

DOI: 10.12086/oe.2024.240026

空间引力波探测星载望远镜专题导读 (二)

顾乃庭^{1,2,3,4}, 王小勇⁵, 汶德胜^{2,6}, 饶长辉^{1,2,3,4*}, 周泽兵⁷, 叶贤基⁸¹自适应光学全国重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;⁴中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;⁵北京空间机电研究所, 北京 100094;⁶中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710019;⁷华中科技大学物理学院引力中心, 精密重力测量国家重大科技基础设施, 基本物理量测量教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074;⁸“天琴计划”教育部重点实验室, 天琴中心 & 物理与天文学院, 天琴前沿科学中心, 国家航天局引力波研究中心, 中山大学(珠海校区), 广东 珠海 519082

摘要: 探测空间引力波有望揭开更多的宇宙奥秘。在国家重点研发计划项目的支持下,《光电工程》组织了“空间引力波探测星载望远镜专题(二)”。专题围绕空间引力波探测星载望远镜设计与分析、建造与装调、测试与评估等几个方面介绍了近期的主要研究进展,将为相关领域学者和专家提供技术研究的参考和合作交流的平台,并将积极推动我国空间引力波探测计划的研究进程。

关键词: 星载望远镜; 空间引力波; 引力波探测; 天琴计划; 专题出版

中图分类号: TH743

文献标志码: A

顾乃庭, 王小勇, 汶德胜, 等. 空间引力波探测星载望远镜专题导读(二)[J]. 光电工程, 2024, 51(2): 240026

Gu N T, Wang X Y, Wen D S, et al. Special issue on telescopes for space gravitational wave detection (II)[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(2): 240026

Special issue on telescopes for space gravitational wave detection (II)

Gu Naiting^{1,2,3,4}, Wang Xiaoyong⁵, Wen Desheng^{2,6}, Rao Changhui^{1,2,3,4*}, Zhou Zebing⁷, Ye Xianji⁸¹National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu, Sichuan 610209, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;⁴Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;⁵Beijing Institute of Space Mechanical and Electrical Engineering, Beijing 100094, China;⁶Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710019, China;⁷Gravity Center, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, National Key Science and

收稿日期: 2024-01-26; 修回日期: 2024-01-29; 录用日期: 2024-02-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2202200, 2021YFC2202000, 2021YFC2202100)

*通信作者: 饶长辉, chrao@ioe.ac.cn.

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

Technology Infrastructure for Precision Gravity Measurement, MOE Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities Measurement, Wuhan, Hubei 430074, China;

⁸MOE Key Laboratory of TianQin Mission, TianQin Research Center for Gravitational Physics & School of Physics and Astronomy, Frontiers Science Center for TianQin, Gravitational Wave Research Center of CNSA, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai, Guangdong 519082, China

Abstract: The detection of space gravitational waves is expected to reveal more mysteries of the universe. With the support of the National Key Research and Development Program of China, "Special issue on telescopes for space gravitational wave detection (II)" was organized by the journal *Opto-Electronic Engineering*. These papers in the special issue introduce the recent major research progress of the designs and analyses, construction and adjustable, and testing and evaluation of telescopes for space gravitational wave detection. They will provide a communication platform for the relevant field scholars and experts, and will actively promote the research process of the space gravitational wave detection project in China.

Keywords: space telescope; space gravitational wave; gravitational wave detection; TianQin project; special issue

引力波是时空中加速运动物体对时空产生的扰动作用。相比地面干涉仪的测量结果,空间引力波探测频段可以拓展到 1 mHz ~ 0.1 Hz,该频段丰富的引力波事件有望揭开更多的宇宙奥秘^[1]。近日,欧洲航天局 (ESA) 已正式批准了首个测量空间引力波的实验项目—激光干涉空间天线 (LISA)^[2]。实际上,LISA 计划早于 31 年前就被提出,且在当时被认为“这是一个很荒谬的想法”,而如今即将成为现实。LISA 将通过部署在以太阳为中心、各自相距 250 万公里的三个星座形成干涉仪,通过自由质量块之间距离变化探测由超大质量黑洞合并等宇宙事件引起的引力波信号,尤其是地面无法探测的低频引力波信号。该任务计划 2025 年启动,并于 2035 年发射,预计耗资数十亿欧元。LISA 被寄予厚望,被认为“将为我们打开一个只有 LISA 能够实现的引力波探测窗口”^[3-4]。我国也相继启动了相应的空间引力波探测计划,分别为“天琴计划”^[5-6]和“太极计划”^[7-8],均采用三星六链路结构设计,计划于 2035 年前后发射。不同的是,“天琴计划”在约 10 万公里高的地心轨道上部署 3 个星座,构成距离为 17 万公里的干涉臂长;而“太极计划”则在距离地球约 5000 万公里的日心轨道上部署 3 个星座,形成干涉臂长约为 300 万公里的干涉仪。

相比较而言,上述三个计划虽然部署轨道不同,引力波探测频段有所差异,但核心技术基本是一致的,需要克服的关键困难也基本相似。因此,这些计划在科学、技术方面能够一定程度上相互支撑,但在关键

技术突破、总体进度等方面也构成直接竞争。正如我们在《光电工程》2023 年第 11 期出版的“空间引力波探测星载望远镜专题(一)”中所描述的^[9],星载激光干涉仪技术进展较快、研究成果较多,相对而言星载望远镜作为激光发射和接收的核心组成部分,其设计、建造以及测试评估等方面要求较高,在光学系统、光机结构、空间环境热控、杂散光抑制、稳定性等方面仍需要持续加大科研投入,力争快速突破关键技术,取得一系列重要研究成果,才能确保我国在空间引力波探测的国际竞争中脱颖而出^[10]。这也是《光电工程》组织该专题的主要动因。

“空间引力波探测星载望远镜专题(二)”依然围绕空间引力波探测星载望远镜设计与分析、建造与装调、测试与评估等几个方面介绍近期的主要研究进展。本期共择优收录了来自中山大学“天琴计划”教育部重点实验室、北京理工大学、浙江大学、首都师范大学、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院光电技术研究所等高校和科研院所的 8 篇最近研究成果,共包括 2 篇综述和 6 篇科研论文。

综述论文《空间引力波星载望远镜测试与评估技术研究进展》重点围绕空间引力波探测星载望远镜测试与评估技术,重点介绍了在光程稳定性和后向杂散光等主要核心指标的测试与评估方法、当前发展现状及已取得的研究成果,并进一步描述了星载望远镜测试与评估的未来发展计划^[11]。综述论文《超长空间激光传输数值模拟研究进展》围绕空间引力波探测中超

长空间链路传输数值模拟仿真研究情况, 介绍了星间传输仿真时采用的计算以及指向抖动引起的相位噪声分析方法, 为高精度指向偏差测量与控制、波前像差控制等提供了依据和参考^[12]。

其余 6 篇研究论文主要介绍了空间引力波探测星载望远镜干涉仪模式对比分析、主镜组件结构设计及热稳定性分析、消光材料积分散射特性测试、杂光抑制、多自由度形变测量以及指向偏差地面高精度测量等方面的最新研究成果, 探讨了与星载望远镜性能优化和实现有关的方法和途径。《空间引力波探测干涉仪探测模式比较研究》从探测模式选择出发, 推导了在单探测器模式和平衡模式下读出噪声和杂散光噪声在干涉信号中的表达形式, 并得出平衡模式可以跨量级抑制激光功率涨落和后向杂散光引起的干涉相位噪声的结论, 可望降低对激光功率涨落和望远镜杂散光的工程指标要求^[13]。《空间引力波望远镜主镜组件结构设计及热稳定性分析》提出一种光机集成分析与优化方法, 开展了主镜侧支撑点位置分析和支撑结构拓扑优化, 建立了各结构参数的评价函数, 设计出一阶频率为 392.43 Hz、重力和温度载荷下主镜面形变化优于 $\lambda/60$ 的主镜组建结构, 在 $10 \mu\text{K}/\text{Hz}^{1/2}$ 的空间热扰动下尺寸稳定性在 $10 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 水平^[14]。《星载望远镜消光材料积分散射特性测试研究》介绍了一种星载望远镜消光材料积分散射特性测试装置, 实现了对星载望远镜消光材料散射特性更为全面的测量, 并证实消光材料的散射特性在不同点位和入射角下存在明显差异^[15]。《基于强化学习的空间引力波探测望远镜系统外杂光抑制研究》提出一种基于强化学习的杂光抑制方法, 并通过制定有效的杂光抑制措施实现对星载望远镜中杂散光控制^[16]。《空间引力波探测望远镜多自由度形变测量方法解耦研究与噪声分析》对空间引力波探测星载望远镜多自由度形变测量方法进行了深入的研究, 解决了多自由度测量耦合问题, 并深入分析了误差来源, 有望满足望远镜多自由度形变测量的需求^[17]。《空间引力波探测望远镜指向偏差地面高精度测量技术研究》提出基于哈特曼原理的新型指向偏差高精度测量方法, 采用多子孔径空间复用思想降低各类随机误差对测量精度的影响, 显著提升指向偏差测量精度, 并初步实现对星载望远镜指向偏差 0.62 nrad 的高精度测量, 为空间引力波探测望远镜地面测试及在轨传感器定标提供了一种可能途径^[18]。

“引力波探测星载望远镜”专题(二)将在《光电工程》2024年第2期刊出, 希望通过本专题以及之前专题(一)中对空间引力波探测星载望远镜设计、建造和测试评估等方面的新理论、新方法、新技术的不断探索, 为相关领域学者和专家提供技术交流、合作研究平台和参考, 并持续、快速地共同推进我国空间引力波探测计划进程。当然, 这需要相关领域同仁的共同努力和不懈探索。最后, 感谢国家重点研发计划项目(2021YFC2202200、2021YFC2202000、2021YFC2202100)对本专题的大力支持!

参考文献

- [1] Livas J C. Possible space-based gravitational-wave observatory mission concept[R]. Honolulu: International Astronomical Union, 2015.
- [2] Gibney E. 'Sci-fi instrument' will hunt for giant gravitational waves in space[EB/OL]. (2024-01-26). <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00254-x>.
- [3] Danzmann K, The LISA Study Team. LISA: Laser interferometer space antenna for gravitational wave measurements[J]. *Class Quantum Grav*, 1996, 13(11A): A247-A250.
- [4] Danzmann K. The LISA mission: a laser-interferometric gravitational wave detector in space[C]//*Proceedings of the Alpbach Summer School on Fundamental Physics in Space*, Alpbach, 1997: 247-252.
- [5] 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.
- [6] Luo J, Ai L H, Ai Y L, et al. A brief introduction to the TianQin project[J]. *Acta Scientiarum Nat Univ Sunyatseni*, 2021, 60(1-2): 1-19.
罗俊, 艾凌皓, 艾艳丽, 等. 天琴计划简介[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(1-2): 1-19.
- [7] Hu W R, Wu Y L. The Taiji Program in Space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. *Natl Sci Rev*, 2017, 4(5): 685-686.
- [8] Luo Z R, Zhang M, Jin G, et al. Introduction of Chinese space-borne gravitational wave detection program "Taiji" and "Taiji-1" satellite mission[J]. *J Deep Space Explor*, 2020, 7(1): 3-10.
罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极1号”在轨测试[J]. *深空探测学报*, 2020, 7(1): 3-10.
- [9] Gu N T, Wang X Y, Wen D S, et al. Special issue on satellite telescope for space gravitational wave detection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(11): 230310.
顾乃庭, 王小勇, 汶德胜, 等. 空间引力波探测星载望远镜专题导读[J]. *光电工程*, 2023, 50(11): 230310.
- [10] 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.

- [11] 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.
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.
- [12] Hua Z Y, Xu Z R, Peng S J, et al. Research progress on numerical simulations of long space laser propagation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(2): 230185.
华喆怿, 徐兆锐, 彭韶婧, 等. 超长空间激光传输数值模拟研究进展[J]. *光电工程*, 2024, 51(2): 230185.
- [13] Wu J G, Wang X Y, Bai S J, et al. Comparative study of detection modes for space-based gravitational wave observation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(2): 230134.
吴金贵, 王小勇, 白绍竣, 等. 空间引力波探测干涉仪探测模式比较研究[J]. *光电工程*, 2024, 51(2): 230134.
- [14] Fang S J, Li B H, He B, et al. Design and thermal stability analysis of primary mirror assembly for space-borne gravitational wave telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(2): 230157.
房思俊, 李博宏, 何斌, 等. 空间引力波望远镜主镜组件结构设计及热稳定性分析[J]. *光电工程*, 2024, 51(2): 230157.
- [15] Liu W, Li Z H, Mao Z, et al. Research on integrated scattering characteristics of extinctive materials for spaceborne telescopes[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(2): 230206.
刘巍, 李朝辉, 毛振, 等. 星载望远镜消光材料积分散射特性测试研究[J]. *光电工程*, 2024, 51(2): 230206.
- [16] Zhang Z Y, Chang J, Huang Y F, et al. Reinforcement learning-based stray light suppression study for space-based gravitational wave detection telescope system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(2): 230210.
张梓扬, 常军, 黄一帆, 等. 基于强化学习的空间引力波探测望远镜系统外杂光抑制研究[J]. *光电工程*, 2024, 51(2): 230210.
- [17] Luo J, Song J, Fang S J, et al. Decoupling study and noise analysis of multi-degree-of-freedom deformation measurement method for space gravitational wave detection telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(2): 230211.
罗健, 宋婕, 房思俊, 等. 空间引力波探测望远镜多自由度形变测量方法解耦研究与噪声分析[J]. *光电工程*, 2024, 51(2): 230211.
- [18] Song Q L, Li Y, Zhou Z Y, et al. High-precision ground measurement technology research for measuring pointing deviation in space-based gravitational wave detection telescopes[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(2): 230234.
宋奇林, 李杨, 周子夜, 等. 空间引力波探测望远镜指向偏差地面高精度测量技术研究[J]. *光电工程*, 2024, 51(2): 230234.