定波长的激光实现稳频。针对空间引力波探测常用的 1 064 nm 激光，在许多原子/分子介质中的吸收较弱，为获得足够的鉴频信号信噪比，通常需要增加吸收程，进而使装置体积增大，不利于系统的小型化与集成化[12-13]。不等臂干涉仪稳频方法则是利用不等臂干涉仪进行频率稳定。目前不等臂稳频主要是以光纤不等臂干涉为主，采用 km 级光纤形成不等臂干涉仪。现阶段，国内外均有在 1 mHz~1 Hz 频段内，部分频段达到空间引力波探测要求的报道，但总体指标不如腔稳。究其原因，因光纤的抗环境干扰能力较差，需辅以 nK 级的温控和苛刻的振动隔离措施，才能达到较高的稳定度[14, 15]。

为进一步降低星上资源消耗，提高可靠性，探索更适合空间引力波探测的备选稳频方案是目前重点研究方向。近年来，由于 LISA 任务的推进，特别是 pm 激光干涉能力的提升，利用较短的空间光干涉光路进行稳频的技术已经开始报道[16]。相较于 F-P 腔，其误差信号较易获得，不需调整激光器中心频率，理论上适用于任意波长。LISA 团队选用基底材料和 F-P 腔相同的 ULE (ultra-low

expansion) 材料, 并采用光粘技术粘接熔融石英镜片, 使干涉仪抗环境干扰能力得到大幅提升。目前在 10 cm 不等臂的光路上已实现激光频率噪声在 1 Hz 处低于 100 Hz/Hz$^{1/2}$[17-18]。近年来, 空间光不等臂稳频正向着小型化、非真空方向发展, 具备较好的应用前景[18-19]。同时, 空间光不等臂干涉稳频能够利用空间引力波探测任务中已有的自由空间光路, 无需额外设置独立的稳频模块, 具有更高的系统集成度和工程兼容性, LISA 探路者任务中已成功进行相关研究[20-21]。近年来, 国内太极和天琴计划虽在干涉系统方面进步显著, 如干涉测量[22-25]、相位计[26-29]、弱光锁相[30, 31]、通信测距[32-34] 等, 但尚缺乏针对现有干涉系统验证不等臂稳频的可行性与实际性能的系统研究。

本文利用已有的太极计划干涉仪平台, 探索利用现有干涉仪进行空间光不等臂稳频的验证, 为未来太极计划的稳频提供备选方案。具体章节安排如下: 第二部分介绍太极计划第一代干涉仪光学平台及利用其进行不等臂干涉稳频的基本原理; 第三部分详细介绍不等臂干涉稳频实验系统设计与构建; 第四部分将对现阶段的稳频结果进行讨论, 并给出现阶段的主要限制因素。

2　太极计划干涉仪光学平台及激光频率噪声

图 1 所示为太极计划第一代干涉仪光学平台光路图, 包含三个干涉测量光路, 即参考干涉仪、测试质量(Test Mass, TM)干涉仪和科学干涉仪, 还有三路辅助光路, 即激光捕获、超前指向、Backlink 光路。本文主要关注参考干涉仪和 TM 干涉仪, 如图 1(彩图见期刊电子版)中红色和蓝色光线所示, 其余功能详细可参考文献 [25]。

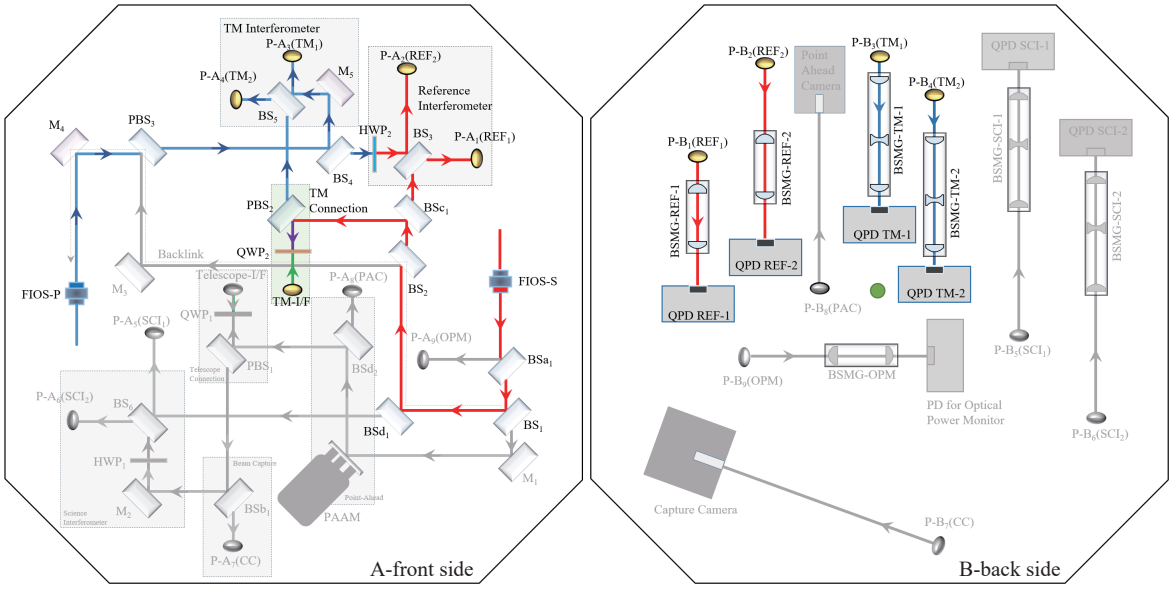

图 1　干涉仪光学平台光路设计图。左: 正面; 右: 背面

Fig. 1　Optical path design of interference optical bench. Left: Front side; Right: Back side

M: mirror; BS: beam splitter (R/T: 50/50); BSa: beam splitter (10/90); BSb: beam splitter (90/10); BSc: beam splitter (1/99); BSd: beam splitter (99/1); PBS: polarizing beam splitter, FIOS:fibre injector optical subassembly; P-A: periscope in side A; P-B: periscope in side B; HWP: half waveplate; QWP: quarter wave plate; Telescope-I/F: telescope interface; TM-I/F: test mass interface; PAAM: point ahead angle mechanism; BSMG: beam shrinking mirror group; QPD: quadrant photodiode

从图 1 中可以看出, 参考干涉仪由左右准直器蓝色和红色光线直接在正面经不同元件引导干涉形成。TM 干涉仪由红色光线经垂直反射至背面, 打到测试质量上(本文测试质量由贴于背面的反射镜代替), 原路反射回正面与蓝色光线干涉形成。经测量, 参考干涉仪和 TM 干涉仪不等臂约为 365.67 mm。

为简化公式推导, 假设到达参考干涉仪及 TM 干涉仪两激光束的功率相同, 记为 P_1 和 P_2。参考、TM 干涉仪经光电转换器转换为电压信号

后，表达式如下：

$$S_{\mathrm{ref}} \propto \sqrt{P_1 P_2}\cos(2\pi(f_{\mathrm{het}}t+\delta f\cdot\Delta t_{\mathrm{ref}})+\varphi_{\mathrm{ref}})$$
$$S_{\mathrm{TM}} \propto \sqrt{P_1 P_2}\cos(2\pi(f_{\mathrm{het}}t+\delta f\cdot\Delta t_{\mathrm{TM}})+\varphi_{\mathrm{TM}}) \quad , \tag{1}$$

其中 f_{het} 为外差频率，δf 为激光频率抖动，Δt_{ref} 和 Δt_{TM} 为各自干涉仪干涉前两束激光束传输臂长时间差，φ_{ref} 和 φ_{TM} 为两个干涉仪的其余相位之和。本节主要讨论激光频率噪声，因此 φ_{ref} 和 φ_{TM} 视为常数。

从式(1)可以看出，忽略其余噪声的情况下，当干涉仪的两干涉激光束存在臂长差时，激光频率噪声 $2\pi\delta f\cdot\Delta t$ 成为主导。但实际中，两干涉仪总会存在其余噪声，如光程噪声、光电探测器噪声、时钟噪声等。因此，实际测量中，往往利用两个干涉仪的共模噪声抑制后的结果作为测量结果。此时，激光频率噪声记为，

$$\phi_f = 2\pi\cdot\delta f\cdot(\Delta t_{\mathrm{ref}}-\Delta t_{\mathrm{TM}}) \quad . \tag{2}$$

由于两干涉仪共用前端光路，因此不等臂部分均在干涉仪光学平台内，即 365.67 mm。激光频率噪声写为位移形式如下，

$$\delta l = \frac{\delta f}{f_0}\Delta L \quad , \tag{3}$$

其中，f_0 为激光的平均频率，δf 为激光频率波动，ΔL 为干涉仪间臂长差。可以看出激光频率噪声正比于激光频率波动和臂长差，在臂长差确定的情况下，激光频率噪声和频率波动仅差一个系数。因此，在干涉仪噪声较小的情况下，可作为频率稳定基准。本文中 ΔL=365.67 mm，f_0=281 THz。

太极计划第一代光学平台实物如图 2(彩图见期刊电子版)所示。

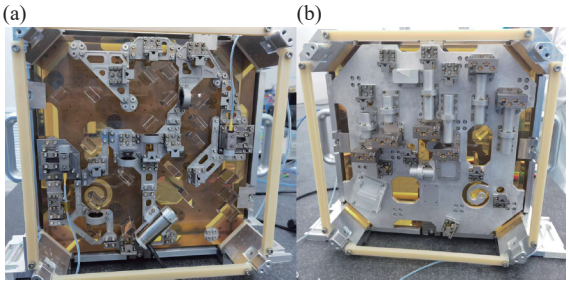

图 2 太极计划第一代干涉仪光学平台实物照片。(a)正面；(b)背面

Fig. 2 Physical photo of the first-generation interferometer optical bench of the Taiji program. (a) Front side; (b) back side

3 实验系统构建

为减少干涉仪的光程噪声，干涉仪光学平台置于真空罐内，实验系统结构框图如图 3 所示。

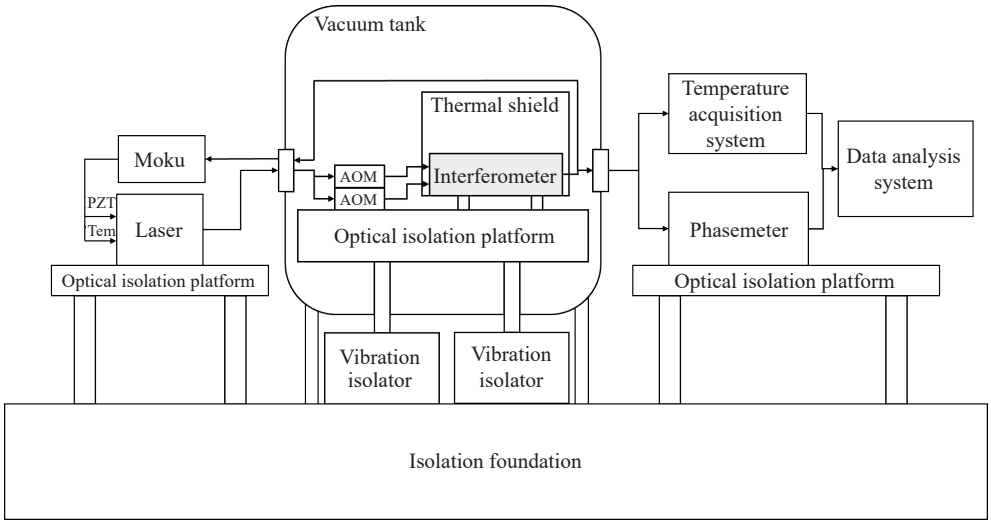

图 3 实验系统结构框图

Fig. 3 Structural diagram of experimental system

为隔绝外界振动，干涉仪放置于隔振光学平台上，同时采用隔热罩进行被动温控。为减少真空泵自身的振动对测量的影响，采用机械泵抽真空至 1 Pa，关闭泵组维持真空。真空腔内光学平台与外界经过独立隔振地基及隔振器隔离外界振动影响。激光器发出的激光经光纤、法兰引入真

空腔内部, 经分束器、声光移频器(Acousto-Optic Modulator, AOM)产生两束差频激光束(2 MHz)。两束光分别经光纤准直器转为空间光进入光学平台, 形成干涉, 并经各自光电探测器转为电压信号。后经射频线缆、法兰导入真空腔外部送入控制器输入端, 控制器输出端口分别连接激光器温度端及 PZT 进行频率控制。

系统选用波长为 1064 nm 的 Coherent Mephisto 500FC 激光器作为种子光源, 控制器为 Liquid Instruments 公司的 Moku pro。实验系统实物如图 4 所示。

图 4　实验系统实物图。(a)干涉仪光学平台; (b)自由运行激光器; (c)相位计(上)及控制器 Moku pro(下); (d)超稳激光器

Fig. 4　Experimental setup photograph. (a) Interferometer optical bench; (b) free-running laser; (c) phasemeter (top) and Moku Pro controller (bottom); (d) ultra-stable laser

参考干涉仪和 TM 干涉仪信号分别通入 Moku pro 的 1、2 输入端口, 输出端口 1、2 分别连接激光器 PZT 及温控端口。Moku pro 及控制部分框图如图 5 所示。

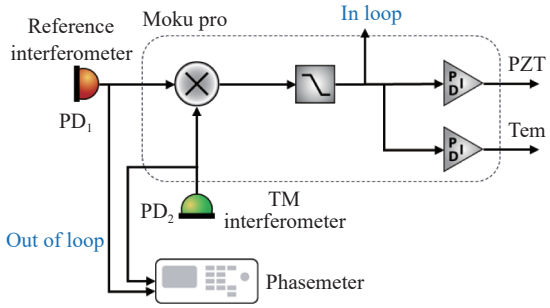

图 5　控制部分框图

Fig. 5　Block diagram of the control section

4　结果与讨论

不等臂干涉稳频实验的典型结果如图 6(彩图见期刊电子版)所示。

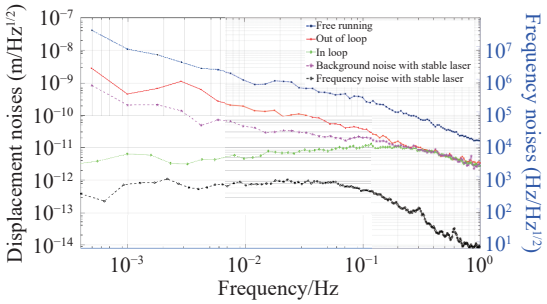

图 6　不等臂干涉稳频实验典型结果, 图中左轴是位移量纲, 右轴是频率量纲

Fig. 6　Typical experimental results of unequal-arm interferometric frequency stabilization. The left axis is in units of displacement, while the right axis corresponds to frequency units

从图 6 可以看出, 自由运行的激光器本底噪声较高, 1 Hz 处为 20 pm/Hz$^{1/2}$, 0.1 Hz 处为 300 pm/Hz$^{1/2}$, 0.01 Hz 处为 1 nm/Hz$^{1/2}$, 1 mHz 处为 10 nm/Hz$^{1/2}$。由前面的讨论可知, 只有当前不等臂干涉仪的主要噪声是激光频率噪声时, 才能进行有效的稳频反馈。因此, 将超稳激光器(Stable laser systems, SLS-INT-1064-200-1)通入干涉仪, 系统噪声及超稳激光器自身频率噪声分别如图 6 中粉红色及黑色曲线所示。通过对比超稳激光器和自由运行激光器下的干涉系统噪声, 说明当频率稳定度提升时, 干涉仪噪声本底得到了大幅度的提升, 1 Hz 处提升约一个量级至 3 pm/Hz$^{1/2}$, 0.1 Hz 提升至 20 pm/Hz$^{1/2}$, 0.01 Hz 为 40 pm/Hz$^{1/2}$, 1 mHz 为 200 pm/Hz$^{1/2}$。因此, 可以判定当前主要噪声为自由运行激光器的激光频率噪声。进而通过控制器分别控制温度端和 PZT 端, 环内和环外如图 6 绿线和红线所示。对比控制前后的噪声曲线, 可以看出干涉仪噪声本底提升约一个量级, 1 Hz 处提升至 3 pm/Hz$^{1/2}$, 0.1 Hz 处约为 4 pm/Hz$^{1/2}$, 0.01 Hz 处约为 200 pm/Hz$^{1/2}$, 1 mHz 处约 600 pm/Hz$^{1/2}$。

对比超稳激光器的系统噪声曲线, 可以看出, 在 0.2~1 Hz 频段, 主要限制因素是干涉仪的背景噪声。但在 0.1~1 mHz 频段内, 并未达到超稳激光器水平。究其原因, 可以发现, 限制目前噪声水平的主要因素是激光器的功率稳定性。通过图 5

可知，控制器通过参考干涉仪和 TM 干涉仪的电压混频滤波作为鉴相信号进行反馈，误差信号表达式如下：

$$\sigma_e \propto P_1 P_2 \cos(2\pi \cdot \delta f \cdot (\Delta t_{ref} - \Delta t_{TM}) + (\varphi_{ref} - \varphi_{TM})) \,. \tag{4}$$

当控制器工作在 0 点附近时，误差信号正比于 δf。但当激光功率发生变化时，误差信号会出现明显波动，控制器会将其误判为频率波动。超稳激光器及普通激光器的相对功率噪声（Relative Intensity Noise, RIN）如图 7（彩图见期刊电子版）所示。

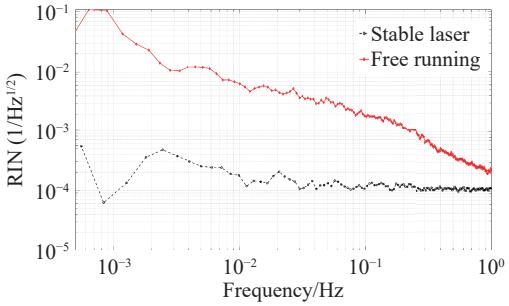

图 7 自由运行激光器和超稳激光器相对功率噪声对比

Fig. 7 Comparison of relative power noise between a free-running laser and an ultra-stable laser

从图 7 中可以看出，超稳激光器内部进行了功率反馈控制，其功率稳定性相对于自由运行激光器有着 1~2 个量级提升。因此，限制当前系统主要噪声是自由运行激光器的功率噪声。

图 6 右轴给出了曲线对应的频率噪声。对比控制前后，可以看出，1 Hz 处从 20 kHz/Hz$^{1/2}$ 提升至 3 kHz/Hz$^{1/2}$，提升约一个量级。对比超稳激光器可以发现，即使采用超稳激光，干涉仪噪声远未达到超稳激光的频率噪声极限。在之前的研究中，已经明确指出，超稳激光器条件下，限制的主要因素是 TTL(tilt to length) 噪声和温度噪声[25]。虽然可以通过后数据处理进行抑制，但反馈控制系统作为时域的实时反馈，暂无法通过控制算法降低系统噪声。

综上所述，通过太极计划第一代干涉仪光学平台验证了采用现有干涉仪进行不等臂干涉稳频方案的有效性。控制前后，频率噪声整体压低约一个量级，频率稳定度在 1 Hz 处提升至 3 kHz/Hz$^{1/2}$。主要限制因素，1 Hz 处为干涉仪本底噪声，其余频段为自由运行激光器的功率噪声。

5 结 论

随着皮米干涉技术的发展，利用空间光不等臂干涉稳频成为激光器稳频领域的热门方案之一。特别是空间引力波探测领域，可利用现有空间激光干涉仪，无需额外超稳载体，极大降低了空间资源消耗。太极计划第一代全功能干涉仪包括三路测量光路和三路辅助功能光路，采用 ULE 光学平台基底和熔融石英光学镜片，采用光粘技术连接，具备皮米级稳定性。参考干涉仪和测试质量干涉仪的不等臂量为 365.67 mm，提供了性能较好的频率传感干涉仪。本文在太极计划第一代干涉仪光学平台的基础上，验证了利用现有光路进行不等臂干涉仪稳频的有效性。通过对自由运行激光器的稳频，整体提升约一个量级，1 Hz 处提升至 3 kHz/Hz$^{1/2}$。通过噪声分析可知，在 0.2~1 Hz 频段，主要限制因素是干涉仪的背景噪声。在 0.1~1 mHz 频段内，主要为自由运行激光器的功率噪声。

未来将从以下两个方面提升频率稳定性：(1)发展第二代太极计划干涉仪光学平台，提升现有干涉仪噪声水平至 1 pm/Hz$^{1/2}$。现有光学平台 TTL 噪声主要来源为商用 FIOS，稳定性较差，第二代平台采用自研全玻璃超稳 FIOS，将极大降低干涉仪噪声。(2)自由运行激光器在进入干涉仪前，进行功率稳定反馈，提升功率稳定性。若干涉仪背景噪声达到 1 pm，则自由运行激光器频率稳定性通过反馈后，预期将达到现有超稳激光器水平，将极大地提升应用价值及太极计划干涉仪系统的载荷集成度。

参考文献：

[1] 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.

[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] 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.

[4] LUO J, BAI SH J, BAI Y ZH, *et al*.. Progress of the TianQin project[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2025, 42(17): 173001.

[5] The LISA Pathfinder Team, The eLISA Consortium. LISA and its pathfinder[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(8): 613-615.

[6] 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).

[7] 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).

[8] FAN X, FAYER S E, MYERS T G, *et al*.. Switchable damping for a one-particle oscillator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(2): 023201.

[9] LI Y Q, LUO Y, LAI J T, *et al*.. An advanced digital controller with automatic design for laser frequency stabilization in space[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2025, 96(8): 084502.

[10] 骆颖欣. 星载激光稳频原理演示系统的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
LUO Y X. *Establishment of a preliminary prototype of the spaceborne laser-frequency-stabilization system*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese).

[11] 彭建康. 星载全固态 Nd: YAG 单块非平面环形腔激光及稳频用参考腔的研制[D]. 武汉: 中国科学院大学 (中国科学院精密测量科学与技术创新研究院), 2025.
PENG J K. *Development of a spaceborne all-solid-state Nd: YAG nonplanar-ring-oscillator laser and the reference cavity for frequency stabilization*[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences, 2025. (in Chinese).

[12] 程飞虎. 用于长度标准的 532 nm 碘分子频率标准的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
CHENG F H. *Study of a 532-nm molecular-iodine frequency standard as a length standard*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2021. (in Chinese).

[13] 支允琳. 碘分子激光稳频及其中剩余幅度调制的研究[D]. 武汉: 中国科学院大学 (中国科学院精密测量科学与技术创新研究院), 2022.
ZHI Y L. *Laser frequency stabilization with iodine molecules and investiagation on residual amplitude modulation*[D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese).

[14] 董靖. 超低噪声光纤干涉仪稳频激光器实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
DONG J. *Experimental research on ultra-low noise fiber interferometer stabilized laser*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese).

[15] SHI B, EDREIRA I B, DING M, *et al*.. Laser stabilized to a fiber interferometer with close-to-zero temperature sensitivity[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2026, 20(8): e02000.

[16] GERBERDING O, ISLEIF K S, MEHMET M, *et al*.. Laser-frequency stabilization via a quasimonolithic mach-zehnder interferometer with arms of unequal length and balanced dc readout[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 7(2): 024027.

[17] HUARCAYA V, ÁLVAREZ M D, PENKERT D, *et al*.. 2×10^{-13} fractional laser-frequency stability with a 7-cm unequal-arm mach-zehnder interferometer[J]. *Physical Review Applied*, 2023, 20(2): 024078.

[18] DI FRONZO C, HOLLAND N A, MITCHELL A L, *et al*.. Laser frequency stabilization with the use of homodyne quadrature interferometers[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2024, 41(6): 065010.

[19] HUARCAYA V, DOVALE ÁLVAREZ M, YAMAMOTO K, *et al*.. Single-element dual-interferometer for precision inertial sensing: sub-picometer structural stability and performance as a reference for laser frequency stabilization[J]. *Sensors*, 2023, 23(24): 9758.

[20] 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.

[21] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, *et al*.. Sensor noise in *LISA Pathfinder*: an extensive in-flight review of the

angular and longitudinal interferometric measurement system[J]. *Physical Review D*, 2022, 106(8): 082001.

[22] WANG J, QI K Q, LIU H SH, *et al*.. An integrated fiber phase modulation device for optical path noise suppression[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2026, 43(1): 015001.

[23] CAO B, JIA F L, YANG M L, *et al*.. Suppression of frequency-mixing effect for pm-level heterodyne interferometers based on “zero coupling” optical path length control[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(12): 3300-3303.

[24] 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)

[25] LIU H SH, WANG J, TAO W, *et al*.. Recent development of the laser interferometer for Taiji Space gravitational wave detection[J]. *Research*, 2026, 9: 1252.

[26] FENG Y J, JIANG Y Z, CHEN L Y, *et al*.. Influence mechanism of truncation on low-frequency phase measurement[J]. *Measurement*, 2026, 259: 119594.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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).

[30] 王晨, 高雪荣, 齐克奇, 等. 太极计划的弱光锁相地面实验验证及噪声分析[J]. 中国激光, 2025, 52(11): 1101004.
WANG CH, GAO X R, QI K Q, *et al*.. Weak-light phase-locked ground-based experimental validation and noise analysis of the Taiji Program[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, 52(11): 1101004. (in Chinese).

[31] LIANG Y R, FENG Y J, XIAO G Y, *et al*.. Experimental scheme and noise analysis of weak-light phase locked loop for large-scale intersatellite laser interferometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(12): 124501.

[32] 陈沛权, 邓汝杰, 张艺斌, 等. 太极计划星间激光通信测距的伪随机码选取[J]. 中国光学 (中英文), 2025, 18(3): 547-556.
CHEN P Q, DENG R J, ZHANG Y B, *et al*.. Pseudo-random code selection for inter-satellite laser ranging and data communication in the Taiji program[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 547-556. (in Chinese).

[33] LIANG H Q, YI ZH X, LING H L, *et al*.. Modeling and simulation of inter-satellite laser communication for space-based gravitational wave detection[J]. *Sensors*, 2025, 25(4): 1068.

[34] 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).

作者简介：

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