

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

空间引力波星载望远镜测试与评估技术研究进展

张兰强, 曾意, 吴小虎, 杨金生, 阮晓莉, 辛强, 顾乃庭, 饶长辉

引用本文:

张兰强, 曾意, 吴小虎, 等. 空间引力波星载望远镜测试与评估技术研究进展[J]. 光电工程, 2024, 51(2): 240027.

Zhang L Q, Zeng Y, Wu X H, et al. Progress in the research of testing and evaluation techniques for spaceborne gravitational wave telescopes[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(2): 240027.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240027>

收稿日期: 2024-01-26; 修改日期: 2024-02-05; 录用日期: 2024-02-05

相关论文

空间引力波探测望远镜研究进展

王小勇, 白绍竣, 张倩, 林栩凌, 李洋, 夏晨晖

光电工程 2023, 50(11): 230219 doi: [10.12086/oe.2023.230219](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230219)

基于夏克-哈特曼传感器的星载望远镜波前测量技术研究

位希雅, 宋奇林, 杨金生, 张兰强, 李杨, 黄林海, 顾乃庭, 饶长辉

光电工程 2023, 50(11): 230215 doi: [10.12086/oe.2023.230215](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230215)

空间引力波望远镜超前瞄准机构致动器电荷驱动位移行为研究

闫泽昊, 周子夜, 李杨, 周虹, 黄林海, 顾乃庭, 饶长辉

光电工程 2023, 50(11): 230223 doi: [10.12086/oe.2023.230223](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230223)

High-resolution visible imaging with piezoelectric deformable secondary mirror: experimental results at the 1.8-m adaptive telescope

Youming Guo, Kele Chen, Jiahui Zhou, Zhengdai Li, Wenyu Han, Xuejun Rao, Hua Bao, Jinsheng Yang, Xinlong Fan, Changhui Rao

Opto-Electronic Advances 2023, 6(12): 230039 doi: [10.29026/oea.2023.230039](https://doi.org/10.29026/oea.2023.230039)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240027

空间引力波星载望远镜测试与评估技术研究进展

张兰强^{1,2,3}, 曾意^{1,2,3}, 吴小虎⁴, 杨金生^{1,2}, 阮晓莉^{1,2},
辛强^{1,2}, 顾乃庭^{1,2,3}, 饶长辉^{1,2,3*}

¹ 自适应光学全国重点实验室, 四川 成都 610209;

² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³ 中国科学院大学, 北京 100049;

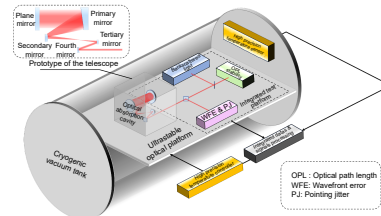
⁴ 山东高等技术研究院, 山东 济南 250100

摘要: 在空间引力波探测任务中, 星载望远镜承担太空超长干涉光路双向光束准直的重要作用。空间引力波探测对星载望远镜提出了 pm 级光程稳定性和低于 10^{-10} 级后向杂散光水平的极高要求。超高水平指标要求超过了当前测试技术的精度极限, 因此, 针对星载望远镜发展测试与评估技术并开展系统超高精度测试是空间引力波探测计划成功的重要前提。本文在概述国内外在研的空间引力波探测星载望远镜研制情况的基础上, 重点围绕星载望远镜的核心技术指标——光程稳定性和后向杂散光, 介绍了在研望远镜的测试技术发展现状和已经取得的部分测试成果, 以及各研究单位进一步的测试计划, 为我国的空间引力波探测的星载望远镜测试与评估技术发展提供参考。

关键词: 空间引力波探测; 星载望远镜; 地面测试; 光程稳定性; 后向杂散光

中图分类号: TH743

文献标志码: A



张兰强, 曾意, 吴小虎, 等. 空间引力波星载望远镜测试与评估技术研究进展 [J]. 光电工程, 2024, 51(2): 240027

Zhang L Q, Zeng Y, Wu X H, et al. Progress in the research of testing and evaluation techniques for spaceborne gravitational wave telescopes[J]. Opto-Electron Eng, 2024, 51(2): 240027

Progress in the research of testing and evaluation techniques for spaceborne gravitational wave telescopes

Zhang Lanqiang^{1,2,3}, Zeng Yi^{1,2,3}, Wu Xiaohu⁴, Yang Jinsheng^{1,2}, Ruan Xiaoli^{1,2}, Xin Qiang^{1,2},
Gu Naiting^{1,2,3}, Rao Changhui^{1,2,3*}

¹ National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu, Sichuan 610209, China;

² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ Shandong Institute of Advanced Technology, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract: Spaceborne telescopes for gravitational wave detection crucially collimate bidirectional beams in ultra-long interferometric optical paths. The faint optical path changes due to gravitational waves demand pm-level

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-02-05; 录用日期: 2024-02-05

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC2202200, 2021YFC2202201)

*通信作者: 饶长辉, chrhao@ioe.ac.cn.

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

optical path length stability and below 10^{-10} level backscattered light in the telescopes. The ultra-high-level specifications requirements are out of state-of-the-art testing techniques. The development of testing and evaluation techniques for spaceborne telescopes is a crucial prerequisite for the success of the space gravitational wave detection program. This paper overviews the development of spaceborne gravitational wave detection telescopes, focusing on the optical path length stability and backscattered light testing status, results, and further plans, providing reference in the testing and evaluation of Chinese spaceborne gravitational wave detection telescopes.

Keywords: space gravitational wave detection; spaceborne telescope; ground test; optical path length stability; backscattered light

1 空间引力波探测背景

引力波是时空中加速运动物体对时空产生的扰动作用。可观测的引力波产生于宇宙中大质量天体活动, 如大质量黑洞合并、超新星爆发、非对称旋转中子星等重大天文事件及天体^[1-3], 宇宙学家可通过引力波研究天体活动与宇宙起源, 这使得引力波探测成为人类研究宇宙的重要途径。引力波探测基于引力波传播时空产生的振荡, 时空场的应变导致时空中物体长度产生变化, 因此引力波探测本质上是长度测量问题^[4]。与一般精密长度测量不同, 引力波探测主要有两大难点: ①引力波引起的长度变化过小: 引力波波源与地球距离为光年级。即便是较强的引力波信号, 经过长距传播后幅度也已变得极其微弱, 在地球引起的单位长度变化量为 10^{-21} 量级, 对测量仪器的精度要求远超人类历史上所有已知精密测量实验。②如图 1 所示

宇宙中引力波波源丰富, 引力波信号频段宽, 探测器尺度需要与目标波源波长量级保持一致才能探测到信号, 因此探测器尺度至少需要达到数千米至数万千米, 且在此基础上仍然保持精度, 这导致引力波探测变得十分困难。而在引力波探测的研究过程中, 科学家们逐渐意识到, 将迈克尔逊干涉仪作为测距原理仪器用于引力波探测几乎可以针对性解决以上难点: ①迈克尔逊干涉仪的臂长可以很长, 相当于放大了引力波信号。如振幅为 10^{-21} 的引力波在 1 m 的空间尺度上会引起 10^{-21} m 级的长度变化, 相应地, 将在 10^9 m 的臂长上引起 10^{-12} m 级的长度变化, 从而使引力波信号进入人类目前可测的精度范围。②迈克尔逊干涉仪可探测频段较宽, 不仅可以针对目标引力波源设置相应的臂长, 同时在较宽的频段内对信号都有较强响应, 从而对很多引力波源进行覆盖。因此, 用大臂长迈克尔逊干涉仪测量引力波信号引起的长度变化成为

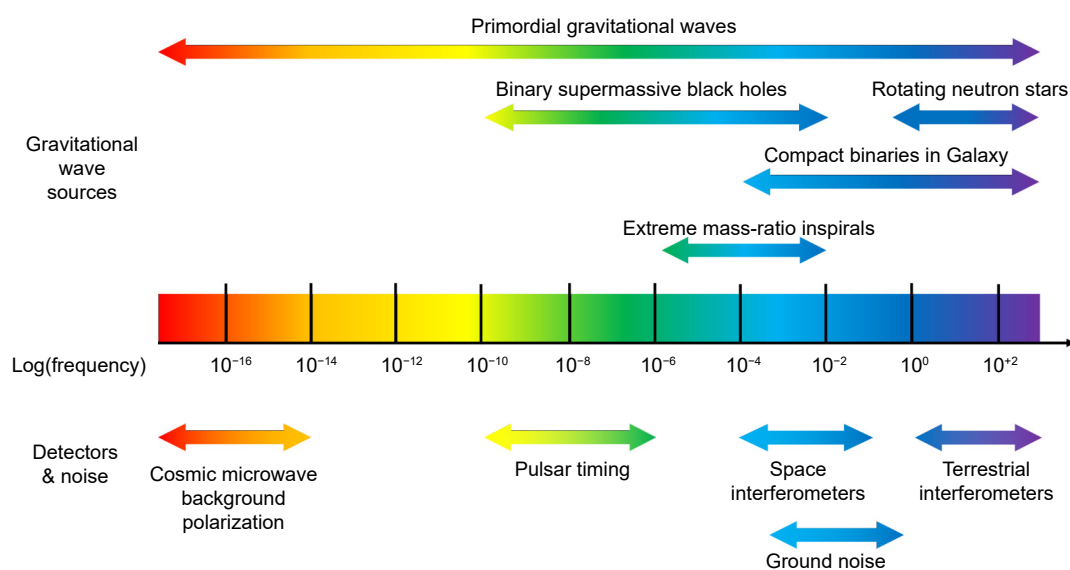


图 1 引力波谱

Fig. 1 Gravitational wave spectrum

首要选择。

因此, 基本确定大型迈克尔逊干涉仪为引力波探测器的基本架构之一, 成本相对较低的地面探测成为技术验证的首要方式。至今已经建成一批臂长千米级用于引力波探测的大型地面迈克尔逊干涉仪, 如 LIGO (laser interferometer gravitational-wave observatory), Virgo 等, 探测频段为几十 Hz 至几千 Hz, 用于探测中子星与致密双星合并等天文事件的引力波信号^[5-7]。2017 年诺贝尔物理学奖就颁发给首次利用地面引力波探测器直接探测到双黑洞合并引力波信号 GW 150914 的三位科学家。然而, 从整个引力波谱的角度来看, 地面探测存在频段局限。在引力波谱低频段 (低于 1 Hz) 有许多极具价值的波源, 如超新星爆发等, 由于波源频率决定探测器尺度, 低频引力波探测器的干涉仪臂长需要达到数万至百万千米, 于地面建造低频引力波探测器并不现实。同时地面干涉仪会受到同处低频段的地震噪声与重力梯度噪声影响, 导致难以进行低频引力波探测^[8]。因此, 学界普遍认为: 对于低频引力波探测需要建造空间引力波天文台, 即在太空环境中搭建臂长为百万千米量级的大型迈克尔逊干涉仪。

目前, 空间引力波探测器普遍设计为三星六链路结构, 由三艘引力波航天器构成等边三角形编队^[9], 其中任意两艘航天器之间构成一套干涉仪。这种结构通过外差干涉的方式测量几百万千米基线上的微小位移, 需达到 pm 量级的精度。每艘航天器内搭载有用于干涉测量的光学平台、惯性基准 (测试质量), 以及两套收发一体的星载望远镜。星载望远镜是空间引力波探测器激光干涉链路的核心元件之一, 由于其在空间引力波探测器结构中的双向光束准直功能, 结合引力波探测所需的超高精度, 对星载望远镜的光程稳定性及后向杂散光提出了极高要求。由于空间环境存在复杂多物理场耦合影响, 为确保星载望远镜进入轨道后能达到预期指标, 需针对上述核心指标研究测试方法与建立测试平台, 模拟在轨工作环境测试指标水平, 分析指标在轨与地面差异。由于引力波探测的超高精度要求, 研究测试方法与搭建测试平台都面临巨大挑战。空间引力波探测星载望远镜自 1998 年起已经进行了多次材料选择与光学设计迭代, 样机加工制造与装配也在逐步推进, 但地面测试技术与方案还比较欠缺。随着星载望远镜设计、加工逐渐完善, 研究地面测试与评估技术已迫在眉睫。

本文介绍了国内外空间引力波探测星载望远镜测试与评估技术发展现状, 重点关注了目前主要在研星载望远镜的光程稳定性与后向杂散光测试现状。首先梳理了国内外主要空间引力波探测星载望远镜研制情况, 简要介绍星载望远镜设计指标、设计发展及样机研制。随后对在研空间引力波探测星载望远镜进行的地面测试技术研究进行介绍, 着重介绍各在研星载望远镜针对光程稳定性及后向杂散光测试研制的测试装置、测试方案、测试平台、目前已有的测试结果及下一步测试计划。

2 空间引力波探测星载望远镜进展概述

目前国内外在研的空间引力波探测探测器主要有欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 与美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 合作开展的 LISA (laser interferometer space antenna) 探测器^[10], 日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 的 DECIGO (DECi-hertz interferometer gravitational-wave observatory) 探测器^[11], 中山大学的天琴探测器^[12]与中国科学院的太极探测器等^[13], 它们的预期轨道如图 2 所示。

当前在研的空间引力波探测器均基于如图 3 所示的三星六链路结构, 星载望远镜在该结构中作为双向光束准直器工作, 因此对其提出的核心指标要求与传统成像望远镜有所不同。首先, 星载望远镜重力卸载与温度梯度会将机械变形与热变形量直接引入光程读数, 结合引力波引起两干涉臂 $10 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ 量级的长度变化, 星载望远镜应当具有 pm 级别的光程稳定性。其他光程噪声还包括了由星载望远镜波像差与指向偏差耦合引入的倾斜-长度 (tilt-to-length, TTL) 噪声, 故要求波像差低于 $\lambda/30$ 或更优, 且指向偏差处于 nrad 级, 从而尽量降低系统总光程噪声^[14]。其次, 由于星载望远镜被要求双向工作, 即发射本地激光给远端航天器的同时, 本地激光出射产生的后向杂散光功率需要基本小于接收光功率, 以天琴为例其望远镜后向杂散光水平需优于 10^{-10} ^[15]。

表 1 中给出了目前国内外在研空间引力波探测星载望远镜的核心指标要求^[14-20], 图 4 展示了空间引力波星载望远镜的主要研究进展^[15-18, 21-36]。

LISA 的星载望远镜于 2010 年由 NASA 的 Livas

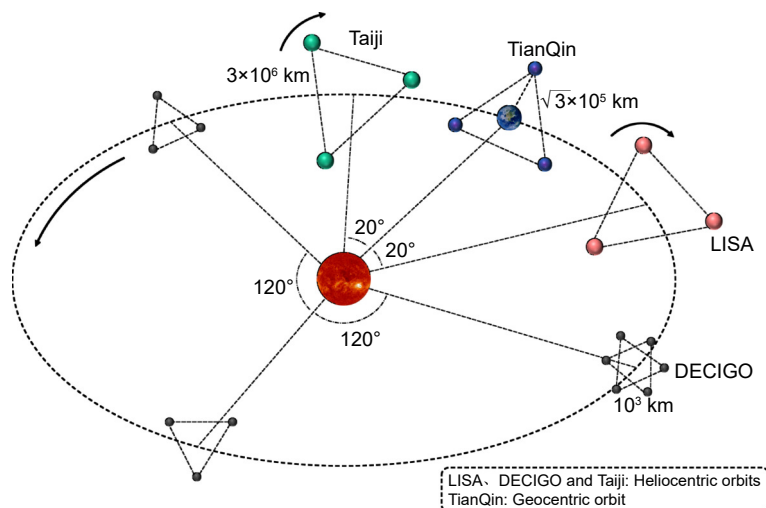
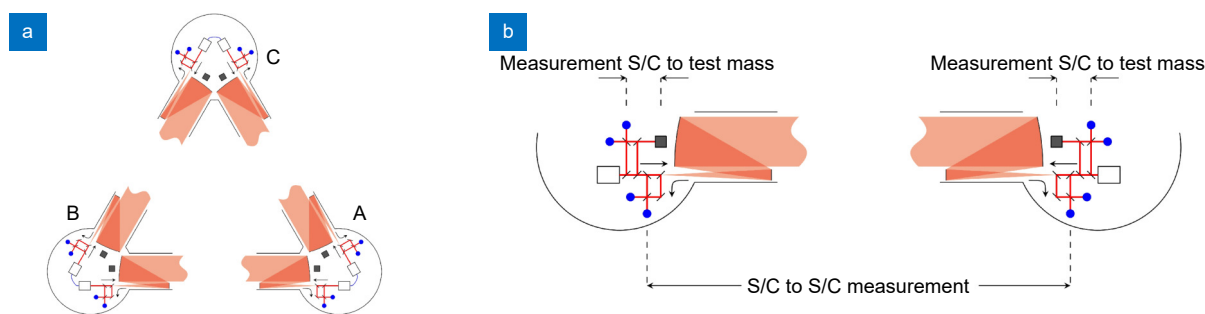


图 2 当前在研空间引力波探测器

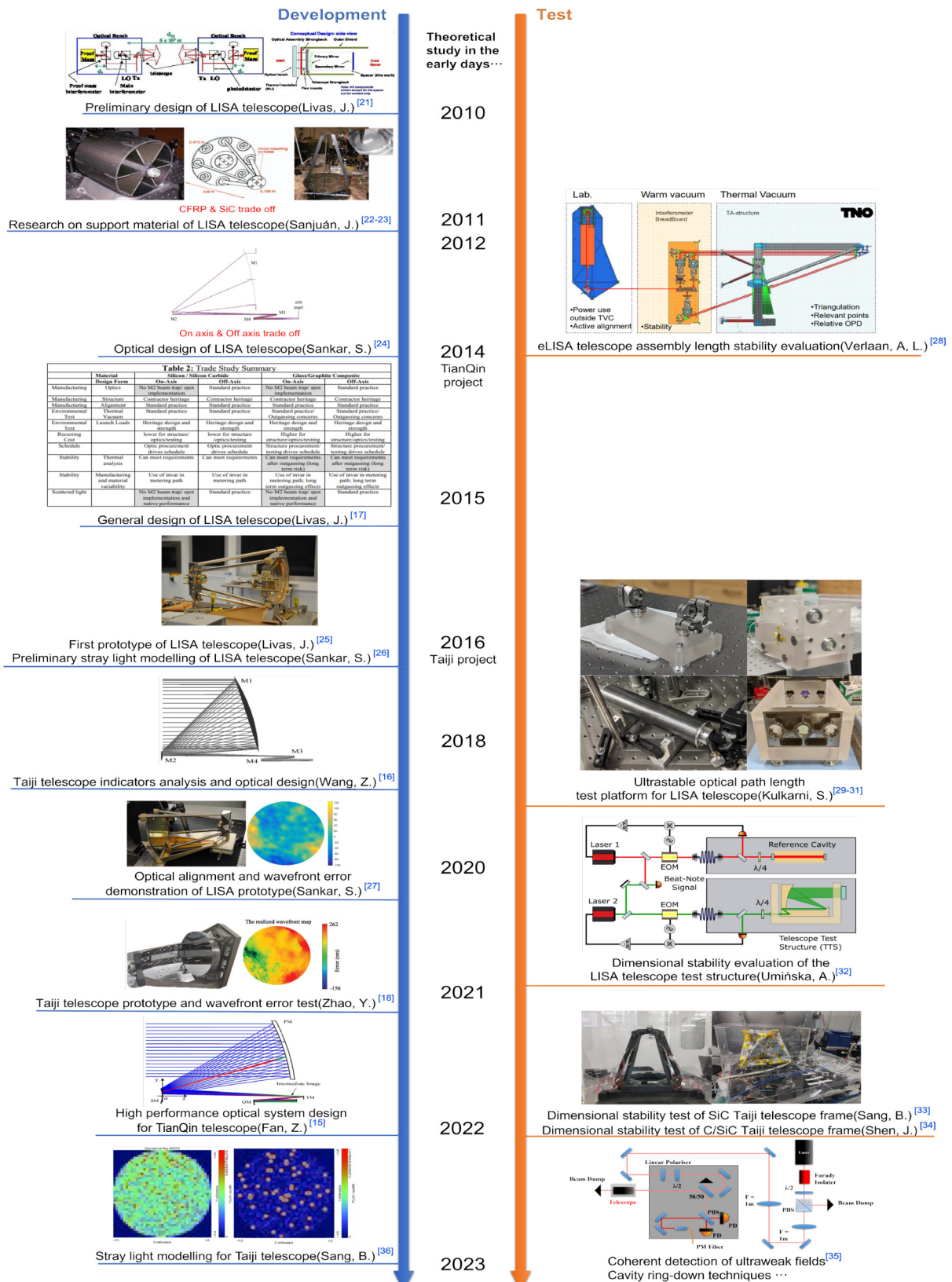
Fig. 2 Developing space gravitational wave detectors

图 3 空间引力波探测器示意图。(a) 探测器三星六链路结构; (b) 两星间激光链路结构^[9]Fig. 3 Schematic diagram of space gravitational wave detectors. (a) Triangular constellation and six links of detectors; (b) Laser links between two spacecraft^[9]表 1 空间引力波探测星载望远镜关键指标^[14-20]Table 1 Key indicators of spaceborne telescopes for space gravitational wave detection^[14-20]

望远镜	口径	光程稳定性要求	杂散光要求	波前误差	指向偏差
LISA	30 cm	$1 \text{ pm/Hz}^{1/2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{3 \text{ mHz}}{f}\right)^4}$	$< 10^{-10}$	$< \lambda/30$	$10 \text{ nrad/Hz}^{1/2}$
天琴	22 cm	$1 \text{ pm/Hz}^{1/2} @ 0.1 \text{ mHz} - 1 \text{ Hz}$	$< 10^{-10}$	$< \lambda/30$	—
太极	20 cm	$1 \text{ pm/Hz}^{1/2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{3 \text{ mHz}}{f}\right)^4}$	$< 10^{-10}$	$< \lambda/30$	—

等进行了光机设计、材料选择、热建模的初步分析。光学设计方面,初步从单个设计的同轴、离轴形式的波前误差灵敏度与同轴公差分析讨论了稳定性问题;支撑结构材料选择与结构设计方面,利用碳化硅(SiC)材料进行了 Quadpod 框架的设计制造并进行了热学仿真,认为 SiC 是 LISA 望远镜支撑材料的可选项^[21]。此外,可能的望远镜支撑材料还有碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)、微晶玻璃、超低膨胀玻璃(ultra-low expansion glass, ULE)

等,它们相较于 SiC 拥有更低的热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE),但分别存在真空放气以及结构强度风险等问题,需要进一步研究。佛罗里达大学的 Sanjuán 等对 SiC 与 CFRP 两种支撑材料是否能够满足 LISA 望远镜尺寸稳定性进行了验证^[22-23]。由室温环境验证结果推断在空间环境内 CFRP 与 SiC 都能满足尺寸稳定性需要,但实验中的 CFRP 空腔放气效应造成望远镜长度收缩远远超过了长期尺寸稳定性要求,因此需要研究不同 CFRP 结构或其它材料。在

图 4 空间引力波探测星载望远镜主要研究进展^[15-18,21-36]Fig. 4 Main research progress of spaceborne telescopes for gravitational wave detection^[15-18,21-36]

之后两年中 Livas 等对望远镜的两个主要方面进行了折衷的考虑: ①光学设计方面采用同轴或离轴设计; ②支撑材料选用 SiC 或碳复合材料的风险分析。其主要对同轴设计的杂散光、离轴设计易受热梯度影响、CFRP 的放气效应等问题进行了权衡。鉴于抑制同轴设计杂散光的研究仍处于初步阶段, 同时 SiC 相较于 CFRP 有更低的长期尺寸稳定性变化, 故采用离轴碳化硅设计的技术风险最小^[17]。此后 Livas 等基于前述讨论设计制造了初代 LISA 原型机, 该原型机采用传统材料制造, 仅用于完成望远镜光学对准与杂散光模型测试, 不适用于空间环境^[25-26]。其基于该原型机进行了望远镜光学对准与对准后波前误差的演示, 并分析了不同频段可能的误差源。对准后原型机波前误差均方根误差为 34.3 nm, 满足 LISA 望远镜 $\lambda/30$ 的要求^[27]。NASA 可能将在未来采用微晶玻璃等其他材料, 迭代更接近空间任务中的原型机, 预期同时进行光程稳定性与后向散射光的验证。目前, LISA 望远镜正在与 L3Harris 进行为期三年的合作开发, 该合作于 2020 年 3 月启动, 包括一个结构热模型与两个工程开发单元的开发^[37]。

国内的空间引力波探测星载望远镜研究起步较晚, 在 2015 年前后天琴与太极计划启动后才开始系统地进行该望远镜的研究^[38]。因此, 天琴与太极望远镜向 LISA 借鉴了指标输入等经验。2018 年王智等对太极望远镜技术要求进行了分析, 完成了太极望远镜初步设计方案, 建立太极望远镜原理样机光机热集成模型并进行了在轨仿真, 在轨前后望远镜系统波前误差由 $\lambda/60$ 变为 $\lambda/50$, 满足远场波前误差 $\lambda/30$ 的要求^[16]。其为进行关键技术的验证制造了太极望远镜样机, 在加工及装配中使得 3 nm 的设计残差恶化至 76 nm ($\lambda/14$)^[18], 但仍可用于部分关键技术验证。2021 年闫勇等以 LISA 望远镜为例分析了国内空间引力波星载望远镜研制的技术难点, 确定国内该望远镜的光学设计方案以及材料、加工、装调要求^[39]。华中科技大学的 Fan 等基于初级像差理论对天琴要求超低波像差、超稳结构和超低杂散光的四镜系统进行了初步设计, 该设计在次镜与三镜采用了场光阑遮光, 使得能够获得超低的杂散光水平。该设计优化后视场内的波前误差小于 $\lambda/300$, 杂散光水平低于 10^{-10} , 满足天琴的需求^[15]。为优化望远镜的 TTL 耦合噪声问题, 目前该团队正在基于光瞳像差理论对望远镜 TTL 噪声水平进行表征, 从而对该设计进行升级; 支撑结构设计方

面, 针对天琴望远镜在太空环境中受到的复杂多物理场耦合影响, 目前已出现通过设计 CFRP 材料铺层改变材料 CTE 的方案, 相对其它可能材料如 SiC 及 Invar 的热变形显著降低, 特定优化设计下热变形分别为前述材料的 11.50 % 与 6.42 %, 有望解决桁架支撑结构热变形问题^[40]。

可见, 空间引力波探测星载望远镜的方案确定、光机设计^[41]、样机加工及装配等方面的工作已经相对完善, 开始进行光机设计升级、关键技术验证等工作。

3 空间引力波探测星载望远镜测试与评估技术

在空间引力波探测星载望远镜发射入轨前对关键指标进行地面测试是保证其在轨性能的关键。空间引力波探测星载望远镜核心指标为光程稳定性与后向杂散光, 其他星载望远镜系统误差源对上述两指标的耦合影响如 TTL 噪声等最终也计入总光程噪声。理论分析中已经进行了许多望远镜误差源对相位 (光程) 测量的耦合影响, 各望远镜研制单位在上述理论工作方面进行了许多研究, 如远场相位噪声及 TTL 噪声与收发望远镜波前误差与指向抖动间的数值建模与仿真^[18,42-45], 杂散光的随机相位变化对远场相位噪声的影响等^[46]。实际望远镜地面性能测试与评估主要直接针对光程稳定性与后向杂散光水平展开, 并最终将在如图 5 所示的地面集成测试平台中进行测试。

3.1 空间引力波探测星载望远镜光程稳定性测试进展

3.1.1 国外空间引力波探测星载望远镜光程稳定性测试进展

对于 LISA 望远镜, 荷兰国家应用科学研究院 TNO (Netherlands Organization for Applied Scientific Research)、NASA 分别与其合作机构开展了测试望远镜光程稳定性的工作。TNO 与 Airbus DS 合作进行的 eLISA 望远镜光学组件稳定性测试项目开展的时间较早, 是早期对 LISA 技术水平能否达到要求的评估工作。NASA 与佛罗里达大学合作进行的 LISA 望远镜光程稳定性测试研究则相对完善, 以期对接 LISA 样机。

由 TNO 与 Airbus DS 在 2012 年合作开展的 LISA 望远镜光学组件稳定性测试工作是 LISA CTP (验证所有 LISA 所需技术水平的项目) 的一部分。

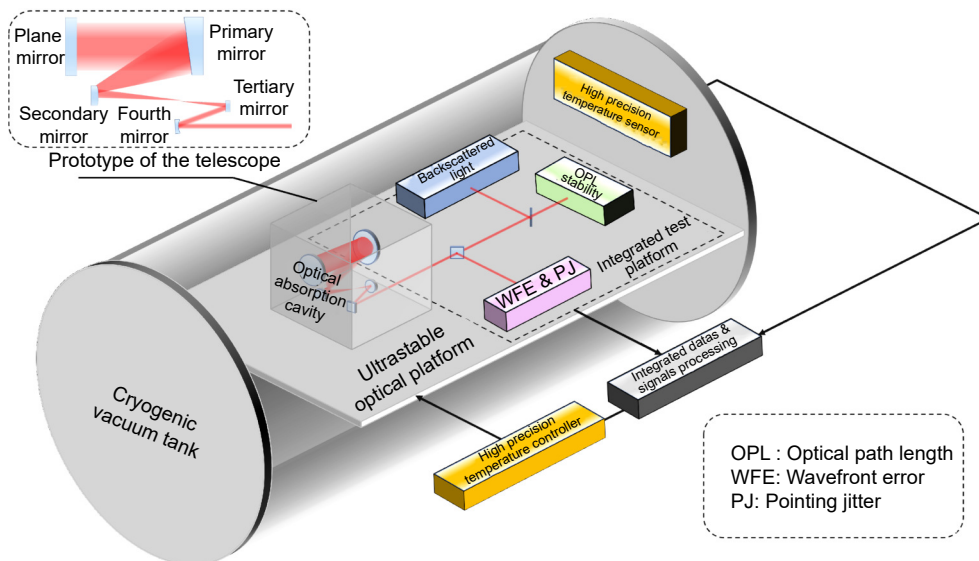
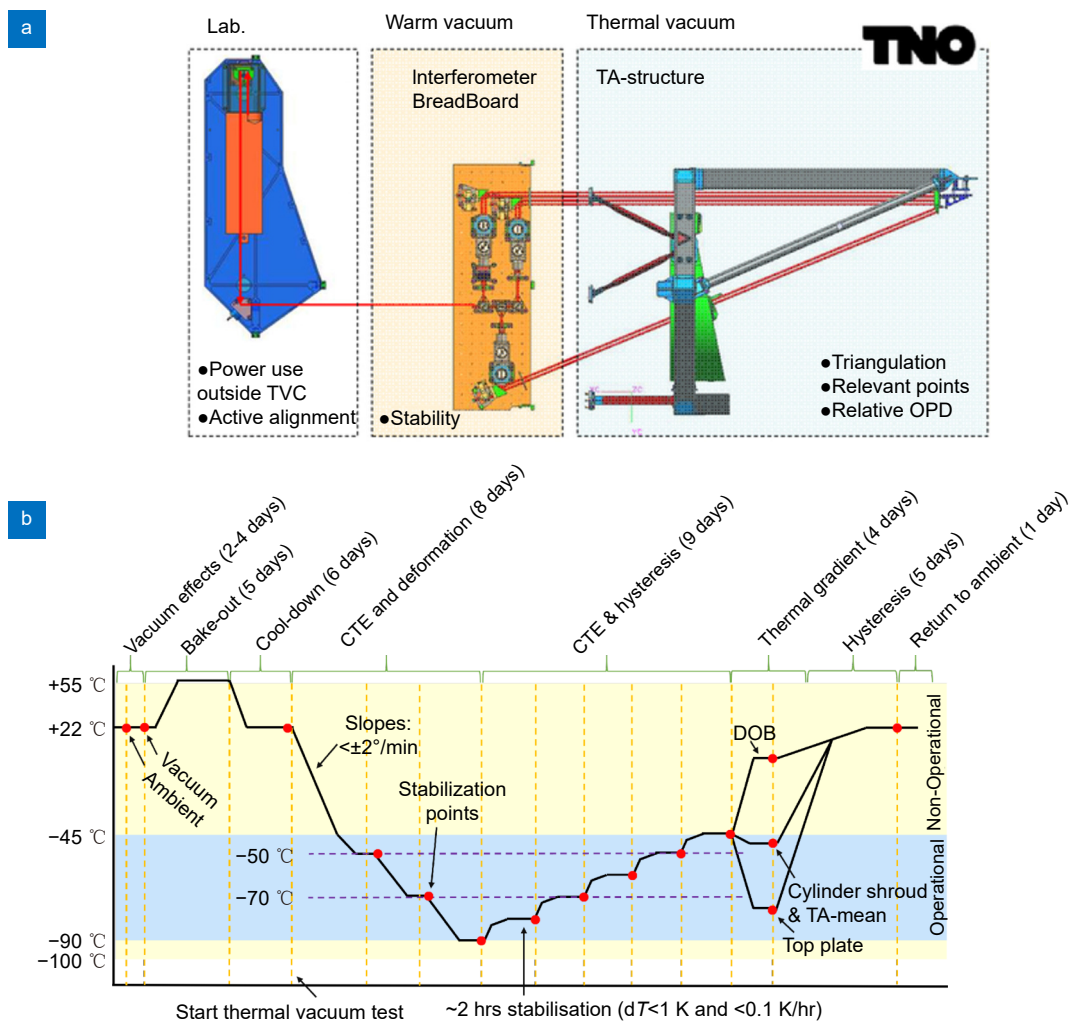


图 5 空间引力波探测星载望远镜地面集成测试平台示意图

Fig. 5 Space gravitational wave detection spaceborne telescope ground integrated test platform

图 6 Verlaan 等的 LISA 望远镜组件尺寸稳定性测试。(a) 测试装置 TA 长度测量平台原理图; (b) 热真空试验方案^[28,47]Fig. 6 LISA telescope assembly dimensional stability test by Verlaan et al. (a) Schematic of TA's length metrology platform; (b) Thermal vacuum test scheme^[28,47]

Verlaan 等设计制造了一个如图 6(a) 所示的测试平台, 采用三个位移干涉仪直接监测基于 CFRP 的望远镜组件构成的测试装置 (telescope assembly, TA) 中 M1 与 M2 之间的位移与倾斜, 从而测量并计算 TA 的各尺寸变化^[28], 并且通过改变热真空腔中的温度, 来测量 TA 的 CTE 与热梯度。此外, 由于该测试工作望远镜组件基于 CFRP 材料, 还需要验证 TA 在冷却至 -90 °C 时、太空放气期间与重力卸载时其变形量能否被准确预测。

Verlaan 等对望远镜组件尺寸稳定性共进行了三次实验, 热真空试验方案如图 6(b) 所示。第一次实验中主要从 TA 的变形量和 CTE 的角度进行望远镜组件热学性质的评估, 并根据测试结果对 TA 结构进行微调。第二次试验是在对 TA 进行微调后再进行测试, 第三次实验是第二次实验完成后直接进行的部分重复试验, 以验证可重复性。

实验结果如表 2 所示: ①在所有试验中, 该基于 CFRP 的望远镜组件 CTE 都可以满足要求。②M1 与 M2 间的旋转很难控制, 在对 TA 结构进行微调之后从 134.4 μrad 减小到 -57.3 μrad , 结果表明微调存在超调。③第一次试验中没有达到 2 μm 的横向位移目标, 但在对 TA 的微调中没有补偿该性能。该性能的补偿只能从望远镜的设计入手, 故在试验过程中认为该性能保持稳定^[47]。通过在其望远镜尺寸稳定性测

试装置上进行的实验, Verlaan 等初步取得了实现 eLISA 高稳定性结构的良好预期。

佛罗里达大学的 Sanjuán、Kulkarni、Umińska、Fulda 等于 2020 至 2022 年间从地面测试平台与腔体材料选择与尺寸稳定性验证^[29]、测试部件结构设计^[30]、超稳测试平台搭建^[31]、地面测试设备尺寸稳定性验证^[32]等方面逐步开展对接 LISA 望远镜样机的光程稳定性测试方法研究。其测试平台基于 PDH (Pound-Drever-Hall) 激光稳频技术、外差干涉测量原理, 如图 7(a) 所示。将参考腔、TTS 置于热控制的真空腔中, 分别将两个 1064 nm 激光器锁定在其对应腔内, 经过两光学腔反射后的激光在干涉平台上进行外差干涉测量。两信号的拍频信号频率与两光学腔的相对长度差异成比例, 从而测试望远镜在预设热环境内的光程变化。该团队目前已完成了测试装置 (TTS) 设计并制造了几种测试装置样机 (proto-TTS), 基于 ULE 的 proto-TTS 如图 7(b) 所示, 其 OptoCAD 模型如图 8(a) 所示。

TTS 是 LISA 望远镜样机的光程稳定性测试装置, 整套系统测试结果与 LISA 样机的研制进度相关, 目前仍还未见与 LISA 样机的联调测试结果。如图 8(b) 所示, 当前佛罗里达大学开发的 proto-TTS 长度噪声的振幅谱密度经测试已在 LISA 望远镜要求之下, 预计 TTS 将符合 LISA 望远镜对超高精度测试装置的要求。此外该团队正在为即将进行的 LISA 望远镜地面

表 2 CFRP 望远镜组件结构热机械要求与测试性能^[47]

Table 2 CFRP telescope assembly structure thermo-mechanical requirements and tested performances^[47]

Performance	Requirement	1 st test	2 nd test	2 nd test re-run
CTE over 100 K/(1/K)	$<10^{-7}$	9.8×10^{-8}	5.7×10^{-8}	6.9×10^{-8}
M1-M2 Longitudinal displacement dz/ μm	<5	-7.6	-8.5	-7.4
M1-M2 Lateral displacement dy/ μm	<2 (goal)	-25.7	-26.3	-26.2
M1-M2 Rotation dRx/ μrad	<20	134.4	-57.3	-47.2

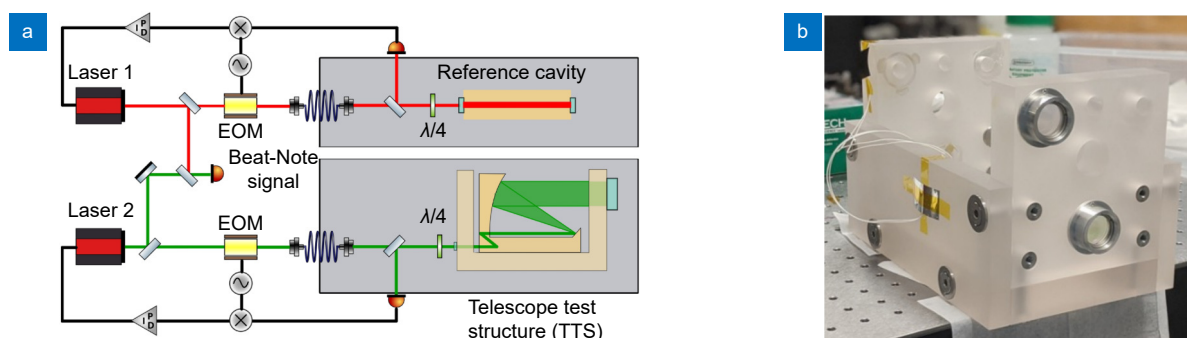


图 7 佛罗里达大学基于外差干涉测量的 LISA 望远镜光程稳定性测试。(a) 光程测试平台原理图; (b) ULE 原型测试装置^[32]

Fig. 7 Optical path length stability test of LISA telescope based on heterodyne interferometry at the University of Florida.

(a) Schematic of optical path length stability test platform; (b) ULE proto-TTS^[32]

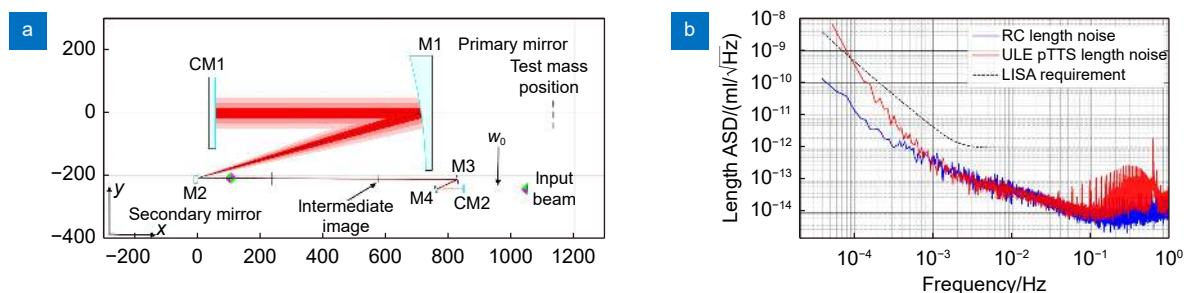


图 8 测试光学腔与 ULE 光学腔尺寸稳定性测试结果。(a) 测试光学腔 OptoCAD 模型;
(b) 参考腔与 ULE 测试腔长度噪声测试结果与 LISA 要求^[32]

Fig. 8 TTS and dimension test result of ULE pTTS. (a) OptoCAD model of TTS; (b) Length noise test results of reference cavity and ULE pTTS and LISA requirement^[32]

验证开发和测试传感系统, 并且关于 LISA 望远镜其它关键指标的地面测试设备开发正在进行中, 以期后续对接 LISA 望远镜样机。

此外, 可通过对望远镜结构进行处理实现在轨光程稳定性监测。Weise 等^[48]提出利用望远镜一部分出射光与本地激光进行外差干涉测量以监测望远镜内部的长度变化, 从而考虑误差剔除方案。Jersey 等^[49]提出在望远镜结构上安装三个 FP 腔以监测望远镜的尺

寸变化, 必要时可与望远镜一同发射并进行在轨监测。

3.1.2 国内空间引力波探测星载望远镜光程稳定性测试现状

对于太极望远镜, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所开展了星载望远镜结构尺寸稳定性测试。2022 年 Sang 等将一种太极望远镜碳化硅结构框架作为测试对象开展了尺寸稳定性研究^[33]。由于望远镜光机结构引入的光程噪声主要来源于主次镜之间的距离

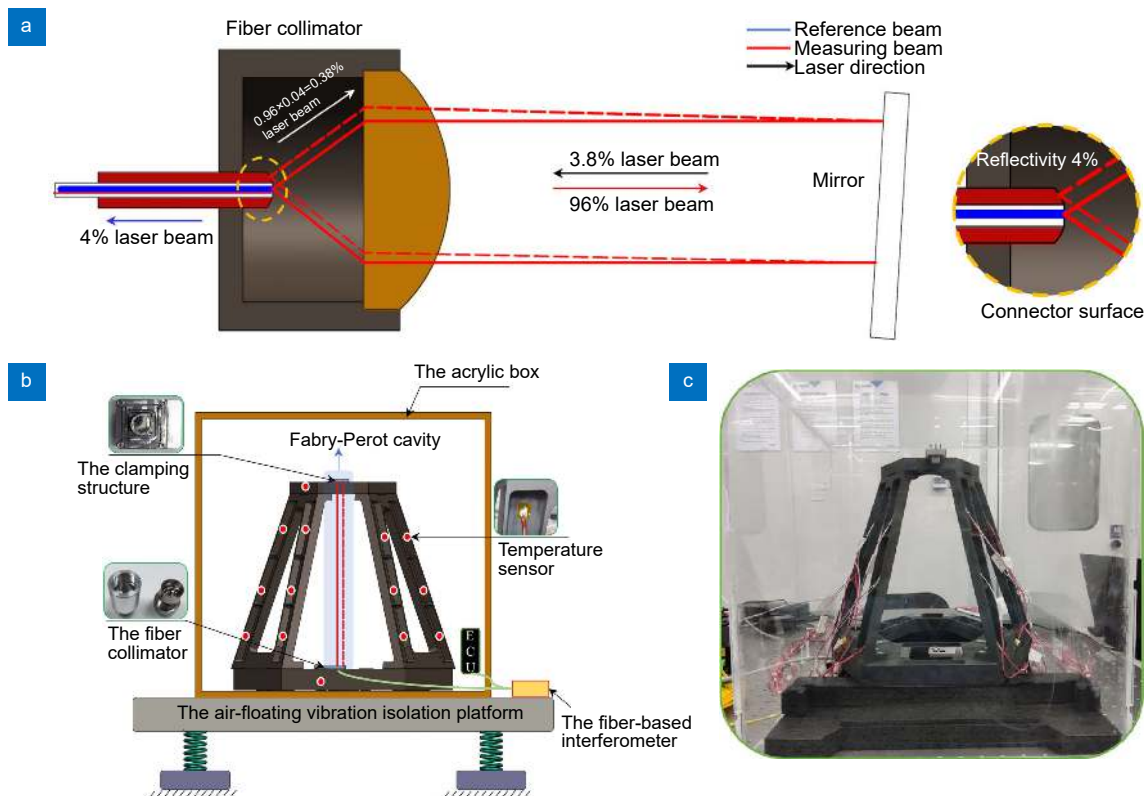


图 9 Sang 等基于光纤干涉仪的太极望远镜 SiC 框架稳定性测试装置。

(a) 光纤干涉仪位移测量原理; (b) 测试平台示意图; (c) 测试平台实物图^[33]

Fig. 9 Stability test of SiC frame of Taiji telescope based on fiber interferometer by Sang et al. (a) Principle of stability testing with fiber optic interferometer; (b) Schematic of the frame stability test platform; (c) Test platform pictures^[33]

变化, 而框架结构变化是距离变化的主因, 故采用框架结构稳定性表征望远镜光程稳定性, 并利用光纤干涉仪测量框架尺寸的变化。光纤干涉仪测量位移的原理如图 9(a) 所示, 大气环境中光纤干涉仪相较于迈克尔逊干涉仪更加精确, 其利用光纤干涉仪搭建了一个基于零差干涉测量位移的光路, 并在室温近似均匀温度场下验证了该测试对象的尺寸稳定性。其测试方法与测试平台搭建如图 9(b-c) 所示, 将测试对象置于气浮隔振平台上, 在框架上安装温度传感器与折射率补偿装置并置于亚克力箱中, 以消除气流、湿度、温度等影响折射率的因素, 以免影响位移测量精度。

其测试结果如图 10 所示, 室温环境下框架 CTE 测试 results 与制造商提供的 CTE 接近, 验证了测试方法的有效性并测量装置尺寸稳定性。在温度稳定性优

于 $0.0011\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Hz}^{1/2}$ 时, 尺寸稳定性可以达到 $300\text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}@f>10\text{ mHz}$ 。其次, 数值模拟的空间环境中, 温度稳定性优于 $6.5\times10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Hz}^{1/2}@f=0.1\text{ mHz}$, 此时对在轨尺寸稳定性的预测为 $6.49\text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}@f=0.1\text{ mHz}$, 与太极望远镜的要求 $1\text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}\times\sqrt{1+(3\text{ mHz}/f)^4}$ 比较接近。后续该团队将进一步降低 SiC 材料的 CTE 并完成望远镜光学器件处理, 从而直接测量光程稳定性。

同在 2022 年 Shen 等开展了与 Sang 等类似的测试太极望远镜支撑结构稳定性的工作^[34], 不同之处是, 其框架材料是基于一种尚未在空间引力波探测星载望远镜中进行系统研究的 C/SiC 材料; 并且采用将加热板粘贴于框架上进行主动加热的方式对框架进行热处理, 从而可以对框架的温度梯度热膨胀性能进行研究, 其对框架进行的热处理如图 11(a) 所示。Shen 等设计

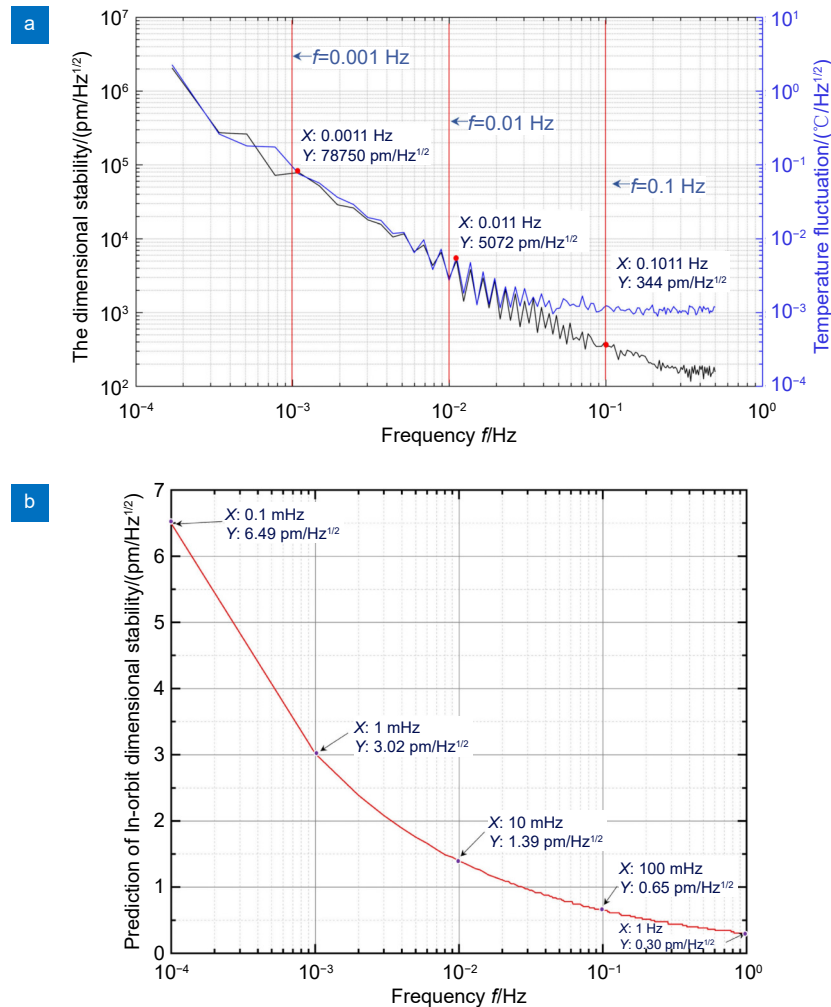


图 10 SiC 框架尺寸稳定性测试与数值模拟结果。(a) 室温环境下测试得框架尺寸稳定性功率谱;

(b) 数值模拟在轨环境下框架尺寸稳定性测试功率谱^[33]

Fig. 10 SiC frame dimensional stability test and numerical simulation results. (a) Power spectrum of room temperature environment test;

(b) Power spectrum of in-orbit numerical simulation^[33]

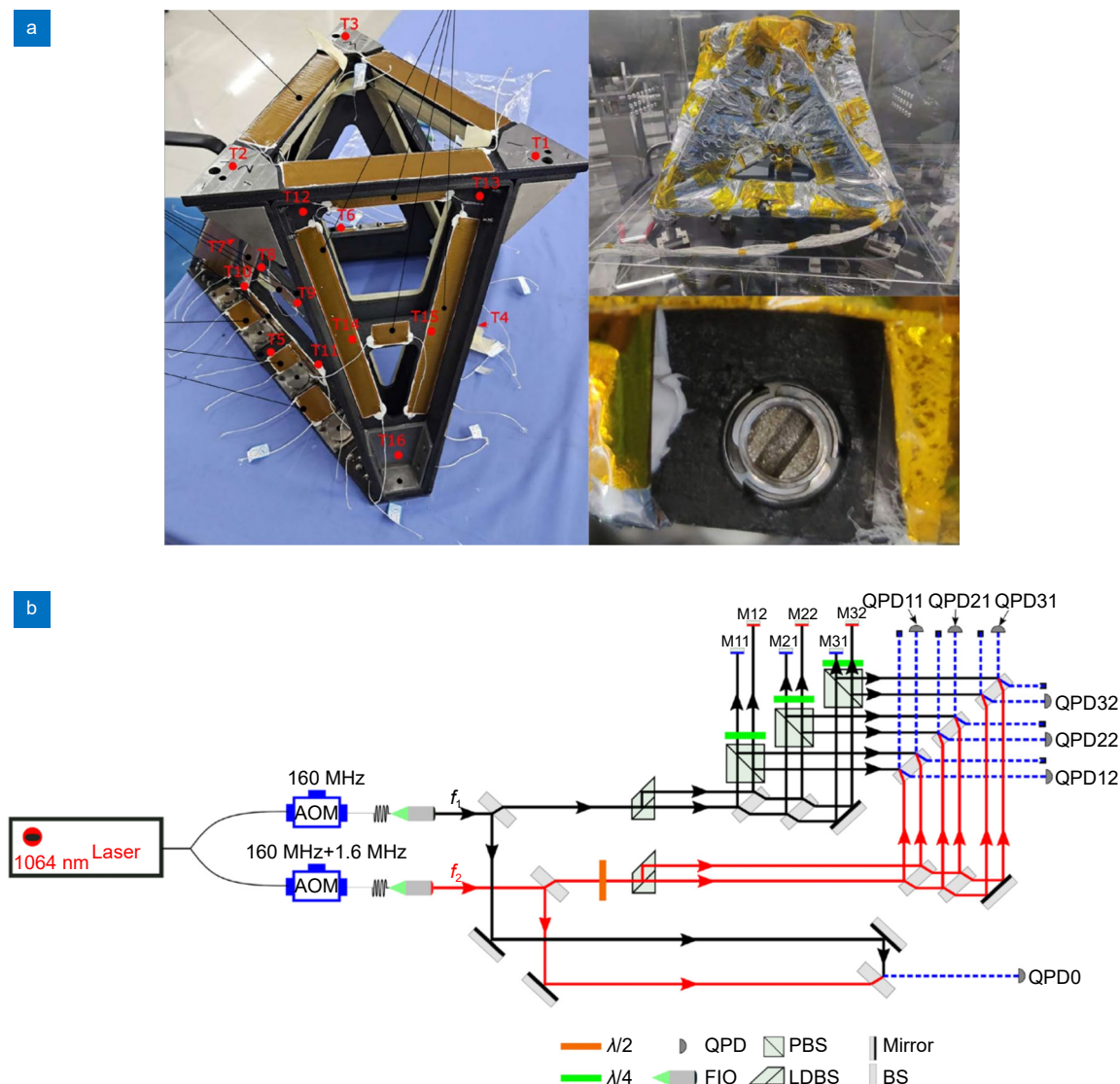


图 11 Shen 等太极望远镜 C/SiC 支撑框架尺寸热稳定性测试。(a) 测试装置热处理; (b) 多通道外差干涉仪测试平台^[34]
 Fig. 11 Dimensional stability test of Taiji telescope's C/SiC support frame by Shen et al. (a) The thermal design of the test structure;
 (b) The multi-channel heterodyne interferometer test platform^[34]

搭建了一个多通道高灵敏度对称外差干涉测量平台, 测量 C/SiC 结构框架的热膨胀系数, 如图 11(b) 所示。由于其使用的 C/SiC 板轴向 CTE 与横向 CTE 并不相同, 均匀热场实验与温度梯度实验数据正交后得到该复合材料板的轴向 CTE 与横向 CTE 分别为: $-8.3 \times 10^{-7} / \text{K}$ 和 $3.3 \times 10^{-5} / \text{K}$, 因此 C/SiC 材料的工艺还需要进一步研究。同时测试平台还存在一些不足: 由于干涉仪结构较大, 干涉光路较长, 且测试环境并未采用真空处理, 精度不够理想, 需要进行改进以提高干涉测量精度, 从而获得 pm 级望远镜稳定性干涉测量系统。

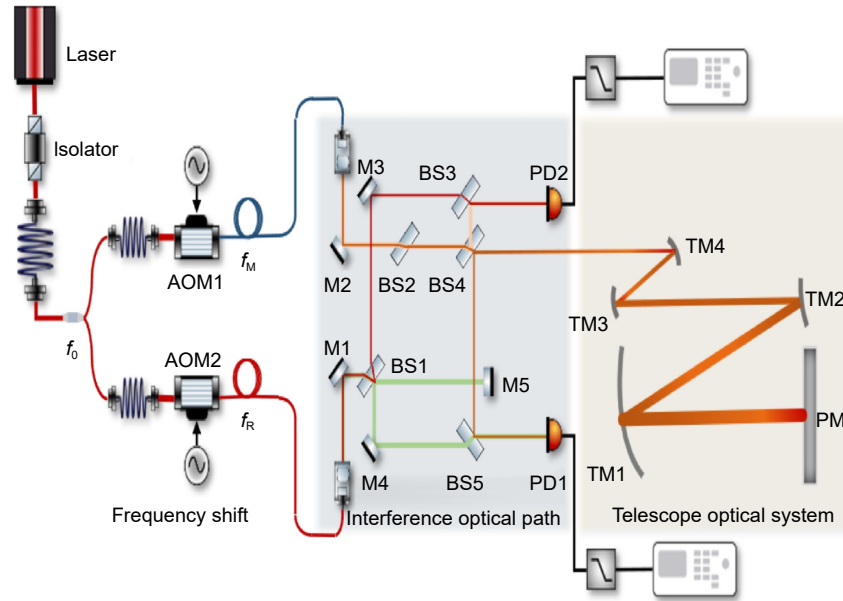
中山大学的赵凯等基于外差干涉原理设计了高共模噪声抑制干涉测试方案并建立了光程噪声模型^[50],

测试方案原理图如图 12 所示。其基于 nm 级精度器件搭建了望远镜前端干涉系统用于验证方案可行性与模型准确性, 实验测得的光程噪声水平为 $3 \text{ nm/Hz}^{1/2}$, 与理论模型推导得出的 $7.319 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ 基本一致, 验证了该光程噪声理论模型的正确性。因此在环境及仪器满足空间引力波探测精度要求时, 该方案有望实现空间引力波探测星载望远镜的光程稳定性测量。

3.2 空间引力波探测星载望远镜后向杂散光测试与评估现状

3.2.1 国外空间引力波探测星载望远镜后向杂散光测试与评估现状

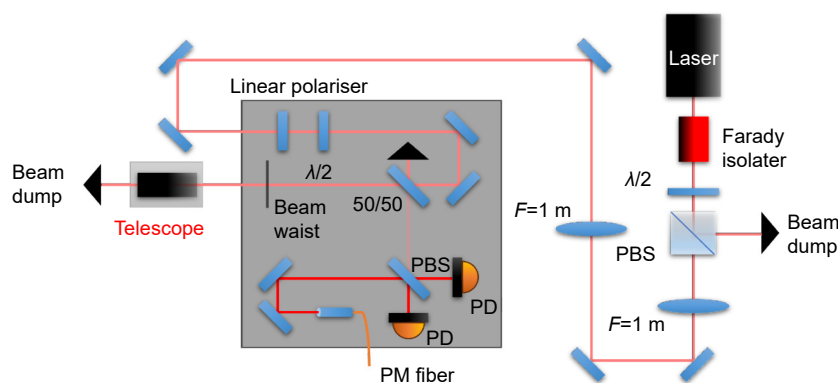
LISA 望远镜在 2012 年由佛罗里达大学的

图 12 空间引力波探测星载望远镜光程稳定性测量方案原理图^[50]Fig. 12 Schematic of the optical path length stability measurement scheme for the space gravitational wave detection spaceborne telescope^[50]

Spector 等从引入相位噪声的角度计算同轴设计允许的背向散射光水平, 同轴设计的后向杂散光功率需要小于 $5.6 \times 10^{-9} \text{ W}$ 才能满足 LISA 相位噪声要求^[51]。由于同轴设计难以解决杂散光问题, 如水仙花效应等, 此后 LISA 逐渐以离轴设计为主流。2016 年 NASA 的 Sankar 等发布了用于测试杂散光水平的初代原型望远镜^[25], 用于验证他们在 2015 年进行的 LISA 杂散光数值模型^[52], 其杂散光模型基于 Mie 散射模型和 Harvey-Shack 散射模型分别处理颗粒污染和反射镜表面误差, 并在 FRED 中计算总后向散射。在样机杂散光测试中 Sankar 表示正在进行比较数值模拟与测试散射光的工作, 但并未提到样机杂散光测试的具体结果。

LISA 望远镜后向杂散光的地面验证同样由佛罗里达大学展开相关工作。在 2020 年 4 月的 APS April Meeting 的报告上, Umińska 等汇报了 LISA 望远镜的后向杂散光测试方法与进展^[35], 其仍计划基于外差干涉测量的方法测试后向杂散光噪声对于干涉仪相位测量的影响, 并设计了如图 13 所示的测试方案。相较于将该测试方法应用于 LISA 望远镜后向杂散光测试, 他们更早地将这种测试方法应用到了 ALPS(Any Light Particle Search) II 的弱场相干检测中, 已经能够成功检测到电场强度相当于 10^{-2} 光子/秒的信号^[53], 并希望借助这种方法检测 LISA 望远镜的后向散射光。

此外, Umińska 等汇报了佛罗里达大学关于 LISA 望远镜杂散光测试的进展与下一步计划: ①基

图 13 基于外差干涉测量的相干杂散光检测原理图^[35]Fig. 13 Schematic of the coherent stray light detection based on the heterodyne interferometry^[35]

于 M3、M4 为后向散射主要来源的结论, 设计了 M3-M4 反射镜的小型模型, 用于杂散光测试。②搭建了部分实验环境。③设计和建造测试光学平台。

3.2.2 国内空间引力波望远镜后向杂散光测试与评估现状

国内的空间引力波探测近几年来开始出现针对天琴与太极望远镜杂散光分析与建模的研究, 目前主要处于理论与仿真阶段^[54]。

对于天琴望远镜的杂散光评估, 2023 年 Yan 等基于望远镜镜面的双向反射分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 构建了一个综合考虑粗糙度、镜面污染、表面缺陷的统一物理模型, 用于评估天琴望远镜的杂散光水平^[20], 并可对耦合相干杂散光功率进行一个近似的估计。该模型从 BRDF 与散射源性质推导各散射源的 BRDF 值, 从而计算光学系统各反射镜的后向散射光功率, 该理论可通用于其它精密光学系统, 并已经在天琴望远镜的光学系统设计上验证了其有效性。

太极方面在 2023 年由长春光机所的 Sang 等对太极望远镜的后向杂散光进行了详细的分析, 将后向散射光对相位噪声的贡献进行了详细的推导, 用点源透射率 (point source transmittance, PST) 代替双向散射分布函数表征光学系统散射强度, 得到了光学系统点源透射率与相位噪声的直接关系^[36]。Sang 等人的理论分析得到了关于太极望远镜杂散光的重要结论: ①当光学系统 PST 小于 4×10^{-10} 时, 后向散射引入的相位噪声小于 $1 \text{ pm/Hz}^{1/2}$; ②三镜和四镜为主要的杂散光来源, 约占 31.02% 与 67.22%, 而主镜只占 0.03%。理论和仿真都表明由于主镜的杂散光贡献较小, 微流星体对主镜的损伤不会对杂散光水平造成明显影响; ③受限于 PST 为 4×10^{-10} , 得到此限制下的光学系统粗糙度的最佳组合: 从主镜到四镜粗糙度依次 20 Å, 4 Å, 1 Å, 1 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$); ④粒子污染的分析结果表明, 望远镜的清洁度需要优于 300。

此外, 徐节速等也针对于激光引力波望远镜镜面杂散光测试方法进行了改进^[55]。其基于元件各向同性及杂散光模型对称性, 优化了重构镜面 BRDF 参数的方法, 使得在子午面内测量一维数据即可重构 BRDF 参数。

4 总结与展望

目前关于空间引力波探测星载望远镜的测试与评

估研究主要聚焦在 LISA、天琴、太极望远镜的研制及其合作单位, 如佛罗里达大学、NASA、ESA、中国科学院长春光机所等。本文在梳理各空间引力波探测计划在研望远镜研究现状的同时, 详细介绍了针对这些望远镜研发的测试方法与技术, 及当前各望远镜的测试现状与下一步测试计划。

综合国内外空间引力波探测星载望远镜测试与评估发展现状, 发现目前在空间引力波探测星载望远镜的测试评估方面仍存在许多不足: ①稳定性测试方面测试参数仍不全面, 缺少望远镜部件、结构的集成稳定性测试。②杂散光测试方面, 当前仍缺乏测试方法及测试标准。③总体系统方面还缺少星载望远镜与干涉仪光学平台的集成测试。

突破空间引力波探测星载望远镜测试与评估技术, 是我国空间引力波探测计划中不可或缺的一环。因为它决定着空间引力波探测星载望远镜的性能, 进而影响空间引力波探测计划的实施。此外, 通过突破新检测技术研究瓶颈与传统光学精密检测技术在星载望远镜测试中的创新应用, 如通过光腔衰荡方法精准测量双向角分辨散射特性, 实现高精度杂散光测量与评估^[56-57], 可推动我国超精密光学仪器测试技术的发展。利用在空间引力波探测星载望远镜测试中积累的技术与经验, 能够为空间光学、精密探测等领域的一些问题提供技术支持与工程经验。这些努力使宇宙学家可以基于空间引力波探测得到的数据完善对天体活动、宇宙起源的理解, 促进宇宙学的进一步发展。

利益冲突: 饶长辉是期刊的编委, 除此之外, 所有作者声明无利益冲突。

参考文献

- [1] The eLISA Consortium. The gravitational universe[Z]. arXiv: 1305.5720, 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1305.5720>.
- [2] Hogan C J. Gravitational wave sources from new physics[J]. *AIP Conf Proc*, 2006, **873**(1): 30-40.
- [3] Amaro-Seoane P, Gair J R, Freitag M, et al. Intermediate and extreme mass-ratio inspirals —astrophysics, science applications and detection using LISA[J]. *Class Quantum Grav*, 2007, **24**(17): R113-R169.
- [4] Cheng J Q, Yang D H. Progress in gravitational wave detection[J]. *Progr Astron*, 2005, **23**(3): 195-204.
程景全, 杨德华. 引力波和引力波望远镜的发展[J]. *天文学进展*, 2005, **23**(3): 195-204.
- [5] Abramovici A, Althouse W E, Drever R W P, et al. LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory[J]. *Science*, 1992, **256**(5055): 325-333.
- [6] The LIGO Scientific Collaboration, Aasi J, Abbott B P, et al.

- Advanced LIGO[J]. *Class Quantum Grav*, 2015, **32**(7): 074001.
- [7] Acernese F, Agathos M, Agatsuma K, et al. Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector[J]. *Class Quantum Grav*, 2014, **32**(2): 024001.
 - [8] Wanner G. Complex optical systems in space: numerical modelling of the heterodyne interferometry of LISA Pathfinder and LISA[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, 2010: 1–106. <https://doi.org/10.15488/7550>.
 - [9] Jennrich O. LISA technology and instrumentation[J]. *Class Quantum Grav*, 2009, **26**(15): 153001.
 - [10] Bayle J B, Bonga B, Caprini C, et al. Overview and progress on the Laser Interferometer Space Antenna mission[J]. *Nat Astron*, 2022, **6**(12): 1334–1338.
 - [11] Kawamura S, Ando M, Seto N, et al. Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO[J]. *Progr Theoret Exp Phys*, 2021, **2021**(5): 05A105.
 - [12] Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Class Quantum Grav*, 2016, **33**(3): 035010.
 - [13] Luo Z R, Guo Z K, Jin G, et al. A brief analysis to Taiji: Science and technology[J]. *Results Phys*, 2020, **16**: 102918.
 - [14] Sanz I E, Heske A, Livas J C. A telescope for LISA—the laser interferometer space antenna[J]. *Adv Opt Technol*, 2018, **7**(6): 395–400.
 - [15] Fan Z C, Zhao L J, Cao S Y, et al. High performance telescope system design for the TianQin project[J]. *Class Quantum Grav*, 2022, **39**(19): 195017.
 - [16] Wang Z, Sha W, Chen Z, et al. Preliminary design and analysis of telescope for space gravitational wave detection[J]. *Chin Opt*, 2018, **11**(1): 132–151.
王智, 沙巍, 陈哲, 等. 空间引力波探测望远镜初步设计与分析[J]. *中国光学*, 2018, **11**(1): 132–151.
 - [17] Livas J, Sankar S. Optical telescope design study results[J]. *J Phys Conf Ser*, 2015, **610**(1): 012029.
 - [18] Zhao Y, Shen J, Fang C, et al. Far-field optical path noise coupled with the pointing jitter in the space measurement of gravitational waves[J]. *Appl Opt*, 2021, **60**(2): 438–444.
 - [19] Xiao Q, Duan H Z, Ming M, et al. The analysis of the far-field phase and the tilt-to-length error contribution in space-based laser interferometry[J]. *Class Quantum Grav*, 2023, **40**(6): 065009.
 - [20] Yan H Y, Chen Q F, Wang H, et al. Scattering model for stray light calculations in laser interferometry application to TianQin science interferometer[J]. *J Phys Conf Ser*, 2023, **2464**(1): 012008.
 - [21] Livas J, Arsenovic P, Catellucci K, et al. Preliminary LISA telescope spacer design[C]//38th COSPAR Scientific Assembly, 2010.
 - [22] Sanjuán J, Preston A, Korytov D, et al. Carbon fiber reinforced polymer dimensional stability investigations for use on the laser interferometer space antenna mission telescope[J]. *Rev Sci Instrum*, 2011, **82**(12): 124501.
 - [23] Sanjuán J, Korytov D, Mueller G, et al. Note: Silicon carbide telescope dimensional stability for space-based gravitational wave detectors[J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, **83**(11): 116107.
 - [24] Sankar S R, Livas J C. Optical telescope design for a space-based gravitational-wave mission[J]. *Proc SPIE*, 2014, **9143**: 914314.
 - [25] Livas J C, Sankar S R. Optical telescope system-level design considerations for a space-based gravitational wave mission[J]. *Proc SPIE*, 2016, **9904**: 99041K.
 - [26] Sankar S, Livas J. Testing and characterization of a prototype telescope for the evolved Laser Interferometer Space Antenna (eLISA)[J]. *Proc SPIE*, 2016, **9904**: 99045A.
 - [27] Sankar S R, Livas J. Optical alignment and wavefront error demonstration of a prototype LISA telescope[J]. *Class Quantum Grav*, 2020, **37**(6): 065005.
 - [28] Verlaan A L, Hogenhuis H, Pijnenburg J, et al. LISA telescope assembly optical stability characterization for ESA[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10564**: 105640K.
 - [29] Kulkarni S, Umińska A A, Sanjuán J, et al. Characterization of dimensional stability for materials used in ultra-stable structures[J]. *Proc SPIE*, 2021, **11820**: 1182008.
 - [30] Kulkarni S, Umińska A, Gleason J, et al. Ultrastable optical components using adjustable commercial mirror mounts anchored in a ULE spacer[J]. *Appl Opt*, 2020, **59**(23): 6999–7003.
 - [31] Kulkarni S. Technology development for ground verification of dimensional stability of the LISA telescope[D]. Florida: University of Florida, 2022. .
 - [32] Umińska A A, Kulkarni S, Sanjuan J, et al. Ground testing of the LISA telescope[J]. *Proc SPIE*, 2021, **11820**: 118200I.
 - [33] Sang B L, Deng X Q, Peng B, et al. Dimensional stability ground test and in-orbit prediction of SiC telescope frame for space gravitational wave detection[J]. *IEEE Access*, 2022, **10**: 21041–21047.
 - [34] Shen J, Zhao Y, Liu H S, et al. Multi-channel thermal deformation interference measurement of the telescope supporting frame in spaceborne gravitational wave detection[J]. *Microgr Sci Technol*, 2022, **34**(4): 59.
 - [35] Uminska A A, Kulkarni S, Gleason J, et al. Telescope testing for the LISA mission[C]//American Physical Society April Meeting, 2020, **65**: 2.
 - [36] Sang B L, Deng X Q, Tao W, et al. Stray light analysis and suppression of Taiji telescope for space gravitational wave detection based on phase noise requirement[J]. *Appl Sci*, 2023, **13**(5): 2923.
 - [37] Livas J, LISA Telescope Team. LISA telescope technology development program[C]//American Astronomical Society Meeting Abstracts, 2021: 151.
 - [38] Wang X Y, Bai S J, Zhang Q, et al. Research progress of telescopes for space-based gravitational wave missions[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(11): 230219.
王小勇, 白绍竣, 张倩, 等. 空间引力波探测望远镜研究进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(11): 230219.
 - [39] Fan W T, Zhao H C, Fan L, et al. Preliminary analysis of space gravitational wave detection telescope system technology[J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyat*, 2021, **60**(1-2): 178–185.
范纹彤, 赵宏超, 范磊, 等. 空间引力波探测望远镜系统技术初步分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, **60**(1-2): 178–185.
 - [40] Li B H, Luo J, Qiu M Y, et al. Design technology of the truss support structure of the ultra-low thermal deformation gravitational wave detection telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(11): 230155.
李博宏, 罗健, 丘敏艳, 等. 引力波探测望远镜超低热变形桁架支撑结构设计技术[J]. *光电工程*, 2023, **50**(11): 230155.
 - [41] Fan Z C, Tan H, Mo Y, et al. Design theory and method of off-axis four-mirror telescope for space-based gravitational-wave mission[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(11): 230194.
范子超, 谈昊, 莫言, 等. 基于离轴四反的空间引力波探测激光发射望远镜设计[J]. *光电工程*, 2023, **50**(11): 230194.
 - [42] Sasso C P, Mana G, Mottini S. Coupling of wavefront errors

- and jitter in the LISA interferometer: far-field propagation[J]. *Class Quantum Grav*, 2018, **35**(18): 185013.
- [43] Vinet J Y, Christensen N, Dinu-Jaeger N, et al. LISA telescope: phase noise due to pointing jitter[J]. *Class Quantum Grav*, 2019, **36**(20): 205003.
- [44] Chen Z W, Leng R K, Yan C X, et al. Analysis of telescope wavefront aberration and optical path stability in space gravitational wave detection[J]. *Appl Sci*, 2022, **12**(24): 12697.
- [45] Zhao Y, Shen J, Fang C, et al. Tilt-to-length noise coupled by wavefront errors in the interfering beams for the space measurement of gravitational waves[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(17): 25545–25561.
- [46] Sasso C P, Mana G, Mottini S. The LISA interferometer: impact of stray light on the phase of the heterodyne signal[J]. *Class Quantum Grav*, 2019, **36**(7): 075015.
- [47] Verlaan A L, Lucarelli S. Lisa telescope assembly optical stability characterization for ESA[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10563**: 105634C.
- [48] Weise D, Marenaci P, Weimer P, et al. Opto-mechanical architecture of the LISA instrument[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10566**: 1056611.
- [49] Jersey K, Zhang Y Q, Harley-Trochimczyk I, et al. Design, fabrication, and testing of an optical truss interferometer for the LISA telescope[J]. *Proc SPIE*, 2021, **11820**: 118200L.
- [50] Zhao K, Fan W T, Hai H W, et al. Design of optical path stability measurement scheme and theoretical analysis of noise in telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(11): 230158. 赵凯, 范纹彤, 海宏文, 等. 望远镜光程稳定性测量方案设计及噪声理论分析[J]. *光电工程*, 2023, **50**(11): 230158.
- [51] Spector A, Mueller G. Back-reflection from a Cassegrain telescope for space-based interferometric gravitational-wave detectors[J]. *Class Quantum Grav*, 2012, **29**(20): 205005.
- [52] Sankar S R, Livas J C. Initial progress with numerical modelling of scattered light in a candidate eLISA telescope[J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2015, **610**(1): 012031.
- [53] Bush Z R, Barke S, Hollis H, et al. Coherent detection of ultraweak electromagnetic fields[J]. *Phys Rev D*, 2019, **99**(2): 022001.
- [54] Zhang Y H, Zhong Z Q, Zhang B. Analysis of surface scattering characteristics of ultra-smooth optical components in gravitational wave detection system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(11): 230222. 张耘豪, 钟哲强, 张彬. 空间引力波探测系统中超光滑光学元件表面散射特性分析[J]. *光电工程*, 2023, **50**(11): 230222.
- [55] Xu J S, Hu Z W, Xu T, et al. Test method of stray light on mirror surface of laser gravitational wave telescope[J]. *Infrared Laser Eng*, 2019, **48**(9): 913001. 徐节速, 胡中文, 徐腾, 等. 激光引力波望远镜镜面杂散光测试方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, **48**(9): 913001.
- [56] Gong Y, Li B C. Continuous-wave cavity ring-down technique for accurate measurement of high reflectivity[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1247–1250. 龚元, 李斌成. 连续激光光腔衰减法精确测量高反射率[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1247–1250.
- [57] Li B C, Gong Y. Review of cavity ring-down techniques for high reflectivity measurements[J]. *Laser Optoelectron Progr*, 2010, **47**(2): 021203. 李斌成, 龚元. 光腔衰减高反射率测量技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 021203.

作者简介



张兰强 (1986-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事高精密光学测试、自适应光学等技术及仪器研究。

E-mail: lqzhang@ioe.ac.cn



【通信作者】饶长辉 (1971-), 男, 博士, 研究员, 主要从事大口径高分辨力光学成像望远镜技术研究和系统研制工作。入选国家百千万人才工程, “天府万人计划”天府杰出科学家。

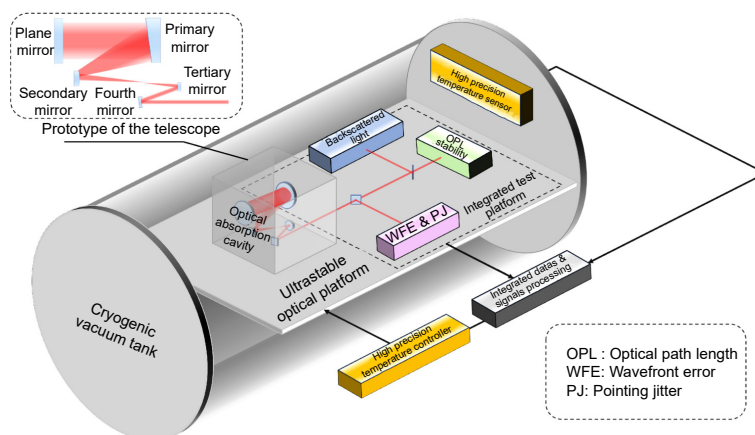
E-mail: chrao@ioe.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Progress in the research of testing and evaluation techniques for spaceborne gravitational wave telescopes

Zhang Lanqiang^{1,2,3}, Zeng Yi^{1,2,3}, Wu Xiaohu⁴, Yang Jinsheng^{1,2}, Ruan Xiaoli^{1,2},
Xin Qiang^{1,2}, Gu Naiting^{1,2,3}, Rao Changhui^{1,2,3*}



Space gravitational wave detection spaceborne telescope ground integrated test platform

Overview: Gravitational waves are spacetime oscillations radiated outward by accelerating mass objects. Significant astronomical events in the universe, such as the merging of massive black holes, emit stronger gravitational waves. Detecting gravitational waves allows for a deeper study of the laws governing celestial bodies and the origins of the universe, making accurate detection crucial. Gravitational wave detection technology utilizes Michelson interferometers to convert the extremely faint spacetime fluctuations caused by gravitational waves into measurable changes in optical path length. Recently, ground-based large Michelson interferometers have achieved direct detection of high-frequency gravitational waves. However, the detection of low-frequency gravitational waves, which is equally important, is not feasible on the ground due to arm length and ground noise issues. This necessitates the construction of ultra-large Michelson interferometers in space for low-frequency gravitational wave detection. Spaceborne gravitational wave detection telescopes play a vital role in collimating bidirectional beams in ultra-long interferometric optical paths in space. The extremely subtle changes in optical path caused by gravitational waves impose high demands for pm-level optical path length stability and below 10^{-10} level backscattered light in these telescopes. The ultra-high level index requirements exceed the precision limits of current ground testing techniques for telescopes. To ensure that spaceborne telescopes maintain their ultra-high design performance in the orbital environment, developing testing and evaluation techniques for these key indicators is a crucial prerequisite for the success of the space gravitational wave detection program. This paper provides an overview of the development of spaceborne gravitational wave detection telescopes, both domestically and internationally. It focuses on the current status and some test results of optical path length stability and backscattered light testing of telescopes under development, as well as further testing plans, providing a reference for the testing and evaluation of Chinese space gravitational wave detection space-borne telescopes.

Zhang L Q, Zeng Y, Wu X H, et al. Progress in the research of testing and evaluation techniques for spaceborne gravitational wave telescopes[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(2): 240027; DOI: 10.12086/oee.2024.240027

Foundation item: This work was supported by National Key R&D Program of China (2021YFC2202200, 2021YFC2202201)

¹National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu, Sichuan 610209, China; ²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴Shandong Institute of Advanced Technology, Jinan, Shandong 250100, China

* E-mail: chrhao@ioe.ac.cn