

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

罗健, 宋婕, 房思俊, 孔繁乐, 闫勇

引用本文:

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.

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.<https://doi.org/10.12086/oe.2024.230211>

收稿日期: 2023-08-30; 修改日期: 2024-02-07; 录用日期: 2024-02-07

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

引力波探测望远镜超低热变形桁架支撑结构设计技术

李博宏, 罗健, 丘敏艳, 陈文多, 赵宏超

光电工程 2023, 50(11): 230155 doi: 10.12086/oe.2023.230155

望远镜光程稳定性测量方案设计及噪声理论分析

赵凯, 范纹彤, 海宏文, 张锐, 范磊

光电工程 2023, 50(11): 230158 doi: 10.12086/oe.2023.230158

基于离轴四反的空间引力波探测激光发射望远镜设计

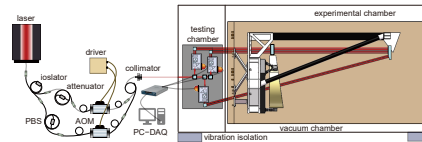
范子超, 谈昊, 莫言, 王海博, 赵璐佳, 冀慧茹, 姜治渝, 彭如意, 付利平, 马冬林

光电工程 2023, 50(11): 230194 doi: 10.12086/oe.2023.230194

更多相关论文见光电期刊集群网站 

DOI: 10.12086/oe.2024.230211

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



罗健, 宋婕, 房思俊, 孔繁乐, 闫勇*

“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: 空间引力波探测望远镜是引力波探测卫星的核心载荷之一, 它同时对传输光束进行扩束和缩束。光程稳定性是望远镜的核心指标之一, 其与望远镜结构稳定性密切相关。为了满足引力波探测任务对望远镜提出的超高光程稳定性和结构稳定性要求, 必须对望远镜结构形变测量进行研究。本文开展了对空间引力波探测望远镜多自由度形变测量的研究, 重点解决多自由度测量的耦合问题, 并对误差来源进行详细分析。在空间引力波探测望远镜的研制阶段, 该测量方法的研究有望满足望远镜多自由度形变测量的需求, 为望远镜设计提供多自由度形变的数据反馈, 为望远镜光程稳定性研究提供指导。

关键词: 空间引力波探测望远镜; 形变测量; 多自由度; 解耦研究; 噪声分析

中图分类号: O439

文献标志码: A

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

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

Decoupling study and noise analysis of multi-degree-of-freedom deformation measurement method for space gravitational wave detection telescope

Luo Jian, Song Jie, Fang Sijun, Kong Fanle, Yan Yong*

MOE 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 space gravitational wave telescope is a key payload of gravitational wave detection satellites, responsible for both beam expansion and compression. Optical path stability is a crucial indicator for the telescope,

收稿日期: 2023-08-30; 修回日期: 2024-02-07; 录用日期: 2024-02-07

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFC2202202)

*通信作者: 闫勇, yanyong5@mail.sysu.edu.cn

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

closely related to its structural stability. To meet the stringent requirements for ultra-high optical path stability and structural stability in gravitational wave detection missions, it is necessary to investigate the measurement of structural deformations in the telescope. This paper presents a study on multi-degree of freedom deformation measurement for space gravitational wave telescopes, focusing on addressing the coupling issues in multi-degree of freedom measurement and conducting a detailed analysis of error sources. During the development phase of the space gravitational wave telescope, this measurement method is expected to meet the demands for multi-degree of freedom deformation measurement, providing data feedback on multi-degree of freedom deformations for telescope design and offering guidance for optical path stability research.

Keywords: the space gravitational wave detection telescope; deformation measurement; multi-degree-of-freedom; decoupling study; noise analysis

1 引言

20 世纪初, 爱因斯坦提出广义相对论并在理论上预测了引力波的存在。一个世纪后, LIGO (the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) 团队首次直接探测到了引力波^[1]。受限于地球引力场和地面噪声的干扰, 地面引力波探测器只能探测到较高频率范围内的引力波信号, 空间引力波探测可以探测低频引力波信号, 目前世界各国都制定了各自的空间引力波探测计划, 其中最具代表的是美国 NASA 和欧空局 ESA 的 LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 计划^[2]。天琴计划是中国的空间引力波探测计划之一, 旨在部署三颗全同卫星构成一个边长约为 17 万公里的等边三角形星座, 以建立一个空间引力波天文台^[3-4], 为实现空间引力波探测迈出了坚实的一步。空间引力波探测望远镜系统的超高光程稳定性是实现皮米级星间测距的关键^[5-6], 望远镜结构形变是影响光程稳定性的重要因素。现阶段望远镜支架形变测量系统的本底噪声要求小于 $10 \text{ nm/Hz}^{1/2}@1 \text{ mHz}$ 。为了提高望远镜结构稳定性, 通常采用热膨胀系数极小的微晶玻璃材料 (Zerodur) 或碳纤维复合材料 (carbon-fiber reinforced plastic, CFRP) 作为支架材料。由于材料特性和热工作环境的影响, 望远镜支架会发生复杂形变。因此需要在地面测量望远镜支架的形变, 建立热扰动与结构形变的传函模型, 研究望远镜支架形变引起的光程稳定性的变化^[7]。在望远镜设计阶段需要获得实物样机多自由度的形变数据作为数据反馈。空间引力波探测望远镜结构多自由度形变测量方法的研究可以验证望远镜支架结构、支架材料和装调是否符合要求, 可以为结构形变影响光程变化的研究提供指导^[8-9]。

望远镜支架形变测量方法的研究一直是国内外引力波研究团队关注的重点之一。2008 年 LISA 团队开展了 CFRP 尺寸稳定性皮米分辨力测量的研究^[10], 由于主次镜之间要求间距必须稳定在几皮米, 备选的材料有 Zerodur 和 CFRP, 因此对这两种材料的热稳定性进行了研究。在 2016 年的一篇报道中, 研究人员介绍了一种未来有可能运用在 LISA 望远镜上的 CFRP 材料的热稳定性的测量方法^[11]。这种方法采用外差干涉技术, 严格控制环境因素来测量 CFRP 管的热变形系数, 该测量装置的测量精度受限于 Tilt-to-length (TTL) 耦合噪声, 目前是 $10^{-8}/\text{K}$ 。为了解决这个问题, 研究者采用了四象限光电传感器和差分波前技术 (differential wavefront sensing, DWS), 目前该装置仍在不断完善。望远镜支架形变测量方法的研究遵循先研究材料的热变形后研究支架结构的热变形的顺序开展, 在该系列问题的相关研究中, 研究者们普遍选用外差干涉法原理^[12]。

2012 年, LISA 团队对望远镜进行了单自由度的结构稳定性测试, 测量了不同温度条件下光轴方向望远镜支架结构的稳定性, 研究结果显在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下大于 0.5 mHz 的频段内或 $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下大于 10 mHz 的频段内, 望远镜光轴方向的结构稳定性均满足要求^[13]。2012 到 2014 年期间, LISA 团队又研究了望远镜三自由度的支架形变测量方法, 开展了真空热循环实验, 测量了结构热变形系数, 研究了温度滞后变形和热梯度的敏感性。通过迭代设计, 望远镜的部分指标达到要求。其研发的由一个热真空室和三个位移检测干涉仪组成的测量设备热稳定性小于 0.1 K/hr , 热均匀性小于 1 K ^[14]。尽管该设备能够获取较大的温度变化范围内望远镜支架的形变信息, 并得到了 100 K 范围内主次镜之间结构的热变形系数, 但该研究缺乏

对多自由度的测量的理论指导。2022年, 太极团队使用商用干涉仪对离轴望远镜支架进行了单自由度的结构稳定性测量, 得到了望远镜支架的结构热变形系数, 修正了仿真模型, 但该团队并未进行多自由度的形变测量研究^[15]。

综上所述, 目前关于引力波探测望远镜多自由度形变测量方法的研究仍存在诸多不足, 如测量点的选择不准确、多自由度耦合无法解耦和多自由度测量的误差来源不清晰等问题。由于望远镜支架多自由形变测量过程中存在多自由度耦合问题, 如何建立准确的数学模型进行解耦测量, 实现多自由度形变的准确测量是望远镜支架形变测量的难点所在。基于此, 本文主要针对望远镜多自由度形变测量的解耦问题展开研究。首先, 基于多路外差干涉法进行光机系统设计和分析, 选择测量的特征点来表示望远镜支架的多自由度形变, 并使用一种可以测量相对位移的光路来测量每一组特征点的位移。其次, 通过解析方法建立解耦数学模型, 并使用 Zemax 软件进行初步验证。最后, 对测量系统进行误差分析, 提出各测量误差源的指标, 进行初步实验验证。

2 多自由度形变测量原理及系统设计

2.1 多自由度形变测量原理

天琴望远镜主镜在卫星舱内, 次镜面向宇宙冷黑环境, 望远镜在轨运行时主次镜间将产生较大的径向和轴向温度梯度, 望远镜支架的材料是膨胀系数极小但具有热膨胀各向异性的碳纤维复合材料, 其热变形发生在六个自由度, 且沿望远镜主支撑杆方向会发生收缩变形, 与望远镜主支撑杆垂直的方向会发生偏转变形, 望远镜主支撑杆截面的方向会发生扭转变形^[16]。

适用于望远镜多自由度形变测量方法主要包括电学法^[17-18]和光学法^[17-18], 它们的优缺点如表 1 所示。在测

量多自由度形变的方法中, 电学法包括电容测量和电感测量, 具有精度高、稳定性好、测量速度快、反应时间快等优点, 但无法实现非接触测量, 且测量范围较小。光学法包括光杠杆法、多路外差法和波前差分法等, 光学法具有高精度的优点, 但对于结构复杂微变形的测量和表征能力有限, 需要合理布置测量点。其中多路外差干涉法在响应速度、灵敏度和测量范围等方面都占有优势, 角度测量非线性也更小^[19], 因此本研究选用多路外差干涉法。

2.2 多自由度形变测量系统组成

测量系统由激光光源模块、相对位移测量光路模块和相位采集数据处理模块组成。激光光源模块提供频率稳定、相干性良好的光源, 包括 1064 nm 单模光纤固体激光器、光纤隔离器、可调光纤衰减器等; 外差调制模块提供固定频差的干涉光束, 包括光纤分束器、声光调制器 (AOM) 及配套射频驱动器等; 测量光路包括平行偏振分束器、偏振分束器、角锥棱镜、偏振波片和反射镜, 主要用于测量两个反射镜之间的相对位移变化。相位采集模块包括光电探测器、多通道数据采集卡及相位处理程序。激光经过光纤分束后进行移频, 输出两路具有固定频差的激光。测量激光通过光学元件实现测量, 由光电探测器接收到激光信号并通过数据采集和数据处理得到位移信息。

常规的外差干涉光路只能测量一个反射镜的位移, 为了实现两个反射镜的相对位移的测量, 需要将常规外差干涉的光路进行改进, 改进的思路是首先将参考臂和测量臂设计为平行的两条光路, 实现的方法是使用平行分光棱镜。当参考臂和测量臂平行时, 让参考臂光路到达第一个反射器之后反射, 让测量臂光路到达第二个反射器之后反射, 这样就可以实现两个反射器的相对位移的测量。最终设计的光路如图 1 所示。偏振方向垂直并且频率不同的两束激光通过平行偏振分光器时发生折射, 分成相互平行的两束激光。一束

表 1 多自由度测量方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of multiple-degree-of-freedom measurement methods

方法	优点	缺点
电学法 ^[20]	电容测量 精度高、稳定性好、测量速度快、反应时间快	无法实现非接触测量, 测量范围小
	电感测量 精度高、对工作环境要求低	
光学法 ^[21]	光杠杆 测量原理简单, 易操作, 稳定性高	灵敏度低
	多路干涉 响应速度快, 灵敏度在 1 mHz 以上占有优势, 测量范围更大, 角度测量非线性更小	结构复杂, 对环境敏感, 对结构复杂微变形的测量和表征能力有限
	差分波前 角度测量简单高效	只能进行角度测量且精度受限于探测器

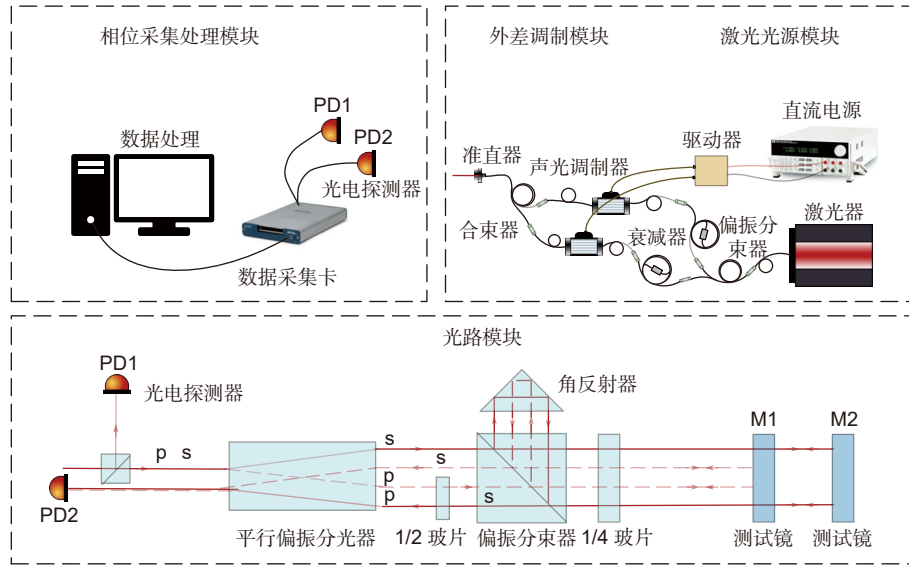


图 1 三自由度形变测量系统结构组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the composition of a three-degree-of-freedom deformation measurement system

激光透射通过偏振分束器、1/4 波片和 M1，在 M2 反射镜发生反射，反射后的激光再次透射经过 M1 和 1/4 波片，由于两次经过 1/4 波片，激光的偏振态发生了改变，在偏振分束器处发生反射，进入角锥棱镜发生一系列反射之后，激光通过 M1 和 1/4 波片后偏振态再次发生改变，激光透射通过偏振分束器和半波片，在平行偏振分光器处与另一束激光合束进入光电探测器 PD2，如图 1 光路模块实线所示，可以表示为

$$E_1 = A_1 e^{-i(\omega_1 t + \phi_1)} \quad (1)$$

在光束偏移器处发生偏移的另一束激光首先通过半波片发生偏振态的改变后进入偏振分束器，通过偏振分束器 1/4 波片后在 M1 反射镜处发生反射，再次经过 1/4 波片后偏振态发生改变，在偏振分束器处发生反射进入角锥棱镜，经过一系列反射之后，通过偏振分束器后在平行偏振分光器处与实线激光发生合束，如图 1 光路模块虚线所示，可以表示为

$$E_2 = A_2 e^{-i(\omega_2 t + \phi_2)} \quad (2)$$

式中： A_1 和 A_2 是两个信号的幅值， ω_1 、 ω_2 是 AOM 移频后的频率； ϕ_1 、 ϕ_2 是对激光进行移频后，初始相位改变后的值。

根据探测器的工作原理，滤去直流分量和高频分量，探测器 PD2 接受到的信号为

$$I \propto A \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi_0) \quad (3)$$

当测量臂与参考臂发生微小相对运动 dx 时，根据多普勒效应，取介质折射率为 1，拍频信号的相位变化可表示为

$$\Delta\phi = \frac{8\pi dx}{\lambda} \quad (4)$$

式中： A 是拍频信号的幅值， $\Delta\phi_0$ 是参考激光与测量激光的相位差， $\Delta\omega$ 是参考激光与测量激光的频率差， λ 是激光波长。

使用 AOM 声光调制器会引入前端光程噪声，在外差干涉仪的基础上添加一路干涉参考信号作为测量相位变化的参考标准，如图 1 光路模块所示进入 PD1 的光束。这种干涉仪实现了测量光束和参考光束的空间分离，同时具有高度对称的光路设计，测量光束和参考光束具有相似的空间光路和接近的光路长度。并且测量光束和参考光束通过相同的光学元件，以此来降低温度对测量精度的影响，所以这种光路设计的优点是使用共模抑制技术，更符合高精度测量的要求。

2.3 多自由度形变测量系统设计

为了实现望远镜支架形变的多自由度测量，本文结合天琴望远镜光机结构设计一种三自由度形变测量方法，如图 2 所示。使用激光器和声光调制器等仪器在真空腔外产生差频激光，激光通过真空罐的光学窗口进入测试腔。在测试腔中布置多个一体化光学器件平台，激光从真空罐外进入一体化光学器件平台分为多条测量链路，测量激光从测试区通过光学窗口进入实验腔。激光通过位于望远镜支架特征点处的测试镜，再达到测试腔内的光电传感器，由数据采集卡进行信号采集和相位提取就可获得望远镜支架的形变信息。

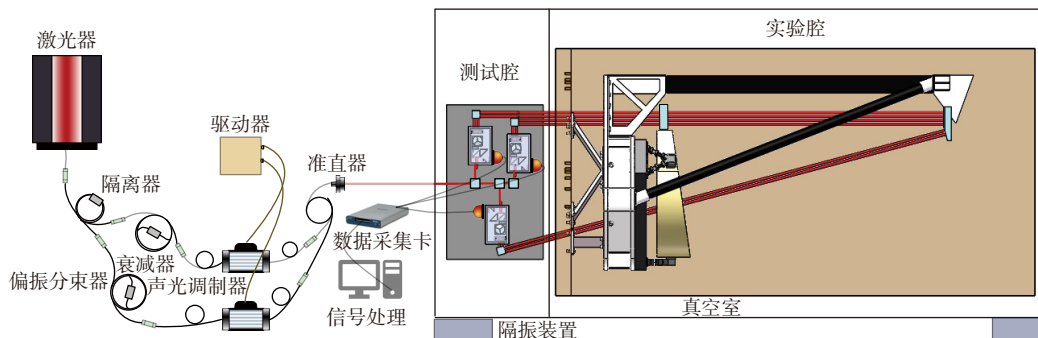


图 2 三自由度形变测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the three-degree-of-freedom deformation measurement system

测试腔真空恒温, 且与实验腔热隔离, 目的是为干涉仪提供良好的工作环境。实验腔外腔采用热沉隔离环境热扰动, 内壁设置加热丝和辐射灯以模拟望远镜的空间工作环境。望远镜支架表面不能反射激光, 必须安装测试镜对测量激光进行反射。考虑到实际加工情况, 实现一体化结构非常困难, 因此需要采用机械安装工件来进行安装。

3 多自由度形变测量系统的解耦问题

3.1 测量自由度选择及表示方法

测量望远镜支架的形变本质上是测量能够反映形变的特征点的位移, 选择的特征点数量越多, 获得望远镜支架形变信息越丰富, 但测量的难度也会越大。因此选择合适的特征点的数量和位置, 既能获取重要信息, 又能降低光学测量系统的复杂性。

利用 Zemax 追迹从入瞳到初始出瞳位置之间的主光线, 分析各个反射镜刚体位移对光程的影响。在只有一块反射镜发生运动的情况下, 主镜、次镜、三镜和四镜在光轴方向发生 $5\ \mu\text{m}$ 的刚体位移时, 总光程均会发生 $10\ \mu\text{m}$ 左右的变化。而主镜和次镜在 R_x 方向 (以 x 轴作为旋转轴, 以顺时针作为正方向) 发生 $5\ \mu\text{rad}$ 的旋转时, 光程分别会发生 $2.1\ \mu\text{m}$ 和 $73.3\ \text{nm}$ 的变化。三镜和四镜在 R_x 方向发生 $5\ \mu\text{rad}$ 的旋转时, 光程均会发生小于 $25\ \text{pm}$ 的变化。由此得出结论: 不同反射镜发生相同的刚体位移对光程的影响不同, 其中主镜和次镜的影响比较大, 三镜和四镜的影响比较小。望远镜系统中反射镜的不同自由度的刚体位移对光程变化的影响权重不同, z 方向平移、 y 方向平移和 R_x 方向的旋转对光程的影响明显较大。因此, 本研究测量主次镜之间 z 方向平移、 y 方向平移和 R_x 方向的旋转三个自由度的刚体位移。测量特征点的位置

变化即可得到望远镜支架敏感方向三个自由度的形变。特征点需要根据测量目的进行选择以获取敏感自由度的变形信息, 特征点处的变形信息比其他位置更有测量价值, 其次, 特征点处的变形更便于测量。根据这样的原则, 选择主次镜主光线经过的点, 位于主支撑方杆两端热变形量较大的点, 望远镜设计关键参数处的点以及对光程影响较大的点, 具体位置如图 3 所示。

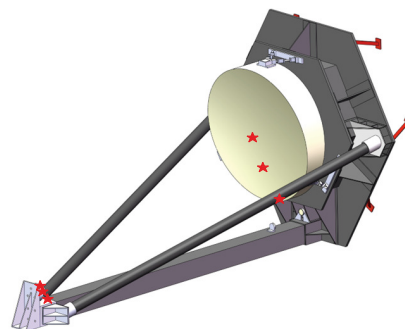


图 3 测量点位置选择示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement point position selection

3.2 三自由度测量解耦

几何耦合关系是指不同自由度的位移之间存在几何关系, 由物体的形状和尺寸所决定的。在进行多自由度位移测量时, 几何耦合会对测量的准确性和精度造成很大的影响。为了解决多自由度测量的耦合问题, 需要对被测物体进行数学建模并解耦分析, 得到一个更为准确的位移计算模型。测量的自由度越多, 各自由度之间相互耦合越复杂, 实现高精度测量就越困难。进行六自由度形变测量需要在三维空间上布置光学元件, 这大大增加了实验的难度和光学传感系统的复杂性。在此情况下, 建立解耦敏感方向三自由度测量数学模型是一种有效的方法, 如图 4 所示。建立激光测

量坐标系, 以主镜测试镜与测量激光 I_1 的交点作为坐标原点, 以光轴射向次镜测试镜的方向作为 z 轴正方向, 用解析式表示出各测量光束和测试镜平面的方程式, 然后计算测试镜发生位移前后激光在测试镜反射面上的交点坐标, 最后通过计算反射前后交点坐标之间的直线距离, 得到测量激光光程的变化。通过分别计算三个激光链路激光光程在测试镜发生不同自由度位移时的光程变化, 联立求解, 可以得到各自由度下不同激光链路测量激光光程的变化。

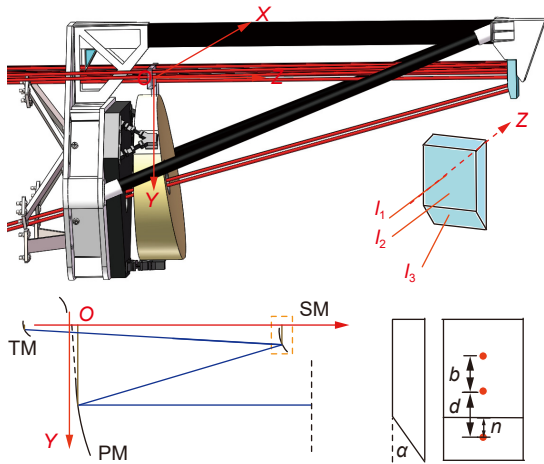


图 4 三自由度形变测量解耦数学模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the decoupling mathematical model for the three-degree-of-freedom deformation measurement system

建立如图 4 所示坐标系, 次镜测试镜平面方程为 $z = 1$, (5)

次镜测试镜斜面的平面方程为

$$\begin{cases} y \sin \alpha - (z+l) \cos \alpha - (b+d-n) \sin \alpha = 0 \\ z = (y-b-d+n) \tan \alpha - l \end{cases} \quad (6)$$

测量激光 I_1 与次镜测试镜相交于 O_1 点 $(0,0,1)$, I_1 的直线方程为

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \end{cases} \quad (7)$$

测量激光 I_2 与次镜测试镜相交于 O_2 点 $(a,0,1)$, I_2 的直线方程为

$$\begin{cases} x = a \\ y = 0 \end{cases} \quad (8)$$

测量激光 I_3 与次镜测试镜相交于 O_3 点 $(0, b+d, n \cdot \tan \alpha + 1)$, I_3 的直线方程为

$$\begin{cases} \frac{y-(b+d)}{\sin \alpha} = -\frac{z+l-n \tan \alpha}{\cos \alpha} \\ x = 0 \end{cases} \quad (9)$$

次镜测试镜发生 y 方向的位移 dy 时, 测量激光干涉测量的位移值为

$$\begin{aligned} dI_1 &= 0, \\ dI_2 &= 0, \\ dI_3 &= -\sin \alpha dy. \end{aligned} \quad (10)$$

次镜测试镜发生 z 方向的位移 dz 时, 测量激光干涉测量的位移值为

$$\begin{aligned} dI_1 &= dz, \\ dI_2 &= dz, \\ dI_3 &= dz \cos \alpha. \end{aligned} \quad (11)$$

次镜测试镜发生绕 x 方向的位移 dR_x 时, 测量激光干涉测量的位移值为

$$\begin{aligned} dI_1 &= 0 \\ dI_2 &= b dR_x \\ dI_3 &= \left[(b+d-n) \cos \alpha + \frac{n}{\cos \alpha} \right] dR_x \end{aligned} \quad (12)$$

以上方法得到的三自由度位移与各光学传感链路的响应矩阵为

$$\begin{pmatrix} dI_1 \\ dI_2 \\ dI_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & b \\ \cos \alpha & -\sin \alpha & (b+d-n) \cos \alpha + \frac{n}{\cos \alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dz \\ dy \\ dR_x \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中: dI_1 、 dI_2 和 dI_3 是三条激光测量链路干涉测量的位移值, dy 和 dz 是测试镜沿 y 轴和 z 轴方向的位移, dR_x 是绕 x 轴的旋转, b 是两条激光链路对应激光光轴之间的距离, d 是两条激光链路对应激光光轴在次镜测试镜平面投影的距离, n 是 I_3 激光光轴与次镜测试镜棱的距离, α 是测试镜的二面角的大小。

3.3 测量系统解耦模型仿真分析

在 Zemax 光学仿真软件中对图 1 光路进行仿真分析, 在非序列模式下, 建立光学系统如图 5 所示。

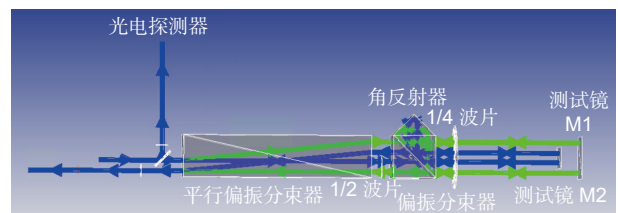


图 5 Zemax 光学系统仿真图

Fig. 5 Zemax optical system simulation

改变测量镜之间的距离, 分别利用光线追迹分析两束光到达 PD2 处的结果, 在探测器查看器中读取相干相位信息, 两者之间的相位差即是实际拍频信号的相位, 由于探测器的仿真方式是在每个探测器的像素点上面求相位值, 所以在探测器的感光面上有许多像素点, 并且相位有微小差异, 将所有像素点的相位做平均, 作为整个光路的相位。通过改变反射镜之间

的相对距离得到的位移变化与拍频信号相位变化的关系, 如图 6。

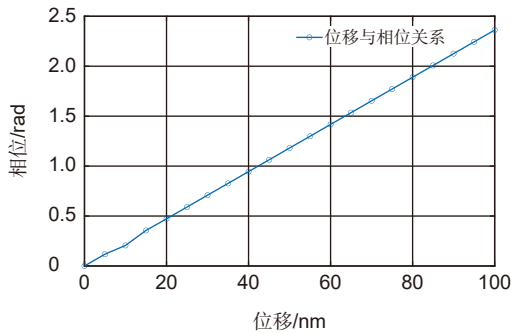


图 6 位移与相位关系图

Fig. 6 Relationship between displacement and phase

图 6 表明位移变化与相位差之间存在线性关系, 利用最小二乘法进行线性拟合, 得到二者关系为

$$\Delta\varphi = 0.02368dx \approx \frac{8\pi}{\lambda} dx. \quad (14)$$

根据仿真结果得出结论, 上述这种光路可以实现两面反射镜相对位移的测量。根据三自由度实际测量光路建立三自由度测量光路的模型, 如图 7 所示。设置光学元件的大小接近实际器件, 然后设置激光光源使其具有固定的频差, 最后设置使用偏振和光线分裂进行光线追迹分析, 在探测器查看器中读取相位的数据, 仿真模拟多自由度测量光路, 目的是验证建立的多自由度解耦数学模型是否正确。

改变主次镜之间的相对位置, 分别使主次镜发生三个自由度的刚体位移, 然后对比次镜反射镜原始位

置状态下不同探测器计算得到的位移值与次镜反射镜分别发生三个自由度的刚体位移后不同探测器计算得到的位移值 (见表 2)。根据探测器探测的相位值计算得到的位移值与次镜反射镜发生不同自由度的刚体位移符合之前得到的耦合矩阵关系, 这初步验证了耦合矩阵的正确性, 为实验提供了指导。

4 测量系统噪声分析

4.1 测量公式与指标分配

通过推导三自由度耦合分析得到的响应矩阵, 可得出多自由度形变测量系统敏感方向的测量公式:

$$\begin{cases} dz = dI_2 \\ dR_x = \frac{dI_2 - dI_1}{b} \\ dy = \cot\alpha dI_2 - \csc\alpha dI_3 + \frac{(b+d-n)}{b} \cot\alpha + \frac{n(dI_2 - dI_1)}{b \cdot \sin\alpha \cos\alpha} \end{cases} \quad (15)$$

对式 (15) 中的各影响因子做灵敏度分析, 结果表明激光链路干涉测量值是灵敏度最高的项 (见表 3)。对其误差来源进行详细分析, 并且将抑制干涉仪的噪声作为重点。

现阶段对望远镜支架形变测量系统提出本底噪声小于 $10 \text{ nm/Hz}^{1/2}@1 \text{ mHz}$ 的指标, 噪声指标进行分配如下表 4 所示, 为了验证测量方案光路设计的可行性, 本研究对指标分配的各噪声进行理论分析并进行实验测量。

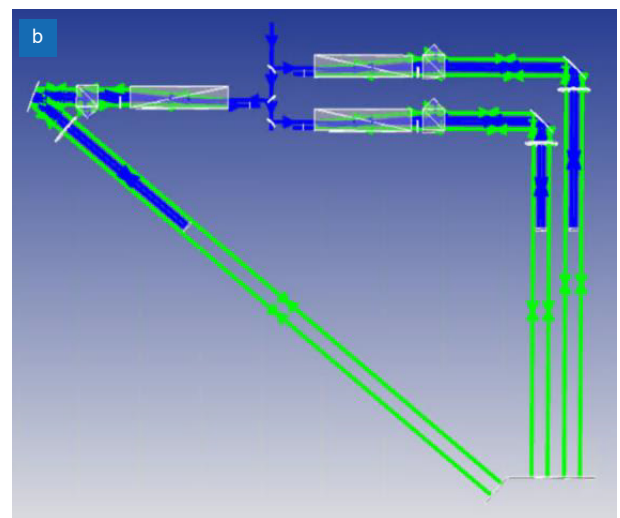
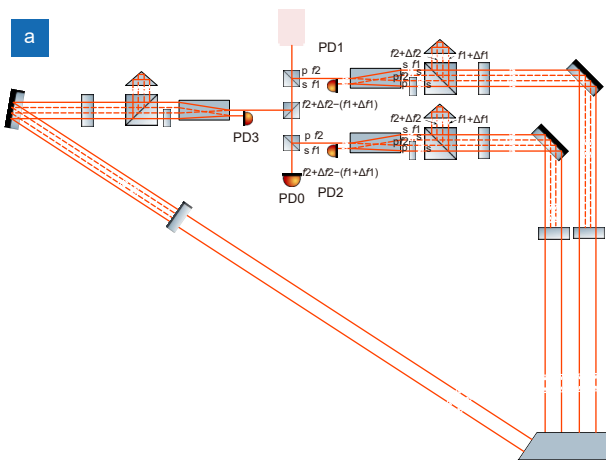


图 7 (a) 实际测量光路示意图; (b) Zemax 光路建模图

Fig. 7 (a) Schematic diagram of the actual measurement path; (b) Zemax optical path modeling diagram

表 2 测试镜刚体位移与光电探测器相位差关系

Table 2 Test the relationship between the rigid body displacement of the mirror and the phase difference received by the photodetector

相对位移	相位差		
	PD1	PD2	PD3
初始位置	0	0	0
沿光轴方向+z平移20 nm	0.47	0.47	0
Rx方向旋转1.7 μrad	0.66	0.47	0.61
垂直光轴方向+y平移20 nm	0	0	0.30

表 3 多自由度测量系统误差灵敏度分析

Table 3 Error sensitivity analysis of the measurement system with multiple degrees of freedom

自由度	比值
z	dI : S : α = 1 : 0 : 0
Rx	dI : S : α = 10000 : 1 : 0
y	dI : S : α = 10000 : 1 : 1

表 4 望远镜形变测量系统测量光程噪声指标分配及要求

Table 4 Allocation and requirements of optical path noise indicators for the telescope deformation measurement system

测量系统组成部分	主要噪声源	噪声分配 (nm/Hz ^{1/2} @1 mHz)	备注
激光光源	激光频率噪声	3	要求激光频率噪声δf小于4.2×10 ⁷ <Hz/Hz ^{1/2} @1 mHz
前端光程耦合噪声	声光调制耦合噪声	1	等效位移噪声<1 nm/Hz ^{1/2} @1 mHz
	光纤温度耦合噪声	2	光纤温度波动δT≤15 mK/Hz ^{1/2} @1 mHz
	温度位移耦合噪声	8	温度位移耦合系数dS/dT=70 nm/K, 测试环境温度波动δT≤15 mK/Hz ^{1/2} @1 mHz
集成光学器件平台	振动位移耦合噪声	2	振动位移耦合系数dS/dx=0.3×10 ⁻³ m/m, 测试环境振动波动δX≤1×10 ⁻³ m/s /Hz ^{1/2} @1 mHz
	空气折射率噪声	2	温度波动δT≤15 mK/Hz ^{1/2} @1 mHz
	偏振噪声	2	等效位移噪声<2 nm/Hz ^{1/2} @1 mHz
信号采集	杂散光噪声	3	控制杂散光强度相较于主光束低于-20 dB
	探测器耦合噪声	1	相对强度噪声需低于-100 dB/Hz@1 mHz
数据处理	相位读取噪声	0.01	要求相位计等效位移本底噪声是0.01 nm/Hz ^{1/2} @1 mHz
测量系统总体噪声			10

4.2 激光频率噪声

激光频率不稳定会引起测量误差,原因是干涉测量的本质是建立起激光相位与位移的函数关系,频率不稳定会引起相位噪声。降低激光频率引起的等效位移噪声的方法是进行激光稳频处理。当参考干涉臂长和测量干涉臂长的不等臂长为Δs时,由激光频率噪声δf(单位为Hz/Hz^{1/2})引起的等效位移噪声δL(单位为m/Hz^{1/2})表示为

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\delta L}{\Delta s}, \quad (16)$$

式中:f表示1064 nm激光中心频率,f=2.82×10¹⁴ Hz。从上式可知,通过采用高精高稳光源或减少臂长差可分别降低δf、Δs对δL的影响,进而提高系统测量精度。本系统设计的测量光路臂长差Δs=2 cm,当等效位移噪声预分配为δL_{Laser}=3 nm/Hz^{1/2}@1 mHz,要求激光频率噪声δf=4.2×10⁷ Hz/Hz^{1/2}@1 mHz。

目前实验所用激光器为窄线宽激光器 Mephisto 500FC,激光频率噪声水平如图8所示。从图8可知,1 mHz 对应的激光频率噪声水平为δf<4.2×10⁷ Hz/Hz^{1/2},

由此可得激光频率噪声引起的等效位移噪声δL_{Laser}<3 nm/Hz^{1/2}@10 mHz。

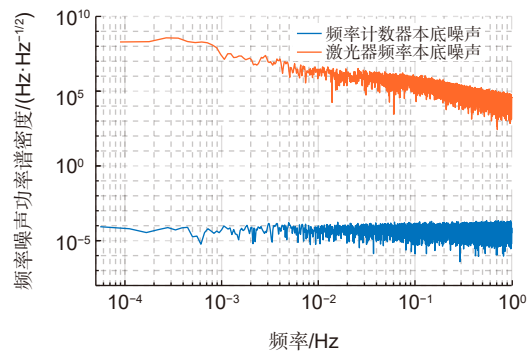


图 8 激光器频率本底噪声

Fig. 8 Laser frequency noise background

4.3 声光调制耦合噪声

前端光程耦合噪声是指激光进入集成光学器件平台之前的光程受声光调制器和环境因素变化导致的相位测量噪声。声光调制器在对光束进行移频时,由于声光调制器的驱动射频信号间存在电子串扰,这就导

致前端光程耦合噪声不能被共模消除。串扰会产生小振幅的电子边带信号，导致调制得到的两束光存在光学边带。当测量和参考光束干涉时，这些边带将出现在拍频信号中。

通过信号源驱动电路设计，减少电子串扰可以降低前端光程与集成光学器件平台位移测量的耦合系数，目前实验所用声光调制器是型号为 SGTF200-1064-1PFH 的保偏光纤声光调制器。声光调制器的噪声可以通过实验测量得到，光纤光程稳定在 $200 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ @1 mHz，耦合系数小于 $1/200$ ， $\delta L_{\text{AOM}} < 1 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ @1 mHz。

4.4 光纤温度耦合噪声

激光光源模块和外差调制模块均采用光纤连接方式对光束进行传输，外界环境波动、机械振动、温度不稳定等均会导致光纤几何尺寸和折射率改变。其中，由于光纤热胀冷缩特性，温度波动的影响最为明显。已知光束在光纤中传输的相位和光纤长度满足

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} nL, \quad (17)$$

式中： φ 为光束经过光纤传输后的相位， n 为光纤折射率， L 为光纤长度。

对式 (15) 关于温度 T 微分得

$$d\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \cdot dT \cdot \left(\frac{dn}{dT} + n \frac{dL}{dT \cdot L} \right). \quad (18)$$

外差调制模块测量光束和参考光束经过光纤传播路径长度记为 L_1 和 L_2 ，利用相位和光程的变换关系，可得由测试环境温度波动 δT 导致光纤发生热变形对测量系统引入的等效位移噪声 δL_{fiber} 表示为

$$\delta L_{\text{fiber}} = (L_1 - L_2) \cdot \delta T \left(\frac{dn}{dT} + n \frac{dL}{dT \cdot L} \right). \quad (19)$$

对于石英光纤： $dn/dT = 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ， $dL/(dT \cdot L) = 5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ， $n = 1.456$ 。参考光束和测量光束光纤初始

长度差取 2 cm ，当光纤温度波动 δT 满足 $15 \text{ mK/Hz}^{1/2}$ @1 mHz 时，对系统引入的等效位移噪声水平 $\delta L_{\text{fiber}} < 2 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ @1 mHz。

4.5 温度位移耦合噪声

目前实验使用镜架和面包板固定光学元器件，由于基板和镜架是金属材料，热膨胀系数较大，与光学器件的热膨胀系数差异也较大。光学平台的热膨胀，光学元件的热漂移会直接影响测量系统的光程。光学元件材料的体积和折射率会随着温度的变化而改变，环境温度波动导致的路径长度变化会耦合进测量相位中，从而引入位移噪声，这种耦合效应称为温度位移耦合。

温度位移耦合噪声的预分配值为 $7 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ @1 mHz，要求温度位移耦合系数 $ds/dT < 70 \text{ nm/K}$ ，测试环境温度 $\delta T < 10 \text{ mK/Hz}^{1/2}$ @1 mHz。镜架热膨胀系数 $\text{CTE} = 2.5 \times 10^{-5}$ ，不等臂长 2 cm ，简单估算温度位移耦合系数 $\frac{ds_{\text{OB}}}{dT} = 50 \text{ nm/K}$ ，与相关文献中的环境温度的位移耦合系数接近^[19]。干涉仪所处的温度水平如图 9(a) 所示，由图可知在 1 mHz 时，环境温度 $\delta T = 15 \text{ mK/Hz}^{1/2}$ @1 mHz，温度位移耦合噪声 $\delta L_{\text{tem}} < 8 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ @1 mHz。

4.6 振动位移耦合噪声

振动导致镜架与镜片抖动与镜架自身的性质有关，金属镜架的刚度系数 $E = 100 \text{ GPa}$ ，建立环境振动与振动引起的位移噪声的函数关系 $f(\delta x) \times g(E) = \delta S$ ，根据图 9 可知环境振动 $\delta x < 0.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ @1 mHz，环境振动会引起镜片的抖动，使用自准直仪测量镜片的抖动，测得 $\delta x < 1 \times 10^{-6} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ @1 mHz，假设测量激光光轴位置距离镜片旋转轴距离为 2 mm ，简单估算抖动引起的位移噪声 $\delta L_{\text{vib}} < 2 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ @1 mHz，可以估算得

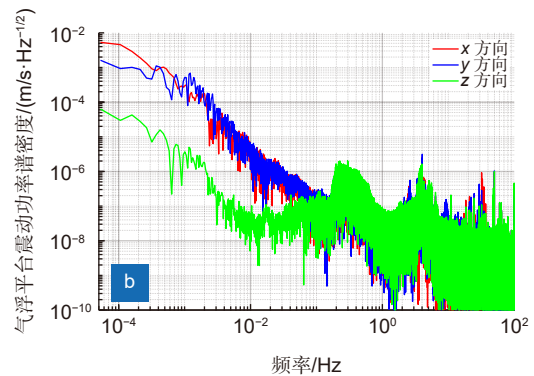
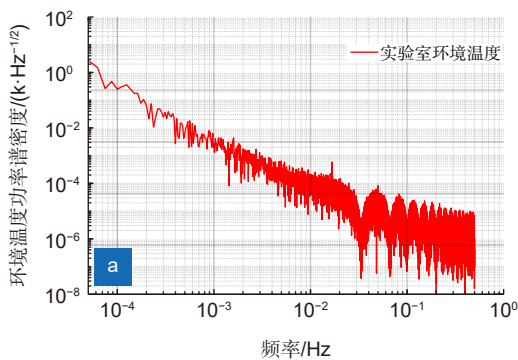


图 9 实验室温度与振动水平。(a) 温度测试图；(b) 振动测试图

Fig. 9 Laboratory temperature and vibration level. (a) Temperature test chart; (b) Vibration test chart

到 $g(E)$ 振动位移耦合系数 $1 \times 10^{-3} \text{ m/m}$, 增加镜架的刚度系数可以进一步降低振动位移耦合噪声。

4.7 空气折射率噪声

外部干扰等因素引起光路的环境发生变化会导致测量误差。外差干涉测量系统是以激光波长为基准来进行长度度量的, 而激光波长的测量会受到环境变化的影响。由于本测量光路是不等臂长设计, 不等臂长的大小近似等于望远镜主次镜之间的距离, 不等臂长越大, 空气折射率对测量结果的影响越大, 所以有必要将测量装置处于真空环境下。在理想条件下, 激光在真空中的波长为 λ_0 , 而在测量环境中, 激光光束的波长与空气折射率存在一定的关系

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}, \quad (20)$$

式中: n 为空气折射率, λ 为激光在空气介质中的波长, λ_0 为激光在真空中的波长。当环境中的温度、湿度和真空度发生变化导致空气折射率发生变化时, 激光波长的变化量为

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda = -\frac{\Delta n \lambda_0}{n(n + \Delta n)}, \quad (21)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为激光波长的变化量, λ_1 为环境变化后的激光波长值, Δn 为空气折射率的变化量。由于本实验设计干涉光路处于高真空环境下, 空气折射率对测量的影响可以忽略不记。目前实验在做了简单隔热和隔振处理的气浮平台上进行, 空气折射率的变化不能忽略。温度的变化和气流对空气折射率的影响最明显, 初步估算实验室条件下, 当光路温度波动 $\delta T < 15 \text{ mK/Hz}^{1/2}$ @1 mHz 时, 空气折射率引起的等效位移噪声 $\delta L_{na} < 2 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ @1 mHz。

4.8 偏振噪声

偏振噪声是指当两束干涉激光的偏振态变化时, 干涉信号的相位也会随之发生变化, 引入等效相位测量噪声。激光从准直器射出之后为椭圆偏振光, 椭圆偏振光的偏振态会受到外界振动和温度波动的影响, 进而影响干涉仪的相位测量结果。使用共模抑制的设计可以降低偏振噪声, 两束激光通过相同的光路时激光的偏振态变化一致, 由于偏振态变化导致的相位误差相同, 经过差分处理后偏振态变化引入的噪声被消除。但实际上由于光学元器件表面镀膜和加工误差, 这种误差不能被全部共模消除。该部分噪声将在后续的研究工作中进行详细分析, 偏振噪声可以将偏振态的光与理想线偏振光进行干涉, 通过实验的方法得到

偏振态变化引入的等效位移噪声。根据相关工作评估当光束偏振消光比大于 10 dB 时, 偏振等效位移噪声小于 $\delta L_{\text{polaris}} < 2 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ @1 mHz。

4.9 杂散光噪声

杂散光产生于漏光、透射光学表面的残余反射和光学系统中非光学表面的残余反射。在干涉仪集成光学器件平台中, 反射镜和分光棱镜等光学元器件的表面会产生寄生杂散光, 这些杂散光在光路中传播, 可能会进入光电传感器。杂散光的频率与主光束接近或相同, 可以和主光束发生干涉, 引入相位测量噪声。

假设光路中产生一束具有和主光线相同角频率的杂散光, 当杂散光进入光电探测器后, 探测到的信号是三束光相干叠加的结果。

$$\begin{cases} E_1 = P \cos(\omega_1 t + \varphi_1^F + \varphi_1^{OB}) \\ E_2 = P \cos(\omega_2 t + \varphi_2^F + \varphi_2^{OB}) \\ E_g = p \cos(\omega_1 t + \varphi_1^F + \varphi_g^{OB}) \end{cases}, \quad (22)$$

式中: E_1 和 E_2 分别代表参考激光和测量激光, E_g 表示杂散光, P 表示参考激光与测量激光振幅, p 表示杂散光的激光振幅; φ_1^F , φ_2^F 表示参考激光和测量激光到达光学器件所经过的路径对应的相位; φ_1^{OB} , φ_2^{OB} 表示参考激光与测量激光在集成光学平台传播对应的相位, 干涉信号可表示为

$$I \propto (E_1 + E_2 + E_g)^2 \quad (23)$$

对于存在多束杂散光的情况, 可以将干涉相位公式拓展为

$$\begin{aligned} \varphi = & \Delta\omega t + (\omega_1^F - \omega_2^F) + (\omega_1^{OB} - \omega_2^{OB}) \\ & + \sum_{i=1}^n (\alpha_i \sin(\omega_1^{OB} - \omega_{ig}^{OB})) \\ & + \sum_{j=1}^m (\beta_j \sin(\omega_2^{OB} - \omega_{jg}^{OB})) \end{aligned}. \quad (24)$$

引入的误差相位为

$$\varphi_{\text{error}} = \arctan \frac{\sqrt{p} \sin(\omega_2^{OB} - \omega_g^{OB})}{\sqrt{P} + \sqrt{p} \sin(\omega_2^{OB} - \omega_g^{OB})}. \quad (25)$$

杂散光会引入周期非线性误差, 杂散光强度越大, 引入的相位误差越大。杂散光消光比可以表示为

$$A_{\text{dB}} = 20 \lg \left(\frac{P_i}{P} \right). \quad (26)$$

假设光学元器件的产生的杂散光强度相较于主光束低于 -20 dB, 估算杂散光引入的误差 $\delta L_{\text{stray}} < 3 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ @1 mHz。为了减少杂散光的影响, 需要对光路做黑幕遮光处理, 减少非光学表面的残余反射。同时提高光学器件质量以减少偏振泄露和寄生杂散光, 控

制杂散光强度, 使其低于主光束-20 dB, 减少射入光电传感器的杂散光。

4.10 相位读取噪声

在测量系统中, 被测位移转换成测量信号相对与参考信号的相位差变化, 因此相位测量误差直接决定位移测量误差。相位测量的方法有很多, 比较常用而且容易实现的一种方法是使用锁相放大技术, 锁相放大技术将测量信号与频率相同的参考信号进行混频滤波, 从而提取有效信号, 滤除噪声的影响。本实验设计相位采集硬件选用 NI-6289 型数据采集卡。数据处理基于 Labview 软件平台实现, 根据相位计本底噪声的实测数据 (见图 10), 相位采集等效位移噪声 $\delta L_{\text{Phase}} < 0.01 \text{ nm/Hz}^{1/2} @ 1 \text{ mHz}$ 。

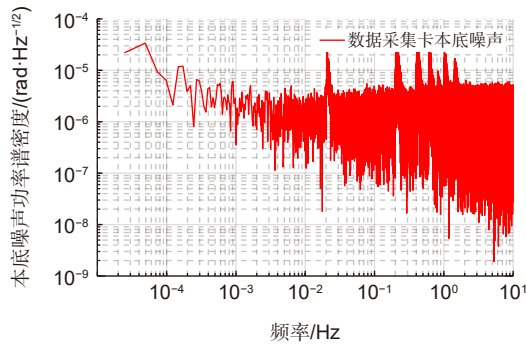


图 10 NI 数据采集卡本底噪声
Fig. 10 NI data acquisition card noise background

4.11 探测器噪声

光电转换过程中, 探测器自身特性也会影响测量精度。在选用光电探测器时, 主要从信号稳定性、信号输出准确性两个方面进行衡量。假设探测器的响应度为 $R_A(\text{A/W})$, 通过光电探测器混频后得到的光电流 i_p 表示为^[22]

$$i_p = R_A \cdot [P_M + P_R + 2\sqrt{P_M P_R} \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi)], \quad (27)$$

式中: P_M 、 P_R 分别表示入射到光敏面上测量光束和参考光束的光功率; $\Delta\omega$ 表示频差; $\Delta\varphi$ 表示相位差。

在光电转换中由于光信号量子随机起伏特性和探测器内部温度波动等不稳定性会引入额外的噪声, 此时光电探测总体贡献的相位噪声 $\delta\varphi_{\text{PD}}(\text{rad/Hz}^{1/2})$ 表示为

$$\delta\varphi_{\text{PD}} = \sqrt{\delta\varphi_D^2 + \delta\varphi_T^2 + \delta\varphi_S^2 + \delta\varphi_{\text{RIN}}^2}, \quad (28)$$

式中: $\delta\varphi_{\text{PD}}$ 表示暗电流噪声; $\delta\varphi_T$ 表示热噪声; $\delta\varphi_S$ 表示散粒噪声; $\delta\varphi_{\text{RIN}}$ 表示激光相对强度噪声。

探测器对测量系统引入的等效位移噪声 δL_{PD} 表示为

$$\delta L_{\text{PD}} = \frac{\lambda}{2\pi} \delta\varphi_{\text{PD}}. \quad (29)$$

探测器等效位移噪声主要受限于激光相对强度噪声, 探测器整体对测量系统引入的等效位移噪声预分配为 $\delta L_{\text{PD}} = 1 \text{ nm/Hz}^{1/2} @ 1 \text{ mHz}$, 要求相对强度噪声在 $-100 \text{ dB/Hz} @ 1 \text{ mHz}$ 以下。

在实验中我们采集信号使用 InGaAs 光电探测器, 测量本底噪声如图 11 所示。响应度为 0.6 A/W , 电压本底为 $10 \mu\text{V/Hz}^{1/2} @ 10 \text{ mHz}$, 测量光路和参考光路光功率为 $100 \mu\text{W}$, 得到由探测器引入的等效位移噪声 $\delta L_{\text{PD}} < 1 \text{ nm/Hz}^{1/2} @ 1 \text{ mHz}$ 。

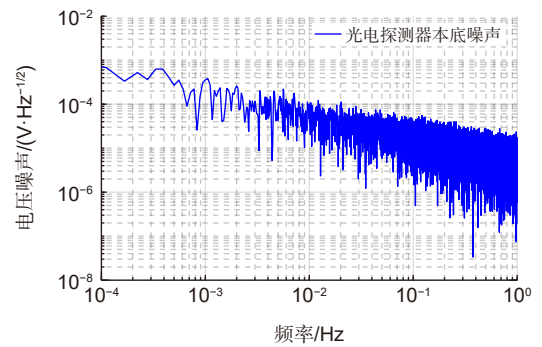


图 11 光电探测器本底噪声
Fig. 11 Photodetector noise background

4.12 单臂测量光路本底噪声

对本文设计的测量方案进行初步实验验证, 单臂测量光路噪声水平测量结果如图 12 所示。目前单链路干涉仪在 1 Hz 附近, 位移噪声本底为 $100 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ 。在 1 mHz 低频处, 位移的噪声本底达到了 $10 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ 。测量系统的噪声水平在 1 mHz 以下的低频段主要受限于环境温度噪声, 在 10 mHz 以上的高频段则主要受限于激光频率噪声、相位采集的本底噪声以及震动噪声影响。为了进一步降低噪声, 可以采取降低干涉不等臂长、使用一体化技术将光学元器件集成等方式, 同时使用真空罐保障干涉仪光路模块的环境温度。

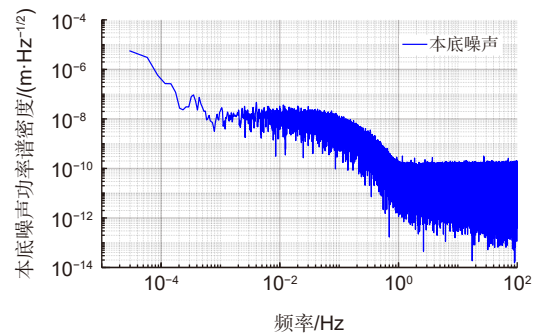


图 12 单链路干涉仪本底噪声
Fig. 12 Background noise of the single chain interferometer

5 结论

本论文针对空间引力波探测星载望远镜结构形变高精度测量问题开展了深入研究, 初步建立了星载望远镜结构形变测量架构和方法体系, 从理论上阐述了方法测量原理, 并通过仿真分析和误差分解等方式验证该方法应用于空间引力波探测的可行性。文章重点研究了多自由度解耦的问题, 通过解析的方法建立了解耦数学模型, 并使用 Zemax 软件进行初步验证。最后对测量系统进行了噪声分析, 实验测试了测量系统中的主要噪声, 验证了本文的噪声理论模型的正确性, 测量系统满足了本底噪声小于 $10 \text{ nm/Hz}^{1/2}@1 \text{ mHz}$ 的指标要求, 初步验证了基于多路外差干涉测量法的可行性。

参考文献

- [1] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, **116**(6): 061102.
- [2] Danzmann K, The LISA Study Team. LISA: laser interferometer space antenna for gravitational wave measurements[J]. *Class Quantum Grav*, 1996, **13**(11A): A247.
- [3] 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.
- [4] Luo J, Bai Y Z, Cai L, et al. The first round result from the TianQin-1 satellite[J]. *Class Quantum Grav*, **37**(18): 185013. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/aba66a>.
- [5] Livas J, Sankar S. Optical telescope design study results[J]. *J Phys Conf Ser*, 2015, **610**: 012029.
- [6] 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.
- [7] J. Sanjuán, A. Preston; D. Korytov, 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.
- [8] Desnoyers N, Goyette P, Leduc B, et al. Dimensional stability performance of a CFRP sandwich optical bench for microsatellite payload[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10372**: 103720G.
- [9] 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**(1-2): 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.
- [10] Machado J C, Heinrich T, Schuldt T, et al. Picometer resolution interferometric characterization of the dimensional stability of zero CTE CFRP[J]. *Proc SPIE*, 2008, **7018**: 70183D.
- [11] Spannagel R, Hamann I, Sanjuan J, et al. Dilatometer setup for low coefficient of thermal expansion materials measurements in the 140 K-250 K temperature range[J]. *Rev Sci Instrum*, 2016, **87**(10): 103112.
- [12] Spannagel R, Gohlke M, Schuldt T, et al. CTE measurement setup with 10 ppb/K sensitivity for characterizing lightweight and highly stable materials for space applications[J]. *Proc SPIE*, 2012, **8450**: 84500Q.
- [13] 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.
- [14] Verlaan A L, Hogenhuis H, Pijnenburg J, et al. LISA telescope assembly optical stability characterization for ESA[J]. *Proc SPIE*, 2012, **8450**: 845003.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Yu X Z. Multi-degree of freedom optical metrology techniques[D]. Rochester: University of Rochester, 2017.
- [18] Klop W A, Verlaan A L. Dimensional stability testing in thermal vacuum of the CHEOPS optical telescope assembly[J]. *Proc SPIE*, 2016, **9904**: 990437.
- [19] Yan H. Study on ultra-precision multi-degree-of-freedom optical measurement base on laser interferometry[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
颜浩. 基于激光干涉的高精度多自由度光学传感研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [20] Yu J P. Study on planar capacitive sensors for multiple-dimensional precision displacement measurement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
余建平. 面向精密定位的平面电容式多自由度位移测量传感器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [21] Sun C. Research on multi-degree-of-freedom measurement method for precision engineering[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2021.
孙闯. 面向精密工程的多自由度测量方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
- [22] 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.

作者简介



罗健 (1995-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为引力波望远镜结构稳定性测量、望远镜结构形变测量方法研究。

E-mail: luoj276@mail2.sysu.edu.cn



【通信作者】闫勇 (1981-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为空间高精密光学仪器及平台总体设计、精密测量光学检测、空间引力波探测试验卫星/微小卫星技术研究、空间载荷光、机、振动系统集成仿真与优化设计, 空间太阳能电站 SSPS 研究等。

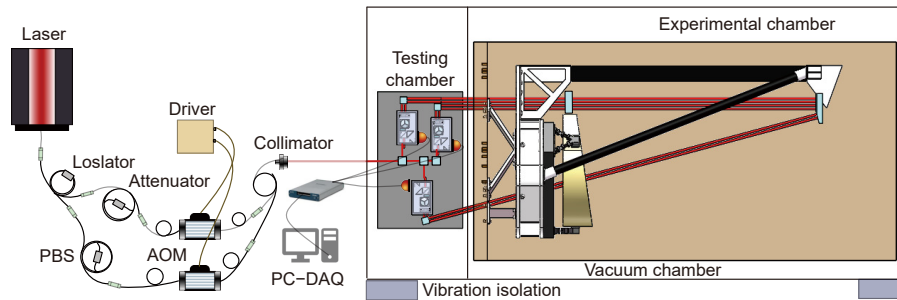
E-mail: yanyong5@mail.sysu.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Decoupling study and noise analysis of multi-degree-of-freedom deformation measurement method for space gravitational wave detection telescope

Luo Jian, Song Jie, Fang Sijun, Kong Fanle, Yan Yong*



Schematic overview of the deformation measurement with three degrees of freedom

Overview: The space gravitational wave detection telescope is one of the core payloads of the gravitational wave detection satellite, simultaneously expanding and contracting the transmitted beam. Optical path stability is one of the core indices for the telescope, closely related to its structural stability. To meet the ultra-high path stability and structural stability requirements posed by the gravitational wave detection mission, it is essential to study the structural deformation measurement of the telescope. Currently, there are still several shortcomings in the research of multi-degree-of-freedom deformation measurement methods for gravitational wave detection telescopes, such as inaccurate selection of measurement points, inability to decouple multi-degree-of-freedom coupling, and unclear identification of error sources in multi-degree-of-freedom measurement. This paper deeply investigates the high-precision measurement of structural deformation of space-borne telescopes designed for space gravitational wave detection. It preliminarily establishes a framework and method system for measuring the structural deformation of space-borne telescopes, theoretically describing the measurement principle of the method. The feasibility of this method applied to space gravitational wave detection is verified through simulation analysis and error decomposition. The paper focuses on resolving the issue of decoupling multiple degrees of freedom, establishing a mathematical model using analytical methods, and conducting preliminary validation using Zemax. Finally, noise analysis of the measurement system is carried out, with experimental testing of the main noise components in the measurement system, validating the correctness of the theoretical noise model proposed in this paper. The experimental results show that near 1 Hz, the displacement noise background of the single-link interferometer is $100 \text{ pm/Hz}^{1/2}$. At 1 mHz in the low-frequency range, the displacement noise background reaches $10 \text{ nm/Hz}^{1/2}$. The noise level of the measurement system below 1 mHz is mainly limited by environmental temperature noise, while above 10 mHz, it is primarily constrained by laser frequency noise, phase acquisition background noise, and vibration noise. During the development phase of the space gravitational wave detection telescope, the research on this measurement method is expected to fulfill the telescope's multi-degree-of-freedom deformation measurement needs. It also provides data feedback for telescope design and offers guidance for the study of the telescope's optical path stability.

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; DOI: [10.12086/oe.2024.230211](https://doi.org/10.12086/oe.2024.230211)

Foundation item: Project supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFC2202202)

MOE 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

* E-mail: yanyong5@mail.sysu.edu.cn