

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

空间引力波探测望远镜研究进展

王小勇, 白绍峻, 张倩, 林栩凌, 李洋, 夏晨晖

引用本文:

王小勇, 白绍峻, 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.

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.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230219>

收稿日期: 2023-09-01; 修改日期: 2023-11-21; 录用日期: 2023-11-24

相关论文

微结构薄膜望远镜研究进展分析

杨伟, 吴时彬, 汪利华, 范斌, 罗先刚, 杨虎

光电工程 2017, 44(5): 475 doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.05.001

1.8 m太阳望远镜偏振标定单元设计

姚本溪, 饶长辉, 顾乃庭

光电工程 2018, 45(11): 180058 doi: 10.12086/oe.2018.180058

光纤激光相干合成研究进展

耿超, 杨燕, 李枫, 黄冠, 李新阳

光电工程 2018, 45(3): 170692 doi: 10.12086/oe.2018.170692

利用超大视场光电望远镜观测GEO中的目标识别方法

罗浩, 毛银盾, 于涌, 唐正宏

光电工程 2017, 44(4): 418 doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.006

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



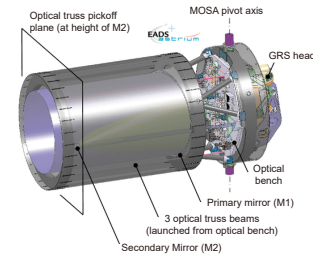
Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230219

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

北京空间机电研究所, 北京 100094



摘要: 望远镜是空间引力波探测系统的核心组件之一, 主要功能是本地激光的准直发射和远端激光的接收与压缩。望远镜作为干涉光路的一部分, 直接影响测量噪声。相对于成像系统, 空间引力波探测望远镜除了波前质量要求高之外, 对杂散光和光程稳定性也具有极高的要求, 而且后两项的挑战性更大。本文围绕望远镜核心指标的实现, 对光学系统、光机结构、空间热环境与热控、杂散光仿真与抑制、稳定性测量等方面的研究进展进行了综述, 可以为我国的空间引力波探测望远镜研制提供参考。

关键词: 空间引力波探测; 空间望远镜; 光程稳定性

中图分类号: TH743

文献标志码: A

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

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

Research progress of telescopes for space-based gravitational wave missions

Wang Xiaoyong, Bai Shaojun*, Zhang Qian, Lin Xuling, Li Yang, Xia Chenhui

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract: The optical telescopes for space-based gravitational wave missions play an important role in the measurement, which both expand the beam going to the far spacecraft and efficiently collect the beam sent from the far spacecraft. The telescope, as part of the interferometric path, directly affects the measurement noise. Compared with the imaging system, the telescope for space gravitational wave observatory not only has high requirements on wavefront quality, but also has extremely high requirements on stray light performance and optical path stability, and the latter two are more challenging. The research progress of the telescope's optical system, optical-mechanical structure, space environment and thermal design, stray light simulation and suppression, and stability measurement is reviewed, which can provide a reference for the development of space gravitational telescope in our country.

Keywords: space-based gravitational wave observatory; space telescope; optical path length stability

收稿日期: 2023-09-01; 修回日期: 2023-11-21; 录用日期: 2023-11-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC2202000)

*通信作者: 白绍竣, bajs2008@126.com。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

1 引言

空间引力波探测技术可以将探测频段拓展到 0.1 mHz~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]。目前国内外主要的空间引力波探测计划有欧洲航天局和美国航空航天局合作开展的“LISA (laser interferometer space antenna) 计划”^[2-3], 中山大学牵头提出的“天琴计划”^[4] 以及中国科学院提出的“太极计划”^[5-6]。这三个计划均采用三颗航天器在空间组成等边的三角形星座, 在几十万到几百万公里的臂长上构建高精度的长基线干涉系统, 测量两个测试质量之间的相对距离变化, 再通过距离变化反演引力波信号。由于引力波信号非常微弱, 探测灵敏度需要在 0.1 mHz~1 Hz 频段内达到~pm/Hz^{1/2} 以及~nrad/Hz^{1/2} 的水平^[3]。为了提高收发链路的效率^[3], 每个航天器载有两个望远镜进行本地激光的准直发射和远端激光的接收与压缩。与通常的成像系统不同, 空间引力波探测望远镜除了具有高质量的波前要求, 还需要满足极高的光程稳定性和杂散光抑制要求^[7]。

望远镜作为空间激光干涉光路的一部分, 其本身的光程变化直接体现为测量噪声, 所以对望远镜光机本身的稳定性要求非常高。另外, 望远镜的波前像差与指向误差的耦合可以产生 TTL (tilt-to-length) 噪声。从发射端来讲, 本地激光通过具有一定像差的望远镜扩束并传输至远场, 远场波前也必定具有像差; 同时, 由于轨道的呼吸角变化或者航天器的指向抖动误差, 可引起接收端望远镜所接收的口径区域相对于发射端的光轴发生移动。这种远场波前误差与光轴的抖动耦合作用, 可以引起相位测量噪声。如果望远镜的口径增大, 可以减小远场光斑的直径, 但是同时会增加噪

声对指向误差的灵敏度^[8]。从接收端来讲, 来自不同方向的光束, 经过望远镜之后在出瞳位置的波前会有微小的差别, 这种波前差别与本振激光耦合之后也可以产生噪声。为了控制 TTL 噪声, 要求望远镜具有较高的波前质量, 并分析不同阶次的像差对 TTL 噪声的影响, 通过光学系统设计和装调保证望远镜波前质量的同时降低 TTL 噪声对光轴指向误差的灵敏度^[3,9]。

本地发射的激光经过超远距离的传输之后, 能被远端接收到的仅仅为极小的一部分。根据 LISA 任务的分析, 假设发射激光功率为 1 W, 远端接收到的功率为~100 pW^[10], 所以望远镜的杂散光不可大于接收信号。由于望远镜同时承担发射和接收功能, 望远镜产生的后向散射杂散光需要满足严格的要求。

本文围绕望远镜的波前、杂散光和稳定性指标的实现, 从光学系统、光机结构、空间热环境与热控、杂散光仿真与抑制、光程稳定性测量等方面的研究进展进行了综述。

2 望远镜指标

根据 LISA 任务的需求以及各项指标实现工程难度和代价的平衡, LISA 的望远镜研究团队对望远镜进行了指标分析和分解^[7,11-12], 各项指标及其来源如表 1 所示, 其中杂散光和光程稳定性指标挑战性最大。天琴^[13-15] 和太极^[16-17] 的研究团队也分别给出了望远镜相关的指标需求。由于太极计划与 LISA 计划均为太阳轨道, 探测臂长相当, 所以两者指标基本一致; 天琴计划为地球轨道, 探测臂长约为 LISA 臂长的 1/15, 所以所需望远镜口径较小, 约为 Φ200 mm, 其余指标与 LISA 基本一致。

表 1 LISA 望远镜的指标参数^[7,11-12]

Table 1 Key requirements for a space-based gravitational wave telescope^[7,11-12]

序号	指标名称	指标	指标来源
1.	波长	1064 nm	激光器
2.	远场波前	RMS 1/30λ	指向精度
3.	捕获视场	±200 μrad	捕获时间
4.	科学视场	±8 μrad	杂散光
5.	杂散光	10 ⁻¹⁰	位移噪声
6.	口径	Φ300 mm	收发链路功率
7.	光程稳定性	$1 \text{ pm} / \sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{\left(1 + \left(\frac{0.003}{f}\right)^4\right)}$ 频段: 1 mHz~0.1 Hz	系统光程噪声分配/指向
8.	光学传输效率	>0.85	散粒噪声

3 光学系统

以 LISA 星座的轨道为例, 在轨 6 年时间轨道呼吸角的变化约为 $60 \pm 0.8^\circ$ ^[3], 为了保证探测任务的连续进行, 需要对轨道呼吸角进行补偿。目前主要有两种解决方案: 1) 通过整体转动望远镜和后光学平台实现补偿; 2) 通过一个大视场的望远镜和高精度的指向镜在视场内改变光轴指向进行补偿。两种方案各有优缺点, 整体转向的方案需要对望远镜和航天器平台之间的光纤和电缆连接进行特殊考虑^[18], 严格控制由运动产生的噪声, 另外由于望远镜和后光学平台转动惯量较大, 对航天器的姿态扰动也较大; 视场内指向的方案可以避免上述两个缺点, 但是会增加望远镜的复杂程度, 指向镜的研制难度也比较大, 指向镜的运动会引起测量噪声, 图 1 所示为两种方案的对比示意图, 目前整体转向的方案是 LISA 的设计基线。

3.1 基于整体转向方案的光学系统设计

对于采用整体转向补偿方案的望远镜, 视场只需要兼顾链路捕获视场和科学视场, 视场需求较小, 具体视场角见表 1。自 LISA 任务提出以来, 众多学者提出了多种望远镜光学系统设计方案。同轴光学系统由于设计简单、空间体积小, 具有良好的对称性, 并且易于加工和装调, 是首先被考虑的光学系统形式。但是次镜引起的后向散射杂光非常严重, 如果在次镜

中心开孔或者涂覆高吸光比的涂层, 又会因衍射效应使轴上出现泊松亮斑。Spector 等^[20]尝试了多种形状的开孔形式, 未能取得满意的效果。目前离轴光学系统是 LISA 的设计基线, 随着技术的进步, 离轴光学系统的加工和装调已经不存在太多困难^[21-22]; 离轴光学系统包络尺寸比同轴光学系统稍大一些, 对径向的温度变化较敏感。另外, 离轴光学系统一般情况下会存在不对称的残余设计像差, 对于采用四象限探测器与 DWS (differential wavefront sensing)^[23]原理进行角度测量的系统, 可能会引起额外的噪声^[20], 需要开发针对残余像差的补偿处理算法。

Livas 等^[10]分别设计了一个同轴卡塞格林系统与一个离轴的卡塞格林系统, 并进行了优劣势对比讨论。Sankar 等^[11]设计了一个 Ritchey-Chrétien 离轴四反光系统, 光学系统布局如图 2 所示, 主镜采用抛物面, 次镜为双曲面, 三镜和四镜均采用球面, 三镜和四镜采用球面的原因就是为了方便加工, 提高反射镜表面的粗糙度, 降低后向散射。按照目前的加工工艺水平, 平面镜和球面镜的粗糙度可以达到 RMS 0.1 nm 以下。

Sankar 等^[24]设计了一个布局与图 2 类似的离轴四反光系统, 其中主镜为抛物面, 次镜为非球面, 三镜和四镜均为球面。为了验证光学系统设计与装调, 研制了一套望远镜缩比样机, 如图 3 所示。样机的口径

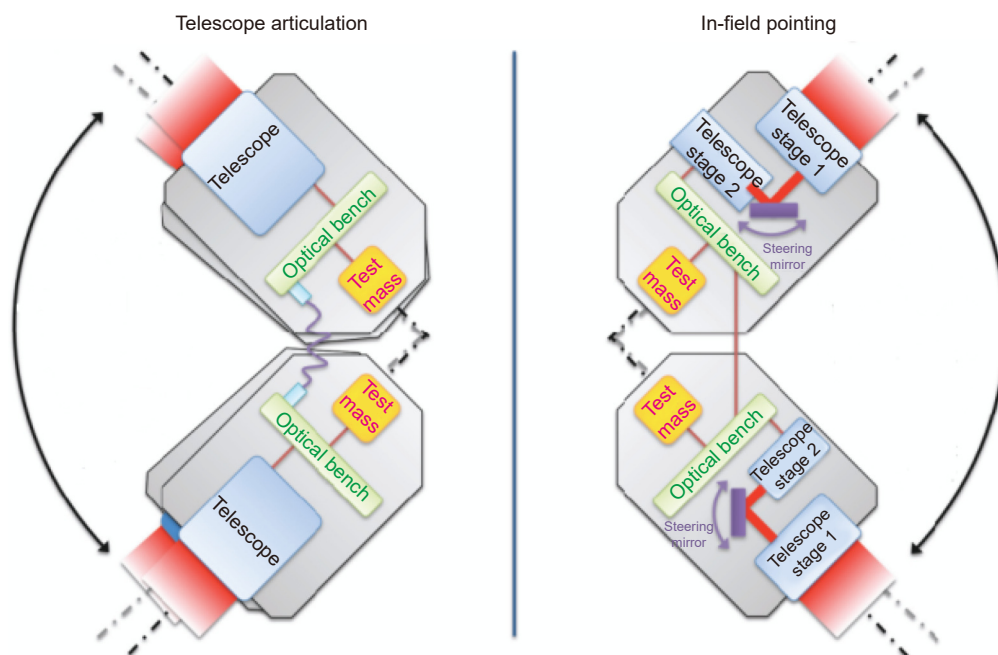


图 1 望远镜整体转向方案与视场内指向方案对比^[19]

Fig. 1 Telescope pointing compensation solutions^[19]

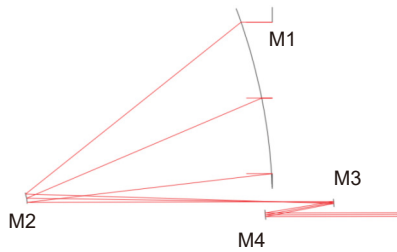


图 2 离轴四反光学系统布局^[11]
Fig. 2 Layout for the off-axis reference design^[11]

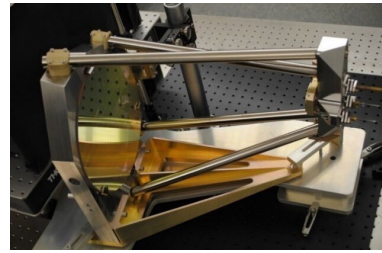


图 3 NASA 与佛罗里达大学联合研制的望远镜原理样机^[24]
Fig. 3 Physical prototype of the telescope developed by NASA and University of Florida^[24]

$\Phi 200$ mm, 视场 ± 200 μ rad, 放大倍率 40 倍, 在 8 μ rad 的科学观测视场内设计波像差为 RMS 3.9 nm, 装调后波前误差为 RMS 35.5 nm, 满足 $1/30\lambda@1064$ nm 的要求。样机未开展光程稳定性和杂散光方面的测试。

Escudero 等^[25]也在卡塞格林系统的基础上设计了一个口径为 $\Phi 300$ mm 的离轴四反光学系统, 主镜为抛物面, 次镜为非球面, 三镜为椭球面, 四镜为球面, 光学系统布局如图 4 所示; 另外, 还在柯尔施系统的基础上设计了一个包括 6 个反射镜的离轴光学系统, 光学系统布局如图 5 所示, 其中包括 2 个抛物面, 2 个双曲面, 1 个椭球面和 1 个平面折转镜。

在 2020 年 LISA 的望远镜研制团队又对光学系统进行了优化^[26], 为了控制 TTL 噪声, 提出了面向光瞳像差的优化方法, 优化后的光学系统布局与图 4 类似。发射通道出瞳直径为 $\Phi 300$ mm, 发射通道入瞳直径为 $\Phi 2.24$ mm, 放大倍率为 134 倍, 三镜采用了自由曲面。采用各个视场的主光线与出瞳平面的交点所包络的区域大小对光瞳像差进行直观的评价, 在科学视场内 TTL 噪声降低到了 1 pm/ μ rad。同时, 也对装调公差也进行了分析, 装调公差要求非常严格,

光学元件位置公差在几个微米以内, 角度公差在 10 角秒以内, 但是仍在工程可实现的范围内。此后该团队又尝试了三镜和四镜均采用自由曲面的光学系统形式, 进一步降低了 TTL 噪声。另外, 为了解决离轴四反光学系统的优化问题, Papa 等^[27]研究了采用自由曲面的四反光学系统的解空间, 为优化提供了理论基础。

Weise 等^[28]提出了一种反射和透射混合的光学系统, 如图 6 所示, 主镜和次镜组成离轴的反射系统, 两个透镜组成目镜系统, 波前误差优于 RMS $1/100\lambda$, 视场角为 ± 350 μ rad。透镜光学元件加工和装调方便, 但是后向散射比较严重。所以研究团队提出收发通道采用具有正交偏振态的线偏光进行隔离的措施。

国内也有众多学者针对天琴和太极开展了望远镜光学系统设计, 但是基本上都在离轴四反的系统布局上开展的优化^[13,16,29-30]。Yu 等^[17]以太极计划为背景设计了一个口径为 $\Phi 400$ mm, 放大倍率为 80 倍的望远镜光学系统。以经典的卡塞格林系统为初始结构开展了优化, 同时考虑了波前质量和 TTL 噪声, 优化后的设计波前误差达到了 RMS $1/200\lambda@1064$ nm; 在 ± 600 μ rad 视场内, TTL 噪声 < 1.7 pm/ μ rad。Fan 等^[15]

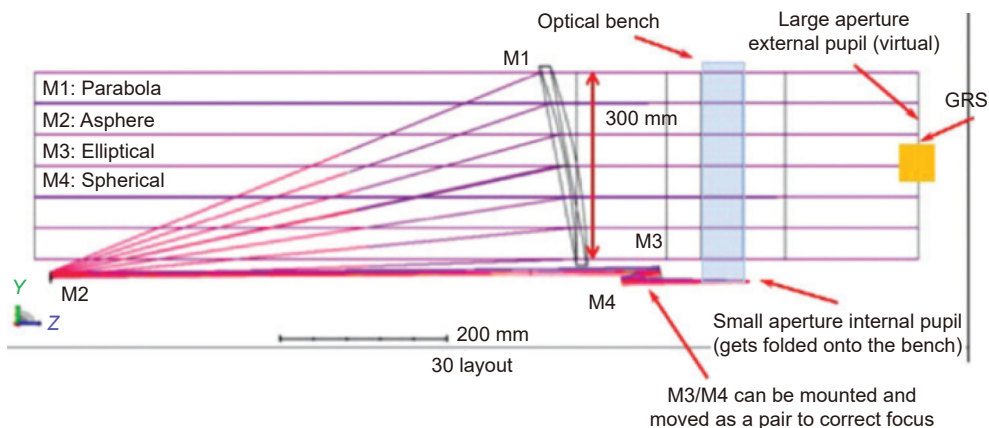


图 4 以卡塞格林系统为基础的离轴四反光学系统布局^[25]
Fig. 4 Cassegrain design form optical system layout^[25]

以天琴计划为背景, 设计了一个口径为 $\Phi 220$ mm 的离轴四反望远镜光学系统, 以光瞳像差和波前质量的综合最优为优化目标。优化后的主镜为抛物面, 其余三个反射镜均为非球面, 在科学视场内的波前达到了 $\text{RMS } 1/200\lambda @ 1064 \text{ nm}$; 在 $\pm 300 \mu\text{rad}$ 视场内, TTL 噪声 $< 3.4 \text{ pm}/\mu\text{rad}$ 。同时也对不同视场的主光线在出瞳平面上的晃动量进行了分析。Li 等^[31] 提出了面向 TTL 噪声的误差分配方法, 给出了 TTL 噪声对望远镜加工装调误差的灵敏度矩阵, 为控制望远镜相关的 TTL 噪声提供了参考。

3.2 基于视场内指向光学系统设计

针对视场内指向的方案, Livas 等^[19] 尝试了三种光学系统。第一种光学系统如图 7(a) 所示, 光学系统由指向镜分为两级, 共包含 6 个光学元件, 第一级的

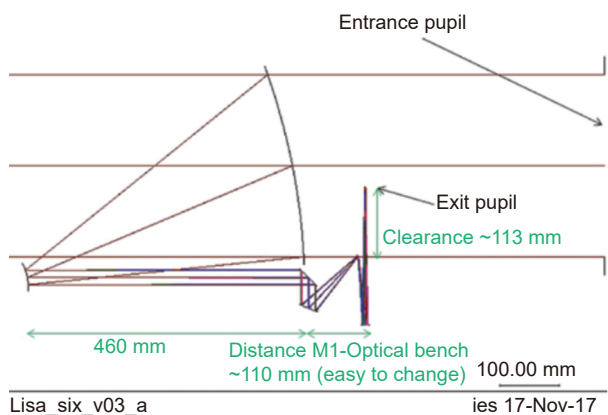


图 5 以柯尔施系统为基础的离轴六反光学系统布局^[25]
Fig. 5 Korsch design form optical system layout^[25]

放大倍率为 5 倍, 视场大于 $\pm 1^\circ$; 第二级的放大倍率为 18 倍, 两级的综合放大倍率 90 倍。假设反射镜面的粗糙度优于 $\text{RMS } 0.5 \text{ nm}$, 表面污染等级为美军标 MIL-STD-1246c 规定的 CL200, 此情况下满足后向散射杂光功率小于发射功率 10^{-10} 的要求。但是这个系统的出瞳位置不方便与后光学平台的集成, 且光学系统的包络比较大。第二种光学系统如图 7(b) 所示, 包括 7 个光学元件, 最后一个光学元件 (M7) 对后向散射的影响较大, 不能满足杂散光的要求。第三种光学系统如图 7(c) 所示, 包括 8 个光学元件, 且其中 2 个为透镜, 系统的尺寸包络相对前两种有所减小, 光瞳的位置也符合集成的要求。但是透镜的后向散射问题不容易解决, 对透镜的膜层性能要求极高, 目前工程难以实现。

Weise 等^[32] 提出一种视场内指向的光学系统, 光学系统布局如图 8 所示。光学系统也是分为两级, 第一级和第二级放大倍率都是 10 倍, 总放大倍率为 100 倍, 口径为 $\Phi 400$ mm, 视场角 $> \pm 0.5^\circ$, 各视场的波前 $< 1/100\lambda \text{ RMS}$ 。在两级光学系统之间设有一个中间光瞳, 用于放置指向镜。

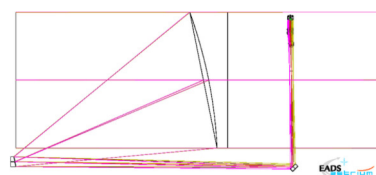


图 6 反射和透射混合的光学系统^[28]
Fig. 6 Mixed reflective and refractive optical systems^[28]

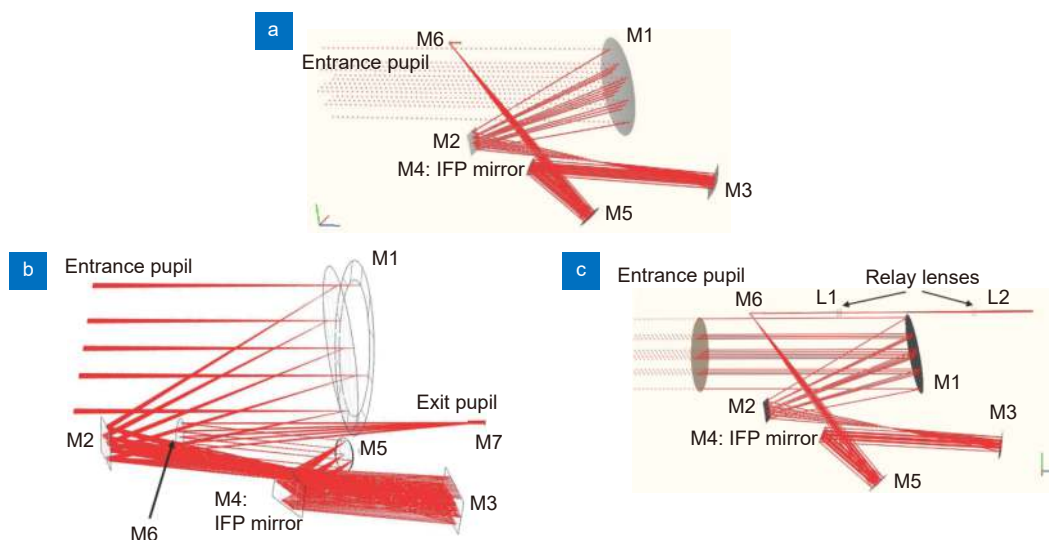


图 7 视场内指向光学系统^[19]
Fig. 7 Optical systems for the in-field pointing telescope^[19]

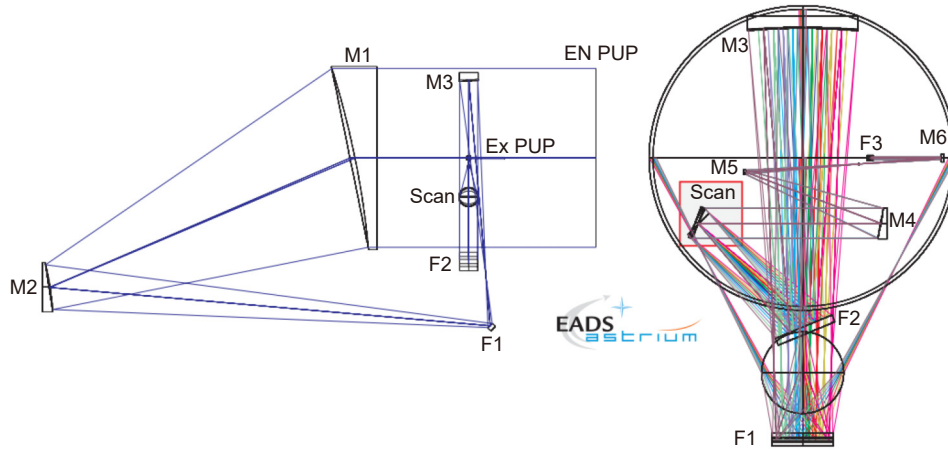


图 8 视场内指向光学系统^[32]

Fig. 8 Optical design of the specialized wide-field, off-axis telescope for in-field pointing^[32]

4 杂散光

空间引力波探测望远镜对杂散光具有极其严苛的要求, 主要基于两方面的原因: 一方面是本地发射的激光经过远距离传输之后, 能够被远端接收的信号非常微弱; 另外一方面是发射激光的后向散射杂光与本振激光具有相同的频率, 与本振光具有相干性, 可以直接产生干涉信号的相位噪声, 此外杂散光的相位变化也是产生测量噪声的来源, 相位噪声与杂散光的关系可以由式 (1) 表示^[20]。

$$\delta\phi = \eta \sqrt{\frac{p_b}{P_L}} \frac{2\pi}{\lambda} \delta x, \quad (1)$$

式中: P_L 为本振激光的功率, p_b 为后向散射杂光的功率, λ 为激光波长, δx 是杂散光的光程变化, η 表示两种光源的矢量场在重叠区域的内积。

$$\eta = \frac{\left| \int E_r^* E_b dA \right|}{\sqrt{\int |E_r|^2 dA \int |E_b|^2 dA}}, \quad (2)$$

其中: E_r 为接收到的远端发射光电场, E_b 为后向散射杂光电场。

望远镜的杂散光来源包括恒星和行星等天体引起的外杂光、光束的衍射效应、光线多次反射引起的鬼像、光线的散射等。为望远镜设计遮光罩与光阑, 以及对结构表面进行超黑处理可以较好地抑制视场外的杂光。冷荣宽等^[33] 以太极计划为背景, 为望远镜设计了遮光罩, 分析了太阳光与望远镜光轴夹角为 60° 时, 出瞳处的杂散辐射可达到 3.9×10^{-12} W, 对应点源透射比为 8.7×10^{-9} , 满足空间引力波探测超低杂散光的需求。但是, 对于视场内的杂散光, 尤其是后

向散射引起的杂散光, 是影响最为严重的^[11]。在光学系统选型以及优化设计时, 就需要特别考虑杂散光的控制, 分析影响杂散光的敏感光学元件、敏感参数, 结合波前质量与加工可实现性进行综合优化。

影响光学表面散射特性的因素主要有表面的粗糙度、膜层特性、表面疵病以及表面的污染情况。双向散射分布函数 BSDF 是表征表面散射特性最常用的手段。表面粗糙度引起的散射可以采用 Harvey-Shack 模型, 由颗粒物污染引起的散射可以采用 Mie 散射模型, 而且散射模型的参数可以根据光学元件的实际测试结果进行修正, 再输入杂散光分析软件进行系统仿真, 提高仿真的精度^[11]。Spector 等^[34] 研究了同轴卡塞格林系统的后向散射特性, 主要结论在 3.1 节已经说明。Sankar 等^[35] 对离轴四反的望远镜进行了初步的杂散光分析, 假设 M1 和 M2 表面粗糙度为 RMS 1.5 nm, M3 和 M4 的表面粗糙度为 RMS 0.5 nm, M1 的洁净等级为 CL300, 其余反射镜阶洁净等级为 CL200, 由 M1 至 M4 引起的后向杂光与发射光的功率比分别为 5×10^{-14} , 2×10^{-12} , 5×10^{-11} 和 9×10^{-12} , 满足 LISA 的对望远镜的杂散光要求。仿真分析显示, 灰尘污染引起的杂散光要比光学元件表面粗糙度引起的杂散光严重。Khodnevych 等^[36] 根据 LISA 的轨道环境, 分析了望远镜受到微流星撞击的概率以及对杂散光的影响。在最坏的假设情况下, 微流星撞击造成的撞击坑以及产生的微尘引起的杂散光仍在可以接受的范围内。

另外, 有部分学者从系统方案层面进行了考虑, 给出了一些可以降低杂散光要求的思路。Weise 等^[37] 提出发射和接收的激光采用不同的偏振状态, 利用偏

振进行收发隔离, 降低对杂散光的要求。另外使本地发射的激光频率与本振激光频率具有一个小的频率差, 这样探测到的干涉信号就是由本振激光、后向散射杂散光、接收的远端激光三者共同干涉的结果, 具有三个频率, 最后再通过数据处理的方法剔除杂散光。

5 光机结构设计

望远镜的光机结构是保证望远镜性能的关键, 也是实现光、机、力、热设计目标的物理载体, 涉及到构型优化、材料选择、工艺实现性、与航天器总体接口、环境适应性等多个方面, 既有科学问题, 也有众多工程问题, 需要综合考虑并进行一体化的优化设计。望远镜在轨的稳定性主要取决于光机结构材料本身的稳定性、温度波动引起的热胀冷缩以及连接部位的稳定性。具有高比刚度、低膨胀系数的材料是望远镜光机结构设计寻找的材料, 在望远镜上具有应用潜力的材料主要有碳纤维复合材料、SiC、单晶硅、微晶玻璃、ULE 等。

Ende 等^[38]设计了一个碳纤维复合材料的望远镜结构, 如图 9 所示, 并进行了真空稳定性测试。测试结果显示结构样件的扭转和侧向的稳定性未达到 LISA 指标要求。Sanjuan 等^[39]对一个圆柱形碳纤维复合材料结构样件 (图 10) 进行了稳定性测试, 样件的直径为 $\Phi 200$ mm, 长度为 230 mm。测试结果显示材料的热膨胀系数为 $2.87 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 在温度稳定性优于 $450 \mu\text{K}/\text{Hz}^{1/2}$ 的情况下, 即可满足 LISA 的稳定性指标要求。但是由于碳纤维复合材料在真空下的出气引起的尺寸收缩量超过了望远镜的指标要求, 如果采用此材料, 需要考虑为望远镜增加调焦的功能。之后 Sanjuan 等^[40]又对一个 SiC 材料的望远镜结构样件 (图 11) 进行了稳定性测试, 由于测量系统在低频段的温度稳定性未能达到要求, SiC 样件在低频段的尺寸稳定性直接测试结果未能达到指标要求。但是, 根据稳定性测试结果和温度数据分析表明 SiC 材料能够满足 LISA 的使用要求。由于微晶玻璃和 ULE 具有更低的热膨胀系数, 可以给热控系统减轻压力, 并且微晶玻璃^[41]和 ULE 具有良好的空间应用历史^[42], 因此研究人员提出了光学元件和光机结构均都采用微晶玻璃或者 ULE 的方案^[25]。

EADS 的研制团队针对同轴系统^[37]和离轴系统^[28]分别进行了构型布局设计, 如图 12 和图 13 所示。主要设计思路都是光学元件采用微晶玻璃材料,

主次镜之间采用桁架结构支撑, 与后光学平台之间采用三点 bipod 支撑。

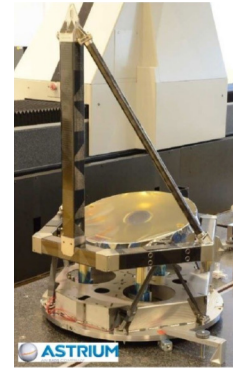


图 9 离轴四反光学系统布局^[38]
Fig. 9 Telescope assembly structure at Airbus^[38]



图 10 碳纤维复合材料结构样件^[39]
Fig. 10 CFRP structure prototype^[39]



图 11 SiC 结构稳定性样件^[40]
Fig. 11 SiC telescope spacer^[40]

Gath 等^[43]针对离轴视场内指向的光学系统形式开展了构型设计, 如图 14 所示, 主次镜之间的支撑采用桁架结构, 另外还尝试了将两个望远镜交叉布置, 如图 15 所示, 这样可以充分利用空间。

NASA 的望远镜研究团队^[25]最近的研究基线转向了光学元件和支撑结构全部采用微晶玻璃的方案, 先后提出了多种构型设计, 目前还在不断地优化过程中。全微晶的光机结构可以较好地保证望远镜的稳定性,

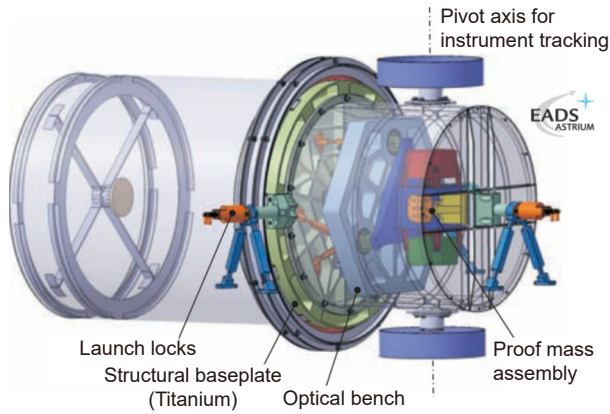


图 12 同轴望远镜构型^[37]
Fig. 12 Configuration of the coaxial telescope^[37]

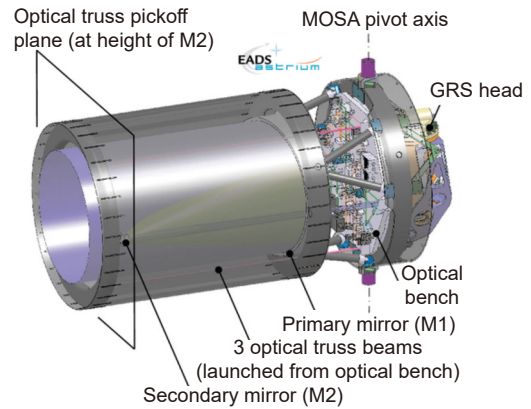


图 13 离轴望远镜构型^[28]
Fig. 13 Configuration of the off-axis telescope^[28]



图 14 离轴视场内指向望远镜构型^[43]
Fig. 14 Configuration of telescopes with in-field pointing^[43]

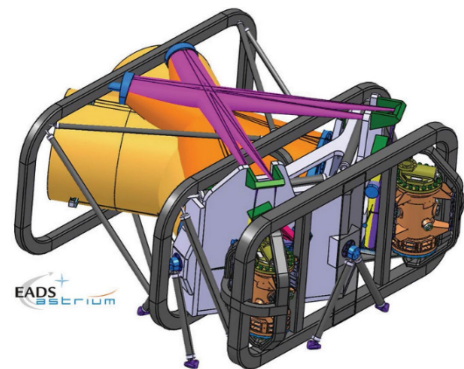


图 15 离轴视场内指向望远镜构型 (望远镜交叉布置)^[43]
Fig. 15 Configuration of telescopes with in-field pointing (crossing the two lines of sight of the two telescopes)^[43]

但是微晶玻璃许用强度较低,脆性材料对于微裂纹和微缺陷敏感,阻尼系数也较小,力学响应会比较大,存在较大的风险,需要开展深入的仿真和验证工作。

6 空间热环境与热控设计

空间引力波探测载荷的测试质量、后光学平台,望远镜等部件都对探测频段内的温度稳定性要求极高,望远镜的温度稳定性是影响光程稳定性的主要因素之一。望远镜的热控设计和边界条件与航天器总体的热控设计密切相关,研究望远镜的热控首先要从空间热环境和航天器总体的布局 and 热控方案出发。空间引力波探测任务规划之初都充分考虑了空间热环境的稳定性,LISA的轨道采用太阳轨道,轨道面与太阳矢量的夹角(β 角)变化比较小,基本稳定在 60° ^[3];LISA PathFinder^[44]选择了绕日地拉格朗日L1点的轨道,任务期间 β 角也基本稳定在 60° 。因此,可以通过在航天器上设计一个遮阳板,其他的部组件都布局在由遮阳板遮挡的 30° 圆锥区域内,确保能够遮挡全部的

太阳光,如图16所示。在遮阳板的外表面布置电池阵列或者高反射率的涂层,从材料和结构设计方面提高遮阳板的热阻,并与载荷舱隔热安装,使太阳热流漏到结构上的热量 $<1\%$ 。除此之外,LISA的热控思路还有^[44-48]:

- 1) 严格控制内热源的开关和工作模式转换,使内热源热耗波动小于 0.2% ;
- 2) 针对热耗较大的电子学单机,面向外空间的表面涂高发射率涂层,面向舱内的表面进行镀金处理,并采用隔热安装方式;
- 3) 尽可能采用被动热控,避免主动控温引起测量频段内的温度波动;
- 4) 为每个望远镜设计圆柱状的隔热罩,隔热罩表面镀金,减少望远镜与其他部组件的热交换;
- 5) 不采用热管进行传热,避免工质流动引起扰动。

另外一个外热流波动源是太阳常数的波动。根据长期的太阳辐照监测数据总结的经验公式估计,在

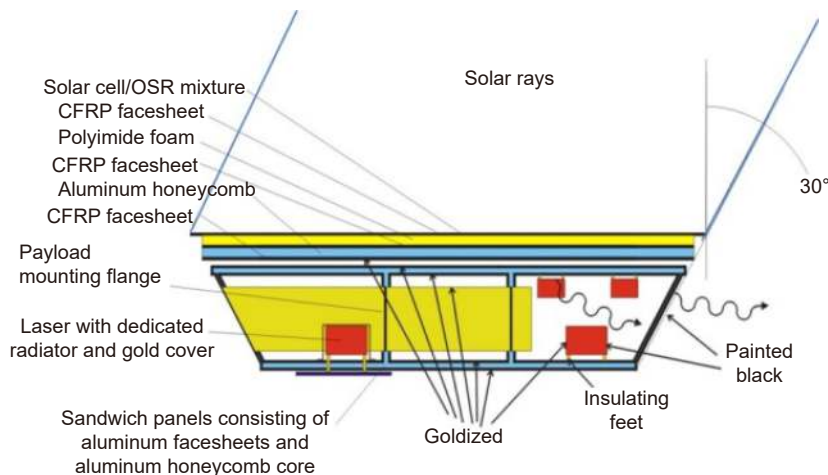


图 16 LISA 航天器的热控设计思路^[45]

Fig. 16 Thermal design concept of the LISA science module^[45]

0.1 mHz 频段太阳常数的波动为 $3.77 \text{ Wm}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$ ^[45]。Morgenroth 等^[45] 的初步热分析结果显示, 由太阳常数的波动引起的望远镜主镜温度波动为 $9.9 \times 10^{-7} \text{ K/Hz}^{1/2}@0.1 \text{ mHz}$; 由电子学单机引起的望远镜主镜温度波动为 $3 \times 10^{-5} \text{ K/Hz}^{1/2}@0.1 \text{ mHz}$ 。电子学单机热耗引起的温度波动远大于太阳常数引起的温度波动。

与 LISA 的轨道不同, 天琴^[49] 采用的是地心轨道, 任务周期内的 β 角变化比较大, 每年的变化范围约为 $-85^\circ \sim 85^\circ$ 。因此, 目前天琴拟采用 3 个月测量, 3 个月待机的交替运行模式, 在测量时段内 β 角的变化范围约为 $46^\circ \sim 85^\circ$, 对应太阳热流的变化约为 $950 \text{ Wm}^{-2} \sim 1400 \text{ Wm}^{-2}$ 。地球和月球引起的热流变化仅为太阳热流变化的 10^{-3} 和 10^{-5} 量级。从频域来看, 在 $0.1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ 频段内, 由 β 角的变化引起的外热流波动 $< 10^{-3} \text{ Wm}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$; 主要的外热流扰动仍来自太阳常数的波动, 约为 $5 \text{ Wm}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$, 与 LISA 太阳轨道的

热环境基本处于同样的水平。Chen 等^[50] 分别分析了 LISA 和天琴三颗航天器接收到的外热流差异, 建立了遮阳板的热动力学模型^[51], 为分析各频段的温度响应提供了基础, 也可以给天琴的热设计优化提供指导。此外天琴团队^[52] 还提出了采用相变材料等措施抑制温度波动的思路。

7 光程稳定性测试系统

由于空间引力波探测望远镜的光程稳定性是其关键指标之一, 所以望远镜的稳定性测试也是一项重要的研制工作。Uminska 等^[53] 设计了一套望远镜的光程稳定性测试系统, 测量原理如图 17 所示。采用超低热膨胀系数的材料构建一个参考 FP 腔, 采用 PDH 技术对其进行锁频, 并将激光频率谱线与碘的吸收谱线进行对比, 保证激光频率的长期稳定性。然后设计一个望远镜测试结构, 如图 18 所示, 将其与望远镜一

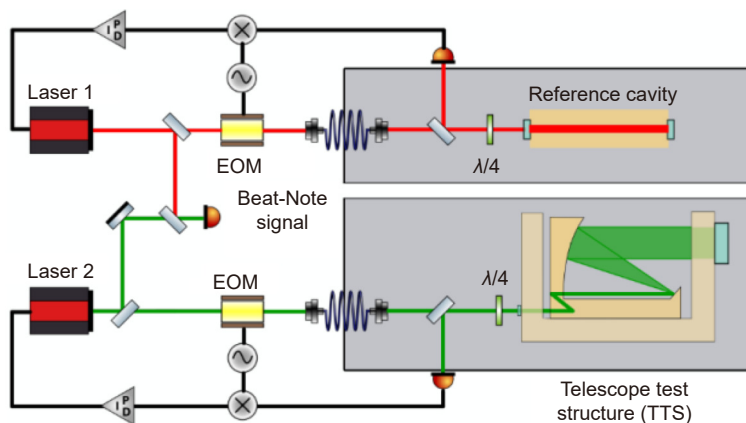


图 17 望远镜光程稳定性测试系统原理图^[53]

Fig. 17 Schematic of the optical setup^[53]

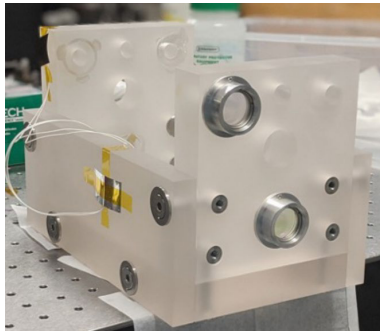


图 18 望远镜测试结构^[53]
Fig. 18 Telescope test structure^[53]

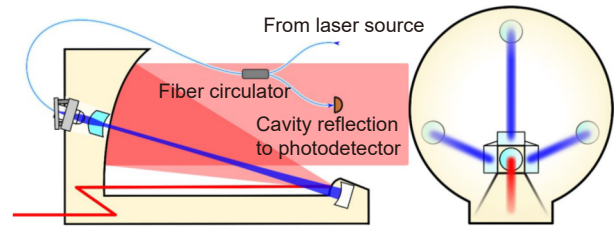


图 19 在望远镜结构上的布局示意图^[54]
Fig. 19 Layout of truss cavities on the telescope^[54]

起构建成一个 FP 腔体。同时再在望远镜测试结构上设置两个 FP 腔用于监测测试结构本身的稳定性。望远镜测试结构的材料为康宁 ULE 玻璃, 具有超低的热膨胀系数。最终在真空环境下的测试精度达到了 $0.3 \text{ pm/Hz}^{1/2}$, 温度稳定度为 $10 \text{ } \mu\text{K/Hz}^{1/2} @ > 2 \text{ mHz}$, 满足了 LISA 望远镜的测试要求。

Jersey 等^[54]设计了一套包含三通道 FP 腔的稳定性监测系统, FP 腔在望远镜上的布局如图 19 所示, 望远镜结构的变化将会引起 FP 腔的腔长变化。该系统三通道采用了同一个激光源, 每一个通道包括一个声光调制器和一个光电调制器, 声光调制器负责将 FP 腔调整至共振状态, 光电调制器负责提供锁频控制, 将反馈提供给声光调制器, 这样就避免了直接调整激光光源频率, 实现三通道共用一个激光光源。为

了与望远镜的尺寸匹配, 腔长设计为 700 mm。三个通道的激光信号可以与一个稳定的参考激光进行干涉测量, 也可以三个通道之间互相形成干涉测量系统, 后者需要比较复杂的解算算法。该系统的设计充分考虑了空间紧凑性, 如果认为望远镜的稳定性存在风险, 有必要进行在轨监测, 可以随着望远镜一起发射。Weise 等^[28]提出在望远镜发射通道截取一个小口径的光束与本振激光构成外差干涉测量系统用于望远镜结构稳定性监测, 如图 20 所示, 可以利用监测数据剔除由望远镜光机结构变化引起的测量噪声。需要注意的是, 上述两种方案直接测量的是望远镜光机的长度变化, 不是直接测量的望远镜的实际光程, 需要根据光学系统模型和光机结构的有限元模型仿真得到光机结构变形引起的实际光程变化。

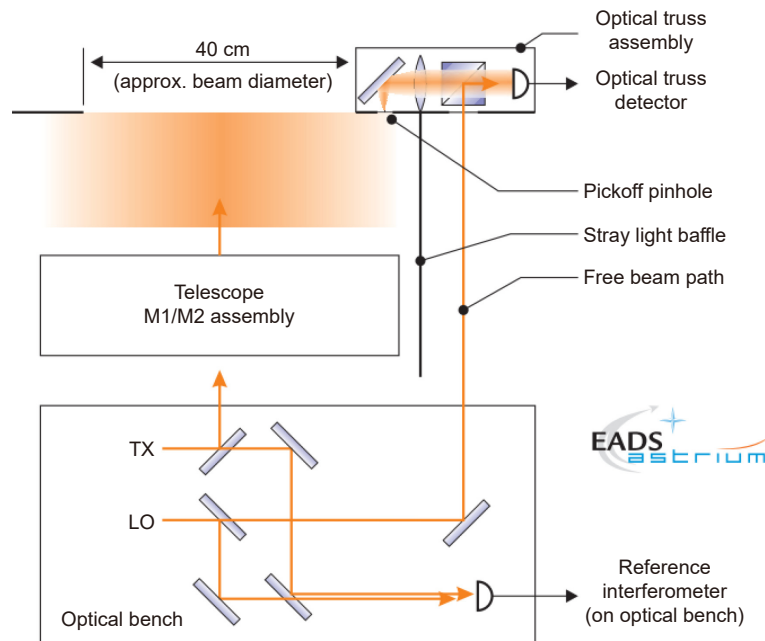


图 20 稳定性监测示意图^[28]
Fig. 20 Concept of the active optical truss^[28]

8 结 论

空间引力波探测望远镜的指标要求极具挑战, 望远镜的设计必需通过光机热集成优化, 并与后光学平台以及航天器总体相互迭代优化。本文对国内外空间引力波望远镜的光学系统设计、光机结构设计、杂散光仿真与控制、热控设计、光程稳定性测量等方面的研究进展进行了回顾。在光学系统方面, 设计基线是离轴四反光学系统, 光学设计和当前的加工装调水平可以保证望远镜的波前质量要求, 光学系统的优化方向是进一步减小与望远镜相关的 TTL 误差以及提高与后光学平台的匹配性。在望远镜光机结构方面, 碳纤维材料虽然比刚度较高, 但是材料出气和吸湿等特性引起的稳定性风险较大; SiC 材料虽然可以满足使用要求, 但由于热膨胀系数偏大, 对热控系统的要求比较高; 目前的基线设计是光学元件和结构全部采用微晶玻璃或者 ULE 材料, 能够较好地解决望远镜的稳定性问题, 但是发射段的抗力学能力问题目前的研究较少, 可以通过在发射段为望远镜提供一个辅助支撑, 入轨之后再使辅助支撑脱离望远镜, 以免影响望远镜在轨的稳定性。在杂散光方面, 通过超光滑光学表面加工技术保证光学元件的表面质量, 可以较好地控制光学表面散射引起的杂光, 光学表面的污染引起的杂散光比光学表面的粗糙度引起的杂散光更严重。随着工艺水平的提升, 光学表面的光滑程度还有进一步提高的空间, 与光学表面的粗糙度相关的杂散光还可以进一步降低; 与表面污染相关的杂散光抑制, 有赖于污染物的散射模型精度提升与污染的控制措施。在望远镜热控设计方面, 在 0.1 mHz~1 Hz 频段内的主要外热流扰动来自太阳常数的波动, 望远镜的热控与整星的构型和星上热源分布密切相关, 需要与航天器开展一体化的热控设计。

参考文献

- [1] Livas J C. Possible space-based gravitational-wave observatory mission concept[R]. Honolulu: International Astronomical Union, 2015.
- [2] Hammesfahr A. LISA mission study overview[J]. *Class Quantum Grav*, 2001, **18**(19): 4045–4051.
- [3] Jennrich O. LISA technology and instrumentation[J]. *Class Quantum Grav*, 2009, **26**(15): 153001.
- [4] 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.
- [5] Luo Z R, Guo Z K, Jin G, et al. A brief analysis to Taiji: science and technology[J]. *Results Phys*, 2020, **16**: 102918.
- [6] Luo Z R, Wang Y, Wu Y L, et al. The Taiji program: a concise overview[J]. *Prog Theor Exp Phys*, 2021, **2021**(5): 05A108.
- [7] 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.
- [8] Robertson D I, McNamara P, Ward H, et al. Optics for LISA[J]. *Class Quantum Grav*, 1997, **14**(6): 1575–1577.
- [9] 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.
- [10] Livas J C, Arsenovic P, Crow J A, et al. Telescopes for space-based gravitational wave missions[J]. *Opt Eng*, 2013, **52**(9): 091811.
- [11] Sankar S R, Livas J C. Optical telescope design for a space-based gravitational-wave mission[J]. *Proc SPIE*, 2014, **9143**: 914314.
- [12] Livas J, Sankar S. Optical telescope design study results[J]. *J Phys Conf Ser*, 2015, **610**: 012029.
- [13] 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 Sunyatseni*, 2021, **60**(1): 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): 178–185.
- [14] 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.
- [15] Fan Z C, Ji H R, Mo Y, et al. Pupil aberrations correction of the afocal telescope for the TianQin project[J]. *Class Quantum Grav*, 2023, **40**(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): 131–151. 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): 131–151.
- [17] Yu M, Li J C, Lin H A, et al. Optical system design of large-aperture space gravitational wave telescope[J]. *Opt Eng*, 2023, **62**(6): 065107.
- [18] Isleif K S, Gerberding O, Penkert D, et al. Suppressing ghost beams: backlink options for LISA[J]. *J Phys Conf Ser*, 2017, **840**: 012016.
- [19] Livas J, Sankar S, West G, et al. eLISA telescope in-field pointing and scattered light study[J]. *J Phys Conf Ser*, 2017, **840**: 012015.
- [20] Spector A D. Investigation of the telescope back-reflection for space-based interferometric gravitational wave detectors[D]. Gainesville: University of Florida, 2015.
- [21] Kim D, Choi H, Brendel T, et al. Advances in optical engineering for future telescopes[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(6): 210040.
- [22] Tian S H, Huang Y M, Xu Y J, et al. Study of off-axis telescope misalignment correction method using out-of-focus spot[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(7): 230040. 田思恒, 黄永梅, 徐杨杰, 等. 利用离焦光斑的离轴望远镜失调校正方法研究[J]. *光电工程*, 2023, **50**(7): 230040.
- [23] Schuldt T, Gohlke M, Weise D, et al. Picometer and nanoradian optical heterodyne interferometry for translation and tilt metrology of the LISA gravitational reference sensor[J]. *Class Quantum Grav*, 2009, **26**(8): 085008.
- [24] Sankar S R, Livas J. Optical alignment and wavefront error demonstration of a prototype LISA telescope[J]. *Class Quantum Grav*, 2020, **37**(6): 065005.
- [25] Escudero Sanz I, Heske A, Livas J C. A telescope for LISA—the laser interferometer space antenna[J]. *Adv Opt Technol*, 2018, **7**(6): 395–400.
- [26] Lehan J P, Howard J M, Li H, et al. Pupil aberrations in the LISA transceiver design[J]. *Proc SPIE*, 2020, **11479**: 114790D.
- [27] Papa J C, Howard J M, Rolland J P. Survey of the four-mirror

- freeform imager solution space[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(25): 41534–41551.
- [28] Weise D, Marenaci P, Weimer P, et al. Opto-mechanical architecture of the LISA instrument[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10566**: 1056611.
- [29] Chen S N, Jiang H L, Wang C Y, et al. Optical system design of inter-spacecraft laser interferometry telescope[J]. *Opt Photonics J*, 2019, **9**(8B): 26–37.
- [30] Yu M, Li J C, Lin H A, et al. Design of optical system for low-sensitivity space gravitational wave telescope[J]. *Chin Opt*, 2023, **16**(6): 1384–1393.
余苗, 李建聪, 林宏安, 等. 低灵敏度空间引力波望远镜光学系统设计[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, **16**(6): 1384–1393.
- [31] Li J C, Lin H A, Huang Y Z, et al. Evaluation method for the design results of space gravitational-wave telescopes[J]. *Meas Sci Technol*, 2023, **34**(5): 055409.
- [32] Weise D R, Marenaci P, Weimer P, et al. Alternative opto-mechanical architectures for the LISA instrument[J]. *J Phys Conf Ser*, 2009, **154**: 012029.
- [33] Leng R K, Wang S, Wang Z, et al. Measurement and suppression of forward stray light for spaceborne gravitational wave detection[J]. *Chin Opt*, 2023, **16**(5): 1081–1088.
冷荣宽, 王上, 王智, 等. 空间引力波探测前向杂散光测量和抑制[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, **16**(5): 1081–1088.
- [34] 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.
- [35] 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**: 012031.
- [36] Khodnevych V, Lintz M, Dinu-Jaeger N, et al. Stray light estimates due to micrometeoroid damage in space optics, application to the LISA telescope[J]. *J Astron Telesc Instrum Syst*, 2020, **6**(4): 048005.
- [37] Weise D, Braxmaier C, Gath P, et al. Optical metrology subsystem of the LISA gravitational wave detector[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10567**: 105670Q.
- [38] Verlaan A L, Hogenhuis H, Pijnenburg J, et al. LISA telescope assembly optical stability characterization for ESA[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10564**: 105640K.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Krieg J, Carré A, Döhning T, et al. The past decade of ZERODUR® glass-ceramics in space applications[J]. *Proc SPIE*, 2022, **12180**: 121805N.
- [42] Brooks T E, Eng R, Stahl H P. Optothermal stability of large ULE and Zerodur mirrors[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10743**: 107430A.
- [43] Gath P F, Weise D, Schulte H R, et al. LISA mission and system architectures and performances[J]. *J Phys Conf Ser*, 2009, **154**: 012013.
- [44] Barraclough S, Robson A, Smith K, et al. LISA Pathfinder thermal design and micro-disturbance considerations[R]. SAE International, 2006. <https://doi.org/10.4271/2006-01-2276>.
- [45] Morgenroth L, Honnen K, Heys S, et al. Thermal study of laser interferometer space antenna (LISA)[R]. SAE International, 2001. <https://doi.org/10.4271/2001-01-2259>.
- [46] Peabody H, Merkowitz S. LISA thermal design[J]. *Class Quantum Grav*, 2005, **22**(10): S403–S411.
- [47] Peabody H, Merkowitz S M. Low frequency thermal performance of the LISA sciencecraft[J]. *AIP Conf Proc*, 2006, **873**(1): 204–209.
- [48] Fishwick N, Barraclough S, Warren C. High accuracy thermal modelling applied to LISA pathfinder thermal noise analysis[C]//40th International Conference on Environmental Systems, 2010: 6142. <https://doi.org/10.2514/6.2010-6142>.
- [49] Xia B, Chen H Y, Wang Y P, et al. External heat flux and thermal control design of space gravitational wave detection satellite[J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 2021, **60**(1): 138–145.
夏冰, 陈厚源, 汪一萍, 等. 空间引力波探测卫星外热流环境及其热控设计[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2021, **60**(1): 138–145.
- [50] Chen H Y, Ling C, Yao Z Y, et al. Thermal environment analysis for TianQin: II. Solar irradiance disparity across constellation[J]. *Class Quantum Grav*, 2022, **39**(16): 165009.
- [51] Chen H Y, Ding Y W, Pan J J, et al. Thermal environment analysis for TianQin: III. Low-frequency thermal transfer inside the flat-top sun shield[J]. *Class Quantum Grav*, 2023, **40**(8): 085001.
- [52] Chen H Y, Ling C, Zhang X F, et al. Thermal environment analysis for TianQin[J]. *Class Quantum Grav*, 2021, **38**(15): 155015.
- [53] Umińska A A, Kulkarni S, Sanjuan J, et al. Ground testing of the LISA telescope[J]. *Proc SPIE*, 2021, **11820**: 118200I.
- [54] 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.

作者简介



王小勇 (1972-), 男, 博士, 研究员, 长期从事空间光学遥感器研究, 主持完成了三代 6 个型号高分辨率航天遥感器研发, 新世纪“百千万人才工程”国家级人选, 享受国务院特殊津贴。

E-mail: w8320@126.com



【通信作者】白绍竣 (1982-), 男, 博士, 主要从事航天遥感器设计, 光机结构设计, 结构动力学等方面研究。

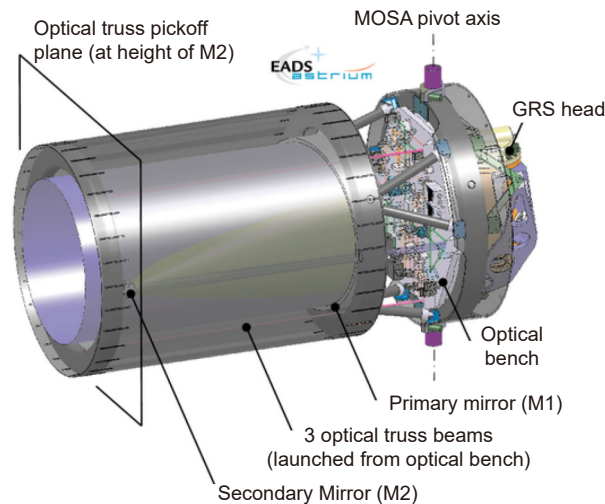
E-mail: baisj2008@126.com



扫描二维码, 获取PDF全文

Research progress of telescopes for space-based gravitational wave missions

Wang Xiaoyong, Bai Shaojun*, Zhang Qian, Lin Xuling, Li Yang, Xia Chenhui



Overview: The optical telescopes for space-based gravitational wave missions play an important role in the measurement, which both expand the beam going to the far spacecraft and efficiently collect the beam sent from the far spacecraft. The telescope, as part of the interferometric path, directly affects the measurement noise. Compared with the imaging system, the telescope for space gravitational wave observatory not only has high requirements on wavefront quality, but also has extremely high requirements on stray light performance and optical path stability. In addition, the coupling of the wavefront aberration resulting from the telescope and pointing error can produce tilt-to-length (TTL) noise. One of the design goals is to minimize the TTL coupling in the transceivers. In terms of the optical system, the design baseline is an off-axis four-mirror optical system, which can meet the wavefront quality and stray light specification requirements. The optimization of the optical system is to further reduce the TTL noise and improve compatibility with the optical bench. The opto-mechanical structure of the telescope is the physical carrier to realize the optical, mechanical, and thermal design functions. The current design baseline tends to use Zerodur or ULE materials for all optical components and structures, which can ensure the optical path stability of the telescope. However, there are currently few studies on the vibration tolerance of telescopes during the launch stage. In terms of stray light, through optimization of the optical system and strict control of the surface quality of optical components, backscattered stray light can be reduced to 10^{-10} of the transmission power. Stray light caused by contamination of the optical surface is more serious than stray light caused by the roughness of the optical surface. Stringent anti-pollution measures need to be taken during development and storage. In terms of the thermal design, the main external heat flow disturbance in the 0.1 mHz - 1 Hz frequency band comes from the fluctuation of the solar constant. The thermal control of the telescope is closely related to the configuration of the spacecraft and the distribution of heat sources. Thermal design and optimization of telescopes need to be carried out integrated with the spacecraft. The research progress of the telescope's optical system, optomechanical structure, space environment and thermal design, stray light simulation and suppression, and stability measurement are reviewed, which can provide a reference for the development of space gravitational telescopes in our country.

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; DOI: [10.12086/oe.2023.230219](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230219)

Foundation item: Project supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFC2202000)
Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

* E-mail: baisj2008@126.com