

空间引力波探测中超前指向机构成像系统设计方案

张廷雨 杨金科 王雪 贾建军 印雄飞

Imaging System Design Scheme for the Point-Ahead Angle Mechanism in Space-Based Gravitational Wave Observation

ZHANG Ting-yu, YANG Jin-ke, WANG Xue, JIA Jian-jun, YIN Xiong-fei

引用本文:

张廷雨, 杨金科, 王雪, 贾建军, 印雄飞. 空间引力波探测中超前指向机构成像系统设计方案[J]. 中国光学, 2026, 19(5): 1-11. doi: 10.3724/CO.2026-0038

ZHANG Ting-yu, YANG Jin-ke, WANG Xue, JIA Jian-jun, YIN Xiong-fei. Imaging System Design Scheme for the Point-Ahead Angle Mechanism in Space-Based Gravitational Wave Observation[J]. Chinese Optics, 2026, 19(5): 1-11. doi: 10.3724/CO.2026-0038

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026-0038>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间引力波探测中超低附加相噪频综研究

Ultralow residual phase noise frequency synthesizer for space gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 661 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0015>

低灵敏度空间引力波望远镜光学系统设计

Design of optical system for low-sensitivity space gravitational wave telescope

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1384 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0006>

空间引力波探测“太极计划”星间姿态-光程耦合噪声迭代拟合与高精度抑制方法

Iterative estimation and precision suppression of inter-spacecraft tilt-to-length coupling noise for the Taiji space gravitational wave detection mission

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 583 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0042>

空间引力波探测前向杂散光测量和抑制

Measurement and suppression of forward stray light for spaceborne gravitational wave detection

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1081 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0251>

空间引力波探测航天器光学测距噪声链路指标优化

Optimization of optical metrology noise link metrics for space-based gravitational wave detection spacecraft

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 568 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0185>

空间引力波探测望远镜集成结构的胶接方法研究

Study of bonding layer for integrated structure of space gravitational wave detector telescope

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 715 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0025>

文章编号 2097-1842(2026)05-0001-11

空间引力波探测中超前指向机构成像系统设计方案

张廷雨^{1,3}, 杨金科^{2,3}, 王 雪^{1,3}, 贾建军^{1,2,3}, 印雄飞^{1,3*}

(1. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:空间引力波探测中, 超前指向机构(PAAM)是实现星间激光链路高精度指向的关键部件, 但其转动引入的抖动耦合(TTL)噪声严重制约干涉测量精度。为抑制 PAAM 角抖动引起的局部 TTL 噪声, 本文提出一种成像系统方案, 通过将探测器光学成像至 PAAM 等效旋转中心, 从几何光路主动抑制噪声。基于激光外差干涉原理构建高对称等臂干涉仪测试平台, 利用 IFOCAD 软件系统分析非理想条件(角抖动、旋转中心偏移、安装误差、热致形变)下成像系统的抑制性能。实现表明: 理想对准, 成像系统可抑制 98.9% 的杠杆光程变化和 98.2% 的活塞光程变化; 安装误差下 TTL 噪声抑制在 1 pm/√Hz 以内, 引入热噪声后仍稳定在 10 pm/√Hz 以内。仿真验证了杠杆噪声与角抖动呈二阶相关、活塞噪声呈一阶相关, 与理论吻合。本研究为高稳定度光束指向控制系统设计及噪声评估提供了理论依据与仿真实现。

关键词:空间引力波探测; 超前指向机构; 等臂干涉仪; 成像系统

中图分类号: P142.8+6; TH744.1 文献标志码: A doi: 10.3724/CO.2026-0038 CSTR: 32171.14.CO.2026-0038

Imaging System Design Scheme for the Point-Ahead Angle Mechanism in Space-Based Gravitational Wave Observation

ZHANG Ting-yu^{1,3}, YANG Jin-ke^{2,3}, WANG Xue^{1,3}, JIA Jian-jun^{1,2,3}, YIN Xiong-fei^{1,3*}

(1. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences,

Hangzhou 310024, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yinxiongfei@ucas.ac.cn

Abstract: In space-based gravitational wave detection, the Point-Ahead Angle Mechanism (PAAM) is crucial for high-precision pointing of intersatellite laser links, but its rotation introduces tilt-to-length (TTL) noise that severely limits interferometric accuracy. To suppress local TTL noise caused by PAAM angular jitter, this paper proposes an imaging system that optically images the detector onto the equivalent rotation center of the PAAM, actively mitigating geometric TTL noise. A highly symmetric equal-arm heterodyne interferometer test platform was constructed, and IFOCAD simulations were performed to evaluate suppression

收稿日期: 2026-03-10; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2024YFC2206900)

Supported by National Key R & D Program of China (No. 2024YFC2206900)

performance under non-ideal conditions (angular jitter, rotation center offset, installation errors, thermal deformation). Results show that under ideal alignment, the imaging system suppresses 98.9% of lever-effect optical path changes and 98.2% of piston-effect changes. With installation errors, TTL noise is suppressed within $1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$, and remains below $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ when thermal noise is introduced. Simulations confirm that lever noise has a second-order correlation with angular jitter, while piston noise has a first-order correlation, consistent with theoretical analysis. This study provides theoretical and simulation support for designing high-stability beam pointing control systems and assessing noise in future missions.

Key words: space gravitational wave detection; point-ahead angle mechanism; equal-arm interferometer; imaging system

1 引言

空间引力波探测为探索宇宙基础物理提供了前所未有的机遇^[1-2]。为实现其所需的超高测量精度,激光外差干涉测量技术已成为标准方案^[3],而高稳定性干涉仪的研发则是该研究方向的核心技术。在星载引力波探测任务中,超前指向机构(Point-Ahead Angle Mechanism, PAAM)^[4-5]承担着建立与维持星间精密激光链路的关键职能。以实时补偿由航天器相对运动产生的超前角(Point-Ahead Angle, PAA),从而确保干涉信号的稳定锁定与测量精度^[6]。

当前,极低频段量子噪声抑制、超精密光学操控与多维位移测量技术持续突破,为高精度引力波探测干涉系统提供了重要支撑。Gao 等人在毫赫兹频段实现了压缩真空态的产生与探测,将量子噪声抑制频段拓展至 4 mHz,为极低频段的噪声抑制提供了量子资源方案^[7];Xiao 等人实现了声子激光非线性谐波的巨增强,为微纳尺度光学系统的精密操控与噪声优化提供了新路径^[8]。在光学精密测量领域,Zhao 等人提出大口径激光差分共焦-干涉融合测量方法,实现了光学元件多参数的高精度同步检测,保障了大口径光学系统的装调精度^[9];Cui 等人研制零死区集成外差光栅干涉仪,突破了传统干涉仪的测量死区限制,实现了原子级精度的多维位移测量,进一步提升了超精密干涉测量的极限能力^[10]。

然而,在精密干涉测量场景下,PAAM 作为一类存在残余机械抖动的运动部件,其自身的角抖动会耦合至光束传播方向,从而引入额外的光程差。这一现象被定义为抖动耦合至光程(Tilt-

To-Length, TTL)噪声^[11-12]。理论分析表明,TTL 噪声可细分为由几何光路引起的几何 TTL 噪声(包括杠杆噪声与活塞噪声)以及由高斯光束特性引起的非几何 TTL 噪声。为评估 PAAM 在稳态运行时的背景噪声是否足以掩盖引力波信号,并验证其光路抖动性能,必须构建一套地面光路测试系统。更重要的是,需要设计一套专用的成像系统,以从几何光路上主动抑制 PAAM 引入的几何 TTL 噪声,从而保障测量精度。

为此,本文基于 PAAM 的旋转特性与偏转范围,设计了一套将探测器光学成像至 PAAM 等效旋转中心的专用成像系统。该系统旨在从源头上抑制由光束指向抖动引发的几何光程变化,进而提升干涉测量的整体精度。

2 原理分析

2.1 超前指向机构工作原理

三颗卫星在轨运行过程中,卫星之间会产生相对速度。该相对速度的存在会使入射光与出射光间形成一定夹角,此夹角被定义为超前角(PAA)^[13],而用于补偿该前置偏角的机构则被称为超前指向机构(PAAM)。

超前指向机构本质上是一种高精度、超稳定的光束指向组件^[14]。但受机械运动特性的制约,其偏转中心不可避免会产生轴向寄生运动,进而给光学系统引入光程差。柔性铰链利用材料的微变形实现位移输出,取代了由刚体与轴承构成的传统偏转机构,可显著提升系统精度。

PAAM 作为安装在提供超前角的光学平台上的二维运动部件,是建立星间科学干涉链路的关键部件之一。它需要解决两个核心技术挑战:

(1)由于星间干涉链路的臂长极长, PAA 预指向必须实现高精度指向。(2)PAAM 指向组件必须保持超稳定的光路稳定性, 并避免在其旋转期间引入任何附加的光路噪声。这是因为 PAAM 直接涉及科学干涉仪, 其光路性能直接影响探测精度。PAAM 在偏航时的偏转范围为 $\pm 270 \mu\text{rad}$, 俯仰时为 $\pm 268 \mu\text{rad}$, 两个轴的指向精度为 $0.35 \mu\text{rad}$ 。考虑到望远镜的 40 倍放大倍数, 这些范围分别降低到 $\pm 6.75 \mu\text{rad}$ (偏航)和 $\pm 6.75 \mu\text{rad}$ (俯仰)。

在现有指向控制系统的理论分析与实验验证工作中, 针对超前指向机构(PAAM)运动过程产生的噪声, 目前仍缺乏有效的抑制方案。为分析 PAAM 在轨运动过程中的噪声干扰, 本研究在仿真实验中, 通过施加驱动电压实现 PAAM 的高精度指向偏转, 对其引入的指向控制噪声开展具体分析, 并提出针对性抑制策略。

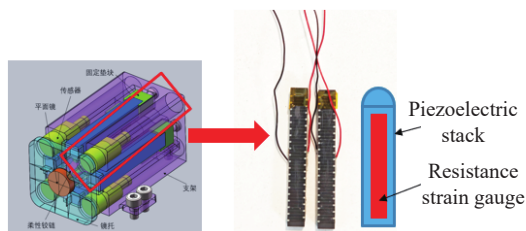


图 1 超前指向机构设计图纸与物理样机展示

Fig. 1 Display of the Design Drawing and Physical Prototype of PAAM

2.2 超前指向机构 TTL 噪声分析

在对高斯光束 TTL 噪声的进一步细化分析中, 需同时开展几何光学分析, 以及计入光场分布的非几何光学分析。由几何光学作用诱发的 TTL 噪声被定义为几何 TTL 噪声^[15], 该噪声可分为两类: 杠杆噪声与活塞噪声。

2.2.1 超前指向机构几何 TTL 噪声分析

杠杆噪声是一种角抖动耦合噪声。PAAM 中反射镜的振动, 会引发反射激光束的振动。

其中, O 为旋转中心点, M_1 为静止状态下的反射镜镜面, M_2 为实际动态旋转过程中的反射镜镜面; A 为入射光束的入射点, ϕ 为反射镜的角抖动量, α_x 为初始入射角, ϕ_{PD} 为探测器的振动角, PD_1 为理想探测器的探测面, PD_2 为实际探测器的探测面, B_1 为镜面静止时反射光与探测器的交点, B_2 为实际动态反射光与探测器的交点, B_3 是以 O 为圆心, 以 d 为半径与 $|OB_2|$ 的交点。根据光

的反射定律, 反射光束光轴的旋转角度为反射镜自身旋转角度的两倍。将该传播光路与反射镜无振动时的光束光路之间的差值定义为杠杆臂误差。基于几何光学计算可得, 杠杆臂误差的表达式如下:

$$OPD_{\text{lever}} = \frac{d \cos \phi_{PD}}{\cos(2\phi + \phi_{PD})} - d, \quad (1)$$

实际工况中, 受不可避免的人为误差影响, 入射光轴与探测器表面法线可能无法保持平行。当探测器的光束对准误差足够小且可忽略时(即 $\phi_{PD} = 0$), 杠杆臂误差可表示为:

$$OPD_{\text{lever}} = d \frac{(1 - \cos(2\phi))}{\cos(2\phi)}, \quad (2)$$

对上述公式进行泰勒级数展开并忽略高阶小项后, 可得到杠杆臂误差的近似表达式:

$$OPD_{\text{lever}} \approx 2\phi^2 d, \quad (3)$$

由上述公式可知, 杠杆噪声与角抖动呈二阶相关关系。在地面干涉仪平台开展测试时, 此类噪声会耦合至测量信号中, 导致测量精度显著下降。

理想工况下, 反射镜中心与其旋转中心完全重合, 且入射光束精准入射至反射镜中心, 因此不会产生活塞误差。但在实际工况中, 入射点与反射镜中心之间存在偏移量 Δx 和 Δy 。当反射镜绕自身中心发生振动时, 会以类活塞运动的方式切入或移出光束光路。由反射镜位移所引发的附加光程变化, 被定义为活塞误差。

其中, P_1 为入射光入射至静止镜面 M_1 时的入射点, P_2 为入射光入射至实际动态镜面时的入射点, P_3 为反射光与静止镜面 M_1 的交点; Δx 为横向对准偏差, Δy 为纵向对准偏差。经几何光学分析可得, 活塞误差 OPD_{piston} 可表示为:

$$OPD_{\text{piston}} = \frac{2 \cos(\alpha_x + \phi + \phi_{PD})}{\cos(2\phi + \phi_{PD})} [\Delta x \sin \phi - \Delta y + \Delta y \cos \phi], \quad (4)$$

当反射镜镜面移出光束光路时, 活塞误差光程差 OPD_{piston} 的变化量为正; 当反射镜镜面切入光束光路时, OPD_{piston} 的变化量为负。

当探测器的光束对准误差足够小且可忽略时(即 $\phi_{PD} = 0$), 活塞误差可表示为:

$$OPD_{piston} = \frac{2\cos(\alpha_x + \varphi)}{\cos(2\varphi)} [\Delta x \sin \varphi - \Delta y + \Delta y \cos \varphi], \quad (5)$$

同理,在空间引力波探测任务中,超前指向组件被置于光学平台的光瞳位置。为确保超前角在空间中的双向偏转,超前指向组件的安装角度需设为 45° ,即 $\alpha_x = 45^\circ$ 。此时活塞误差可表示为:

$$OPD_{piston} = \frac{2\cos\left(\frac{\pi}{4} + \varphi\right)}{\cos(2\varphi)} [\Delta x \sin \varphi - \Delta y + \Delta y \cos \varphi], \quad (6)$$

对上述公式的分析需分两种情形展开。当 $\Delta x=0$ 时,则:

$$OPD_{piston}^y = -\Delta y \frac{2\cos\left(\frac{\pi}{4} + \varphi\right)(1 - \cos \varphi)}{\cos 2\varphi}, \quad (7)$$

对上述公式进行泰勒级数展开并忽略高阶小项,由推导结果可得,纵向振动引发的活塞误差 Δb_y 可表示为:

$$OPD_{piston}^y \approx -\frac{\sqrt{2}}{2} \Delta y \varphi^2, \quad (8)$$

同理,当 $\Delta y=0$ 时,则:

$$OPD_{piston}^x = \Delta x \frac{2\cos\left(\frac{\pi}{4} + \varphi\right)\sin \varphi}{\cos(2\varphi)}, \quad (9)$$

对上述公式进行泰勒级数展开并忽略高阶小项,由推导结果可得,横向振动引发的活塞误差 Δb_x 表达式如下:

$$OPD_{piston}^x \approx \sqrt{2} \Delta x \varphi, \quad (10)$$

结合以上结论,得到活塞误差公式为:

$$LPS_{ng} \approx (x_{im} - x_{ir}) \left[\frac{z_{Rm}(z_{Rm} + z_{Rr}) + z_m(z_m - z_r)}{(z_{Rm} + z_{Rr})^2 + (z_m - z_r)^2} (\theta_m - \theta_{PD}) \right] + \frac{z_{Rr}(z_{Rm} + z_{Rr}) - z_r(z_m - z_r)}{(z_{Rm} + z_{Rr})^2 + (z_m - z_r)^2} (\theta_r - \theta_{PD}) - \left[\frac{(z_{Rr}^2 + z_r^2)z_m - (z_{Rm}^2 + z_m^2)z_r}{(z_{Rm} + z_{Rr})^2 + (z_m - z_r)^2} \right] \left(\frac{\theta_m^2}{2} - \theta_m \theta_r \right) + (x_{im} - x_{ir})^2 \left[\frac{(z_m - z_r)}{2((z_{Rm} + z_{Rr})^2 + (z_m - z_r)^2)} \right], \quad (13)$$

下标 m 与 r 分别对应测量光与参考光。其中, x_{im} 和 x_{ir} 为测量光与参考光在探测器上的入射点; z_{Rm} 和 z_{Rr} 为瑞利距离; z_m 和 z_r 为束腰至探测器的距离; θ_m 和 θ_r 是测量光与参考光的倾斜角; θ_{PD} 为探测器的倾斜角。在公式(13)中,可进一步简化处理,将参考光的偏差 x_{ir} 等效视为测量光的初始偏差 $x_{im,0}$ 的一部分,此时,若 $x_{im,0} = 0$,则表明在平行光入射条件下,参考光与测量光在探测器上的入

$$OPD_{piston} \approx \sqrt{2} \Delta x \varphi - \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta y \varphi^2, \quad (11)$$

由活塞误差的表达式可知,活塞误差与横向振动呈一阶相关关系,与纵向振动呈二阶相关关系。提高激光光束的对准精度,可有效降低活塞误差的耦合系数。

综合上述分析,激光光束入射所产生的 TTL 噪声表达式如下:

$$OPD_{TTL} = OPD_{lever} + OPD_{piston} \approx \sqrt{2} \Delta x \varphi - \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \Delta y - 2d \right) \varphi^2, \quad (12)$$

2.2.2 超前指向机构非几何 TTL 噪声分析

仅借助几何 TTL 噪声耦合公式分析耦合过程的方法,仅适用于理想平面波的应用场景。针对实际应用中所采用的高斯光束,亟需补充非几何 TTL 噪声耦合的相关理论研究。这是因为在特定工况下,几何 TTL 噪声与非几何 TTL 噪声的耦合效应可在一定程度上相互抵消。为实现对入射光角度变化及超前指向组件角振动所诱发 TTL 噪声的精准定量描述,在假设探测器远大于光束半径,在抖动范围内、探测器有效范围,高斯光的有效半径 ω 、曲率半径 R 和 Gouy 相移都近似为常数时,文献^[16-17]基于下述坐标系开展分析工作,并推导得到非几何 TTL 噪声的解析解 LPS_{ng} 。

公式中参数使用的坐标系如上图所示,y轴垂直于纸面方向。公式中测量光、参考光及探测器的旋转角度,均为绕 y 轴的旋转角度。偏移量 (x_{im}, x_{ir}) 与坐标系的 x 轴方向相对应。

射点 x_{ir} 和 x_{im} 是重合的。

为建立测量光入射点 x_{im} 与测量光抖动角度 θ_m 和抖动量 φ 之间的函数关系,将图 4 中所定义的坐标系运用到图 2 和图 3 的分析中。由图 2 和图 3 可知,反射光束角度的转动会造成 x_{im} 沿 x 轴负方向移动。考虑到在分析过程中,接收系统的转动方向被定义为正向,而测量光相对于探测器的转动方向与之相反,因此可得 $\theta_m = -\varphi$ 。在此基

基础上, 结合图2所示的杠杆效应几何关系, 可得如下表达式:

$$x_{im} = -2\varphi d, \quad (14)$$

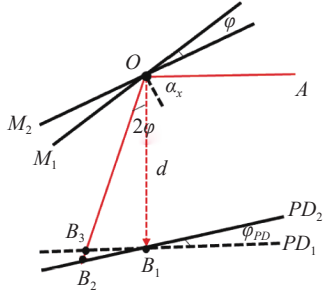


图2 杠杆臂误差分析图展示

Fig. 2 Analysis diagram of lever arm error

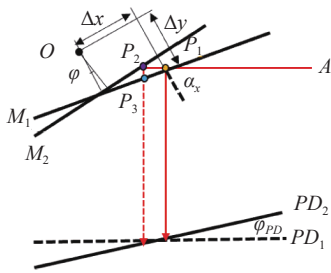


图3 活塞误差分析图展示

Fig. 3 Analysis diagram of piston error

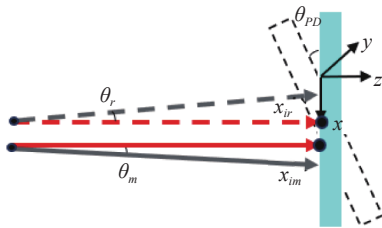


图4 变量与坐标系示意图

Fig. 4 Schematic of Variables and Coordinate System

同理, 也可以得到活塞效应下 x_{im} 的表达式:

$$x_{im} = 2 \sin \alpha_x \Delta x \varphi + (2 \Delta x \cos \alpha_x - \sin \alpha_x \Delta y) \varphi^2, \quad (15)$$

超前指向组件的安装角度需设为 45° , 即 $\alpha_x = 45^\circ$, 所以公式(15)可简化为:

$$x_{im} = \sqrt{2} \Delta x \varphi + \left(\sqrt{2} \Delta x - \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta y \right) \varphi^2, \quad (16)$$

在理想装调情况下, 即探测器的倾斜角 $\theta_{PD} = 0$ 、参考光偏移量 $x_{ir} = 0$ 、参考光倾斜角 $\theta_r = 0$ 、初始偏差 $x_{im,0} = 0$ 时, 简化公式(13)可得:

$$LPS_{ng} \approx x_{im} \left[\frac{z_{Rm}(z_{Rm} + z_{Rr}) + z_m(z_m - z_r)}{(z_{Rm} + z_{Rr})^2 + (z_m - z_r)^2} \theta_m \right] - \left[\frac{(z_{Rr}^2 + z_r^2) z_m - (z_{Rm}^2 + z_m^2) z_r}{(z_{Rm} + z_{Rr})^2 + (z_m - z_r)^2} \right] \frac{\theta_m^2}{2} + x_{im}^2 \left[\frac{(z_m - z_r)}{2((z_{Rm} + z_{Rr})^2 + (z_m - z_r)^2)} \right], \quad (17)$$

当初始偏差 $x_{im,0} = 0$ 时, 结果中将只有二阶耦合项:

$$LPS_{ng} \approx K \varphi^2, \quad (18)$$

其中 $K \varphi^2$ 表示非几何 TTL 噪声的二阶形式, 这个结果表明, 提高装调精度能降低一阶非几何 TTL 耦合, 而一阶非几何 TTL 耦合来源于各种装调误差。进一步分析可知, 当 $z_m = z_r$, $z_{Rm} = z_{Rr}$ 时, 公式(18)可以进一步简化为:

$$LPS_{ng} \approx \frac{1}{2} x_{im} \theta_m, \quad (19)$$

将公式(14)(16)代入公式(19), 只保留一阶二阶低阶项, 可得到杠杆效应的非几何 TTL 噪声公式为:

$$LPS_{ng} \approx -2d \varphi^2, \quad (20)$$

活塞效应的非几何 TTL 噪声公式为:

$$LPS_{ng} \approx \sqrt{2} \Delta x \varphi^2, \quad (21)$$

将几何 TTL 噪声与非几何 TTL 噪声进行叠加, 即可得到总 TTL 噪声耦合关系为:

$$LPS_{TTL} \approx \sqrt{2} \Delta x (\varphi + \varphi^2) - \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta y \varphi^2, \quad (22)$$

2.2.3 超前指向机构 TTL 噪声综合分析

综合上述理论分析可知, 在理想对准条件下, 杠杆效应引入的几何 TTL 噪声与非几何 TTL 噪声之间存在一定的负相关关系, 二者可在一定程度上相互抑制。受横向偏移与纵向偏移的影响, 活塞噪声无法实现完全消除。该负相关机制虽能在无外部辅助条件下实现部分噪声的削弱, 但当测量光束与参考光束的位置发生偏移, 且二者的瑞利长度不再匹配时, 这种抵消状态将被打破, 杠杆 TTL 噪声逐渐增强, 抵消效应随之减弱甚至消失。

上述分析均基于理想化的环境与操作假设。然而, 在实际搭建地面干涉仪测试平台的过程中,

各类非理想因素不可避免地会引入 TTL 噪声,并耦合至相位测量结果中,显著影响测量精度。仅依赖几何与非几何噪声之间的自然抵消,难以满足任务所要求的测量精度。因此,有必要构建额外的成像系统,以主动抑制几何 TTL 噪声,进一步提升系统性能。

2.3 成像系统设计原理

目前,针对干涉仪设计的成像系统已具备成熟方案^[18],且这类系统均遵循统一的设计思路。假设第一枚光学元件的物方焦距与像方焦距分别为 f_1 和 f'_1 ,第二组光学组件的物方焦距与像方焦距分别为 f_2 和 f'_2 。两组光学组件的像方焦距均为正值,即二者的光焦度均为正:

$$f'_1 > 0 \text{ \& } f'_2 > 0, \quad (23)$$

此外,第一枚光学元件的像方焦点与第二组光学组件的物方焦点重合,即满足:

$$d = f'_1 - f_2, \quad (24)$$

式中, d 为第一枚光学元件的像方主点到第二组光学组件的物方主点的距离。

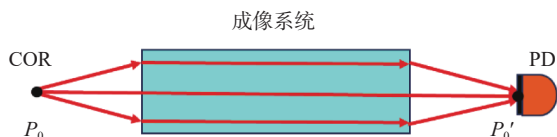


图 5 成像系统

Fig. 5 Imaging system

如图 6 所示,该图展示了成像系统在接收光路中的使用方式。通过对接收光束进行准直与缩束处理,可使光束尺寸与探测器的光敏区域相匹配,同时避免光束在探测器表面发生偏移。干涉仪平台通过位于透镜 L_1 物方焦点 f_1 处的光阑截取部分球面波,该部分光线可近似视为平行光。由于被截取的入射光线等效绕透镜 L_1 的物方焦点发生旋转,因此出射光线的旋转中心位于透镜 L_2 的像方焦点 f'_2 处。

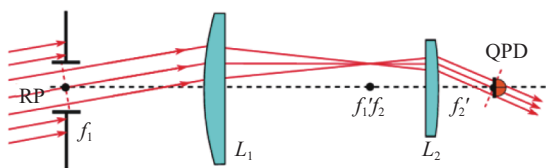


图 6 成像系统在干涉仪中的应用

Fig. 6 Application of the imaging system in the Interferometer

若将光电探测器置于透镜 L_2 的像方焦点 f'_2 处,当入射光线绕焦点 f_1 发生旋转时,根据望远镜系统的光学特性,出射光束的中心将始终与光电探测器的中心重合。这一设计可避免激光在旋转过程中偏离探测器中心。由望远镜系统的特性可知,激光在透镜 L_1 物方焦点 f_1 至透镜 L_2 像方焦点 f'_2 之间的光程保持恒定。因此,在焦点 f_1 处测得的干涉信号相对相位变化信息,与在焦点 f'_2 处测得的信息完全一致。这一过程等效于由实际探测器成像得到的一枚虚拟探测器,在透镜 L_1 的物方焦点处接收干涉信号。

3 试验与仿真设计

3.1 基于超前指向机构的光学平台设计

本研究采用基于激光外差干涉原理的高度对称等臂干涉仪设计方案,以最大限度抑制共模噪声。为抑制杂散光噪声,本系统采用前后表面夹角为 0.5° 的楔形分束器,该器件可对杂散光进行发散处理,避免其耦合进入测量光路。等臂设计方案虽在理论上可完全消除共模噪声,但在实际系统中,楔形分束器的几何不对称性、光路对准及安装误差等因素会破坏理想的等臂条件。

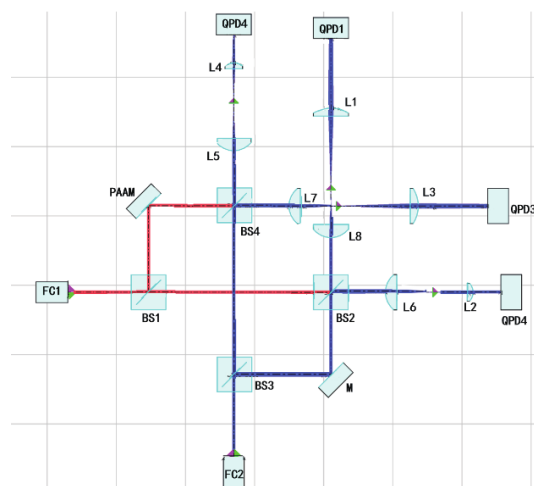


图 7 光学平台设计仿真示意图

Fig. 7 Optical Platform Design Simulation Schematic

针对楔角引入的几何不对称问题,必须通过精密的光路补偿实现有效的等臂结构配置。本研究借助 IFOCAD 软件^[19]对光学元件的空间位置进行优化,以达成亚纳米级的光路匹配精度。仿真结果表明,设计的臂长差仅为 $\Delta L_{\text{designed}} =$

10.58 pm, 远低于实际对准误差。

依据该干涉仪的参考光路与测量光路满足严格的等臂条件, 理论上可实现零光程差的等臂长干涉测量。本研究基于激光外差干涉原理, 为产生具有特定频差的两束激光, 系统前端激光调谐电路由激光源、1×2 光纤耦合器、声光调制器 (AOM) 和信号发生器组成, 确保了激光的稳定输出。

但在实际搭建过程中, 还需考虑光学元件性能及环境因素^[20]的影响。温度是需要考虑的首要影响因素之一。此外, 平台需建立在隔振平台上, 以避免引入额外的不必要抖动噪声。

3.1.1 TTL 耦合噪声分析

根据前文的理论分析可知, 几何噪声的产生本质上是指由于测量系统的机械支撑结构存在几何放大效应, 支点附近的微小位移, 可以在力臂远端产生较大的位移。在本文光学平台中, 这种位移会直接影响光程差, 造成相位或强度的波动。因此我们在模拟几何噪声的过程中, 在 PAAM 的旋转中心加入微小的机械角度抖动用来模拟杠杆噪声; 通过特定 PAAM 中心偏移量值来改变 PAAM 的旋转中心模拟活塞噪声, 由此量化几何 TTL 噪声对光路 TTL 噪声带来的影响。

3.1.2 安装误差噪声分析

在实际试验过程中, 光学元器件的安装不可避免会出现一定的安装误差, 因此为了更好的模拟真实的情况, 我们在仿真中给超前指向机构的加入了 $1\mu\text{m}$ 的安装误差, 这与实际情况下的安装误差接近。在安装成像系统时也加 $1\mu\text{m}$ 的安装误差, 用来模拟真实情况下成像系统的安装精度。

3.1.3 热噪声分析

结合现有实施条件限制进行分析, 仿真过程

中还需考虑探测器发热引发的热形变问题, 这是当前系统的主要噪声源之一。探测器作为干涉仪系统的核心信号传感元件, 在工作过程中会因内部电路功耗、光电转换损耗等因素不可避免地产生热量。若热量无法及时散逸, 将导致探测器本体及周边光学元件 (如相邻反射镜、透镜等) 出现温度梯度分布与热胀冷缩效应, 进而引发几何结构与位置的微扰。此类热形变并非均匀稳定的变化, 而是随工作时长、环境温度波动、探测功率调节等因素动态演变, 并最终通过光路耦合转化为显著的 TTL 噪声。

为了模拟实际实验中热噪声效应对其 TTL 噪声精度的影响, 我们在各个元器件上设置不同的温度值, 模拟在温度影响下元器件表面产生的形变, 并输出当前温度下的各个关键数值, 分别观察在是否含有成像系统的情况下, 有无热噪声对其光路产生的影响。

4 结果与讨论分析

4.1 TTL 耦合噪声结果分析设计

在成像系统及完美对准的理想情况下, 在 PAAM 上加入持续性角度偏移以模拟杠杆噪声, 观察在有无成像系统的情况下局部 TTL 噪声的变化, 如下图 8 所示, 左图显示了在无成像系统场景中, 光束角度上的路径长度变化, 将 PAAM 连续转动 $\pm 200\ \mu\text{rad}$ 时会导致纵向路径长度变化约 2.5 nm 左右。相比之下, 右侧的图显示了同一干涉仪与加入成像系统后的光程差变化, 路径长度变化减少到 0.03 nm 以下, 成像系统抑制了约 98.9% 的光程变化量, 此研究结果表明, 成像系统可以有效抑制 PAAM 在转动过程中所引起的杠杆噪声。

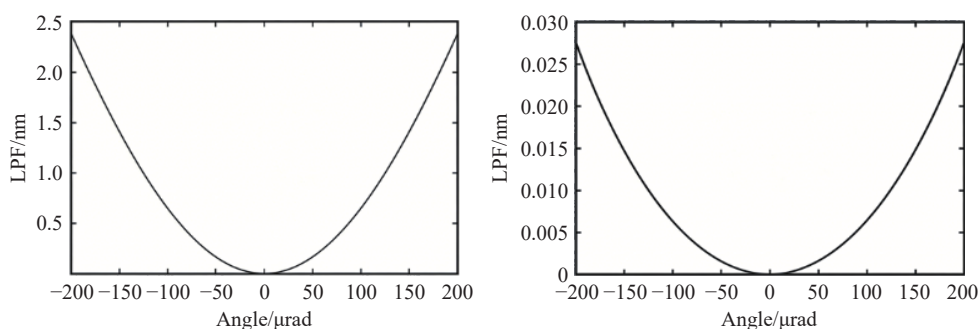


图 8 在成像系统安装前(左)和安装后(右)所产生的局部 TTL 耦合变化

Fig. 8 Local TTL coupling variations generated without (left) and with (right) the imaging system

为进一步研究 PAAM 转动过程中产生噪声对光程差的干扰程度,在 PAAM 旋转中心点施加定向偏移以模拟活塞噪声,本节重点对于 QPD3 与 QPD4 的局部 TTL 耦合噪声展开对比分析。图 9 分别展示了超前指向机构(PAAM)在模拟活

塞误差的非成像系统下,旋转中心沿 X/Y 方向施加 $5\text{ }\mu\text{m}$ 偏移时,四象限探测器 QPD3 与 QPD4 的局部 TTL 耦合特性变化规律(图中红实线对应无偏移($X/Y\text{ offset}=0\text{ }\mu\text{m}$),黑线对应 $5\text{ }\mu\text{m}$ 偏移($X/Y\text{ offset}=5\text{ }\mu\text{m}$))。

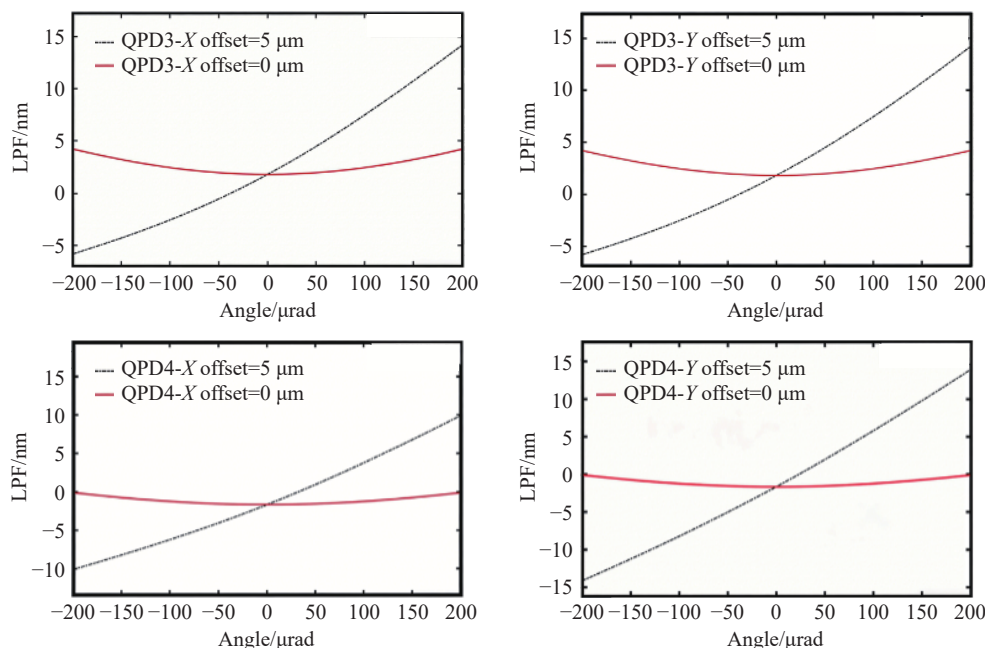


图 9 成像系统安装前仿真结果。横向偏移和纵向偏移产生的局部 TTL 耦合变化

Fig. 9 Simulation results without imaging system. The local TTL coupling variations generated by the lateral offset (top) and the longitudinal offset (bottom) are given

由结果可知,在 X 轴方向偏移场景中,QPD3 和 QPD4 的光程差变化幅度也不相同,在无偏移情况下光程差变化稳定在 4 nm 左右,但随着 PAAM 旋转角度逐渐增加,QPD3 和 QPD4 的光程差也逐渐增加。当 PAAM 沿 X 轴施加 $5\text{ }\mu\text{m}$ 定向中心偏移后,在旋转角为 $200\text{ }\mu\text{rad}$ 附近,QPD3 出现约 13 nm 的光程差变化,QPD4 出现幅值约 10 nm 的光程差变化;在 Y 轴方向偏移场景中,其变化规律与 X 轴向偏移呈现高度一致性:随着 PAAM 沿 Y 轴定向偏移同样会导致光程差增加。

这一结果表明无论是 X 轴向活塞偏移还是 Y 轴向活塞偏移,都会使得光路光程差逐渐增加,加剧 TTL 耦合的噪声扰动。而且随着设定偏移角度的逐渐加大,引入的活塞噪声也会越来越多,同时这一结果也验证了 PAAM 定向偏移对 TTL 耦合噪声的扰动具有各向同性特征。

在实际试验中,像透镜的横向或纵向定位活塞偏移从而引起的焦距变化是不可避免的,任何误差的出现都会导致额外的 TTL 耦合增加。仅

依靠当前成像系统无法实现良好的活塞噪声抑制效果,因此需要通过 IFOCAD 数值优化调整透镜组位置,减少安装透镜组引入的 TTL 耦合噪声。此情况仅适用于仿真实验中,如图 10 所示,成像系统像方焦点位于 QPD 中心,物方焦点位于 PAAM 旋转中心,整个系统严格满足成像系统基本原理。

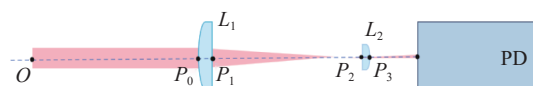


图 10 IFOCAD 数值优化成像系统设计。标记了透镜组和 QPD 的前表面的中心的纵向位置,而旋转点 O 位于 PAAM2 旋转中心处。严格考虑透镜厚度对于光路传播影响

Fig. 10 Design of the IFOCAD numerically optimized imaging system. The longitudinal positions of the centers of the lens group and the front surface of the QPD are marked, with the rotation point O located at the rotation center of PAAM2. The influence of lens thickness on optical path propagation is strictly considered

图 11 分析了在 PAAM 旋转中心增加 $5\text{ }\mu\text{m}$ 偏移量的情况下, 优化后的成像系统对活塞噪声的抑制效果, 在成像系统作用下, 无论 X 轴方向还是 Y 轴方向上的中心偏移, 对于光程差增长趋

势都具有良好抑制效果, 在旋转角度为 $200\text{ }\mu\text{rad}$ 的情况下, 光程差长度变化仅为 0.16 nm , 抑制了约 98.2% 的活塞噪声。这表明成像系统有效抑制了 PAAM 活塞偏移引发光程差变化。

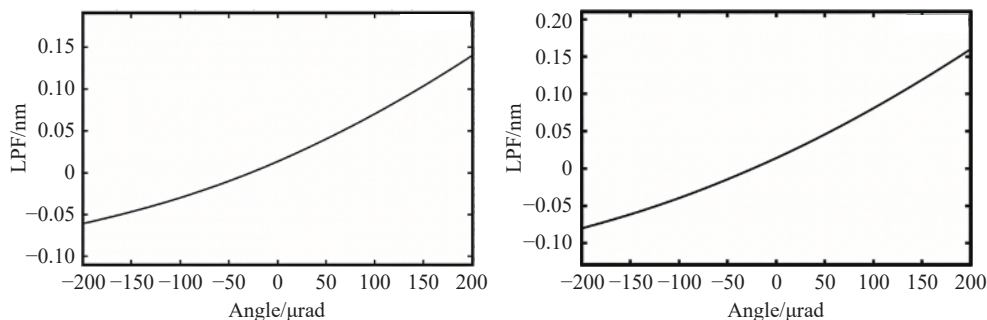


图 11 成像系统安装后仿真结果。横向偏移(左)和纵向偏移(右)所产生的局部 TTL 耦合变化

Fig. 11 Simulation results without imaging system. The local TTL coupling variations generated by the lateral offset (top) and the longitudinal offset (bottom) are given.

4.2 安装误差噪声结果分析

在存在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 安装误差的情况下, 当 PAAM 连续转动时, 其 0.1 Hz 至 0.01 Hz 频段内引入的 TTL 耦合噪声被抑制在 $1\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下, 如图 12 所示, 这一结果表明, 即使在非理想安装条件下, 所设计的成像系统仍能有效抑制由 PAAM 转动引入的 TTL 耦合噪声, 验证了该系统在实际工程应用中的鲁棒性与有效性。

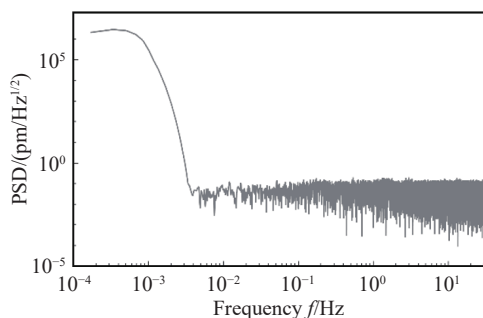


图 12 IFOCAD 中 PAAM 角抖动引起的 TTL 耦合噪声

Fig. 12 TTL coupling noise caused by PAAM rotation in IFOCAD

4.3 热噪声结果分析

为深入探究热变形噪声的特性及其对测量系统的影响机制, 需在实际实验环境中开展精细化的温度监测与数据分析。我们在探测器壳体、感光元件周边、相邻光学表面以及光路支撑结构等关键区域布设了多个高精度温度传感器, 以实时同步采集实验过程中各部位的温度变化数据。借

助 IFOCAD 等仿真平台构建了热-结构-光学多物理场耦合模型, 从而系统量化温度起伏与成像系统(TTL)噪声之间的关联规律。

仿真结果如图 13 所示, 该分布表明, 温度波动对干涉仪在 0.1 Hz – 0.01 Hz 频段内的测量精度具有显著影响, 由于热噪声的影响成像系统 TTL 耦合噪声从 $1\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 上升至 $10\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$, 这一结果不仅明确了热噪声在低频域的主要影响作用, 也为后续开展温控设计与低频噪声抑制提供了关键依据。

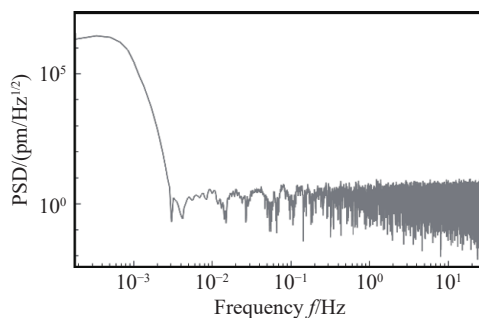


图 13 IFOCAD 中温度漂移引起的 TTL 耦合噪声

Fig. 13 TTL coupling noise caused by temperature drift in IFOCAD

5 结 论

本文的分析与仿真结果均基于理想安装和特定条件推导得出, 成像系统设计对于光路中产生

的 TTL 噪声具有良好的抑制效果。由以上仿真结果表明,成像系统对于杠杆噪声和活塞噪声均具有良好的抑制效果。具体而言,在理想对准情况下,成像系统能够抑制 98.9% 的杠杆效应导致的光程变化;通过成像系统优化可以抑制 98.2% 的活塞效应导致的光程变化。并且在仿真结果中我们可以得到,杠杆噪声与角度抖动呈现二阶相关性,活塞噪声与角抖动呈现一阶相关性,这与我们上文理论分析的公式 (3) 和 (10) 相吻合。在存在安装误差情况下,成像系统对于 TTL 耦合噪声抑制程度在 $1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以内,但随着加入热噪声影响,抑制程度大幅下降, TTL 噪声稳定在 $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以内。这说明,随着影响因素的不断增加,例如热噪声、安装偏差、甚至实验器材的性能优劣,都会使噪声性质会变得越来越复杂,

成像系统对于 TTL 噪声的抑制效果也随之不断削弱。

在实际工程部署中,系统性能同样会受到多种环境与硬件因素的耦合制约。其中,环境温度波动引发的热漂移效应是影响系统稳定性的关键因素之一,现有实验设备的性能冗余不足也可能成为系统误差的主要来源。因此在实际试验中,提高对准精度、减少安装误差、增加温度控制是必要的。针对上述问题,除提高对准精度外,后续研究考虑将从两方面开展优化工作:一是部署主动隔热温控系统,通过闭环温度调控将热漂移效应抑制至可接受的误差阈值内;二是遴选高性能实验器材,通过硬件性能的迭代升级进一步降低硬件引入的系统误差。通过上述措施,有望为系统在真实环境下的稳定运行提供保障。

参考文献:

- [1] EINSTEIN A. The field equations of gravitation[J]. *Sitzungsberichte Der Koniglich Preussischen Akademie Der Wissenschaften*, 1915, 1915: 844-847. (查阅网上资料,未找到本条文献刊名,请确认).
- [2] EINSTEIN A. On the general theory of relativity[J]. *Sitzungsberichte Der Koniglich Preussischen Akademie Der Wissenschaften*, 1915, 1915: 778-786. (查阅网上资料,未找到本条文献刊名全拼,请确认).
- [3] 罗子人,白珊,边星,等.空间激光干涉引力波探测[J]. *力学进展*, 2013, 43(4): 415-447.
LUO Z R, BAI SH, BIAN X, *et al.*. Gravitational wave detection by space laser interferometry[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(4): 415-447. (in Chinese).
- [4] CHANG Y H, HAO G B, LIU C S. Design and characterisation of a compact 4-degree-of-freedom fast steering mirror system based on double Porro prisms for laser beam stabilization[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 322: 112639.
- [5] KLUK D J, BOULET M T, TRUMPER D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(3): 257-270.
- [6] WANG Y K, MENG L Q, XU X S, *et al.*. Research on semi-physical simulation testing of inter-satellite laser interference in the China Taiji space gravitational wave detection program[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(17): 7872.
- [7] GAO L, ZHENG L A, LU B, *et al.*. Generation of squeezed vacuum state in the millihertz frequency band[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 294.
- [8] XIAO G Z, KUANG T F, HE Y T, *et al.*. Giant enhancement of nonlinear harmonics of an optical-tweezer phonon laser[J]. *eLight*, 2024, 4(1): 17.
- [9] ZHAO W Q, TANG L, YANG SH, *et al.*. Research on high-precision large-aperture laser differential confocal-interferometric optical element multi-parameter measurement method[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(4): 47.
- [10] CUI C, GAO L Y, ZHAO P B, *et al.*. Towards multi-dimensional atomic-level measurement: integrated heterodyne grating interferometer with zero dead-zone[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6(2): 40.
- [11] GEORGE D, SANJUAN J, FULDA P, *et al.*. Calculating the precision of tilt-to-length coupling estimation and noise subtraction in LISA using Fisher information[J]. *Physical Review D*, 2023, 107(2): 022005.
- [12] HARTIG M S. *Tilt-To-Length coupling in LISA Pathfinder: model, data analysis and take-away messages for LISA*[D]. Hannover: Leibniz University Hannover, 2022.
- [13] SHINSHI T, SHIMIZU D, KODEKI K, *et al.*. A fast steering mirror using a compact magnetic suspension and voice coil motors for observation satellites[J]. *Electronics*, 2020, 9(12): 1997.

- [14] LIU H, NIU X, ZENG M, *et al.*. Review of micro propulsion technology for space gravitational waves detection[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 193: 496-510.
- [15] HARTIG M S, SCHUSTER S, WANNER G. Geometric tilt-to-length coupling in precision interferometry: mechanisms and analytical descriptions[J]. *Journal of Optics*, 2022, 24(6): 065601.
- [16] HARTIG M S, SCHUSTER S, HEINZEL G, *et al.*. Non-geometric tilt-to-length coupling in precision interferometry: mechanisms and analytical descriptions[J]. *Journal of Optics*, 2023, 25(5): 055601.
- [17] WANNER G, HEINZEL G. Analytical description of interference between two misaligned and mismatched complete Gaussian beams[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(14): 3043-3048. SHEARD B S, HEINZEL G, DANZMANN K, *et al.*. Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(12): 1083-1095. (此处有 2 条文献, 请确认).
- [18] IFOCAD. IfoCAD[EB/OL]. [2023-06-12]. <https://www.aei.mpg.de/ifocad>.
- [19] HU W R, WU Y L. The Taiji Program in Space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. *National Science Review*, 2017, 4(5): 685-686.
- [20] ACCADIA T, ACERNESE F, ANTONUCCI F, *et al.*. Status of the Virgo project[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, 28(11): 114002.

作者简介:



张廷雨(2002—), 女, 安徽宿州人, 硕士, 现就读于国科大杭州高等研究院, 研究方向为光电信息工程。E-mail: zhangtingyu0616@163.com



印雄飞(1973—), 男, 浙江杭州人, 2000年于上海交通大学获得工学博士学位, 现为国科大杭州高等研究院教授级高级工程师, 研究方向为激光精密测量与加工。E-mail: yinxiongfei@ucas.ac.cn