0254-6124/2025/45(4)-1047-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Heshan, WANG Juan, GAO Ruihong, QI Keqi, WANG Shaoxin, LI Pan, GAO Xuerong, LUO Ziren. Noise and Index Decomposition of Taiji-2 Interferometer System (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(4): 1047–1057. CSTR:32142.14.cjss.2025–yg02. DOI:10.11728/cjss2025.04.2025–yg02

太极二号干涉仪系统噪声与指标分解*

刘河山[1] 王 娟[1] 高瑞弘[1] 齐克奇[1]
王少鑫[1] 李 磐[1] 高雪荣[1] 罗子人[1,2]

1(中国科学院力学研究所 微重力重点实验室 北京 100190)

2(国科大杭州高等研究院基础物理与数学科学学院 杭州 310024)

摘 要 空间引力波探测太极计划是中国科学院发起的 mHz 频段引力波探测任务, 由围绕太阳旋转的三颗卫星组成等边三角形, 星间距 3×10^6 km, 通过激光差分干涉方法实现卫星间 pm 级位移波动测量. 作为太极计划“三步走”战略的承上启下的关键环节, 太极二号将全面验证太极计划的各项关键技术. 太极二号卫星构型与太极三号相同, 激光干涉系统作为核心测量手段, 需达到 30 pm·Hz$^{-1/2}$ 的噪声水平. 本文从顶层指标出发, 逐步分解各子系统噪声指标及关键参数, 包括激光器、干涉仪光学平台、相位计、望远镜、呼吸角补偿机构等. 研究结果可为太极二号后续工程任务的指标划分奠定理论基础.

关键词 空间引力波探测, 激光干涉系统, 噪声分解, 干涉仪光学平台

中图分类号 O439, V447

Noise and Index Decomposition of Taiji-2 Interferometer System

LIU Heshan[1] WANG Juan[1] GAO Ruihong[1] QI Keqi[1]
WANG Shaoxin[1] LI Pan[1] GAO Xuerong[1] LUO Ziren[1,2]

1(*Key Laboratory of Microgravity*, *Institute of Mechanics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

2(*School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences*, *Hangzhou Institute for Advanced Study*, *UCAS*, *Hangzhou* 310024)

Abstract The Taiji program for space-based gravitational wave detection is a mission initiated by the Chinese Academy of Sciences to explore gravitational waves in the mHz frequency band. It consists of three satellites orbiting the Sun in an equilateral triangle formation with an arm length of 3×10^6 km, employing laser interferometry to measure picometer-level displacement fluctuations between satellites. As a pivotal link in Taiji's “three-step” development strategy, Taiji-2 will comprehensively validate all key technologies of the program. The satellite configuration of the Taiji-2 satellite shares the same configuration as Taiji-3, with its laser interferometry system requiring a noise level of 30 pm·Hz$^{-1/2}$ as the core

* 国家重点研发计划项目资助 (2021YFC2202902, 2020YFC2200100)

2025-03-25 收到原稿, 2025-06-03 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

measurement technique. This paper systematically decomposes the top-level requirements into subsystem noise budgets and key parameters, including the laser system, interferometer optical bench, phasemeter, telescope, and breathing angle compensation mechanism. The research findings establish a theoretical foundation for subsequent engineering task allocation in the Taiji-2 mission.

Key words Space gravitational waves detection, Laser interferometer system, Noise decomposition, Optical bench

0 引言

太极计划是中国科学院于 2008 年发起的空间引力波探测任务, 拟通过发射三颗日心轨道卫星组成等边三角形的星座, 实现低频 (0.1 mHz～1 Hz) 引力波的探测[1]. 拟采用激光差分干涉的方法学, 将相距 3×10^6 km 测试质量间的皮米级位移波动, 转换为差分干涉信号的相位变化. 通过对相位的高精度测量, 达到对位移的高精度测量. 类似的计划, 包括欧美 LISA 计划及中国的地心轨道任务天琴计划[2–4].

2016 年经过深入系统论证, 明确了太极计划“三步走”的发展战略, 即太极一号至三号, 稳步推动中国空间引力波探测的关键技术发展, 力争在 2030—2035 年率先在国际上开展 mHz 频段的引力波探测. 2018 年 8 月, 太极一号 (Taiji-1) 工程任务立项. 2019 年 8 月 31 日成功发射, 通过在轨实验, 验证了单星关键技术路线的可行性, 完成了中国空间引力波探测的第一步. 太极一号由单颗卫星组成, 验证了包括星内干涉仪、惯性传感器、无拖曳控制及微推进器、超净超稳卫星平台等一系列关键载荷的性能. 在轨结果表明, 激光干涉仪部分频段噪声优于 30 pm·Hz$^{-1/2}$, 满足了任务指标[5,6]. 但太极一号由于单颗星的限制, 无法进行星间相关技术验证, 特别是星间激光干涉仪、星间捕获指向技术、时间延迟干涉技术等. 因此, 太极计划第二阶段即太极二号 (Taiji-2) 被提上日程. 根据“三步走”发展战略, Taiji-2 将覆盖太极计划最终所有科学载荷的技术验证[1,7,8]. Taiji-2 最初计划由两颗日心轨道卫星组成, 拟对太极计划关键技术进行全系统、全功能、高指标的在轨验证, 进一步提高技术成熟度、可靠性及在轨适应性. 目前, 任务团队正在寻求进一步的资金支持, 探索将 Taiji-2 发展成完整三星的可能性. 仅与太极三号 (Taiji-3) 在任务寿命、测量精度等方面有所降低, 可全面验证空间引力波探测的各项技术.

作为太极计划的核心载荷, 激光干涉系统需实现皮米级测量精度. 通过分析系统中各子载荷部件的噪声进行指标分配, 根据分配的噪声指标对各子载荷部件提出可行的性能参数要求. 本文根据 Taiji-2 的顶层指标, 分析给出激光干涉系统的各功能指标参数, 进而基于干涉仪系统整体性能指标及噪声分解需求, 结合各子载荷的功能及组成进行噪声分配.

1 Taiji-2 激光干涉仪系统

太极计划对干涉测量系统提出的顶层指标[1] 列于表 1. 干涉系统主要功能为完成测试质量间的位移测量. 相比 Taiji-3, Taiji-2 在测距精度等方面的要求有所降低, 即在 3×10^6 km 的星间距上实现敏感频段内测距精度优于 30 pm·Hz$^{-1/2}$, 加速度残余噪声优于 3×10^{-14} m·s^{-2}·Hz$^{-1/2}$. Taiji-2 干涉系统主要由超稳激光器 (Laser)、干涉仪光学平台 (Optical Bench, OB)、相位计 (Phasemeter, PM) 及望远镜 (Telescope, TS) 组成[9]. 各组成及连接关系如图 1 所示.

超稳激光器产生高频率稳定性和高功率稳定性的激光束, 通过光纤接口送入干涉仪平台, 通过不同功能光学元件引导, 形成各功能光路. 部分光束通过

表 1 太极计划顶层指标参数

Table 1 Top-level indicator parameters of the Taiji program

卫星	臂长/m	光功率/W	望远镜口径/cm	系统测距噪声/(pm·Hz$^{-1/2}$)	加速度噪声/(m·s^{-2}·Hz$^{-1/2}$)
Taiji-3	3×10^9	2～3	40	8	3×10^{-15}
Taiji-2	3×10^9	2～3	40	30	3×10^{-14}

望远镜发射至远端航天器, 远端完成弱光锁相放大并返回, 经本地望远镜接收再次进入光学平台与本地参考光干涉. 在这个过程中, 搭建了参考 (Reference, Ref.) 干涉仪、测试质量 (Test Mass, TM) 干涉仪和科学 (Science, Sci.) 干涉仪系统. 干涉信号通过探测器 (Photodetector, PD) 或四象限探测器 (Quadrant Photodetector, QPD) 转换为模拟电信号, 最终送入相位计进行相位解析. 干涉系统主要功能如下.

(1) 星间测试质量间高精度 pm 级位移测量.

(2) 星间激光链路捕获指向所需卫星姿态信息[10].

(3) 无拖曳控制所需测试质量与本地光学平台的位移和角度信息.

(4) 星间激光通信与绝对距离测量[11,12].

(5) 星间时钟噪声传递[13].

(6) 弱光锁相、激光锁臂[14].

各项功能对应的指标参数要求列于表 2.

在多功能集成情况下, 激光干涉系统测量精度总体要求是优于 30 pm·Hz$^{-1/2}$. 基于此要求, 分析 Taiji-2 干涉系统各组成部件的功能和耦合机制, 建立噪声模型, 为 Taiji-2 干涉系统指标体系的建立提供参考.

2 干涉仪系统主要噪声分解

激光干涉仪系统可以分为激光器、干涉仪光学平台、相位计、望远镜等, 根据各子系统给出 Taiji-2 的

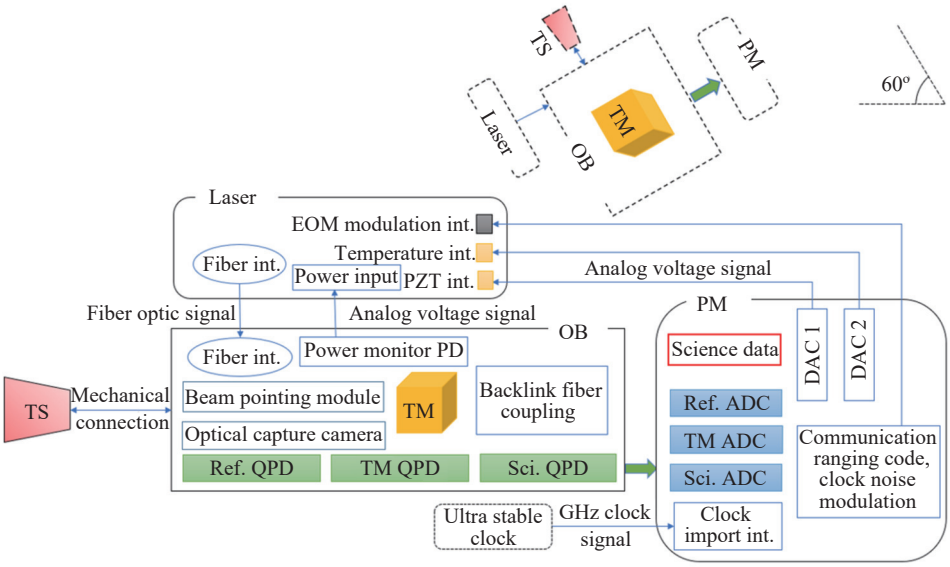

图 1 太极计划单星干涉仪系统组成及连接关系

Fig. 1 System composition and connection relationships for the Taiji single-satellite interferometer

表 2 Taiji-2 干涉仪系统各功能指标参数

Table 2 Indicator parameters of Taiji-2 interferometer function

功能	参数	需求
星间测距测角	本地位移测量噪声/(pm·Hz$^{-1/2}$)	≤10
	本地角度测量噪声/(nrad·Hz$^{-1/2}$)	≤10
星间通信与绝对距离测量	通信速率/(kbit·s^{-1})	≥20
	距离测量精度/m	≤10
星间时钟噪声传递	噪声/(pm·Hz$^{-1/2}$)	≤10
弱光锁相	噪声/(pm·Hz$^{-1/2}$)	≤6
锁臂	噪声/(Hz·Hz$^{-1/2}$)	≤10^{-4}

噪声指标分配结果. 以 30 pm·Hz$^{-1/2}$ 为目标精度, 首先给出每个噪声分项的噪声模型, 并基于模型给出具体的指标分配.

2.1 散粒噪声

散粒噪声是光学测量最基本的噪声之一, 与光强相关, 主要是由光子数的涨落引起的. 噪声的幅度谱密度 (ASD) 表达式为[15]

$$\tilde{x}_{\mathrm{SN}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{hc\lambda}{P_{\mathrm{i}}}}. \tag{1}$$

其中, P_{i} 为探测器接收的光功率值, h 为普朗克常数, c 为光速, λ 为波长.

假设激光干涉仪本地望远镜输出功率为 P_{o}, 经过星间传输后, 远端航天器接收到的激光功率为

$$P_{\mathrm{i}} = P_{\mathrm{o}}\left[\frac{\varepsilon\pi^2\nu^2D^4}{c^2}\right]\left[\frac{1}{4\pi L^2}\right]\left[\frac{\varepsilon\pi D^2}{4}\right]. \tag{2}$$

其中, ν为激光频率, L 为星间距, D 为望远镜口径, ε 为光学效率. 空间引力波探测中, 望远镜接收远端航天器发出的光所引起的散粒噪声 ASD 表达式为

$$\tilde{x}_{\mathrm{SN}} = \frac{2\sqrt{hc}}{\pi^2}\frac{\lambda^{\frac{3}{2}}L}{\varepsilon D^2}P_{\mathrm{o}}^{-\frac{1}{2}}. \tag{3}$$

Taiji-2 望远镜输出光功率为 1.2 W, 望远镜口径为 40 cm, 总光学效率取 0.3, 那么可得散粒噪声约为 6 pm·Hz$^{-1/2}$.

2.2 激光器

2.2.1 激光频率噪声

激光频率噪声$N_{\delta l}$是激光干涉系统最大的噪声源, 主要由激光频率抖动$N_{\delta\nu}$与干涉臂长差ΔL耦合引起, 表达式为[16,17]

$$N_{\delta l} = \Delta L\frac{N_{\delta\nu}}{\nu}. \tag{4}$$

其中, $\nu=c/\lambda=2.81\times10^{14}$ Hz.

在敏感频段, Taiji-2 要求由激光频率抖动引起的位移噪声优于 10 pm·Hz$^{-1/2}$. 由 Taiji-2 的轨道设计可知, 轨道游离引起的臂长差最大约为臂长的 1%[18,19]. 只有将光源的频率稳定性压制到 10^{-5} Hz·Hz$^{-1/2}$ 量级, 才能使该噪声低于要求. 空间引力波探测所采用的 Nd:YAG 固体激光器自由运行时, 频率稳定性约为 1 MHz·Hz$^{-1/2}$. 因此, Taiji-2 需要将激光频率噪声压低约 11 个量级. 拟采用多级压制手段, 具体如下.

(1) 激光初稳频至 30 Hz·Hz$^{-1/2}$. 多采用 PDH (Pound-Drever-Hall) 锁腔, 同步也在探索碘稳频或延迟干涉仪稳频等[20,21].

(2) 激光锁臂 0.3 Hz·Hz$^{-1/2}$. 空间中轨道的变化在 0.1 mHz～1 Hz 频率段, 其稳定性非常高, 可作为进一步压制的参考[22].

(3) 时间延迟干涉 (TDI) [23] 压低至 10^{-5} Hz·Hz$^{-1/2}$. 当无法进一步压制时, 通过构建等臂干涉仪消除不等臂, 进一步压低激光频率噪声至要求范围. 因此, TDI 并不是直接降低激光的频率抖动值, 而是数据上消除不等臂的臂长. 限制 TDI 精度的主要因素为星间的绝对距离测量精度, Taiji-2 要求约 10 m.

2.2.2 激光功率噪声

相对强度涨落噪声 (RIN) 是干涉仪中光功率波动带来的噪声, 也称光功率噪声[24]. RIN 对干涉测量的影响机制分为两个方面[24–26]: 功率波动与外差信号的耦合相位噪声; 测试质量的辐射压噪声.

2.2.2.1 功率波动与外差信号的耦合相位噪声

RIN 噪声是近年来研究的热点, 主要是由于光功率的波动在外差频率处与信号的耦合, 主要分为 1f-RIN 和 2f-RIN 噪声[24]. 1f-RIN 噪声是指 RIN 中频率等于外差频率的部分, 平衡探测可以从理论上完全消除. 但一般干涉仪间的共模抑制后, 引起的相位噪声表达式为

$$N_{\text{1f-RIN}} = \frac{\sqrt{2\left(P_{\mathrm{m}}+P_{\mathrm{r}}\right)}}{\sqrt{\eta_{\mathrm{het}}P_{\mathrm{m}}P_{\mathrm{r}}}}\tilde{r}_{(1\mathrm{f_{het}})}\left|\sin\left(\frac{\varphi-\varphi_{\mathrm{R}}}{2}\right)\right|. \tag{5}$$

其中, P_{m}和P_{r}分别为测量光、参考光的光强, η_{het}为外差干涉效率, $\tilde{r}_{(1\mathrm{f_{het}})}$为相对功率波动在一倍外差频率处的值, φ和φ_{R}为测量干涉仪、参考干涉仪的相位. 2f-RIN 噪声是指 RIN 中频率等于两倍外差频率的部分, 共模抑制后, 相位噪声表达式可写为

$$N_{\text{2f-RIN}} = \sqrt{2}\tilde{r}_{(2\mathrm{f_{het}})}\left|\sin\left(\varphi-\varphi_{\mathrm{R}}\right)\right|. \tag{6}$$

其中, $\tilde{r}_{(2\mathrm{f_{het}})}$为相对功率波动在二倍外差频率处的值. 在空间引力波探测中, 典型的非平面环形振荡器 (NPRO) 激光器的相对强度噪声在毫赫兹频段约为 1×10^{-4} Hz$^{-1/2}$, 在兆赫兹量级约为 1×10^{-8} Hz$^{-1/2}$, 并且随着频率的增大激光强度噪声逐渐降低. 因此, 2f-RIN 噪声远小于要求的 2π μrad·Hz$^{-1/2}$, 其影响可以忽略不计; 但 1f-RIN 噪声则需要分类讨论.

测试质量干涉仪及参考干涉仪类型相同, 如果测量光P_{m}及参考光P_{r}功率相同, 此时 1f-RIN 对应的相位噪声为$\sqrt{\frac{2}{\eta_{\mathrm{het}}}}\tilde{r}_{(1\mathrm{f_{het}})}$, 若$\eta_{\mathrm{het}}=0.7$, 则 1f-RIN 对应的

相位噪声$N_{\text{1f-RIN}}=1.7\tilde{r}_{(1\text{f}_{\text{het}})}$, 可忽略不计. 但二者不相同时, 假设$P_{\text{r}}=n\cdot P_{\text{m}}$, 则 1f-RIN 对应的相位噪声$N_{\text{1f-RIN}}=\dfrac{1+n}{\sqrt{2\eta_{\text{het}}\cdot n}}\tilde{r}_{(1\text{f}_{\text{het}})}=\dfrac{1}{\sqrt{2\eta_{\text{het}}}}\sqrt{\dfrac{(1+n)^2}{n}}\tilde{r}_{(1\text{f}_{\text{het}})}$. 若使$N_{\text{1f-RIN}}\leqslant 2\pi\ \mu\text{rad}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 则 $n\leqslant 5.5\times10^5$. 但一般情况下, 参考光与测量光的功率比值约为 100, 因此可以忽略不计. 但星间科学干涉仪较为复杂, 由于本地光为 100 μW, 接收光为 100 pW, 相差 6 个量级, 因此按照上述条件, 约为 8.5 $\mu\text{rad}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 即 1.43 $\text{pm}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, Taiji-2 的条件下可以忽略不计.

2.2.2.2 测试质量的辐射压噪声

打到测试质量上的光功率发生波动时, 会引起辐射压噪声, 体现为测试质量受到力噪声的干扰, 进而产生位移的波动, 这一效应的作用频段主要是在低频. 测试质量受到的力 F 与入射光功率 P 之间的关系为

$$F=\frac{P}{c}(1+\rho). \tag{7}$$

其中 ρ 为反射率.

Taiji-2 拟打到测试质量上的光功率约为 100 μW, 光功率稳定性为 10^{-4}, 测试质量块约为 2 kg, 反射率约为 0.95. 则由光功率不稳定性产生的加速度噪声约为 $3.3\times10^{-17}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 远低于 $3\times10^{-14}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的要求. 进一步降低辐射压力, 直接的方法是降低光功率及提高光功率稳定性.

根据现有 RIN 理论, 除测试质量的辐射压噪声外, 有研究表明低频功率波动（≤1 Hz）会对相位读出产生影响, 是目前的研究热点之一[25,26].

2.3 干涉仪光学平台

2.3.1 光程噪声

Taiji-2 干涉仪采用一体化设计, 在基板的正反两面都布置了光学元件[27]. 光学平台的主要作用是通过镜片引导光束形成参考、测试质量和科学干涉仪, 通过测量不同干涉仪的相位变化组合得到星间测试质量的位移波动. 光学平台上任何引起光程、相位变化的因素, 都会影响测量的精度. 主要包括干涉仪光学平台的基板、镜片、光纤等光学元件在受到外界环境扰动, 如温度涨落或应力波动, 引起材料发生形变, 导致物理距离或折射率改变, 引起光程波动[28], 此外, 还有光束角度波动等引起的光程噪声, 杂散光噪声[29]、Backlink 光纤噪声[30] 等.

光路传输过程中非预期的散射光或反射光, 与主光束叠加后会进入干涉信号, 导致信噪比下降, 系统稳定性降低, 影响测量精度. 光学平台上各类光学元件的界面反射、材料散射及结构缺陷均会在系统中引入杂散光. 例如透镜和分束器件等光学元件在主界面处通常镀有部分反射膜用于分光, 二次表面约有 0.2% 的光束反射, 形成杂散光束; 偏振元件, 如波片和偏振分束器, 其表面反射形成的鬼光束也会形成杂散光; 双平台干涉仪之间的 Backlink 光纤实验中, 光在平台之间传输时, 光纤端面光会有百分之一被反射形成杂散光. 通过平衡探测或使杂散光偏离主光路可以抑制杂散光.

敏感频段要求干涉仪平台光程噪声为 10 $\text{pm}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. 要达到上述指标, Taiji-2 提出如下指标要求: 光学平台温控达到 100 $\mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$(膨胀系数优于 10^{-7})[31]; 超静平台, 无机械振动源, 采用氢氧催化光粘技术[32,33]减小内应力; 干涉光束间平行度 10 μrad 量级, 重合度 10 μm 量级.

2.3.2 TTL 噪声

在星间激光干涉测量链路中, 角度耦合噪声 TTL (Tilt-to-Length) 噪声的影响不容忽略, 其是一种由干涉光束的倾斜或抖动引起的额外光程噪声. 可能的光束抖动包括: TM 干涉仪中测试质量姿态的变化; 星间干涉仪卫星姿态的扰动等. 同时, 光学元器件的在轨应力释放及四象限探测器的位置参数改变等均会对 TTL 噪声产生影响. 此处以红噪声的形式给出了 TTL 耦合噪声的 ASD 模型, 其中 TTL 噪声系数α_{TTL}与 TTL 耦合噪声x_{TTL}、接收光抖动值θ_{p}的关系为[34,35]

$$\alpha_{\text{TTL}}=\frac{x_{\text{TTL}}}{\theta_{\text{p}}}. \tag{8}$$

TTL 噪声一般在科学 (星间) 干涉仪和 TM 干涉仪中较为明显, 且由于远端来的近似平顶光束和本地高斯光束波前相差较大, 星间干涉仪的 TTL 噪声耦合更为复杂. 耦合系数对于不同干涉仪需求不同, 星间干涉仪的 TTL 耦合噪声要求优于 15 $\text{pm}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 光束指向经控制后为 30 $\text{nrad}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 经 100 倍放大, 约为 3 μrad, 因此满足噪声指标要求的系数需小于 5 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$. TM 干涉仪中 TM 的抖动会产生 TTL 噪声, 其处理相对于星间干涉仪较为简单, 测试质量经静电锁定后, 角度抖动约 100 $\text{nrad}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 若要求 TTL 噪声小于 1 $\text{pm}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 即耦合系数要求

10 μm·rad^{-1}.

TTL 噪声与光束的角度抖动呈正比, 因此 TTL 噪声可以通过成像透镜组和高精度装调进行硬件压制, 未来 Taiji-2 的工程任务指标可根据实际情况进一步压制光束指向抖动, 减少 TTL 耦合噪声.

2.3.3 超前指向噪声

受到轨道扰动的影响, 卫星间不仅存在轴向相对运动, 还存在一定的切向相对运动. 对于百万公里星间距, 星间激光传播约需 10 s, 为保证经远距离传输后的光斑中心对准远端航天器以实现功率最大化, 发射光束应增加一个超前角度, 即在干涉链路中设计超前指向机构. 超前指向机构安装在干涉仪平台上[36], 其主要功能部件是一个可以旋转的反射镜. 在干涉光路建立过程中反射镜的对准与抖动过程会产生光路延迟, 即超前指向噪声. 在敏感频段, 要求超前指向光程噪声优于 5 pm·Hz$^{-1/2}$, 为红噪声.

对于超前指向机构, 提出的指标要求为: 偏转范围达到 500 μrad, 偏转精度优于 2 μrad, 使用非磁性支撑件.

2.4 相位计

相位计作为干涉仪的电子学部分, 其主要功能是完成相位信息提取. 主要功能包括干涉测距、星间激光通信测距的调制与解调、时钟噪声传递的解调及弱光锁相. Taiji-2 干涉仪光学平台包含三路干涉仪, 即 6 个四象限探测器, 共 24 路干涉信号. 探测器的每个象限相互独立, 分别对应相位计的 24 个通道. 考虑到卫星间相对运动导致的大范围多普勒频移[37–39], 相位计普遍采用基于全数字锁相环的方法学. 该方法能够同时跟踪多个频率成分, 且能应对大范围的频率漂移. 根据目前的轨道设计, 星间相对速度最大约 ±10 m·s^{-1}, 对应 1064 nm 波长, 多普勒频移约 ±10 MHz. Taiji-2 的弱光锁相中心频率为 15 MHz, 通过外差干涉, 得到拍频的频率为 5～25 MHz[18]. 主要噪声包括相位测量噪声和时钟噪声.

2.4.1 相位测量噪声

相位测量噪声是一个综合噪声, 主要由光电探测器噪声、相位计测相噪声、相位计模拟前端噪声等组成. 探测器等效光功率噪声是探测器到模数转换器 (ADC) 间的各类电子学元器件的噪声的统称, 由探测器暗电流、运算放大器暗电流等噪声构成. 相位计测相噪声由 ADC 量化误差、ADC 采样抖动噪声及 FPGA 数字运算误差组成. ADC 采样抖动噪声由 ADC 采样时间的抖动造成, 一般约为 10 ps 量级, 与载波信号的频率呈正比, 通常采用导频信号的方式消除. 相位计模拟前端噪声主要包括模拟电路耦合噪声, 如射频电路串扰、温度耦合噪声等.

相位测量噪声在敏感频段内表现为红噪声, 要求为 5 pm·Hz$^{-1/2}$.

2.4.2 时钟噪声

时钟噪声是相位测量中需要单独说明的, 由于时钟不可避免地存在计时误差 $\tilde{t}_{\mathrm{USO}}$, 在拍频信号采样时 (假设频率为 f_{h}) 会由于计时点的抖动引起相位读出上的误差为[13,40]

$$\tilde{\phi}_{\mathrm{USO}} = 2\pi\tilde{t}_{\mathrm{USO}} f_{\mathrm{h}}. \tag{9}$$

可以看出, 时钟噪声由时钟计时误差和载波频率共同决定, Taiji-2 要求为 10 pm·Hz$^{-1/2}$. 由于轨道的多普勒效应, Taiji-2 的载波频率波动范围为 5～25 MHz. 因此, Taiji-2 要求时钟计时误差低于 4×10^{-13} s·Hz$^{-1/2}$, 目前尚无满足此要求的星载时钟. 为减少该噪声一般采用共模消除的方式, 单颗卫星内所有采样均使用单一超稳时钟同步, 通道间的时钟噪声可以消除. 但卫星间的相位计无法通过单一超稳时钟同步. Taiji-2 拟采用时钟噪声传递加数据后处理的方式消除, 即通过将时钟噪声调制到激光边带, 传递至远端航天器, 在远端航天器测量得到两个时钟的误差, 随后通过 TDI 数据处理的方式进行共模消除.

2.5 望远镜

望远镜主要用于星间激光的光束收发, 将光学平台中的光束扩束, 得到接近衍射极限的准直光束. 在向远端卫星发射光束的同时接收来自远端卫星的入射光束. 同时, 需要满足两个要求: 一是从本地卫星发射的光功率必须足够高, 保证激光能够有效地被远端卫星接收, 以最大限度地降低光读出系统中的散粒噪声; 二是为了避免光束抖动引起额外的测距噪声, 出射光的波前要尽可能平滑. 为避免望远镜中杂散光的影响, 望远镜普遍采用离轴四反设计[41–43]. 本地光束为高斯光束, 经望远镜打到远端卫星被接收; 远端卫星来的光到达本地望远镜后, 远场波前被截取并缩束为平顶光束, 然后与本地高斯光束干涉.

2.5.1 望远镜稳定性噪声

望远镜位于两卫星的平台间, 用于星间的激光收发. 其稳定性直接进入光程, 影响测量精度. Taiji-2

望远镜拟采用离轴四反结构, 其稳定性主要由连接镜片间的框架结构决定.

超高稳定度望远镜光机结构材料应选择超低膨胀系数材料, 以降低对在轨工作温度水平和温度稳定性的要求, 并且降低热设计的难度. 根据技术指标, Taiji-2 超高稳定度望远镜拟选用微晶玻璃作为光学元件材料; 主支撑结构选用碳纤维桁架形式, 通过控制碳纤维杆的轴向线胀系数来保证光学元件相对位置关系; 主支承结构框架顶板和底板拟选用低膨胀 C/SiC 复合材料, 以上三种材料均有成功应用经历, 热膨胀系数实测结果均可达到 1×10^{-7} K^{-1} 或更低水平. 但是未来望远镜的材料会根据实际研究进程和相关材料性质做合适的选择.

稳定性噪声也是典型的红噪声, 要求为 10 pm·$Hz^{-1/2}$.

2.5.2 激光指向噪声

望远镜的不平整度和传输方向激光光束的抖动互相耦合会导致激光指向误差. 在敏感频段, 要求激光指向误差对应的位移误差优于 10 pm·$Hz^{-1/2}$.

理想状态下, 离开望远镜的波前是以测试质量为中心的球面波, 这种理想波前能够保证光学路径测量对航天器的任何指向抖动不敏感, 不会产生额外的光程噪声. 相反, 对理想波前的任何偏离都会将航天器的抖动转化成等效的路径噪声. 由于望远镜不平整度的影响, 激光的波前 (等相位面) 在传播百万公里后将偏离球面波近似. 因此, 若远端航天器发出的激光在传播方向发生抖动, 本地航天器在接收该激光时会探测到光束波前变化 (相位变化), 即激光指向误差[44]

$$\tilde{x} = \frac{\pi d D^2}{2\lambda^2}\theta_{\rm dc}\tilde{\theta}_{\rm p}. \tag{10}$$

其中, d 为望远镜波前平整度, $\theta_{\rm dc}$ 为激光指向的静态偏差, $\tilde{\theta}_{\rm p}$为指向抖动, 其值取决于卫星平台. 由于激光指向稳定性噪声属于红噪声, 因此, 指向抖动噪声也表现为红噪声. 为使$\tilde{x} \leqslant 10\ {\rm pm}\cdot{\rm Hz}^{-1/2}$, Taiji-2 对相关参数的具体要求为: 激光波前畸变为 $\lambda/20$, 静态偏差 30 nrad, 指向抖动 30 nrad·$Hz^{-1/2}$. 同时可以看出, 波前平整度、静态指向偏差和指向抖动为相乘关系, 通过提高其中一个指标精度, 另外的指标要求可以放宽. 因此, Taiji-2 可根据实际工程情况适当修改相关参数, 以保证指向噪声优于 10 pm·$Hz^{-1/2}$.

2.5.3 杂散光

望远镜杂散光为本地光经望远镜出射时反射回来的光, 其影响机制与光学平台杂散光相同, 杂散光引起的相位差为

$$\Delta\varphi = -\sqrt{\frac{P_{\rm s}}{P_{\rm o}}}\Delta\varphi_{\rm s}. \tag{11}$$

其中, $\Delta\varphi_{\rm s}$为杂散光相位波动, 与杂散光和本地参考光光功率$P_{\rm s}$和$P_{\rm o}$相关. 由于望远镜杂散光与测量光所走的路径相同, 偏振状态相同, 因此无法通过楔形镜片的方式避免. 望远镜杂散光的抑制主要有三种方式: 第一种, 减少杂散光, 主要是提高镜片的反射率, 但望远镜镜体加工较难, 根据现有的技术水平, 很难进一步提升; 第二种, 增大本地光功率, 但光功率的提升对杂散光的压制效果不明显, 且将导致光功率噪声的提升; 第三种, 减少杂散光相位波动, 即抑制杂散光路径的相位波动, 主要来源于连接望远镜与干涉仪结构的稳定性[45,46].

Taiji-2 要求杂散光噪声优于 5 pm·$Hz^{-1/2}$. 现阶段, 一般 $P_{\rm s}$=1 nW, 本地光 $P_{\rm o}$=100 μW, 那么连接望远镜及干涉仪间的结构稳定性优于 1.6 nm·$Hz^{-1/2}$.

2.6 呼吸角补偿光程噪声

由于三星轨道扰动, 星间连线夹角年变化±1°[36,41]. 由于望远镜视场的限制, 单纯采用超前机构无法维持三星编队, 需利用额外机构进行角度补偿. 根据 Taiji-2 的载荷设计, 每个卫星中有一套载荷, 包括两个激光器, 一套相位测量系统和两套可移动光学组件 (MOSA)[36]. MOSA 包括光学平台、望远镜、引力参考传感器等一系列与光路相关的部件. 两套光学组件通过结构框架与卫星连接, 彼此之间的夹角可以在 60°附近调节, 用作对卫星呼吸角的补偿. 补偿机构围绕两套 MOSA 系统的光轴交点发生旋转, 要求在旋转过程中不能额外引起测试质量的轴向位移, 即呼吸角补偿光程噪声优于 5 pm·$Hz^{-1/2}$.

2.7 其他噪声

干涉测量系统中, 除上述噪声源外, 各子系统之间的机械耦合会引入额外的相位噪声, 直接影响系统的测量精度. 这些耦合噪声主要来源于以下关键结构.

(1) 惯性传感器的光学玻璃窗口噪声[47]. 光学玻璃窗口 (蓝宝石玻璃镀增透膜, 厚度 2～5 mm) 的作用为隔离惯性传感器和外界环境, 同时透射 TM 光束. 由于窗口材料会受到外界扰动, 如温度和应力变

化的影响, 光束通过时会引起光程噪声. 此外, 当光束倾角发生改变时会引起额外的 TTL 噪声.

(2) MOSA 结构的噪声. 作为干涉系统核心部件的支撑框架, 其稳定性直接影响光学测量精度. 例如 MOSA 受到的温度应力等扰动会传递到干涉仪、惯传、望远镜, 使光学系统产生形变, 进而调制干涉信号.

(3) 子系统连接结构的传递噪声. 主要涉及干涉仪、望远镜和惯性传感器之间的机械连接件, 一方面连接件的轴向收缩会直接贡献光程噪声; 另一方面当连接件的刚性不足时, 其弯曲或扭转变形均会放大光学元件的偏转角度, 加剧系统的 TTL 噪声.

在敏感频段, 上述耦合噪声的总贡献需满足 5 pm·Hz$^{-1/2}$ 的要求.

2.8 总噪声分配表

从以上的噪声分析可以看出, 目前的噪声总体可分为以下三类.

(1) 通过提升载荷设备的参数进行相关指标压制. 如散粒噪声、激光频率噪声、激光功率噪声、光程噪声、超前指向噪声、相位测量噪声、望远镜稳定性噪声、其他噪声等.

(2) 通过在轨主动控制加参数抑制的方式压制, 如望远镜的指向噪声、TTL 噪声等.

(3) 后续的数据处理压制, 例如激光频率噪声、时钟噪声、部分 TTL 噪声[48], 这三种噪声无法通过现有的硬件技术手段进行抑制.

汇总上述噪声分析, 干涉仪噪声模型的指标分配及其指导下的载荷参数设计见表 3. 从表 3 可以看出, 太极二号干涉仪是一个复杂系统, 各类指标不仅与干涉仪各子系统相关, 同时与惯性传感器、微推及无拖曳系统、卫星平台等参数相关. 因此, 在未来的工程实施过程中, 需结合各系统参数的实际情况做进一步微调.

3 结论与展望

Taiji-2 干涉仪系统由激光器、干涉仪光学平台、

表 3 Taiji-2 测距噪声指标分解

Table 3 Indicator decomposition for ranging noise in Taiji-2

噪声类型	指标/(pm·Hz$^{-1/2}$)	噪声模型	相关参数	数值
散粒噪声	6	$\tilde{x}_{\mathrm{SN}} = \frac{2\sqrt{hc}}{\pi^2}\frac{\lambda^{\frac{3}{2}}L}{\varepsilon D^2}P_{\mathrm{o}}^{-\frac{1}{2}}$	P_{o}激光输出功率/W	1.2
			望远镜口径D/m	0.4
			ε总光学效率	0.3
激光频率噪声(TDI)	10	—	频率稳定度/(Hz·Hz$^{-1/2}$)	30
			TDI/(pm·Hz$^{-1/2}$)	10
激光功率噪声	2	$N_{\mathrm{1f\text{-}RIN}} = \frac{\sqrt{2(P_{\mathrm{m}}+P_{\mathrm{r}})}}{\sqrt{\eta_{\mathrm{het}}P_m P_{\mathrm{r}}}}\tilde{r}(1\mathrm{f}_{\mathrm{het}})\left\lvert\sin\left(\frac{\varphi-\varphi_{\mathrm{R}}}{2}\right)\right\rvert$	MHz-RIN/Hz$^{-1/2}$	10^{-8}
		$N_{\mathrm{2f\text{-}RIN}} = \sqrt{2}\tilde{r}(2\mathrm{f}_{\mathrm{het}})\lvert\sin(\varphi-\varphi_{\mathrm{R}})\rvert$		
		$F = \frac{P}{c}(1+\rho)$	mHz-RIN/Hz$^{-1/2}$	10^{-4}
光程噪声	10	—	光学平台光程噪声/(pm·Hz$^{-1/2}$)	10
TTL噪声	15	$\alpha_{\mathrm{TTL}} = \frac{x_{\mathrm{TTL}}}{\theta_{\mathrm{p}}}$	光束抖动/(rad·Hz$^{-1/2}$)	3
			望远镜放大倍数	100
			耦合系数/(m·rad^{-1})	5
超前指向噪声	5	—	机构光程噪声/(pm·Hz$^{-1/2}$)	5
相位测量噪声	5	—	探测器等效光功率噪声、相位计测相噪声、相位计模拟前端噪声/(pm·Hz$^{-1/2}$)	5
时钟噪声	10	$\tilde{\phi}_{\mathrm{USO}} = 2\pi\tilde{t}_{\mathrm{USO}}f_{\mathrm{h}}$	计时误差/(s·Hz$^{-1/2}$)	4×10^{-13}
			差分频率/MHz	5～25

续表 3

噪声类型	指标/(pm·Hz$^{-1/2}$)	噪声模型	相关参数	数值
望远镜稳定性噪声	10	—	—	—
激光指向噪声	10	$\tilde{x}=\frac{\pi dD^2}{2\lambda^2}\theta_{\rm dc}\tilde{\theta}_{\rm p}$	望远镜镜面平整度@1064 nm	$\lambda/20$
			指向静态偏差/nrad	30
			指向抖动/(nrad·Hz$^{-1/2}$)	30
杂散光	5	$\Delta\varphi=-\sqrt{\frac{P_{\rm s}}{P_{\rm o}}}\Delta\varphi_{\rm s}$	杂散光功率/nW	1
			参考光功率/μW	100
			结构稳定性/(nm·Hz$^{-1/2}$)	1
呼吸角补偿光程噪声	5	—	—	—
其他噪声	5	—	—	—
总噪声	—	—	总噪声值/(pm·Hz$^{-1/2}$)	29.8

相位计和望远镜四大模块组成. 为实现皮米级星间激光测距指标, 本文首先就干涉仪系统的结构及功能进行了介绍, 其次以分解顶层噪声指标 30 pm·Hz$^{-1/2}$ 为目的, 逐步分解干涉系统的各类噪声并建立噪声模型, 对各子系统相关的性能参数进行了初步的约束. 最终, 初步建立了 Taiji-2 干涉仪系统的指标噪声体系, 为后续任务的噪声讨论和参数指标调整奠定了理论基础.

不同于其余科学卫星, 空间引力波探测是一个巨复杂系统, 且干涉仪系统设计会根据后续噪声的表现和功能反复迭代. 因此在讨论后续任务的干涉仪系统指标时, 应针对不同的功能干涉仪提出不同的指标. 参考干涉仪和 TM 干涉仪由于光功率较强, 干涉仪的读出精度可达到 1 pm·Hz$^{-1/2}$. 但科学干涉仪较为复杂, 由于接收光功率较弱, 传递过程中会受到望远镜、TTL、杂散光等噪声的影响, 目前设定系统读出精度为 30 pm·Hz$^{-1/2}$. 同时, 本文仅从干涉测距的角度建立了噪声指标, 但科学干涉仪不仅仅需完成干涉测距、测角, 同时需完成绝对距离测量与激光通信、时钟噪声传递等功能, 统称为干涉仪辅助功能. 辅助功能是在干涉仪主功能的基础上, 进行相位调制, 此时将进一步降低用于激光干涉测距的光功率, 辅助功能占 1% ～ 10% 的光功率. 辅助功能将会影响干涉测距的精度, 未来需进一步分析讨论.

参考文献

[1] LUO Z R, WANG Y, WU Y L, *et al.* The Taiji program: a concise overview[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, **2021**(5): 05A108

[2] WU Yueliang, HU Wenrui, WANG Jianyu, *et al.* Review and scientific objectives of spaceborne gravitational wave detection missions[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 589-599 (吴岳良, 胡文瑞, 王建宇, 等. 空间引力波探测综述与拟解决的科学问题 [J]. 空间科学学报, 2023, **43**(4): 589-599)

[3] 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

[4] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, *et al.* TianQin: a spaceborne gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, **33**(3): 035010

[5] 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

[6] LIU H S, LUO Z R, SHA W, *et al.* In-orbit performance of the laser interferometer of Taiji-1 experimental satellite[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, **36**(11n12): 2140004

[7] The Taiji Scientific Collaboration. The pilot of Taiji program — from the ground to Taiji-2[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, **36**(11/12): 2012001

[8] LUO Z R, ZHANG M, WANG J Y, *et al.* Progress of Taiji-2 Project[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(4): 674-676

[9] WANG Juan, QI Keqi, WANG Shaoxin, *et al.* Advance and prospect in the study of laser interferometrytechnology for space gravitational wave detection[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2024, **54**(7): 270405 (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)

[10] GAO Ruihong, LIU Heshan, LUO Ziren, *et al.* Introduction of laser pointing scheme in the Taiji program[J]. *Chinese Optics*, 2019, **12**(3): 425-431 (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)

[11] LIU Heshan, GAO Ruihong, LUO Ziren, *et al.* Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2019, **12**(3): 486-492 (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)

[12] CHEN P Q, ZHANG Y B, DENG R J, *et al.* Experimental demonstration of bi-directional laser ranging and data communication for space gravitational wave detection[J]. *Results in Physics*, 2024, **65**: 107985

[13] JIANG Qiang, DONG Peng, LIU Heshan, *et al.* Ground-based principle verification of clock noisetransfer for the Taiji program[J]. *Chinese Optics*, 2023, **16**(6): 1394-1403 (江强, 董鹏, 刘河山, 等. 太极计划时钟噪声传递的地面原理验证 [J]. 中国光学 (中英文), 2023, **16**(6): 1394-1403)

[14] WANG Chen, GAO Xuerong, QI Keqi, *et al.* Weak light phase-locked ground-based experimantal validation and noise analysis of the Taiji projecet[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2025, **52**(11): 1101004 (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)

[15] BARKE S. Inter-Spacecraft Frequency Distribution for Future Gravitational Wave Observatories[D]. Hannover: Leibniz Universität Hannover, 2015

[16] ZHAN Z H, LUO Y X, YEH H C, *et al.* Development of a space-compatible packaging system for an integrated monolithic ultra-stable optical reference[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2024, **95**(10): 104505

[17] LIU Yu, ZHANG Yuzhu, PENG Xiaodong, *et al.* Analysis of the influence and importance of laser frequency fluctuation on laser interference simulation system for space gravitational wave detection[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(1): 179-188 (刘宇, 张玉珠, 彭晓东, 等. 激光频率波动对空间引力波探测激光干涉测量的影响分析 [J]. 空间科学学报, 2025, **45**(1): 179-188)

[18] ZHANG J F, YANG Z, MA X S, *et al.* Inter-spacecraft offset frequency setting strategy in the Taiji program[J]. *Applied Optics*, 2022, **61**(3): 837-843

[19] ZHANG J F, MA X S, ZHAO M Y, *et al.* Advanced inter-spacecraft offset frequency setting strategy for the Taiji program based on a two-stage optimization algorithm[J]. *Applied Optics*, 2023, **62**(16): 4370-4380

[20] 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

[21] 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

[22] GHOSH S, SANJUAN J, MUELLER G. Arm locking performance with the new LISA design[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2022, **39**(11): 115009

[23] YAMAMOTO K, BYKOV I, REINHARDT J N, *et al.* Experimental end-to-end demonstration of intersatellite absolute ranging for the laser interferometer space antenna[J]. *Physical Review Applied*, 2024, **22**(5): 054020

[24] WISSEL L, WITTCHEN A, SCHWARZE T S, *et al.* Relative-intensity-noise coupling in heterodyne interferometers[J]. *Physical Review Applied*, 2022, **17**(2): 024025

[25] WISSEL L, HARTWIG O, BAYLE J B, *et al.* Influence of laser relative-intensity noise on the laser interferometer space antenna[J]. *Physical Review Applied*, 2023, **20**(1): 014016

[26] WISSEL L, HEWITSON M, HEINZEL G. Measuring the impact of laser relative intensity noise on heterodyne interferometers using differential wavefront sensing[J]. *Physical Review Applied*, 2024, **22**(4): 044048

[27] 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

[28] REID M M, HAUGHIAN K, CUMMING A V, *et al.* Temperature dependence of the thermal conductivity of hydroxide catalysis bonds between silicon substrates[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2023, **40**(24): 245006

[29] LOHDE A, VOIGT D, GERBERDING O. Dual balanced readout for scattered light noise mitigation in Michelson interferometers[J]. *Physical Review D*, 2025, **111**(2): 022004

[30] ROHR M J, AST S, GERBERDING O, *et al.* Fiber backscatter under increasing exposure to ionizing radiation[J]. *Optics Express*, 2020, **28**(23): 34894-34903

[31] YAN Lihui, LIU Heshan, BIAN Xing, *et al.* Design and verification of temperature measurement bridge excitation source in the Taiji Program[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(3): 1-10 (言立慧, 刘河山, 边星, 等. 太极计划中的测温电桥激励源设计与验证 [J]. 空间科学学报, 2025, **45**(3): 1-10)

[32] ROBERTSON D I, FITZSIMONS E D, KILLOW C J, *et al.* Automated precision alignment of optical components for hydroxide catalysis bonding[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(22): 28323-28334

[33] MANGANO V, VAN VEGGEL A A, DOUGLAS R, *et al.* Determination of the refractive index and thickness of a hydroxide-catalysis bond between fused silica from reflectivity measurements[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(4): 3196-3213

[34] SCHUSTER S, TRÖBS M, WANNER G, *et al.* Experimental demonstration of reduced tilt-to-length coupling by a two-lens imaging system[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(10): 10466-10475

[35] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, *et al.* Tilt-to-length coupling in LISA Pathfinder: a data analysis[J]. *Physical Review D*, 2023, **108**(10): 102003

[36] SALLUSTI M, GATH P, WEISE D, *et al.* LISA system design highlights[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2009, **26**(9): 094015

[37] LIANG Yurong. Hign Precision Phase Measurement for Heterofyne Laser Interferomter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013 (梁浴榕. 外差激光干涉仪中的高精度相位测量研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013)

[38] YANG R, LIU H S, 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

[39] LI Zhuo, ZHENG Jianhua, LI Mingtao, *et al.* Analysis of celestial gravity influence on heliocentric formation flying of gravitational wave observatory[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(3): 457-466 (李卓, 郑建华, 李明涛, 等. 太阳系天体引力对空间引力波探测日心编队构型的影响分析 [J]. 空间科学学报, 2021, **41**(3): 457-466)

[40] XU Mingyang, TAN Yujie, SHAO Chenggang. Research progress on clock noise suppression technique for spaceborne gravitational wave detection[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2025, **55**(3): 230409 (许茗洋, 谈玉杰, 邵成刚. 空间引力波探测中的时钟噪声抑制技术研究进展 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, **55**(3): 230409)

[41] SANZ I E, HESKE A, LIVAS J C. A telescope for LISA – the Laser Interferometer Space Antenna[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2018, **7**(6): 395-400

[42] SASSO C P, MANA G, MOTTINI S. Telescope jitters and phase noise in the LISA interferometer[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(12): 16855-16870

[43] JERSEY K, ZHANG Y Q, HARLEY-TROCHIMCZYK I, *et al.* Design, fabrication, and testing of an optical truss interferometer for the LISA telescope[C]//Design, Manufacture, and Test of Space and Ground Systems III. San Diego: SPIE, 2021

[44] BENDER P L. Wavefront distortion and beam pointing for LISA[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, **22**(10): S339-S346

[45] Team L S. LISA Pre-Phase A Report[R]. Noordwijk: ESTEC, 1998

[46] TRÖBS M, 'ARCIO L D, BARKE S, *et al.* Testing the LISA optical bench[C]//Proceedings of the International Conference on Space Optics. Ajaccio: ESA, 2012

[47] NOFRARIAS M, MARÍN A F G, LOBO A, *et al.* Thermal diagnostic of the optical window on board *LISA Pathfinder*[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2007, **24**(20): 5103-5121

[48] PACZKOWSKI S, GIUSTERI R, HEWITSON M, *et al.* Postprocessing subtraction of tilt-to-length noise in LISA[J]. *Physical Review D*, 2022, **106**(4): 042005

作者简介

刘河山 男, 1988 年出生于安徽阜阳, 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（通信作者） 男, 1980 年出生于湖南长沙, 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