

基于自适应光学技术的差分波前传感性能提升方法研究

宋威 刘靖翰 高瑞弘

Research on the method for improving the performance of differential wavefront sensing based on adaptive optics technology

SONG Wei, LIU Jing-han, GAO Rui-hong

引用本文:

宋威, 刘靖翰, 高瑞弘. 基于自适应光学技术的差分波前传感性能提升方法研究[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0028

SONG Wei, LIU Jing-han, GAO Rui-hong. Research on the method for improving the performance of differential wavefront sensing based on adaptive optics technology[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0028

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

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>

面向自由空间光通信波前校正的改进模拟退火算法

Improved simulated annealing algorithm for wavefront correction in free-space optical communication

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 784 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0028>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-14

基于自适应光学技术的差分波前传感性能提升方法研究

宋 威^{1,2,3}, 刘靖翰², 高瑞弘^{2*}

(1. 国科大杭州高等研究院 基础物理与数学科学学院, 杭州 310024;

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:空间引力波探测计划拟在太空中使用 3 颗卫星建立等边三角形的星座结构, 通过激光外差干涉的方法实现中低频段引力波信号的探测。激光捕获跟瞄技术用于实现卫星间光束的高精度对准, 实现三条双向激光链路的构建。差分波前传感(DWS)技术是激光跟瞄阶段的核心, 是实现纳弧度级角度分辨的关键。为充分验证激光捕获跟瞄系统的在轨可行性, 需对原理样机开展地面长距离验证实验。然而光束在大气中的传输会严重影响 DWS 技术的角度测量能力, 亟需寻求干扰的抑制方案。为此本文首先通过数值仿真的手段, 系统分析了大气对 DWS 的影响, 首次提出引入自适应光学技术补偿大气对 DWS 信号的干扰, 之后设计并搭建了基于 DWS 信号及波前测量的双控制回路激光跟瞄实验系统。引入了像差扰动开展实验, 实验结果表明, 在 0.1 Hz-1 Hz 频段, 同频段性能可提升约 10 倍, 充分说明了自适应光学系统可以有效提高 DWS 在大气环境下的测量能力, 为后续的激光捕获跟瞄系统长距离大气环境地面验证奠定了基础。

关键词:差分波前传感技术; 激光捕获跟瞄; 自适应光学; 空间引力波探测

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0028 CSTR: 32171.14.CO.2026-0028

Research on the method for improving the performance of differential wavefront sensing based on adaptive optics technology

SONG Wei^{1,2,3}, LIU Jing-han², GAO Rui-hong^{2*}

(1. School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

* Corresponding author, E-mail: gaoruihong@imech.ac.cn

Abstract: The Space Gravitational Wave detection program intends to use three satellites in space to establish an equilateral triangle constellation structure, and realize the detection of gravitational wave signals in the middle and low frequency bands by laser heterodyne interference. Laser capture and pointing technology

收稿日期: 2026-03-02; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (No. 12305074)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12305074)

is used to achieve high-precision alignment of beams between satellites, and the construction of three bidirectional laser links is realized. Differential wavefront sensing (DWS) technology is the core of laser tracking and pointing stage, and it is the key to achieve nanoradian Angle resolution. In order to fully verify the on-orbit feasibility of the laser capture and tracking system, it is necessary to carry out long-distance ground verification experiments on the principle prototype. However, the transmission of light in the atmosphere will seriously affect the Angle measurement ability of DWS technology, and it is urgent to find a scheme to suppress the interference. Therefore, this paper systematically analyzes the influence of atmosphere on DWS by means of numerical simulation, and proposes the introduction of adaptive optics technology to compensate the interference of atmosphere on DWS signal for the first time. Then, a laser tracking and pointing experimental system with dual control loops based on DWS signal and wavefront measurement is designed and built. The experimental results show that in the 0.1 Hz–1 Hz frequency band, the performance of the same frequency band can be improved by about 10 times, which fully demonstrates that the adaptive optics system can effectively improve the measurement ability of DWS in the atmospheric environment, laying a foundation for the subsequent long-distance ground verification of laser capture and pointing system in atmospheric environment.

Key words: Differential Wavefront Sensing Technology; Laser Capture Tracking; Adaptive Optics; Gravitational wave detection in space

1 引言

随着地面引力波探测计划的成功实施^[1], 科学界正将目光投向更广阔的频段, 特别是 0.1 mHz 至 1 Hz 的中低频波段。为系统性探测该频段信号(主要源自超大质量黑洞并合等宇宙大质量天体事件), 全球多国正积极推进空间引力波探测计划。此类计划的核心在于构建由卫星编队组成的长基线空间激光干涉仪。目前, 欧洲主导的“激光干涉空间天线”(LISA)^[2] 以及中国的天琴^[3] 与太极计划^[4-6], 均拟采用三颗卫星构成臂长在十万至百万公里级的等边三角形构型, 利用激光外差干涉技术精密测量星间检验质量的距离变化, 从而提取引力波信号。以“太极”计划为例, 其卫星间距长达 300 万公里。激光束经此超远距离传输后, 接收端功率将急剧衰减至 nW 量级^[7-8]。与此同时, 为消除激光指向噪声对测量精度的影响, 系统需在 0.1 mHz 至 1 Hz 频段内将激光指向抖动抑制至 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下。这种集超长传输距离、极弱信号接收、极高精度控制于一体的极端条件, 使得高稳定激光链路的构建与维持成为空间引力波探测任务面临的核心挑战。

激光捕获、指向、跟踪(Acquisition Tracking

Pointing, ATP)技术是建立并维持星间激光链路的关键^[9-10]。重力场恢复与气候实验后续(GRACE Follow-On)作为全球首个在轨成功运行的星间激光干涉仪^[11], 采用了四象限探测器(Quadrant Photodiode, QPD)兼作捕获与科学测量探测器。该方案虽然简化了载荷, 但由于角度信息与频率信息耦合, 导致扫描捕获时间较长, 且缺乏专用的捕获传感器以解耦空间扫描与频率扫描。LISA、天琴和太极计划则采用专用捕获传感器, 得益于捕获探测器的大动态范围和弱光探测能力, 这些计划能够实现快速高效的波束对准, 随后切换至 DWS 模式进行高精度指向控制。以太极计划为例, 采用三级探测器逐级搭建激光链路, 分别采用星敏感器(STR)、互补金属氧化物半导体(CMOS)和 QPD 三种探测器逐级搭建双向激光链路, 最后基于 DWS 测得的高精度位姿信息, 完成 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 激光瞄准抖动控制。

对于 ATP 技术的地面验证, 现有研究已从早期的纯理论仿真走向复杂的动态实物模拟。LISA 团队模拟了整个激光链路采集过程, 主要聚焦于理论演示, 包括三条双向激光链路^[12-17], 并优化了采集控制系统的设计。针对 GRACE Follow-On^[18-19], 德国团队利用光纤延迟线模拟了长距离传输带来

的功率衰减和多普勒频移, 成功验证了在轨性能。太极计划中, Ruihong Gao 等进行了实际光路、远场波前和扫描情况的模拟^[20-21], 据此搭建了空间引力波激光捕获指向地面模拟实验系统, 在 10 m 的大理石台上实现了太极计划扫描捕获全过程模拟, 并且实现了 $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的激光捕获精度, 对太极计划捕获系统进行了原理方法学验证。天琴计划中, Qilin Hu 等搭建了由两个光学单元模块和一个星间链路模拟模块组成的地面半物理实验系统^[22], 在引入真实卫星姿态抖动的动态条件下, 闭环控制系统成功将激光指向波动抑制在约 $5 \mu\text{rad}$ 水平。蒙特卡洛模拟与重复实验表明, 该方案的双向链路建立成功率达 81.7% 至 98%, 平均捕获时间控制在 82 至 99 秒之间。这些数据充分验证了天琴计划 ATP 系统在动态干扰下的鲁棒性及“相机+DWS”两级架构的有效性。

受限于实验室空间, 现有地面实验的自由空间传输距离较短(通常在 10 m 量级), 主要依赖光纤或光学缩束系统来模拟长距离传输的功率衰减和波前变化。这种短距光学模拟实验虽然能实现原理方法学验证, 但是受限于有限的传输距离无论是光束扫描范围还是平顶光束的模拟程度都无法做到空间百万公里的等效模拟。开展长距离自由空间地面验证已成为下一步技术发展的必然趋势, 以更真实地考核 ATP 系统在远场条件下的性能。对 ATP 系统的长距离地面模拟是下一步的发展趋势, 但大气湍流等随机干扰会引入波前畸变, 严重制约 DWS 技术的测量精度。已有研究初步探讨了光学像差对 DWS 的影响^[23], 但其分析尚不完善, 缺乏对大气环境下 DWS 性能受限机理的系统性研究, 更未见有效补偿方法的提出。随着相关技术地面验证的推进, 解决大气对 DWS 的干扰将具有极其重要的工程意义。而自适应光学作为最常用的检测、控制和校正波前畸变的方法, 已经在多个领域内有着成熟的应用, 本文首次将自适应光学系统用于 DWS 测量, 通过实时校正波前畸变, 有望显著提升大气环境下 DWS 的测量性能, 推进空间引力波探测激光捕获跟瞄系统地面长基线验证。此外, 相比于传统 ATP 系统采用的基于 CCD/CMOS 捕获相机光强敏感的角度测量方案, DWS 技术具有更高的角度分辨率, 因此该项研究也将为地面自由空间激光

通信等领域提供更具潜力的精密指向方案。

本文第二章从技术原理和系统组成介绍 DWS 和自适应光学相关理论, 第三章通过分析波前畸变的产生、表述, 定量分析像差对 DWS 的影响, 系统解析了大气湍流对 DWS 的影响机制, 第四章介绍实验系统的设计和相关实验结果, 第五章将对工作进行总结与展望。

2 关键技术

本文的研究主要涉及两个关键技术, DWS 技术和自适应光学技术。DWS 技术广泛应用于空间高精度角度测量, 在太极的捕获跟瞄系统中, 作为第三级的精密指向, DWS 分辨率要达到 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。而自适应光学则是针对由大气扰动引起的波前畸变。比如, 在天文观测中, 受大气扰动等因素的影响, 恒星像的分辨能力会大幅下降, 而采用自适应光学技术能够有效地克服这些畸变, 达到逼近衍射极限的成像分辨率。下面将介绍这两种技术的系统组成和工作原理。

2.1 DWS 技术

差分波前传感(Differential Wavefront Sensing, DWS)是一种高精度角测量方法, 其工作原理如图 1 所示: 利用来自远端的接收光(Beam2)和本地参考光(Beam1)在四象限探测器上进行干涉, 通过 QPD 将光信号转换成电信号, 然后利用相位计对各个象限的平均位相进行分离, 得到相应的相位, φ_A 、 φ_B 、 φ_C 、 φ_D 则:

$$\varphi_{ud} = (\varphi_A + \varphi_D - \varphi_B - \varphi_C)/2 \quad (1)$$

$$\varphi_{lr} = (\varphi_C + \varphi_D - \varphi_B - \varphi_A)/2 \quad (2)$$

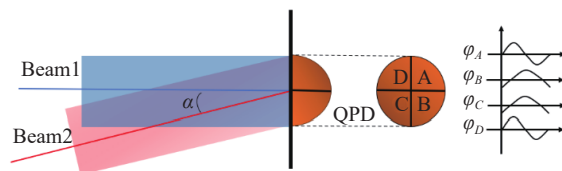


图 1 DWS 技术原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the DWS technique

这里, φ_{ud} 和 φ_{lr} 表示上下、左右两个象限的相位差。在两个波束相对较小的情况下, 偏航(yaw)与俯仰(pitch)方向的角位移量与 φ_{ud} 和 φ_{lr} 成正比, 从而可以利用高精度的相位信息来实现高精度测

量的测角。在偏转角相对较小并且两个激光束都是平坦的情况下, yaw 与 pitch 方向的角偏移量可以大致表达为:

$$\Delta\varphi \approx \frac{16r}{3\lambda}\alpha, \quad (3)$$

其中 $\Delta\varphi$ 为相位差, r 为探测器光敏面半径, λ 为激光波长, α 为两光束在相应方向上的夹角。

QPD 相位数据由相位计读取, 传输到计算机上进行计算, 以太极计划为例, 项目拟采用的激光波长为 1064 nm, 选用探测器光敏面直径 1 mm 的 QPD, 根据式 (3) 可得相位差与角度之间的转换系数约为 2500 rad/rad。现在相位计的相位测量精度可达 $2\pi \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}@ (0.1 \text{ mHz}-1 \text{ Hz})$ [24-25], 因此利用 DWS 技术测角在理论上可以实现优于 $2.5 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测量精度, 能够达到空间引力波探测 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的角度测量需求, 可以用于激光精密指向阶段。

激光经数百万公里传播后, 其特征为平顶光束, 所以可视为高斯光和平顶光的干涉而形成了 DWS 信号。理想条件下, 在 DWS 信号为 0 的条件下, 接收光束应该与本地光束平行。波前有畸变时, 接收端的波前也会发生改变, 从而使 QPD 表面干涉信号的相位产生改变。对于这一问题的定量研究还很少, 只有 Xiangzhi Yu 等人用数值模拟的方式对其进行了简单的分析[23], 而像差具体是如何引起 DWS 测角误差目前仍是尚未解决的关键问题, 需进一步研究其对激光指向系统的影响。本文后续章节将进行相关内容的分析。

2.2 自适应光学技术

自适应光学技术分为有波前探测和无波前探测两种实现。无波前探测系统具有结构简单, 无需信标光即可工作的特点, 适用于一些无法安装波前探测器的系统中。本文使用的是有波前探测的自适应光学系统。下面四个小节将对相关内容进行介绍。

2.2.1 闭环校正原理

图 2 展示了基于波前探测技术的闭环自适应光学校正架构[26]。在该系统中, 大气湍流效应会导致传输光束发生相位畸变, 形成非理想的畸变波前。为克服这一障碍, 接收端引入了自适应光学(AO)技术进行共轭相位补偿。该系统的核心闭环控制机制由三大关键部分构成: 其一是波前

传感器(Wavefront Sensor, WFS), 其职责是实时捕获信号光的波前畸变特征; 其二是波前控制器(Wavefront Controller), 它作为系统的“大脑”, 利用波前重构算法(如 Zernike 多项式拟合)处理传感器采集的数据, 解算出所需的校正信号, 并施加到相应的器件上; 最后是波前校正器(Wavefront Corrector), 它依据控制器下发的电压指令产生形变, 生成与入射畸变波前相位相反、振幅相等的共轭波前。当原始畸变波前与该共轭波前叠加时, 相位偏差被相互抵消, 从而显著改善残余波前质量。系统通过这种高频次的实时迭代校正, 旨在将残余波前误差降至最低, 理想状态下可实现完全校正(残余波前为零), 最终大幅提升接收端的光学成像分辨率与光束质量。

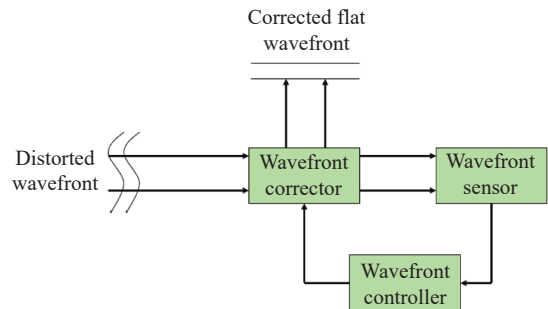


图 2 自适应光学系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of adaptive optics system

2.2.2 波前传感器

波前传感器在整个自适应系统中扮演着“眼睛”的角色, 可以实时探测波前畸变, 产生控制信号至波前控制器, 从而实现闭环控制[27]。

Shack-Hartmann 波前传感器工作原理如图 3 所示, 其主要由 CCD 探测器和微透镜阵列组成。其微透镜阵列将入射波前聚焦到 CCD 的感光面上形成一个光点阵列图像, 事先用无像差的光束标定出参考质心, 计算各子孔径内光斑的质心相对参考质心的偏移量, 通过一定的波前复原算法就能重构入射波前。

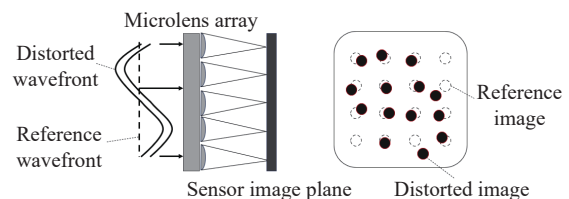


图 3 Shack-Hartmann 波前传感器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of Shack-Hartmann wavefront sensor

2.2.3 波前校正器

波前校正器^[28]的核心机制是接收控制计算机输出的电压指令, 驱动镜面产生形变, 从而实现畸变波前的相位补偿。由于在大气湍流引起的波前畸变中, 倾斜分量(Tip-Tilt)的方差贡献率高达约 87%, 因此系统通常采用快速偏摆反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)专门负责低阶倾斜像差的校正, 利用变形镜(Deformable Mirror, DM)处理剩余的高阶像差。以下将对这两类关键器件进行阐述。

基于压电陶瓷驱动的 FSM 具备高谐振频率与极快的响应速度。FSM 内部集成两组正交方向的促动器, 可实现偏航(yaw)和俯仰(pitch)的两个自由度的运动。向驱动器施加特定的电压组合, 可精确控制镜面在二维平面内的偏转角度, 进而有效校正光束的倾斜畸变。

以压电陶瓷作为促动器的压电变形镜典型结构为“分立促动器支撑连续镜面”。镜面一般为方形或圆形。工作时, 施加电压使压电陶瓷发生伸缩形变, 进而推动镜面局部“凸起”或“凹陷”, 通过改变镜面面型来拟合并补偿入射波前的复杂畸变。

变形镜的校正性能主要取决于促动器数量(单元数)、间距及其拓扑排布。一般而言, 单元数越多, 空间校正自由度越高; 在同等口径下, 较小的促动器间距意味着更高的空间频率校正能力, 但过小的间距会加剧促动器间的机械耦合, 反而限制了对特定像差的拟合精度。

2.2.4 波前控制器

在自适应光学系统的闭环控制架构中, 波前控制器是连接波前探测端与校正执行端的核心枢纽。波前传感器实时采集畸变波前信号并将其传输至波前控制计算机, 计算机内部算法对接收到的探测数据进行波前重构运算, 解算出相应的校正指令, 生成的控制信号被发送至变形镜, 驱动其产生共轭面型以补偿像差。作为运行于通用计算机上的软件模块, 波前控制器既承担着核心的波前重构与控制解算任务, 还集成了数据实时记录、存储及系统状态监控等多重功能。

3 大气湍流对 DWS 的影响

在激光传输过程中, 大气作为复杂的传输介

质, 会对光束造成直接影响。其中对 DWS 影响较大的是大气湍流引起的光束波前畸变, 像差的波动会引起 DWS 信号的波动, 淹没实际的角度抖动信号。使用 Zernike 多项式来描述波前畸变在波前重构、波前控制等方面具有显著优势, 不同 Zernike 多项式项系数对于 DWS 的影响不同, 本章将会详细介绍这些内容。

3.1 大气湍流影响光束波前的原理概述

大气湍流的形成与气象因素、太阳辐射相关, 由大气温度、风速的随机波动引发, 最终导致大气密度及折射率的随机起伏, 进而改变激光传输特性。

湍流可通过外尺度 L_0 (最大涡旋尺度, 数十至数百米) 和内尺度 l_0 (最小涡旋尺度, 仅几毫米) 描述。激光传输时, 穿过大尺度涡旋会受折射影响, 穿过小尺度涡旋则受衍射影响, 二者共同导致光束传播方向偏移、能量扩散及空间相干性降低。

大气折射率起伏的结构函数遵循 Kolmogorov 三分之二定律, 其定义为:

$$D_n(r) = C_n^2 r^{2/3}, \quad (4)$$

其中为大气结构常数, 是表征湍流强度的核心参数, $C_n^2 = 10^{-16} \text{m}^{-2/3}$ 对应弱湍流, $C_n^2 = 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ 对应中强湍流, 水平传输时, C_n^2 可视为常数; 斜程传输(如星地激光链路)常用 Hufnagel-Valley 模型描述:

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} \left(\frac{W}{27}\right)^2 h^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{h}{100}\right), \quad (5)$$

h 是一个高度值, 表示光束距水平面的值, $W=21 \text{ m/s}$ 表示风速, 这是一个随机变量, $A=1.7 \times 10^{-14}$, 也就是 H-V5/7 模型。

在工程应用中, 大气湍流的强弱常用大气相干长度 r_0 来表示:

$$r_0 = \left[0.423 k^2 \sec \beta \int_0^H C_n^2(z) dz\right]^{-3/5}, \quad (6)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, C_n^2 为大气结构常数, β 为天顶角, H 为对流层顶相对地面高度。随着大气湍流的加剧, r_0 的数值减小, 通常在几个到几十个厘米的范围内。

激光在理想大气中传输时,其波前为规则的球面或平面,而在实际扰动大气中,湍流导致的折射率随机涨落和散射引起的光线传播路径改变,会使原本规则的波前产生不规则的畸变,进而影响 DWS 干涉信号。波前畸变会导致 DWS 的干涉信号相位分布、光强分布发生异常,引入测角误差,严重影响 DWS 技术的角度测量能力。

3.2 Zernike 多项式与大气湍流

大气湍流效应是引起波前像差的主要物理机制。针对这一现象, Noll 率先引入 Zernike 多项式(泽尼克多项式)构建了数学描述模型。该多项式体系在畸变波前的特征表征、波前相位重构以及变形镜控制指令解算等关键环节中,展现出绝对的优势。鉴于 Zernike 多项式具备在单位圆域上的正交特性,复杂的波前像差通常被展开为一系列该多项式的线性叠加,其数学表达形式如下:

$$\begin{cases} Z_i = \sqrt{2(n+1)}R_n^m \cos(m\theta), & m \neq 0, i = \text{even} \\ Z_i = \sqrt{2(n+1)}R_n^m \sin(m\theta), & m \neq 0, i = \text{odd} \\ Z_i = \sqrt{n+1}R_n^m, & m = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$R_n^m = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2 - s]! [(n-m)/2 - s]!} r^{n-2s}, \quad (8)$$

其中 θ 是极坐标角度值, r 是极坐标半径。 m 和 n 表示角向频率与径向频率,具有以下关系:

$$m \leq n, n - |m| = \text{even}, \quad (9)$$

表 1 给出了前 15 项泽尼克系数的表达式。

表 1 Zernike 多项式的前 15 项

Tab. 1 The first 15 terms of Zernike polynomials

| j | n | m | $Z_j(\rho, \theta)$ |
|-----|-----|-----|---------------------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | $2\rho \cos\theta$ |
| 3 | 1 | 1 | $2\rho \sin\theta$ |
| 4 | 2 | 0 | $\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$ |
| 5 | 2 | 2 | $\sqrt{6}\rho^2 \sin 2\theta$ |
| 6 | 2 | 2 | $\sqrt{6}\rho^2 \cos 2\theta$ |
| 7 | 3 | 1 | $\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin\theta$ |
| 8 | 3 | 1 | $\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos\theta$ |
| 9 | 3 | 3 | $\sqrt{8}\rho^3 \sin 3\theta$ |
| 10 | 3 | 3 | $\sqrt{8}\rho^3 \cos 3\theta$ |

续表 1

| j | n | m | $Z_j(\rho, \theta)$ |
|-----|-----|-----|--|
| 11 | 4 | 0 | $\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$ |
| 12 | 4 | 2 | $\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos 2\theta$ |
| 13 | 4 | 2 | $\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin 2\theta$ |
| 14 | 4 | 4 | $\sqrt{10}\rho^4 \cos 4\theta$ |
| 15 | 4 | 4 | $\sqrt{10}\rho^4 \sin 4\theta$ |

3.3 像差对 DWS 影响

本小节将采用数值模拟的方法分析像差对 DWS 信号的影响,故将首先建立含像差项的 DWS 信号数学模型。

空间引力波探测中,经过数百万公里的传播后,远端卫星发出的激光被望远镜截取、缩束为平顶光束,与本地高斯光束在 QPD 表面干涉产生 DWS 信号。本地高斯光束复振幅:

$$E_g(r, \theta, z_g, t) = E_1 \cdot e^{-\frac{r^2}{\omega^2(z_g)}} e^{-ik\left[\frac{r^2}{2R(z_g)} + W_1(r, \theta)\right] + i\omega_1 t}, \quad (10)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, E_1 为振幅, $W_1(r, \theta)$ 表示引入的像差, z_g 为高斯光束传播距离, ω_1 是角频率, $\omega(z_g)$ 和 $R(z_g)$ 分别表示 z_g 处光斑半径及波前曲率半径。

接收平顶光束复振幅近似为:

$$A_{flat-top} = \begin{cases} E_0 \cdot e^{-ikz_f} & x^2 + y^2 \leq \omega_f^2 \\ 0 & x^2 + y^2 > \omega_f^2 \end{cases}, \quad (11)$$

其中 E_0 为振幅, ω_f 表示 QPD 表面平顶光束光斑半径, z_f 代表平顶光束传播距离。

平顶光束在 yaw 方向偏移角度 φ , 且引入像差 $W_2(r, \theta)$, 复振幅表达式为:

$$E_f(r, \theta, t) = \begin{cases} E_2 \cdot e^{-ik[-\sin\varphi \cdot r \cos\theta + W_2(r, \theta)] + i\omega_2 t} & r \leq r_0 \\ 0 & r > r_0 \end{cases}, \quad (12)$$

其中 r_0 为 QPD 表面光斑半径。

两束光在 QPD 表面内形成干涉,左右象限 DWS 信号可表示为:

$$DWS_{rl} = \frac{1}{2} \arg\left(\frac{F_1 \cdot F_4}{F_2 \cdot F_3}\right) = \frac{1}{2} (\arg F_1 + \arg F_4 - \arg F_2 - \arg F_3), \quad (13)$$

其中 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 为各象限干涉信号复振幅。忽略高阶项后, DWS 信号核心关系为:

$$DWS_{rl} \approx k_{aber}\varphi + b_{aber}, \quad (14)$$

其中 k_{aber} 和 b_{aber} 分别为相角转化系数和像差引起的固定偏差, 将 $\varphi_e = \frac{b_{aber}}{k_{aber}}$ 为 DWS 技术的测角误差, 是评估像差影响的关键指标。

采用 Zernike 多项式前 21 项模拟实际复杂波前, 剔除无关项后, 发现 Zernike 多项式中 Z_8 、 Z_{10} 、 Z_{16} 、 Z_{18} 和 Z_{20} 对 yaw 方向以及 Z_7 、 Z_9 、 Z_{17} 、 Z_{19} 、 Z_{21} 对 pitch 方向会引起明显的固定测量偏差, 其余项影响可忽略。考虑 Z_8 、 Z_{10} 、 Z_{16} 、 Z_{18} 、 Z_{20} 项引起的测角误差与像差系数之间的关系, 得到的固定测角误差与像差系数的关系如图 4 所示, 其中包含影响较大的几项以及 Z_4 项, 其余项的结果与 Z_4 项一样对固定偏差基本没有影响。本文后续使用前 15 项 Zernike 系数重构波前, 可以看到前 15 项中, Z_8 、 Z_{10} 引起 yaw 方向测角误差较大。

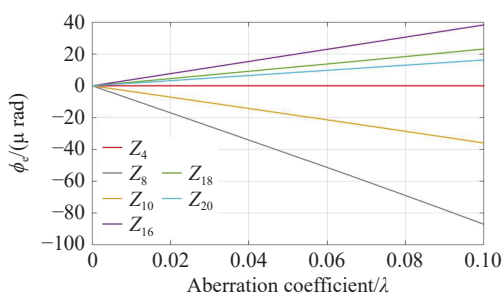


图 4 测角误差与像差系数的关系

Fig. 4 Relationship between angular error and aberration coefficient

根据 Kolmogorov 大气湍流理论相关公式, 我们可以仿真出 Kolmogorov 湍流相位屏, 再带入这一节推导的公式, 我们可以仿真出 Kolmogorov 湍流下的 DWS 波动水平。如图 5 所示, 仿真条件为大气相干长度 $r_0=1$ cm, 接收口径 $D=0.5$ cm, 该口径参数与后续实验相符, 这里主要是考虑 Z_7 - Z_{10} 的影响, 忽略了倾斜项以及高阶项的影响。

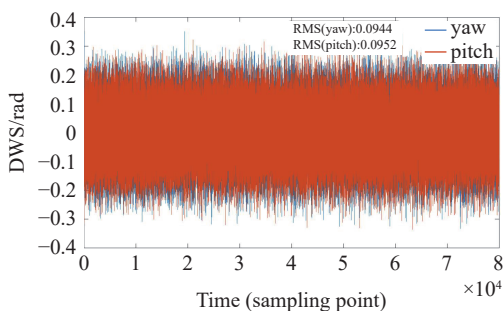


图 5 真实湍流中 DWS 波动水平

Fig. 5 DWS fluctuation level in real turbulence

4 实验与结果

上一章介绍了大气湍流影响 DWS 的原理, 并通过数值仿真分析了像差对 DWS 的影响。本章将通过实验来说明自适应光学系统对大气中 DWS 测量效果的提升。首先搭建自适应光学+DWS 双控制回路实验系统, 然后标定快反镜角度-DWS 相位转化系数, 并对自适应系统闭环控制性能、DWS 角度指向性能进行测试, 最后通过对比不同条件下有无自适应系统控制的实验结果, 从而验证方法的有效性。

4.1 实验方案设计及系统搭建

4.1.1 实验系统

实验光路设计如图 6 所示, 测量光从激光器发出, 波长 λ 为 1064 nm, 经过 FSM 反射, 进行扩束和光阑的截取, 此时测量光可以近似模拟高斯平顶光, 光路中的透镜组起到了共轭的作用。光束经 PBS(Polarized Beam Splitter, 偏振分光棱镜) 折转分别发射到 DM 和 WFS, 此时可认为 WFS 与 DM 在对同一波前进行测量和校正, 这个过程需要执行多次, 直至将波前校正至所要求。校正后的光束经 BS1(Beam Splitter, 半反半透镜) 分光 and MIRROR(反射镜) 反射, 到达 QPD 与本地激光发生干涉。实验中所有扩束/缩束系统都是 4f 光学系统, 保证了波前探测、校正和传输的一致。图 7 是实际搭建的光路图。表 2 列举了系统中的主要参数。

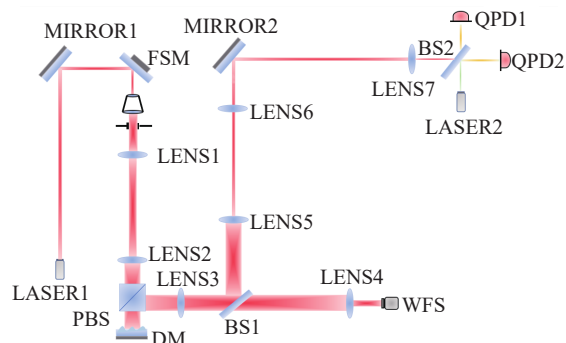


图 6 实验光路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental lightpath

实验系统分为两部分: 自适应光学系统和基于 DWS 信号的指向控制系统, 分别对应了下面两条控制环路:

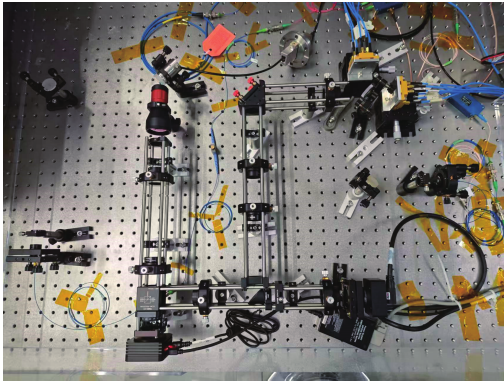


图 7 实验光路实物图

Fig. 7 Physical picture of the experimental lightpath

表 2 实验系统基本参数

Tab. 2 Table of key parameters of the experimental system

| 参数 | 数值 |
|-------------------|---------|
| 激光波长(λ) | 1064 nm |
| 测量光扩束倍数 | 3 |
| 扩束后光斑大小 | 7.8 mm |
| 光阑大小 | 5 mm |
| WFS光斑大小 | 3.3 mm |
| QPD光斑大小 | 1.5 mm |
| DM光斑大小 | 10 mm |

自适应光学系统的环路由 WFS 和 DM 组成, 实验所用波前传感器是 Thorlabs 的 WFS20-5C, 变形镜是 Thorlabs 的 DMH40, 仪器的基本参数见表 3、表 4, DM 最多对 Z_4 - Z_{15} 阶 Zernike 系数进行控制, 因此实验选择前 15 项 Zernike 系数重构波前, WFS 实时输出波前的 Zernike 系数数组, 控制软件不断读取数组内容并计算输出 DM 的控制电压。实验中 WFS 的采样率为 220 Hz 左右, 由于上位机软件计算并产生控制到实际施加电压到变形镜产生共轭面型存在一个毫秒级延时, 该延时无法准确计算, 为了确保控制是基于有效的 Zernike 系数, DM 回路的控制带宽设置为 67 Hz, 是采样率的三分之一, 控制器采用 PI(比例积分)控制器。

第二条环路由 QPD 和 FSM 组成, FSM 根据内环 QPD 的读数进行角度指向控制, 用于保证内外环的 DWS 角度都接近于 0。这时噪声会使 DWS 角度偏离 0, 就可以量化噪声, 通过时域和频域图结合分析 DWS 的噪声水平, 可以对方法

的有效性进行评估, 频域图数据是本文主要的评价指标。

表 3 哈特曼波前传感器基本参数

Tab. 3 Hartmann wavefront sensor parameter

| 参数 | 数值 |
|---------------|--------------------------------------|
| RMS值(波前敏感性) | 1/100 rms @ 633 nm |
| 子孔径数目 | 47×35 |
| CCD的分辨率 | 1440×1080 Pixels |
| 像元尺寸 | 5.0 μm ×5.0 μm |
| 通光孔径 | 9 mm |
| 每个微透镜对应的子孔径大小 | 7.20 mm×5.40 mm |
| 微透镜阵列间距 | 150 μm |
| 微透镜阵列焦距 | 5.6 mm |
| 微透镜阵列的几何形状 | 圆形 |
| 最高采样率 | 880 fps |

表 4 变形镜基本参数

Tab. 4 Deformable mirror parameters

| 参数 | 数值 |
|--------------------------|-------------------------|
| 口径大小及形状 | 圆形, 直径为14 mm |
| 镜面分段数 | 一共40个, 24个在瞳孔内, 16个在瞳孔外 |
| 镜面涂层 | 银 |
| 驱动电压 | 0~300 V |
| 平均反射率 | |
| 450 nm - 2 μm | >97.5% |
| 2 - 20 μm | >96.0% |
| 相对于参考球面初始均方值 | 200 nm |
| 初始主要畸变 | 直径为18 mm的凹球面 |
| 最大冲程 | 24.5 μm |

FSM 的驱动需要使用 PI 公司的 E-518 接口模块和 E-504 压电放大器模块组成的控制器, 表 5 是相关参数, FSM 软件部分同样集成在 Labview 程序中, 采用 PI 控制器进行控制。QPD 的相位读出依赖相位计, 实验中所用相位计读出频率是 60 Hz, 通过 USB 端口连接计算机, 读出数据为四个象限的相位二进制补码数据, 需要经过计算得到两个方向的角度信息, 然后根据标定的 FSM 角度-DWS 角度系数作为比例系数进行控制。

如图 8 所示, WFS 软件使用 Thorlabs 官方的上位机软件, 其余控制以及数据采集等功能均在自主编写的上位机软件中实现, 上位机软件编写

主要使用 Labview, 部分功能使用 C++实现并封装成动态链接库集成到 Labview 中。两个软件通过 DataSocket 实现数据交互, WFS 可不断向数据缓冲区中发送波前信息, 控制软件可以实时读取缓冲区中的数据用于控制或者数据保存。

表 5 快速反射镜基本参数

Tab. 5 Basic parameters of the fast mirror

| 参数 | 数值 |
|---------------|----------------|
| 角度变化范围 | 2 mrad |
| 分辨率 | 0.05 μ rad |
| 重复精度(10%偏摆角) | 0.15 μ rad |
| 重复精度(100%偏摆角) | 1.5 μ rad |

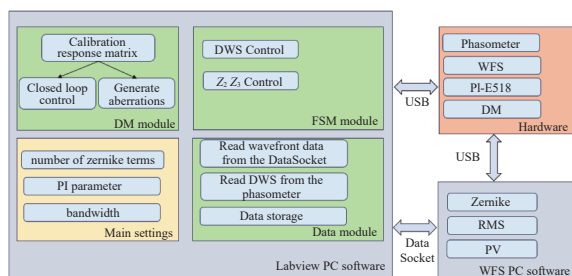


图 8 上位机软件逻辑图

Fig. 8 Upper computer software logic diagram

由于该控制对实时性要求较高, 为了保证 WFS 软件和 Labview 控制软件的实时性, 可以在系统进程管理器中提升这两个进程的优先级, 会有利于系统控制稳定。

4.1.2 参数标定与系统性能验证

在实验开始前需要进行相关参数标定、系统两条控制回路的初始性能测试以及有效性考虑, 一共有下面四部分:

1) FSM-DWS 系数标定

首先需要标定 FSM-DWS 系数, 这个系数用于计算内环 DWS 控制转化系数, 也用于计算外环 DWS 角度。下图是 DWS 系数标定结果, 通过在 PI 公司 PIMikroMove 软件分别在两个方向上施加正弦波来控制 FSM 两个方向的角度变化, 并在此过程中测量 DWS 角度数据来标定转化系数, 标定结果如图 9、图 10 所示。经过一阶线性拟合计算两个方向的快反镜角度-DWS 相位转化系数, yaw 方向是 1923 rad/rad, pitch 方向是 1969 rad/rad, 与理论值 2230 rad/rad 有一定偏差。与理论的偏差由后端成像光路像差、实验系

统参数与标称值偏差和装配误差等引起。上述 2.1 节中提到了理论值为 2500 rad/rad, 这个理论值为平顶光与平顶光模型计算得到, 仅用于说明太空中的理论精度。本实验中使用的是高斯与平顶光干涉模型。

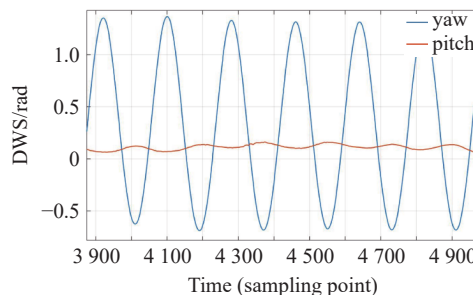


图 9 yaw 方向相角转化系数标定

Fig. 9 Calibration of yaw direction phase Angle conversion coefficient

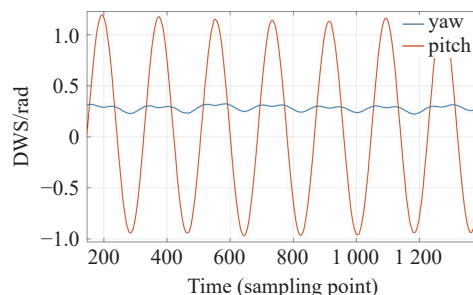


图 10 pitch 方向相角转化系数标定

Fig. 10 Calibration of pitch direction phase Angle conversion coefficient

DWS 控制的转化系数为 200 左右, 这个系数用于 DWS 信号到 FSM 角度的转换, PI 控制器的比例系数是 0.43, 积分时间是 1 s。下图可见 FSM 两个方向会存在一定耦合, 耦合会对增加一定的 DWS 角度跟瞄噪声, 但是影响很小, 两个方向的耦合都在 3% 以内。

2) DM 控制回路性能测试

接着对 DM 控制回路进行性能测试, 图 11 为开环和闭环控制情况下采集的 Zernike 系数 RMS 值, 前半段为开环(DM 施加初始电压, 为平坦面型), 后半段进行闭环控制。不考虑倾斜项 Z₂、Z₃ 影响, 控制前波前系数 RMS 值在 0.94 λ , 闭环控制后波前系数 RMS 值在 0.0023 λ 左右。使用 DWS 像差模型估计 DM 控制残余 Zernike 系数带来的 DWS 角度波动, yaw 的 RMS 为 0.0007 rad, pitch 的 RMS 为 0.0019 rad。pitch 方向受到的干扰会更大一些。

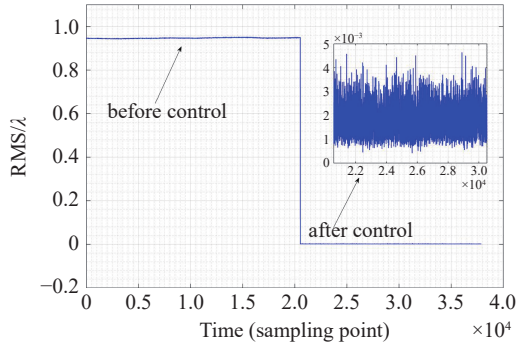
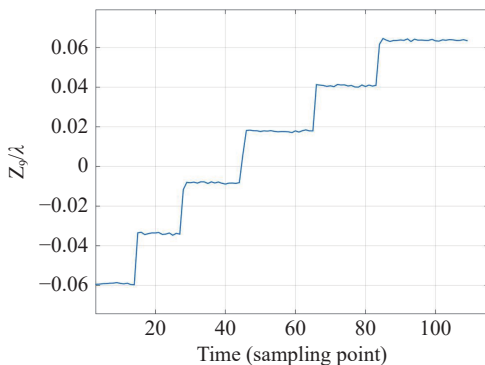


图 11 Zernike 系数控制效果

Fig. 11 Zernike coefficient controls the effect

3) DM 控制回路的有效性

接着需要考虑 DM 控制回路的有效性。由于装调误差以及透镜组的固有偏差,在 WFS 处经闭环控制无像差的波前,在后续的干涉光路依然存在像差,需要关注静态像差的存在是否会导致像差的波动水平在两个回路中不一致。测试方法是通过 WFS 和 DM 调制固定的像差,然后使用第二个 WFS 在共轭位置测量阶跃响应, WFS2 具体位置在图 6 的 LENS5 后。以 Z_9 、 Z_{10} 为例测试结果如图 12、图 13 所示, Z_9 调制 -0.05λ 到 0.05λ 的像差,共轭位置阶跃响应约为 -0.058λ 到 0.063λ 。 Z_{10} 调制 -0.1λ 到 0.1λ 的像差,共轭位置响应为 -0.101λ 到 0.124λ ,两个共轭位置的像差阶跃响应基本一致,说明了自适应光学控制回路可以有效作用于后面的干涉回路。响应略大的原因可能是由于两个 WFS 型号不同,第二个 WFS 使用的是 Thorlabs 公司的 WFS40,两个 WFS 内部参考波前不完全一致、表面光强分布也有差异。

图 12 共轭位置 Z_9 阶跃响应Fig. 12 Conjugate position Z_9 step response

4) DWS 角度指向控制回路的性能测试

最后是 DWS 角度指向控制回路的性能测试,图 14、图 15 是 DWS 角度指向控制的时域与频

域结果,时域图是 DWS 信号波动,频域图中是转换后的角度,绘制了开环和闭环控制下的内外环数据用作对比。角度是 DWS 信号除以上步骤标定的相角转化系数和光学系统缩放倍数,上述实验系数介绍可知经扩束后 FSM 处的光束直径为 7.8 mm ,最后 QPD 处实际光束直径为 1.5 mm ,计算得到缩放倍数为 5.2。

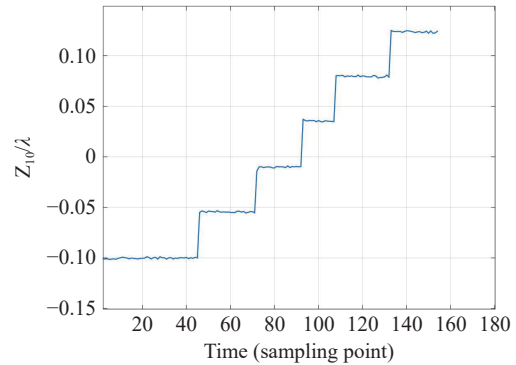
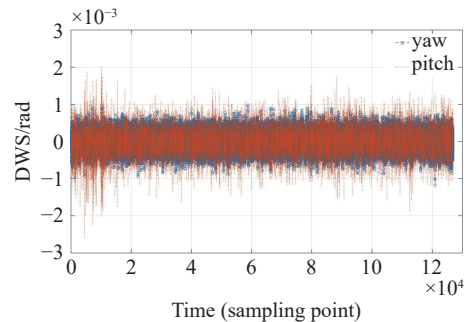
图 13 共轭位置 Z_{10} 阶跃响应Fig. 13 Conjugate position Z_{10} step response

图 14 角度指向控制时域图

Fig. 14 Angle tracking aiming time domain diagram

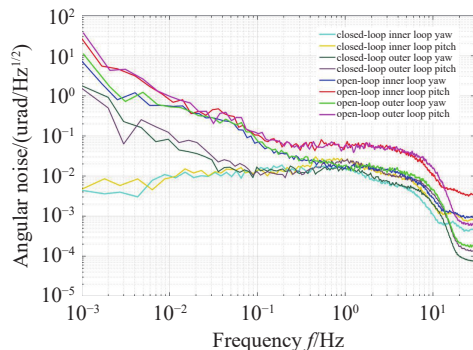


图 15 角度指向控制频域图

Fig. 15 Angle tracking aiming frequency domain plot

实验整体流程如下:

- 1) 根据设计好的系统和光路进行搭建与粗调。
- 2) 开启闭环控制, WFS 采集光束波前信息并

输出 Zernike 多项式系数, 低阶倾斜像差 Z_2 、 Z_3 由 FSM 校正, 高阶像差 Z_4 - Z_{15} 由 DM 校正。

3) 通过示波器、BS 来调整内外环 QPD 处的干涉信号, 尽量使四条波形峰峰值和相位一致, 此时 DWS 角度接近 0。在步骤 2) 之后再调整 DWS 信号的目的是: 光束波前像差接近 0 时, 调整 DWS 干涉信号, 使内外环 DWS 角度接近于 0。后续在控制 DM 时 DWS 角度接近 0, 可以减少固定误差。

4) 在不同干扰条件下, 同时采集内外环的 QPD 数据, 对比有无闭环控制的 DWS 精度, 从而分析和说明自适应系统的作用。

yaw 与 pitch 方向的控制结构对称, 性能表现一致。为使统计与说明更为清晰, 本文后续内容将集中展示 yaw 方向的实验结果。

4.2 实验结果

为了验证引入自适应光学系统对提升大气环境下 DWS 测量能力的有效性, 我们对比了不同像差波动水平下的 DWS 数据。分别采集了不做控制(open loop)、仅使用 FSM-DWS 控制回路进行角度的跟踪瞄准、控制角度同时使用 WFS-DM 回路控制像差下的内外环角度波动水平。

首先采集了不引入额外干扰情况下的实验结果, 结果如图 16、图 17 所示。可看出在没有干扰时, DM 回路对像差进行控制, 受限于器件固有精度等影响, DM 在控制过程中镜面会不断产生微小变化, 该噪声会使 DWS 的精度下降约一个量级, 尤其是在 0.1 Hz-10 Hz 的高频段。据 2.2.3 节的介绍可知, 变形镜镜面的分段数和促动器间距等会对矫正效果有很大影响, 我们使用的变形有 40 个矫正单元, 且瞳孔内只有 24 个矫正单元, 只能对 Z_4 - Z_{15} 项 Zernike 系数进行控制, 所以器件矫正精度有限, 使用拥有更多镜面段数和矫正单元的变形镜会获得更好的控制精度, 在本实验的体现就是控制相同阶数的 Zernike 系数对 DWS 信号的干扰更小。由表 3 可知当前 WFS 最大子孔径数为 1645, 最多可以输出前 66 项 Zernike 多项式的系数, 所以当前系统的控制精度水平主要是受限于变形镜。

DM 和 DWS 回路, 都抑制了静态读数漂移, 所以在中低频段有更高的精度。当前实验条件 DM 控制未产生明显效果的原因一方面是器件精

度有限, 另一方面是高阶像差在该实验条件下影响较小。

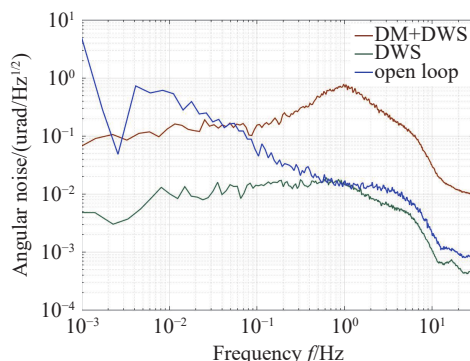


图 16 无干扰内环频谱对比图

Fig. 16 Comparison of spectrum in the inner loop without interference

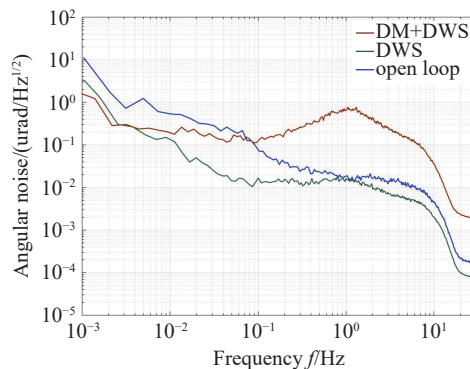


图 17 无干扰外环频谱对比图

Fig. 17 Comparison of spectrum of the outer loop without interference

在 3.3 节中证明了前 15 项中 Z_8 、 Z_{10} 会引起 yaw 方向的测角误差, 在此考虑直接通过变形镜引入 Z_8 、 Z_{10} 的影响, 模拟长距离传输强干扰的情况。单次引入像差是 -0.005λ 到 0.005λ 中的随机数, 频率为 1 s, 并且设置了随机像差叠加的上下限为 $\pm 0.04 \lambda$, 该像差不管是数值还是频率都在 DM 的控制范围内, 可以被 DM 轻松抑制。实验结果如图 18、图 19 所示, 该实验条件下 DWS 控制对噪声在 1 Hz 以下的中低频段控制效果明显, 但是由于像差的存在干涉信号更差, 所以整体效果有限。而 DM 可以快速消除像差, 保持 DWS 环路干涉信号一直处于更好的状态, 可以有效进行内环角度控制。从外环结果可以看出, 有 DM 控制的结果在 0.1 Hz-1 Hz 频段读数在 $1 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 左右, 而仅 DWS 跟瞄的环路相关频段的读数在 10-100 $\mu\text{rad}/\text{Hz}$, DM 回路显著压制了

噪声,在该条件下有接近一个数量级的提升。

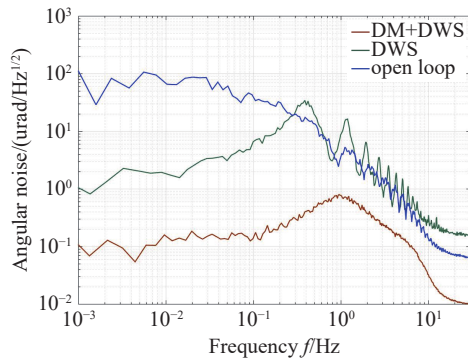


图 18 有干扰内环频谱对比图

Fig. 18 Comparison of spectrum of strong interference inner loop

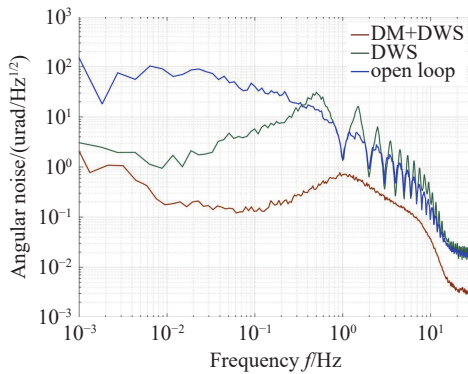


图 19 有干扰外环频谱对比图

Fig. 19 Comparison of spectrum of strong interference outer loop

太极引力波探测计划主要频段集中在 0.1 mHz–1 Hz。在地面验证阶段,抑制 0.1 Hz–1 Hz 频段内剧烈的大气湍流噪声是开展高精度测角的前提。

本文验证了自适应光学与 DWS 技术结合的可行性,而这一成果直接指向太极计划空间引力波探测的地面验证核心需求。该技术方案进一步优化后应用于太极计划激光捕获跟瞄系统的地面长距离测试,可有效还原空间无湍流环境下的测

角精度,验证星间激光链路构建的技术可行性,具有重要的实践意义。

5 总结与展望

本文针对太极计划激光捕获跟瞄系统地面长距离验证中,大气湍流引发波前畸变导致 DWS 测角精度下降的问题,开展了系统性的技术与实验验证。研究的核心创新在于将自适应光学技术与 DWS 技术融合,构建了包含波前传感器-变形镜自适应校正回路、QPD-快速反射镜角度跟瞄回路的一体化实验系统,实现了大气湍流干扰下 DWS 测角噪声的有效抑制,填补了大气环境下 DWS 性能补偿方法的研究空白。

研究中先通过数值仿真结合 Zernike 多项式解析,明确了大气湍流引发的 Z_8 、 Z_{10} 等特定阶次像差对 DWS 测角的影响,确定了自适应光学系统的核心校正对象;随后设计搭建了硬件与软件协同的实验平台,通过引入不同强度的扰动模拟大气湍流影响,完成了多条件下的对比实验验证。实验结果表明 0.1 Hz~1 Hz 的频段内,自适应光学系统具有显著的噪声抑制效果。

后续研究可从三方面进一步优化与深化:其一是硬件方面,采用更高分辨率、更多促动器的变形镜与高采样率波前传感器,提升高阶像差的校正精度,降低器件固有精度对系统性能的限制;其二,优化控制算法,可引入基于湍流强度实时感知的自适应 PI 参数调节算法,或引入模型预测控制、深度学习等先进控制方法,提升系统对动态大气湍流的自适应校正能力与响应速度;其三,开展长距离户外大气传输实验,模拟太极计划星间激光链路的实际传输场景,验证本技术在真实复杂大气环境下的工程适用性。

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]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 061102.
- [2] DANZMANN K, The LISA Study Team. LISA: laser interferometer space antenna for gravitational wave measurements[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 1996, 13(11A): A247-A250.
- [3] LUO J, CHEN L, DUAN H, *et al.*. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Classical Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035010.
- [4] 徐欣,谈宜东,穆衡霖,等. 空间引力波探测中的激光干涉多自由度测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(3): 0312006.

- XU X, TAN Y D, MU H L, *et al.*. Laser interferometric multi-degree-of-freedom measurement technology in space gravitational-wave detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 0312006. (in Chinese).
- [5] LUO Z R, WANG Y, WU Y L, *et al.*. The Taiji program: a concise overview[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, 2021(5): 05A108.
- [6] 王娟, 齐克奇, 王少鑫, 等. 面向空间引力波探测的激光干涉技术研究进展及展望[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2024, 54(7): 109-127.
- WANG J, QI K Q, WANG SH X, *et al.*. Advance and prospect in the study of laser interferometry technology for space gravitational wave detection[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2024, 54(7): 109-127. (in Chinese).
- [7] 闫昊昱. 空间引力波探测望远镜杂散光抑制技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2025.
- YAN H Y. *Research on technology for suppressing stray light in space gravitational wave detection telescopes*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optical & Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences, 2025. (in Chinese).
- [8] CHEN Q SH, ZHU F, DONG J X, *et al.*. Comprehensive optimization approach for telescope optical parameters targeting minimal tilt-to-length coupling coefficient with required wavefront aberration in intersatellite laser interferometer for gravitational wave detection[J]. *Results in Engineering*, 2026, 29: 109637.
- [9] 赵云, 王汉, 董滨滨, 等. 星地激光通信研究现状与前沿技术[J]. *空间科学学报*, 2025, 45(2): 612-628.
- ZHAO Y, WANG H, DONG B B, *et al.*. Research progress and fronts in satellite-to-ground laser communication[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 612-628. (in Chinese).
- [10] 刘立人. 卫星激光通信 I: 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, 34(1): 3-20.
- LIU L R. Laser communications in space I: optical link and terminal technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(1): 3-20. (in Chinese).
- [11] HEINZEL G, SHEARD B, BRAUSE N, *et al.*. Laser ranging interferometer for GRACE follow-on[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10564: 1056420.
- [12] HECHENBLAIKNER G, DELCHAMBRE S, ZIEGLER T. Optical link acquisition for the LISA mission with in-field pointing architecture[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 161: 109213.
- [13] CHARPIGNY N. *An executable system model for behavioural analyses of the LISA mission*[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2019. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [14] HYDE T T, MAGHAMI P G, MERKOWITZ S M. Pointing acquisition and performance for the laser interferometry space antenna mission[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2004, 21(5): S635-S640.
- [15] GOMEZ A R, AHDAB M A. Momentum-based learning of Nash equilibria for LISA pointing acquisition[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2023, 56(2): 6012-6017.
- [16] HYDE T T, MAGHAMI P G. Precision pointing for the Laser Interferometer Space Antenna (LISA) mission[C]. *AAS Guidance and Control Conference*, 2003. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [17] CIRILLO F, GATH P F. Control system design for the constellation acquisition phase of the LISA mission[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, 154: 012014.
- [18] KOCH A. *Link acquisition and optimization for intersatellite laser interferometry*[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2020.
- [19] ABICH K, ABRAMOVICI A, AMPARAN B, *et al.*. In-orbit performance of the GRACE follow-on laser ranging interferometer[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 031101.
- [20] GAO R H, LIU H SH, ZHAO Y, *et al.*. Laser acquisition experimental demonstration for space gravitational wave detection missions[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 6368-6383.
- [21] GAO R H, WANG Y K, CUI Z, *et al.*. On-ground demonstration of laser-link construction for space-based detection of gravitational waves[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 160: 107287.
- [22] HU Q L, ZHANG J Y, NIE R L, *et al.*. Ground-based simulation of laser link acquisition for inter-satellite laser interferometry[J]. *Optics Express*, 2024, 32(18): 31006-31022.
- [23] YU X Z, GILLMER S R, ELLIS J D. Beam geometry, alignment, and wavefront aberration effects on interferometric differential wavefront sensing[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(12): 125203-125203.
- [24] 张强涛, 刘河山, 罗子人. 面向空间激光干涉的多通道相位测量系统[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(5): 1089-

- 1099.
- ZHANG Q T, LIU H SH, LUO Z R. Multi-channel phase measurement system for the space laser interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1089-1099. (in Chinese).
- [25] 江强, 董鹏, 刘河山, 等. 太极计划时钟噪声传递的地面原理验证[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(6): 1394-1403.
JIANG Q, DONG P, LIU H SH, *et al.*. Ground-based principle verification of clock noise transfer for the Taiji program[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1394-1403. (in Chinese).
- [26] 胡鸣, 张琪, 王红燕, 等. 基于 P-U-net 的角锥波前探测器的波前校正方法[J]. 液晶与显示, 2024, 39(9): 1174-1181.
HU M, ZHANG Q, WANG H Y, *et al.*. Wavefront correction method based on P-U-net for pyramid wavefront detector[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(9): 1174-1181. (in Chinese).
- [27] 欧阳朴秀, 陈凯余, 郭友明, 等. 基于哈特曼波前传感器的白天天光背景时空特性分析[J]. 光学精密工程, 2025, 33(21): 3431-3440.
OUYANG P X, CHEN K Y, GUO Y M, *et al.*. Daytime sky background spatio-temporal analysis using Hartmann wavefront sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(21): 3431-3440. (in Chinese).
- [28] 王文宇. 自适应光学的波前校正器与闭环控制系统建模仿真研究[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), 2025.
WANG W Y. *Research on modeling and simulation of wavefront corrector and closed-loop control system in adaptive optics*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2025. (in Chinese).

作者简介:



宋 威(2002—), 男, 河南信阳人。2019-2023, 郑州大学, 计算机科学与技术, 本科。2023-至今, 中国科学院大学, 计算机技术, 硕士。研究方向为引力波探测。E-mail: songwii@qq.com



刘靖翰(2000—), 男, 湖北十堰人。2018-2022, 武汉大学, 自动化, 本科。2022-2025, 中国科学院大学, 电子信息, 硕士。2025-至今, 科研助理。主要从事激光干涉测量、激光捕获跟瞄等方面的研究。E-mail: liujinghan22@mailsucas.ac.cn



高瑞弘(1994—), 男, 辽宁大连人。2011.09-2015.07, 北京理工大学, 光电信息工程, 本科。2015.09-2020.12, 中国科学院大学/中国科学院力学研究所, 一般力学与力学基础, 硕博, 工学博士。2021.01-2023.01, 国科大杭州高等研究院, 基础物理与数学科学学院, 博士后。2023.02-至今, 中国科学院力学研究所, NML 引力波实验中心, 助研。主要从事空间引力波探测超高精度测量技术方面的研究。E-mail: gaoruihong@imech.ac.cn