

密级:_____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

面向空间激光干涉引力波探测的精密指向和弱光锁相
控制技术的研究

作者姓名:_____董玉辉_____

指导教师:_____靳刚 研究员_____

_____中国科学院力学研究所_____

学位类别:_____工学博士_____

学科专业:_____一般力学与力学基础_____

培养单位:_____中国科学院力学研究所_____

2015 年 10 月

Inter-satellite Interferometry: Fine Pointing and Weak-light
Phase-locking Techniques for Space Gravitational Wave
Observatory

By

Yu-hui Dong

A Dissertation Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Engineering

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences
October, 2015

摘要

LISA (Laser Interferometer Space Antenna)是最具代表性的空间激光干涉引力波探测计划,它有望直接验证广义相对论,并为宇宙探索提供一种电磁波所不及的、新的窗口。精密指向和弱光锁相是 LISA 必备的两项关键技术,并需在 1 mHz 到 1 Hz 频段内分别达到 $10\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 指向稳定性和 $10\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的锁相精度,以实现引力波探测。

为实现 LISA 精密指向和弱光锁相技术的原理与方法学验证,本论文将主要解决以下科学与技术问题。如何筛选核心器件与方法学,并实现地基模拟系统的设计与构建?如何评估地基系统核心功能模块,并分析限制系统表现的主要噪声?如何压制主要噪声,并实现系统优化?如何借助所构系统实现原理方法学验证和性能指标演示?

精密指向系统的地面实现和扩展应用。当携带指向抖动和波前畸变的传播激光被远端航天器接收并与本地激光干涉时,激光指向噪声将耦合并主导测距噪声。精密指向控制技术能提高激光指向稳定性,压制指向噪声,是 LISA 的必备技术。为此,基于差分波前测角技术,本论文设计构建地基精密指向控制系统。通过对测角模块、控制模块、驱动模块和干涉模块的综合噪声分析发现,读出噪声是限制指向系统表现的主要噪声。因此,本论文在 10 kHz 到 1 MHz 的激光差频范围内,测量和优化系统读出噪声。在优选的 40 kHz 差频下构建精密指向系统,以期在 1 mHz-1 Hz 频段内实现 $10\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的指向稳定性。另外,本论文将基于差分波前测角技术的精密指向系统应用于星间激光通信。设计集成精密指向技术的星间激光通信系统,并构建地基模拟系统。该系统在 0.5 s 内将大于 100 μrad 的指向偏置迅速压制到优于 100 nrad,具有良好的动态响应;将 20 μrad 的指向抖动噪声控制在 50 nrad 左右,具有良好的指向稳定性。

锁相控制系统的地面实现和深入模拟。500 万公里的星间距和 40 厘米的望远镜直径,使直接反射式干涉仪终端接收光强仅为 10^{-20} 瓦,无法实现光学探测。弱光锁相技术将高功率的本地激光相位锁定到经远程传播的入射激光,实现终端光强百皮瓦量级的放大,是 LISA 引力波探测的必备技术。为此,基于普克尔电

光相位调制技术, 本论文设计构建地基弱光锁相模拟系统, 并在 1 mHz 到 1 Hz 频段内实现 $100\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的锁相精度。通过对 10 kHz-1 MHz 差分频率下系统读出噪声的测量和分析, 优选得到 20 kHz 的地基锁相模拟系统, 并实现 $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级锁相精度的提升。由于地基锁相系统受温度漂移噪声和读出噪声限制, 尚未达到 LISA 锁相要求。考虑 LISA 利用弱光锁相技术将本地激光相位锁定到携带微弱信号与各类光学位置噪声和加速度噪声的传播激光的物理图像, 利用 Matlab/Simulink 软件平台, 构建 LISA 弱光锁相软件模拟系统, 并利用地基锁相系统实验数据验证该模型的有效性。进一步, 分析具体 LISA 噪声, 如散粒噪声、频率噪声、指向噪声、时钟噪声等光学位置噪声和加速度噪声的频谱分布, 借助反幅度谱密度分析方法, 生成具备随机特性的上述时域噪声数据, 并将其引入软件模拟系统。模拟结果表明 LISA 空间运行时, 激光频率噪声是限制弱光锁相水平的主要噪声; 通过 TDI 处理后, 本地激光能很好的跟踪锁定传播激光, 其锁相噪声主要受限于读出噪声, 且优于 $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的 LISA 要求, 验证弱光锁相的可行性。

关键词: 空间引力波探测、激光干涉仪、精密指向技术、弱光锁相技术、差分波前测角技术、电光相位技术。

Inter-satellite Interferometry: Fine Pointing and Weak-light Phase-locking Techniques for Space Gravitational Wave Observatory

Yu-hui Dong (General Mechanics and Mechanics Fundamental)

Directed by Prof. Gang Jin

Abstract

LISA (Laser Interferometer Space Antenna), the most representative space gravitational wave detective mission, may be the first direct verification of general relativity and open a gravitational window on the Universe which can't be observed by electromagnetic radiation. Beam pointing and weak-light phase-locking which are the most stringent techniques for LISA have to achieve $10\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ and $10\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ in the frequencies from 1 mHz to 1 Hz, respectively, to observe the gravitational waves.

To realize methodological demonstration of the laser beam pointing and weak-light phase-locking for LISA, the following scientific and technological questions are mainly focused on. After investigating the core device and methodology, how to design and construct the ground-based system? How to evaluate the core function modules of the system and analyze the limited noise sources? How to suppress the noises and improve the performance of the system? How to demonstrate the methodology and achieve LISA's requirement?

After interfering with the local laser, the transmitting light carrying angle jitters and wavefront distortion will cause and dominate laser ranging noise. The fine pointing control system is used to improve the pointing stability and suppress the pointing noise, which is essential for space gravitational wave detection mission. For this purpose, a ground-based pointing control system is designed and built based on the DWS (Differential Wavefront Sensing) technique. After analyzing the noise source of the angle measuring system, the controller, the driver and the interferometer,

the readout noise is the main noise which limits the pointing system. Further, the readout noise is measured in the heterodyne frequencies between 10 kHz and 1 MHz. Then the 40 kHz heterodyne frequency pointing system is selected and constructed to achieve $10\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ pointing stability in the frequency band from 1 mHz to 1 Hz. Moreover, the DWS pointing technique is applied to the inter-satellite laser communication. Integrated with the beam pointing technique, the inter-satellite laser communication system is designed and the ground-based simulation system is built. With the pointing control system turned on, the offset pointing error of more than 100 μrad has been rapidly suppressed to lower than 100 nrad in less than 0.5 s; the pointing stability can be kept at 50 nrad when the simulated received beam jitter is set at 20 rad, which indicates a good dynamic response and pointing stability for the requirement of inter-satellite laser communication.

The final received power of the direct-reflecting laser ranging interferometer is about 10^{-20} W due to 5 million km' armlength and 40 cm' telescope, which makes the optical detection impossible. The weak-light phase-locking technique is essential for LISA, which phase-locked the local light to the transmitting laser and enlarge the final receive power to 10^{-10} W. For this purpose, a ground-based weak-light phase-locking system based on Pockels effect is designed and built to achieve $100\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ in the frequency band between 1 mHz and 1Hz. After measuring and analyzing the readout noise in the heterodyne frequencies from 10 kHz to 1 MHz, the optimized system whose beat note is 20 kHz is built and the order of magnitude for phase-locking is $10\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$. Moreover, considering the physical picture of the weak-light phase-locking, a comprehensive simulation based on Matlab/Simulink is carried out because the ground system, which is mainly limited by thermal drift noise and readout noise, can't meet LISA's requirement. The time domain LISA noise with random characteristics is produced using inverse amplitude spectral density analysis based on the original frequency domain LISA noise distribution, such as shot noise, pointing

noise, frequency noise, and so on. The result showed that the phase-locking performance was mainly limited by the laser frequency noise when LISA is running in the space. After TDI analysis, the phase of the slave laser tracked well with the received transmitting light and the locking precision was limited by the phase readout noise which is better than $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$. The noise floor recovered from the required LISA noise floor, which proved the validity of the simulation program.

Key Words: space gravitational wave detection, laser interferometer, fine pointing control technique, weak-light phase-locking technique, DWS technique, electro-optics phase-modulated technique.

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	VII
第一章 绪论.....	1
1.1 引力波探测的背景和意义.....	1
1.2 精密指向控制技术.....	11
1.2.1 精密指向控制技术的意义.....	11
1.2.2 精密测角方法学探讨.....	16
1.2.3 研究现状与问题分析.....	18
1.3 弱光锁相控制技术.....	20
1.3.1 弱光锁相控制技术的意义.....	20
1.3.2 精密调相方法学探讨.....	22
1.3.3 研究现状与问题分析.....	23
1.4 本文的科学和技术问题及主要研究内容.....	24
第二章 精密指向系统的地面实现与扩展应用.....	27
2.1 引言.....	27
2.2 精密指向系统设计与构建.....	27
2.2.1 系统设计.....	29
2.2.2 系统构建.....	30
2.3 精密指向系统评价与分析.....	33
2.3.1 DWS 测角模块评价与分析.....	33
2.3.2 反馈控制模块评价与分析.....	36
2.3.3 系统读出模块评价与分析.....	39
2.4 精密指向系统实验与讨论.....	42
2.5 精密指向系统噪声分析.....	44
2.5.1 DWS 测角噪声分析.....	44
2.5.2 控制器噪声分析.....	51
2.5.3 驱动器噪声分析.....	53

2.5.4 干涉仪噪声分析	59
2.6 精密指向系统优化与提升	63
2.6.1 主要噪声分析与抑制	63
2.6.2 优化系统评价与分析	67
2.7 精密指向系统的扩展应用	71
2.7.1 星间激光通信精密指向系统设计	74
2.7.2 地基指向系统评价与分析	75
2.7.3 地基指向实验结果与讨论	77
2.8 本章小结	80
第三章 弱光锁相系统的地面实现和深化模拟	81
3.1 引言	81
3.2 实验设计与系统构建	81
3.2.1 系统设计	82
3.2.2 系统构建	83
3.3 地基锁相系统评价与分析	84
3.3.1 电光调相模块评价与分析	85
3.3.2 反馈控制模块评价与分析	86
3.3.3 系统读出模块评价与分析	88
3.4 锁相控制系统实验与分析	90
3.5 地基锁相系统主要噪声源分析	92
3.5.1 温度漂移噪声	92
3.5.2 系统读出噪声	94
3.6 系统优化提升与结果讨论	97
3.7 LISA 弱光锁相的深化模拟	99
3.7.1 模型构建与验证	100
3.7.2 LISA 噪声源分析	102
3.7.3 时域数据生成与分析	105
3.7.4 结果与讨论	110

3.8 本章小结.....	115
第四章 总结与展望.....	117
4.1 总结.....	117
4.2 展望.....	118
参考文献.....	121
附录 A: 缩写词注释.....	141
附录 B: 主要器件清单.....	143
在学期间发表的学术论文与研究成果.....	145
致 谢.....	149

第一章 绪论

1.1 引力波探测的背景和意义

1915 年, 爱因斯坦发表的广义相对论预言了引力波的存在^[1-6]。引力波是由加速运动的质量所引起时空扰动的传播。任何质量分布在时间相关的四极矩或更高极矩下的运动会激发引力波。当引力波经过时, 时空度量会被改变, 因此两惯性自由测试质量间的距离将会随时间变化。但正如广义相对论所说, 时空可以看成弹性系数很大的弹性介质, 只有引力波强度足够大, 所引起的时空变化才能被探测。时空的这种刚性特质导致引力波与物质的相互作用非常微弱, 它在宇宙中传播过程中几乎没有衰减^[7]。因此, 我们可以利用这一特性, 借助引力波来深入洞察那些电磁波所不及的、多样的天体现象^[8-10], 如银河系内的双星系统(白矮星、中子星或黑洞等致密星体组成的双星, 如图 1.1), 河外星系内大质量黑洞的合并(如图 1.2), 脉冲星的自转, 超新星的引力坍缩, 大爆炸留下的背景辐射(如图 1.3)等^[10, 11]。因此, 引力波探测具有十分重要的科学意义, 它不仅能直接检验爱因斯坦的广义相对论, 更有望提供一种电磁波探测所不及的、新的窗口观测和认识宇宙^[12-14]。

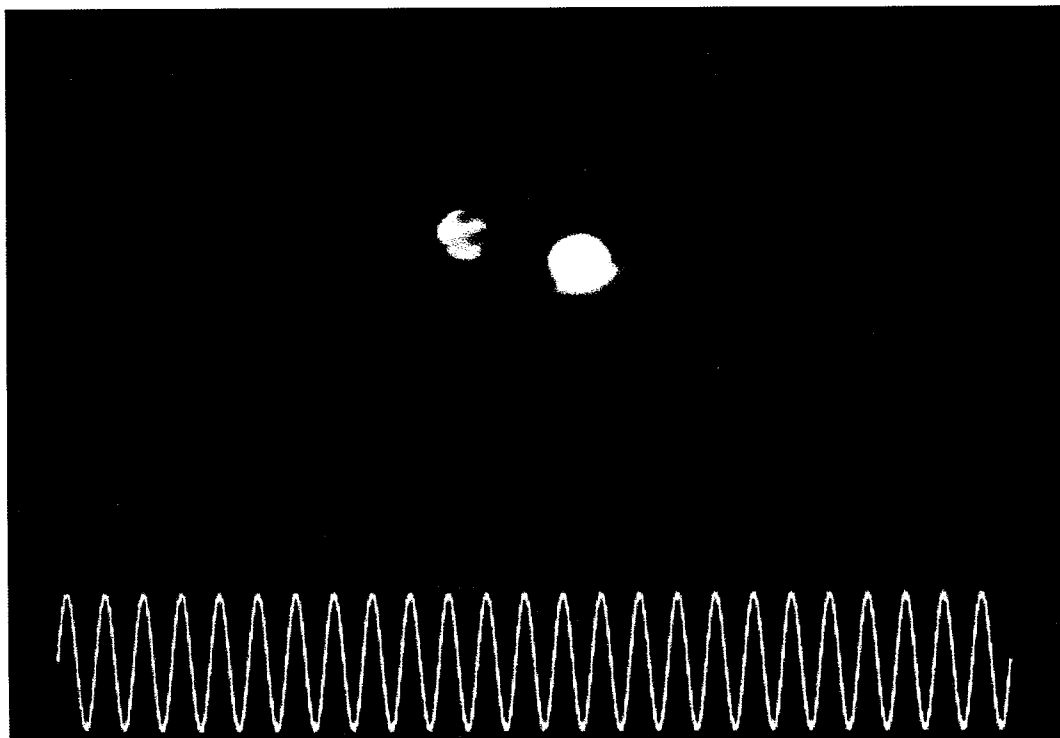


图 1.1 紧凑双星绕转系统和预期的代表性引力波波形^[11]

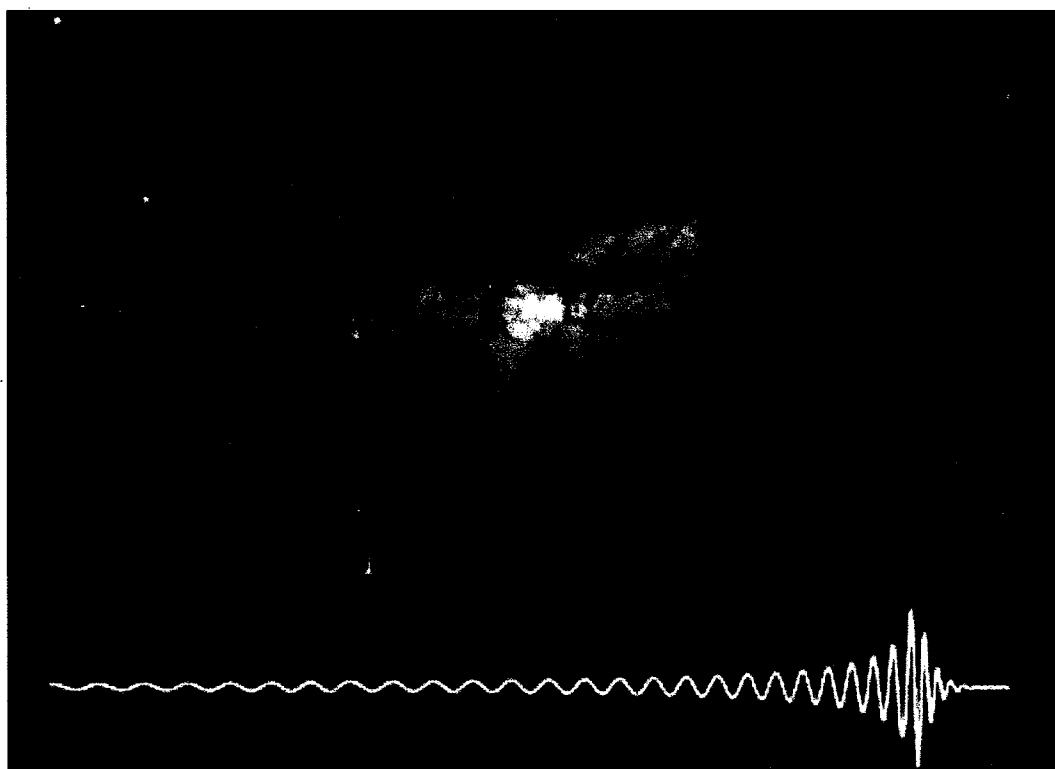


图 1.2 并合星系 NGC6240 和从两个超大质量黑洞的合并所预期产生的代表性引力波^[11]

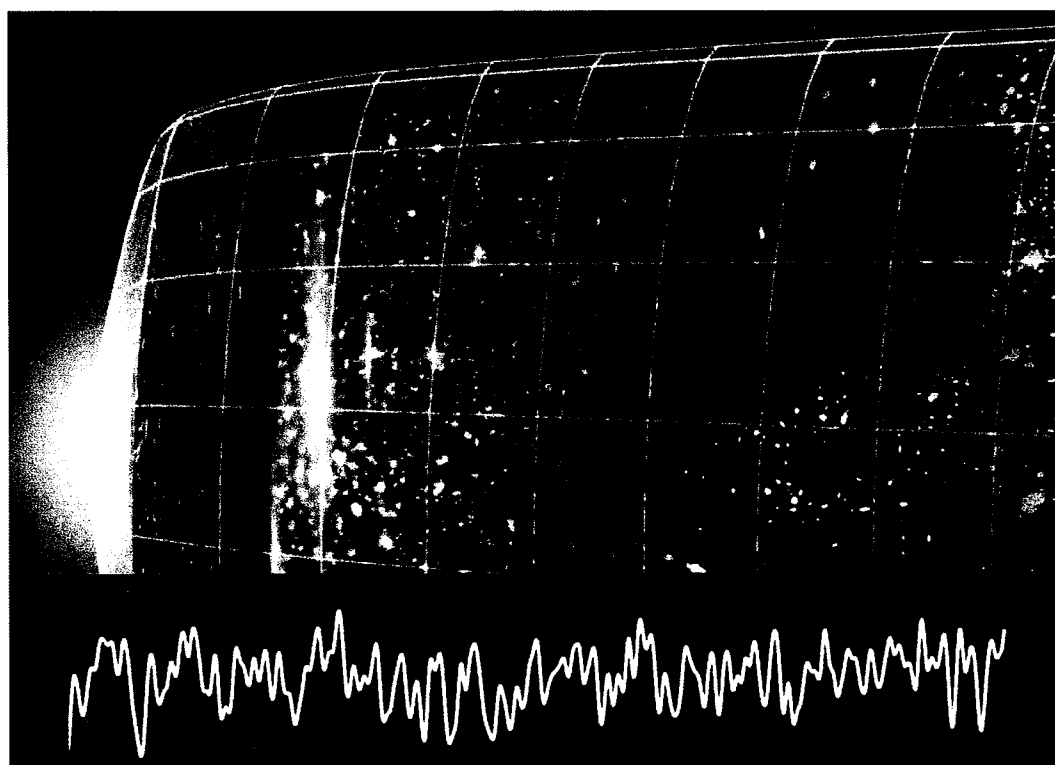


图 1.3 大爆炸和早期宇宙所预期产生的引力波的时间演化^[11]

广义相对论预言引力波后，科学家们锲而不舍的验证它的存在。直到 1974 年，普林斯顿大学的 Hulse 和 Taylor 利用射电望远镜观测到 PSR B1913+16 双星脉冲周期变短（如图 1.4），基本符合广义相对论引力辐射的理论预测^[15-20]。该发现首次间接证明了引力波的存在，并于 1993 年获得诺贝尔物理学奖。随着天文观测的发展，以 PSR J0737-3039 双脉冲星^[21-23]为代表的多个类似天体现象的观测和分析进一步验证引力波的存在^[13, 24]。

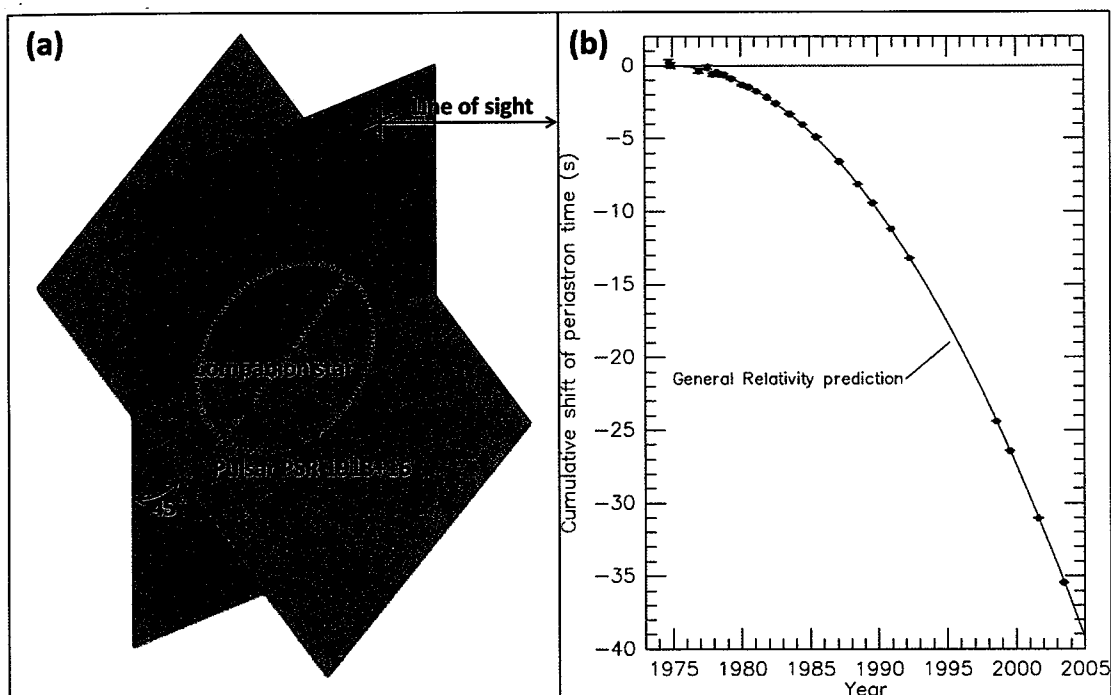


图 1.4 (a) PSR B1913+16 轨道示意图^[16] (b) PSR B1913+16 轨道衰减^[19]

诸多间接证据的发现，鼓舞了科学家们对引力波的直接探测。上世纪 60 年代，Joseph Weber 开启了实验直接探测引力波的先河^[25-27]。他在 Maryland 大学建立的第一个由长 2m、直径 1m、重 1.4 吨铝棒构成的引力波探测器（如图 1.5）。为隔绝环境振动噪声，共振棒采用悬浮挂置。该探测器利用引力波与金属棒间的弹性模共振，探测 2 kHz 附近的引力波信号。在随后的 40 多年里，来自 8 个国家的 19 个改进的共振棒引力波探测器相继建立和应用。但这种探测方法频带窄、灵敏度低，所能探测的引力波事件率极低，目前尚未成功探测到引力波^[28-30]。

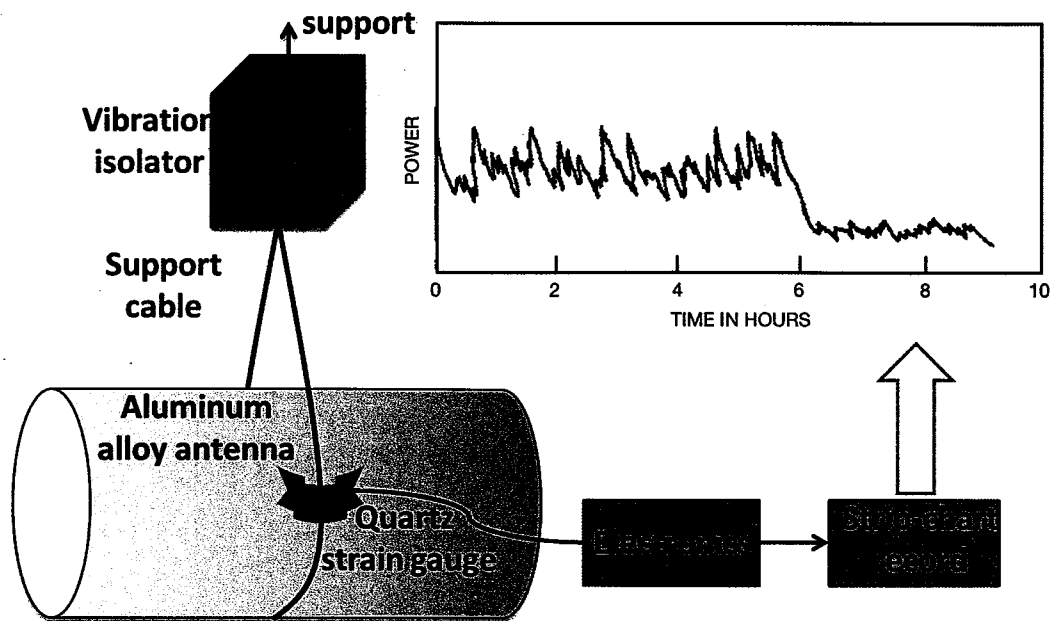


图 1.5 韦伯共振棒引力波探测器原理简图^[27]。其中 Aluminum alloy antenna 为铝合金天线, Electronics 为电子设备, Quartz strain gauge 为石英应变仪, Strip-chart record 带状记录仪, Support cable 支撑绳, Vibration isolator 隔振器。

20 世纪 70 年代, 激光干涉方法学被引入引力波探测^[31]。它通过精密测量两自由悬浮测试质量间距离变化, 以反演引力波信号。由于宽频带、高灵敏度等优点, 激光干涉方法学为引力波的直接探测注入新的活力, 并很快成为主流探测手段。国际上相继建立了多个公里量级零差式激光干涉引力波探测器。如图 1.6, 我们以迈克尔逊式干涉仪为例介绍零差式激光干涉探测引力波的基本原理。

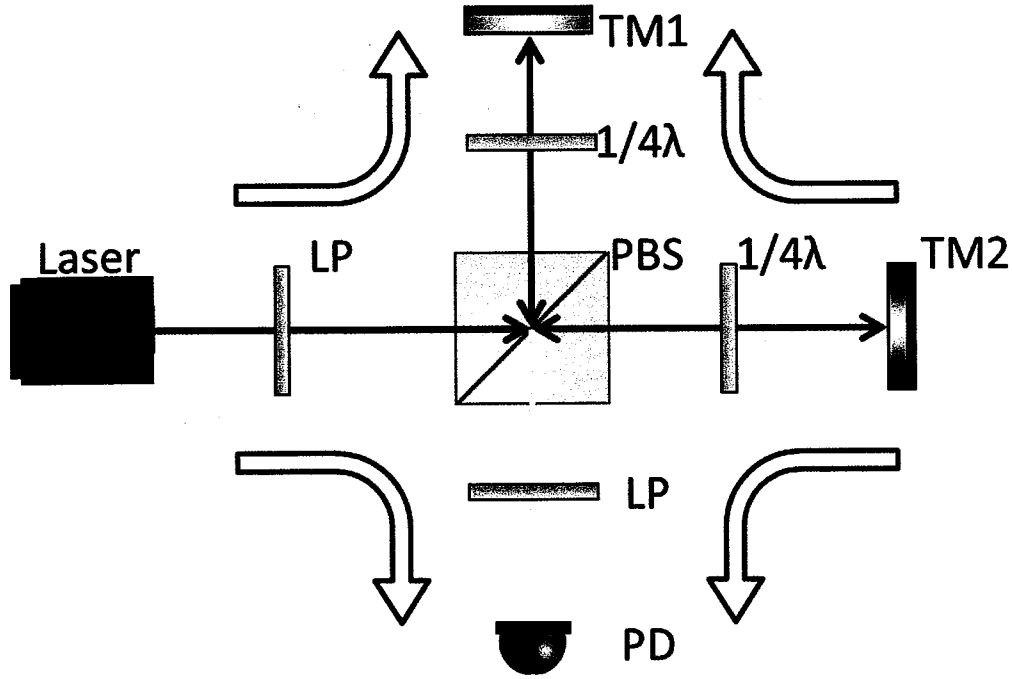


图 1.6 Michelson 零差激光干涉原理图。其中 LP 为线性偏振片，Laser 为激光器，PBS 为偏振分光镜，TM 为测试质量，PD 为光电探测器， $1/4\lambda$ 为 $1/4$ 波片，蓝色箭头表示引力波经过引起的的作用方向。

如图 1.6，激光出射后，经线性偏振片调整偏振方向。到达偏振分光镜时，S 方向偏振的激光 1 反射，P 方向偏振激光 2 透射。其中光束 1 经由测试质量 1 反射并两次通过 $1/4$ 波片后，变为 P 光透过偏振分光镜；而光束 2 经测试质量 2 反射并两次通过 $1/4$ 波片后，变为 S 光并被偏振分光镜反射。两束激光经过线性偏振片的调整后，形成干涉并被探测。这种由两束同频率激光形成的干涉称为零差干涉。通过对干涉信号的相位检测可得到两测试质量间的相对位移。由此，我们可以测量引力波经过时，所引起的测试质量间的相对距离的变化，来反演引力波源。

零差干涉仪具有架构简单、散粒噪声水平低、耦合噪声（外差调制引入的幅度噪声、相位噪声）水平低、易于标定等优点^[32-35]，广泛应用于地面激光干涉引力波探测器，并表现出极佳的测量精度^[36, 37]。目前国际上正在运行的地基零差激光干涉引力波探测器主要代表有德国、英国合作的 GEO600(如图 1.7(a))^[38-40]、美国的 LIGO(如图 1.7(b))^[41-43]、法国、意大利合作的 VIRGO(如图 1.7(c))

[44-46]、澳大利亚的 AIGO^[47, 48]、日本的 TAMA300 (如图 1.7 (d))^[49-52]、LCGT^[53-55] 和 KAGIA^[56-58] 等。

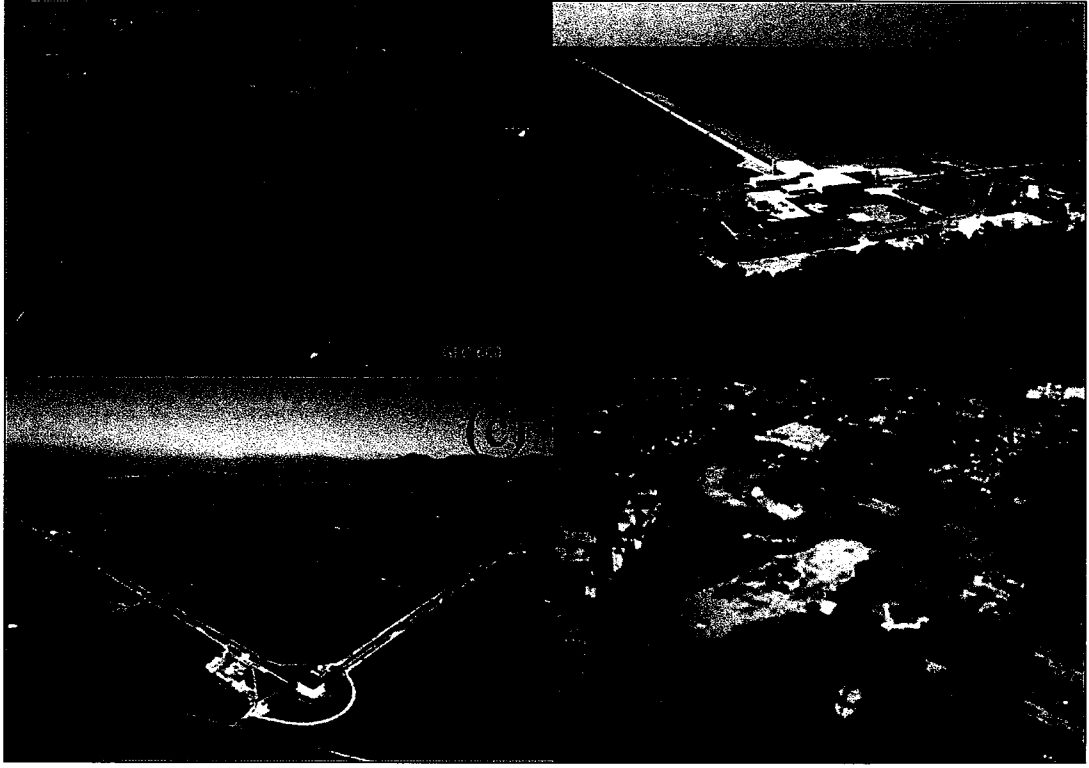


图 1.7 地面激光干涉引力波探测器代表。其中 (a) 德国和英国的 GEO600, (b) 美国的 LIGO, (c) 法国和意大利 VIRGO, (d) 日本的 TAMA300。

受重力梯度噪声、振动背景噪声的影响, 以及干涉臂长的限制^[36, 59, 60], 地面激光干涉引力波探测器仅能探测 10 Hz 以上的引力波源^[61, 62], 如银河系附近的双中子星或太阳质量双黑洞系统的绕转和并合, 以及非对称超新星等。随着天文学的发展, 人们发现在 1 mHz-1 Hz 的低频段存在重要天文学意义的天体波源, 如双致密星系统、超大质量比黑洞绕转系统、中等质量比黑洞绕转、以及星系合并引起的超大质量黑洞并合等。为突破地面限制, 探测中低频段的引力波源, 人们将目光投向太空, 计划发展百万公里量级空间激光干涉引力波探测器^[9-13]。

20 世纪 90 年代, 空间激光干涉引力波探测计划开始兴起。它通过测量双星内自由悬浮测试质量间的相对距离变化, 以反演引力波信号。由于轨道游离现象, 双星存在多普勒效应 (Doppler effect)^[63, 64], 其多普勒频移可表示为:

$$\Delta f = -\frac{v_r}{c} f_0 \quad (1.1)$$

其中, v_r 为星间相对速度, c 是光速, f_0 为激光频率。耦合多普勒频移的测距信息无法提取引力波信号。从数据反演的角度, 要想反演引力波信息, 必须采用激光差分频率大于多普勒频移的外差式激光干涉方法学。本文将结合图1.8简要说明外差式激光干涉空间引力波探测的基本原理^[13]。

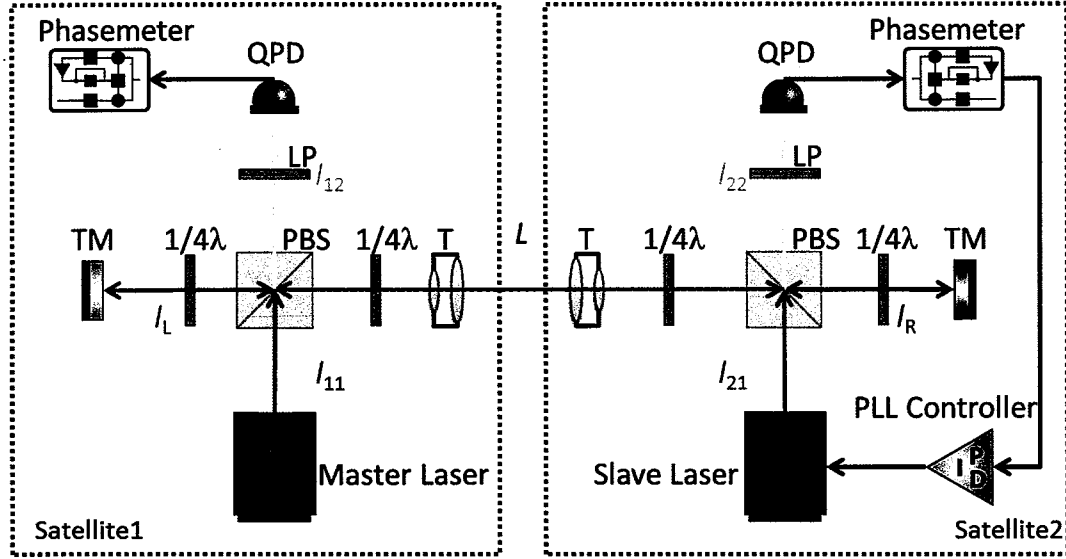


图 1.8 外差式双星激光干涉测距原理图。其中 LP 为线性偏振片, Master Laser 为主激光器, PBS 为偏振分光镜, Phasemeter 为相位计, PLL Controller 为锁相控制器, QPD 为四象计, Slave Laser 为从激光器, T 为望远镜, TM 为测试质量, l_{11} 表示卫星 1 主激光器到偏振分光镜的距离, l_{12} 表示卫星 1 偏振分光镜到探测器的距离, l_L 表示卫星 1 偏振分光镜到测试质量的距离, l_{21} 表示卫星 2 主激光器到偏振分光镜的距离, l_{22} 表示卫星 2 偏振分光镜到探测器的距离, l_R 表示卫星 2 偏振分光镜到测试质量的距离, L 表示双星偏振分光镜间的距离。

如图 1.8 所示, 卫星 1、2 上的主从激光分别表示为 $E_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$ 和 $E_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$ 。主激光出射后, 大部分光强经偏振分光镜和望远镜发送到航天器 2。经接收望远镜, 该激光变为 P 偏振方向并透过偏振分光镜。被测试质量反射, 并经过两次 1/4 波片后, 与本地激光干涉, 其干涉信号表示为 $\cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi)$ 。

其中, $\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{2\pi}{\lambda}(l_{11} + L + 2l_R - l_{21})$ 表示入射激光和本地激光的相位差。

利用弱光锁相技术, 将入射激光相位复制并锁定到本地激光。此时, 本地激光信号 $E_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \Delta\varphi) = E_2 \cos[\omega_2 t + \varphi_1 + \frac{2\pi}{\lambda}(l_{11} + L + 2l_R - l_{21})]$ 。进而, 利用高功率的本地激光代替微弱的入射激光发往卫星 1。被卫星 1 接收后, 入射激光经测试质量并与主激光干涉, 其干涉信号为 $\cos[\Delta\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}(2L + 2l_R + 2l_L)]$ 。最后, 通过读出系统精密测量两测试质量间相对距离变化, 以推演引力波信号。外差式激光干涉测距克服多普勒频移的影响, 并具备测量频带宽、测距精度高等优点, 成为空间引力波探测等项目的首选^[13, 65]。

欧空局 (ESA) 和美国宇航局 (NASA) 合作开展的 LISA (Laser Interferometer Space Antenna), 是最具代表性的空间激光干涉引力波探测计划^[8-10, 66, 67]。如图 1.9 所示, LISA 由三颗相距 500 万公里的等边三角形卫星编队组成, 其星组平面与黄道面夹角为约 60° 。为降低地球和其它行星的影响, 并方便与地球间的通信, LISA 位于落后地球 20° (约 5000 万公里) 的地球同步轨道绕太阳运转^[64, 68-71]。

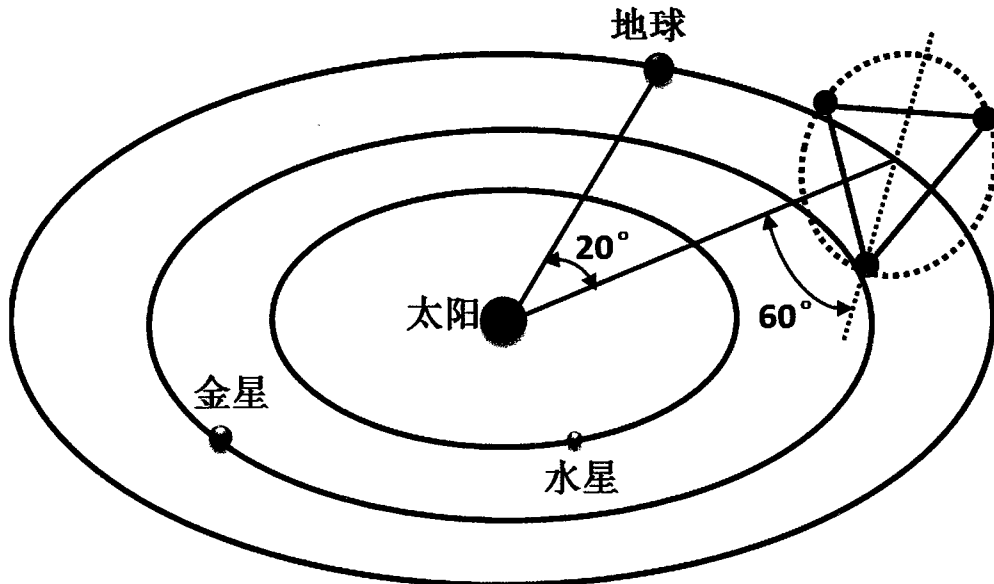


图 1.9 LISA 轨道及航天器编队示意图

如图 1.10 所示, 为实现引力波探测, LISA 有六个相同的激光测距终端形成的三组迈克尔逊干涉仪^[9, 72]。由 LISA 的轨道设计可知, 星间最大相对速度约为 ± 15 m/s, 由此引起的多普勒频移为 ± 15 MHz^[8-10]。为此, LISA 拟采用 18 MHz 的激光差分频率, 以实现有效的数据反演^[64, 73, 74]。

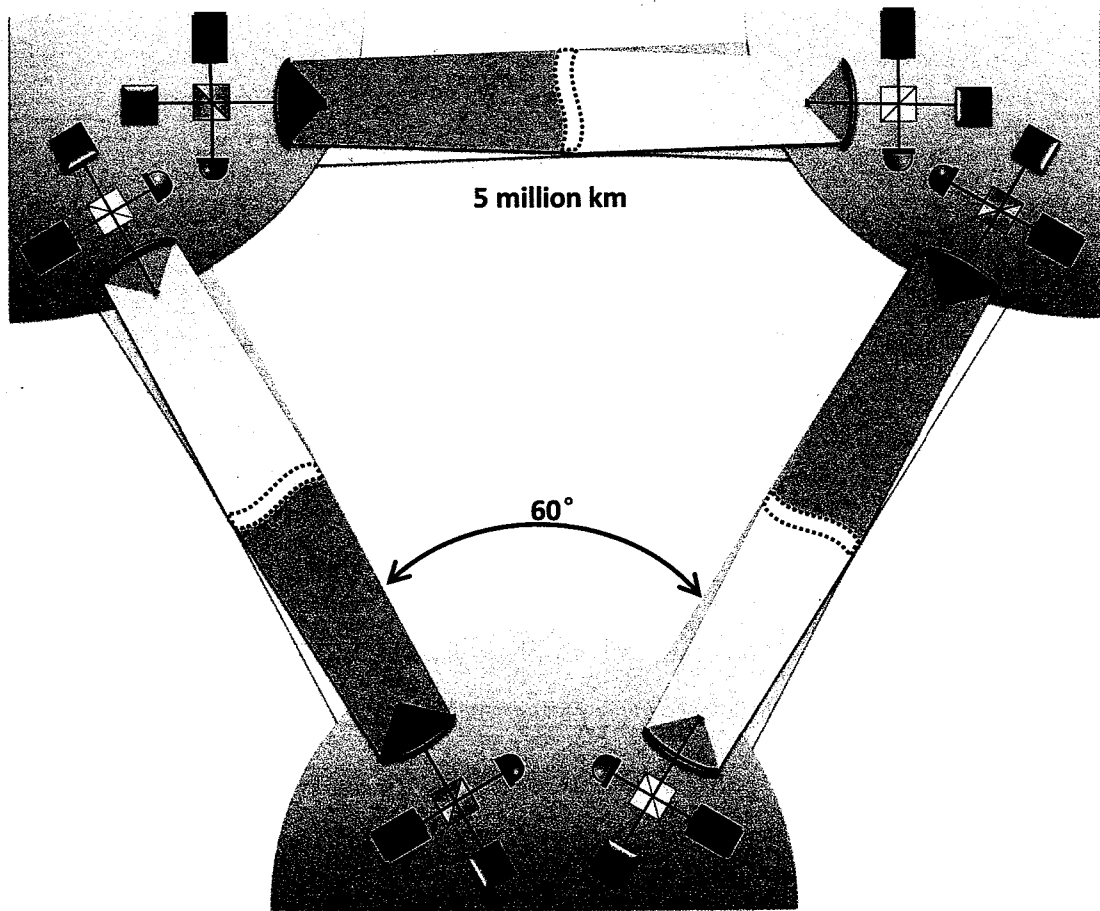
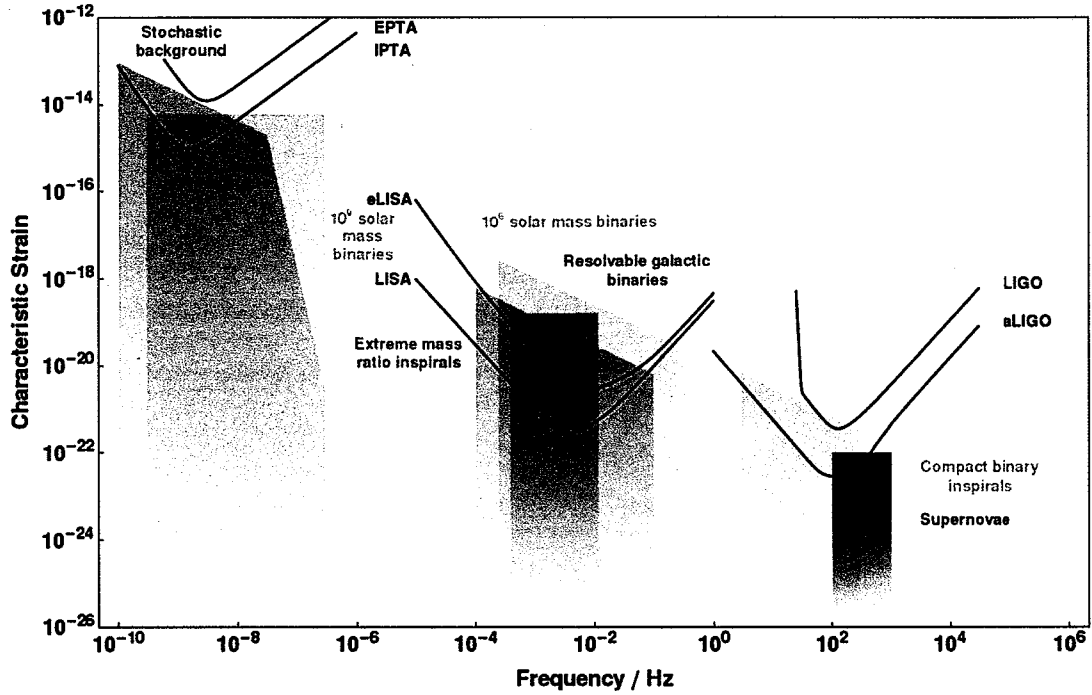


图 1.10 LISA 星组干涉仪示意图

LISA 通过精密测量不同卫星自由测试质量间的距离变化，以反演待测引力波信号。如图 1.11 所示，LISA 引力波探测将主要针对三大引力波源：大质量黑洞双星、超大质量比双星绕转和超致密双星^[7, 9, 10, 75-77]。为观测大质量黑洞的合并、太阳质量双星黑洞绕转、超致密银河双星以及早期宇宙遗留辐射等具有重大天文学意义的天体现象，LISA 需在 1 mHz-1 Hz 频段内实现 $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测距精度^[14, 78, 79]。

图 1.11 引力波探测器与对应波源示意图^[77]

LISA 计划的提出及其关键技术的发展促进了空间引力波探测的兴起，一批基于激光干涉方法学的类 LISA 计划相继出现，包括以相对论时空基本定律检验为主要目标的 ASTROD 计划（Astrodynamical Space Test of Relativity using Optical Devices）^[80-82]，以探测中质量黑洞为目标的 ALIA 计划（Advanced Laser Interferometer Antenna）^[12, 83, 84]，针对宇宙早期现象的 BBO 计划（Big Bang Observer）^[85-87]等。这些空间引力波计划均基于激光干涉的方法学，并具有明确而有意义的科学目标。但相较于 LISA 计划，其技术难度有过之而无不及。因此，本论文将以 LISA 为代表，阐述空间引力波探测对激光干涉仪的极高要求，及由此发展的两项必备关键技术——精密指向和弱光锁相技术。

为实现引力波探测，LISA 需在五百万公里的星间距上实现 $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测距精度测距^[8-10]。这种超远程和超高精度的测距特点，对激光干涉测距系统提出了极高的要求。精密指向技术和弱光锁相技术是 LISA 激光干涉仪中两项必备关键技术。受复杂空间环境和望远镜打磨精度影响，出射激光指向抖动将耦合并主导测距噪声，使引力波探测无法实现。精密指向技术用于提高指向稳定性，压制指向抖动噪声，是空间引力波探测的必备关键技术。超长的星间距和有限的望远

镜尺寸,使直接反射式干涉仪终端接收光信号仅为 10^{-20} W 量级,显然无法实现引力波探测。弱光锁相技术应运而生,使终端接收光强提高至 10^{-10} W 量级,是空间引力波探测的另一必备关键技术。同为空间引力波探测激光干涉仪的必备关键技术,精密指向和弱光锁相的原理方法学验证均需借助地基超稳外差干涉系统实现,且拥有类似的反馈控制策略和相位读出模块。因此,本论文将对精密指向和弱光锁相这两项 LISA 关键技术共同开展研究和探讨。

1.2 精密指向控制技术

1.2.1 精密指向控制技术的意义

发射到预定轨道后, LISA 星组需要一系列指向调控,才能构建激光链路并实现科学数据采集。如表 1-1 所示, LISA 激光指向调控全程可分为三个部分: STR (Star Tracker, 星敏感器) 初指向、CCD (Charge-Coupled Device, 电荷耦合器) 粗指向和 QPD (Quadrant Photodiode, 四象计) 精密指向^[88-91]。当激光链路尚未构建时, STR 初指向作为一级指向调控,能将航天器间的指向偏角控制到 2×10^{-5} rad 量级。然而,航天器出射激光的发散角度仅有约 4×10^{-6} rad,如何接收到传播激光是所面临的首要问题。为此, LISA 以航天器 1 的测试质量作为指向参考,采用螺旋扫描技术,以 3×10^{-6} rad 为步进,缓慢扫描 10×10 的网格。当航天器 2 接收到传输激光时, CCD 粗指向将测量航天器 2 的指向姿态与航天器 1 出射激光间的相对夹角。进而,利用微推技术,控制航天器 2 的姿态,使本地激光沿入射激光方向反向打到航天器 1。同理,航天器 1 根据其指向姿态调控与入射激光夹角,控制本地航天器姿态,使出射激光打到航天器 2。此时, CCD 粗指向将激光角度进一步调控至亚微弧度。至此,星间激光链路成功构建^[91-93, 98],但仍无法实现科学数据的采集。受到复杂空间环境,如太阳风、太阳辐射、宇宙射线等非保守力影响,航天器会发生抖动。无拖曳控制系统用于最大限度的压制这类航天器抖动噪声^[92, 93]。但部分残余抖动仍将耦合到出射激光,并经过五百万公里传播到达远端航天器。若此时传播激光为标准高斯光束,与本地激光干涉时,其指向抖动将不会耦合到测距信号。而实际情况下,如图 1.12 所示,传播望远镜的打磨精度有限,由此出射的激光存在一定的波前畸变。经五百万公里后,

传播激光将偏离标准高斯波前。当携带抖动信号的非标准高斯传播激光与远端航天器的本地激光干涉时,指向抖动将耦合并主导测距噪声,使引力波探测无法实现^[8-10, 94]。

表 1-1 各级指向敏感器的视场、分辨率和读出噪声^[89]

	STR	CCD	QPD
视场	0.3 rad	155 μrad	1 μrad
分辨率	5 μrad	0.4 $\mu\text{rad}/\text{pixel}$	1 nrad/pixel
读出噪声	20 μrad (RMS 3 σ)	60 nrad (RMS 3 σ)	750 prad/ $\sqrt{\text{Hz}}$

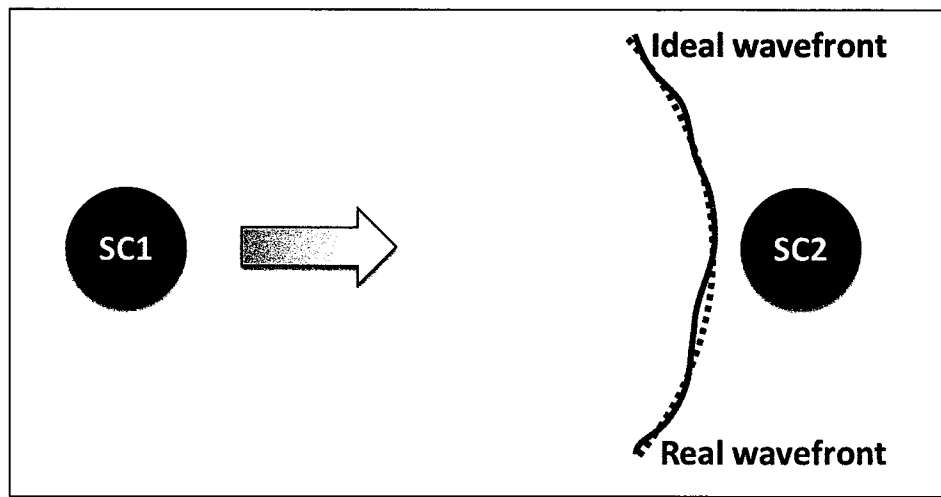


图 1.12 星间干涉仪激光波前示意图。其中 SC1 为航天器 1, SC2 为航天器 2, Ideal wavefront 为理想波前, Real wavefront 为实际波前。

清晰的物理图像是压制指向噪声,实现引力波探测的前提。如图 1.13 所示,我们将以 TEM_{00} 模激光为例,深入研究和讨论指向噪声的产生机理和影响因素^[95]。 TEM_{00} 高斯光束的电场分布为:

$$\phi_{00}(r, z) = \frac{A\omega_0}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right) \exp\left(-ikz - ik\frac{r^2}{2R(z)} + i\zeta(z)\right) \quad (1.2)$$

其中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为场点距离光轴中心的径向距离, z 为光波传播方向, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, λ 为激光波长, $A = \phi_{00}(0, 0)$ 为振幅, $\omega_0 = \omega(0)$ 为光腰半径, $R(z)$ 为光波波前曲率半径, $\zeta(z) = \arctan\left(\frac{z}{f}\right)$ 为 Gouy 相位, $f = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ 为高斯光束的共焦参数。

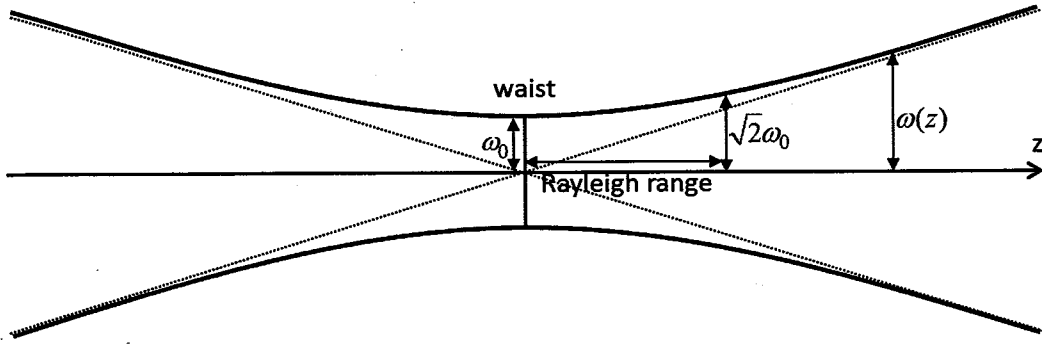


图 1.13 高斯光束传播示意图。其中 waist 为光腰，rayleigh range 为瑞利距离， z 为激光传播方向。

对于 LISA 而言，如图 1.14 所示，激光从激光器出射，经干涉仪到达传播望远镜时传播路径长度为 z_a ，其波前分布变为：

$$\phi_{00}(r) = A \exp\left(\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right) \exp(-ikz_a) \quad (1.3)$$

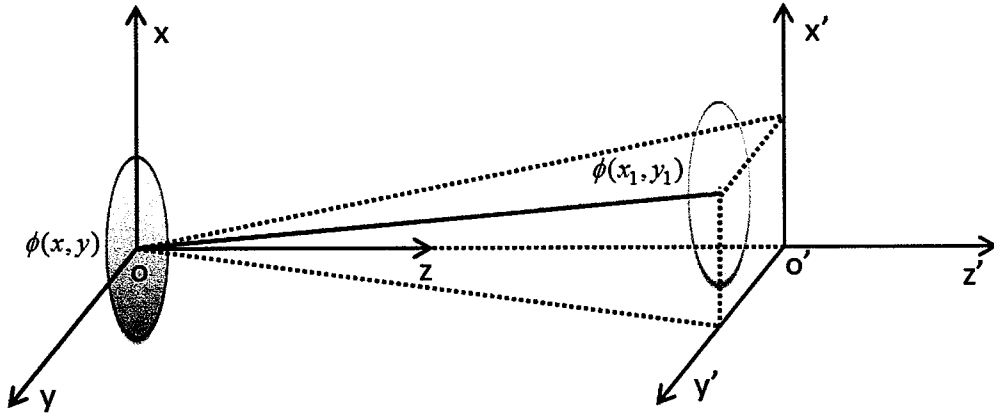


图 1.14 LISA 激光波前传播示意图

激光由传播望远镜发射，经五百万公里传播，到达本地望远镜时，其波前满足菲涅尔-基尔霍夫衍射公式。由此，到达本地望远镜时，激光波前分布为：

$$\phi_{00}(x', y') = \frac{1}{i\lambda} \oint_S \phi_{00}(x, y) \exp(ikr) \frac{K(\theta)}{r} dS \quad (1.4)$$

其中， $\phi_{00}(x, y)$ 表示传播望远镜处波前分布， $K(\theta)$ 为倾斜因子。由于 LISA 星间距约为五百万公里，利用远场夫琅禾费衍射近似，则本地望远镜激光波前分布可

表示为:

$$\phi_{00}(x', y') = \frac{1}{i\lambda l} \oint_s \phi_{00}(x, y) \exp(ikr) dS \quad (1.5)$$

其中, l 表示传播望远镜和本地望远镜中心的距离。结合 LISA 的实际参数, 我们将上式化为:

$$\phi_{00}(x', y') \approx \frac{1}{i\lambda l} \exp(ikl) \oint_s \phi_{00}(x, y) \exp(-ik \frac{x'x + y'y}{l}) dS \quad (1.6)$$

进一步, 将直角坐标转换为极坐标, 则上式可化为:

$$\phi_{00}(x', y') = \frac{1}{i\lambda l} \exp(ikl) \oint_s \phi_{00}(x, y) \exp(-ik \frac{R\bar{m} \cdot \bar{n}}{l}) dS \quad (1.7)$$

其中, 其中 $\bar{m} = (x, y)$, $\bar{n} = (x', y')$, R 为望远镜半径。由于泽尼克多项式与实际光学检测中的像差在形式上一致, 因此, 人们借此来描述激光波前。泽尼克多项式可表示为:

$$Z_n^m(\rho, \beta) = R_n^m(\rho) \cos(m\beta) \quad (1.8)$$

$$Z_n^{-m}(\rho, \beta) = R_n^m(\rho) \sin(m\beta) \quad (1.9)$$

其中, m 、 n 为非负整数, 且 $n \geq m$, φ 为方位角, ρ 为径向距离, 且 $0 \leq \rho \leq 1$ 。径向多项式 $R_n^m(\rho)$ 定义为:

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{n-m/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! (\frac{n+m}{2} - k)! (\frac{n-m}{2} - k)!} \rho^{n-2k} \quad (1.10)$$

其中, $n-m$ 为偶数, 否则 $R_n^m(\rho) = 0$ 。实际情况下泽尼克多项式的前两项对波前畸变的贡献最大。因此, 我们仅考虑前两项的影响, 即:

$$Z_1 = Z_1^1 = \rho \cos(\beta) \quad (1.11)$$

$$Z_2 = Z_1^{-1} = \rho \sin(\beta) \quad (1.12)$$

将其引入式 1.7 可得:

$$\phi_{00} \propto \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \exp(-\rho^2) \exp[-ik(R\rho\theta_x \cos \beta + R\rho\theta_y \sin \beta)] \rho d\rho d\beta \quad (1.13)$$

由于 LISA 静态偏角 θ 在 10 nrad 量级, 所以可将上式进一步简化:

$$\begin{aligned}\varphi_{00} &\propto \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \exp(-\rho^2) \exp[1 - ik(R\rho\theta_x \cos \beta + R\rho\theta_y \sin \beta) \\ &\quad - \frac{1}{2!} k^2 (R\rho\theta_x \cos \beta + R\rho\theta_y \sin \beta)^2 \\ &\quad + \frac{i}{3!} k^3 (R\rho\theta_x \cos \beta + R\rho\theta_y \sin \beta)^3] \rho d\rho d\beta \\ &\propto 1 + \frac{i}{64} k^3 d D^2 (\theta_x^2 + \theta_y^2)\end{aligned}\quad (1.14)$$

所以, 在远场条件下, 激光指向抖动所引起的测相噪声可表达为^[94, 96-98]:

$$\delta\varphi \approx \frac{1}{32} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 d D^2 \theta_{dc} \delta\theta \quad (1.15)$$

其中, λ : 激光波长; d : 波前曲率误差; D : 接收望远镜直径; θ_{dc} : 指向静态偏转误差; $\delta\theta$: 激光指向抖动。

为实现高精度的星间测距, 必须有效的压制激光指向噪声。由公式 1.15 可知, 在波长一定的前提下, 降低激光指向噪声的途径如下:

1) 减小望远镜尺寸:

激光指向噪声与望远镜直径的平方成正比。因此, 减小望远镜尺寸能有效降低激光指向噪声。但是望远镜尺寸与接受光功率直接相关, 在远场条件下, 接收光功率可表示为^[10]:

$$P_{\text{rec}} = 0.50 \frac{D^4}{\lambda^2 L^2} P \quad (1.16)$$

由此产生的散粒噪声^[10]可表示为:

$$\delta\varphi_{\text{sn}} = \sqrt{\frac{hc}{\lambda \eta P_{\text{rec}}}} = \sqrt{\frac{2hc\lambda L^2}{\eta P D^4}} = \frac{L}{D^2} \sqrt{\frac{2hc\lambda}{\eta P}} \quad (1.17)$$

其中 P : 激光初始出射功率; D : 望远镜直径; λ : 激光波长; L : 星间距离, h 为普朗克常数, c 为光速, η 为探测器光电转换效率。由公式 1.17 知散粒噪声与望远镜直径的平方成反比。由此可知, 望远镜尺寸的减小虽然有助于减低激光指向噪声, 但同时引起散粒噪声的增大。尤其在面对百万公里量级星间激光干涉测距时, 激光在传播过程中发散严重, 望远镜尺寸的减小会进一步加剧弱光的探测难度, 增大散粒噪声。因此, 需权衡指向噪声和散粒噪声的影响, 合理选取望远镜直径。

2) 减小波前曲率误差:

由公式 1.15 不难看出, 激光指向噪声与望远镜曲率偏差成正比。提高望远镜加工精度将有助于减小曲率误差, 降低指向噪声。但目前国际上最高打磨精度可以达到 $\lambda/20$, 进一步提高的空间有限。

3) 减小指向抖动:

激光指向抖动时产生指向噪声的根源。通过激光指向控制技术能压制指向抖动, 提高指向稳定性, 是降低激光指向噪声的有效方法。

基于上述分析, 我们可知在成功构建激光链路后, 必须经过第三级指向调控——精密指向控制, 提高指向稳定性, 压制指向噪声, 才能实现引力波探测。

1.2.2 精密测角方法学探讨

干涉激光相对角度的高精度测量, 是精密指向控制的前提。面对空间引力波探测时, 纳弧度量级的角度敏感测量方法将是压制激光指向噪声的基础。为此, 我们将对比并筛选具备空间应用前景的两类精密测角技术: 强度敏感测角技术和相位敏感测角技术。

1) 强度敏感测角技术

常用的强度敏感测角器件为象限探测器, 如 CCD、QPD 等。如图 1.15 所示, 强度敏感测角技术通过测量不同象限的光强分布, 利用测角算法估算光斑中心位置, 进而得到激光的方位角, 是目前国内外普遍采用的激光角度测量方法^[99, 100]。结合相应的物理模型, 该方法能够快速有效的测量激光的角度变化, 从而实现激光角度控制。强度敏感测角技术能迅速稳定的实现高精度激光角度控制, 在激光通信、目标跟踪等领域应用广泛。但面向空间引力波探测, 强度敏感测角技术存在以下限制:

a) 激光强度分布

以 LISA 为例, 经过 500 万公里的长距离传输后, 光斑直径将扩大至公里量级, 激光强度由高斯分布变为高斯平顶分布。被有限的望远镜接收后, 其强度分布近乎均匀, 受探测器的分辨能力和器件噪声的影响只能实现微弧度量级的角度分辨, 不能满足空间引力波探测对激光相对角度的测量要求^[90]。另外, 在长距离传播中, 激光强度分布受到复杂空间环境的影响发生扰动, 对角度测量精度产生影响。

b) 散粒噪声

超长的星间距离和有限的望远镜尺寸,使得 LISA 的接收光功率只有百皮瓦量级。若不能将测距和测角有效的集合起来,将分散有效激光功率,增大散粒噪声的影响。而 CCD 只能实现角度测量,无法兼顾星间测距,必须分离有限的光功率分别实现测距和测角的功能。

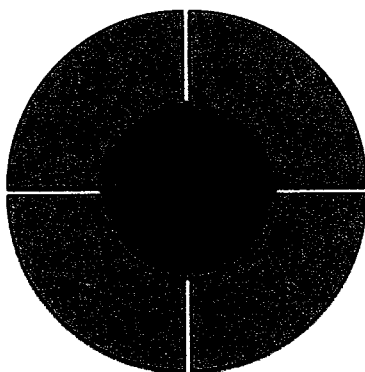


图 1.15 光强敏感测角原理图

2) 相位敏感测角技术

DWS (Differential Wave-front Sensing)技术,即差分波前敏感测角技术,是一种相位敏感测角方法学^[101-106]。它是 1994 年由 Morrison 提出,通过四象限探测器测量两束激光波前的相位关系,以计算其相对夹角信息。

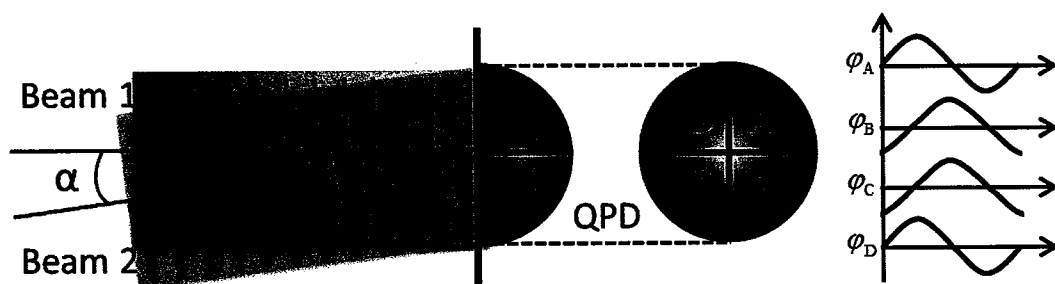


图 1.16 DWS 测角原理图。其中 Beam 1 为本地激光, Beam 2 为传播激光, QPD 为四象计, α 为相对夹角。

如图 1.16 所示, DWS 技术是作为一项高灵敏度测量两光束相对波前失准的技术。传播激光与本地激光干涉后,其拍频光信号被四象计转化为电信号。四通道相位计同时独立测量四象计各象限干涉信号的平均相位 φ_A 、 φ_B 、 φ_C 、 φ_D 。

其中左右象限的相位差为:

$$\theta_L - \theta_R = \frac{\varphi_C + \varphi_D}{2} - \frac{\varphi_A + \varphi_B}{2} \quad (1.18)$$

上下象限的相位差为:

$$\theta_U - \theta_D = \frac{\varphi_A + \varphi_D}{2} - \frac{\varphi_B + \varphi_C}{2} \quad (1.19)$$

假设激光为高斯平顶光束, 其干涉信号完全覆盖探测器敏感面, 并在小角度偏差下, 上下(或左右)探测面的平均相位与相应的角度偏差的关系可近似为^[107]:

$$\Delta\theta \approx \frac{16r}{3\lambda} \cdot \alpha = k \cdot \alpha \quad (1.20)$$

其中, α 为激光相对夹角, r 为探测器光敏面半径, λ 为激光波长。若 $r=1 \text{ mm}$, $\lambda=1064 \text{ nm}$, 则转化因子 k 为:

$$k \approx \frac{16r}{3\lambda} = \frac{16 \cdot 1 \text{ mm}}{3 \cdot 1064 \text{ nm}} \approx 5012 \text{ rad/rad} \quad (1.21)$$

对比光强敏感型测角方法学, 我们可以发现 DWS 技术的几个优点:

a) 高灵敏度

高的相位-角度转化因子使高灵敏度角度测量成为可能。若相角转化因子为 5000 rad/rad , 器件噪声水平达到 $\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级, 即可获得 $\text{nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平的测角灵敏度。

b) 低噪声

DWS 技术采用对立象限相位作差的测角算法, 测距信息中呈现的频率噪声、光路扰动等噪声源被共模抑制。如此, DWS 技术能更真实的测量激光相对夹角信号, 为精密指向控制提供前提。

c) 测距测角的一致性

DWS 技术在实现角度测量的同时, 可通过平均相位 $\bar{\varphi} = \frac{\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C + \varphi_D}{4}$ 实现测距功能。它有效避免分别测距和测角导致的光强分散和散粒噪声增加, 使系统整体设计更加合理。

1.2.3 研究现状与问题分析

从上世纪八十年代, 国际上先后建立了多个地基长基线激光干涉引力波探测器, 如美国的 LIGO、意大利和法国的 VIRGO、德英的 GEO600、日本的 TAMA

等^[108-110]。为实现地面引力波探测，必须有效压制地面振动引起的激光指向抖动噪声^[111-120]。以 GEO600 为例，他们采用励磁线圈（coil-magnet）为制动器，在 0.1 Hz-100 Hz 的高频段实现了优于 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的指向控制精度（如图 1.17）^[104]，为地基引力波探测提供保障。空间引力波探测对电磁噪声有严格的要求，并需要更加紧致的光学系统。而励磁线圈制动器体积大、电磁噪声显著，并不适用于空间引力波探测。另外，为实现空间引力波探测，需在 1 mHz-1 Hz 的低频段实现纳弧度量级的精密指向控制，这也是地面引力波所未涉及的技术难题。目前德国 AEI 研究组正在针对空间引力波探测开展理论预研和仿真模拟工作^[90, 121-123]，相关实验工作亟需进行。

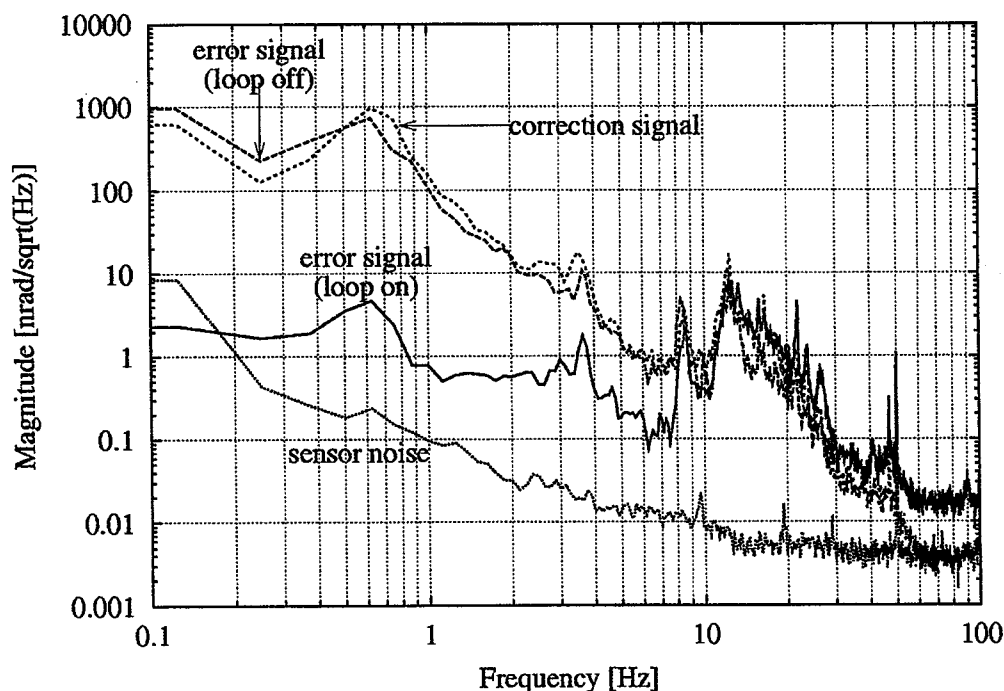


图 1.17 GEO600 指向控制效果图^[104]

我国在先进重力卫星以及空间引力波探测等研究领域起步较晚，关键技术研究滞后于国外，其中指向控制技术的工作尚未很好开展。虽然在激光通信、目标跟踪及相关军事领域上有一定经验积累，但角度测量多采用强度敏感方法学，其精度一般在 $10 \mu\text{rad}$ 左右，远不能达到空间引力波探测的要求^[100, 124-126]。因此，精密指向技术的研究势在必行。

1.3 弱光锁相控制技术

1.3.1 弱光锁相控制技术的意义

星间激光干涉测距系统有两种设计：直接反射式干涉仪（如图 1.18 所示）和弱光锁相式干涉仪（如图 1.19 所示）。直接反射式干涉仪将远端卫星作为直接反射镜，是最简单的双星测距模式。本地卫星发出的激光经过单臂长传播到达远端卫星并直接反射，然后再经单臂长传播返回本地卫星并完成干涉测距。这种测距方法简单，造价低。由于远端望远镜的接收光功率与传播距离的平方成反比，因此上述设计但所面临的关键问题是，激光强度经过双程工作距的传播而严重削弱，引起探测散粒噪声的显著增加，甚至无法探测。

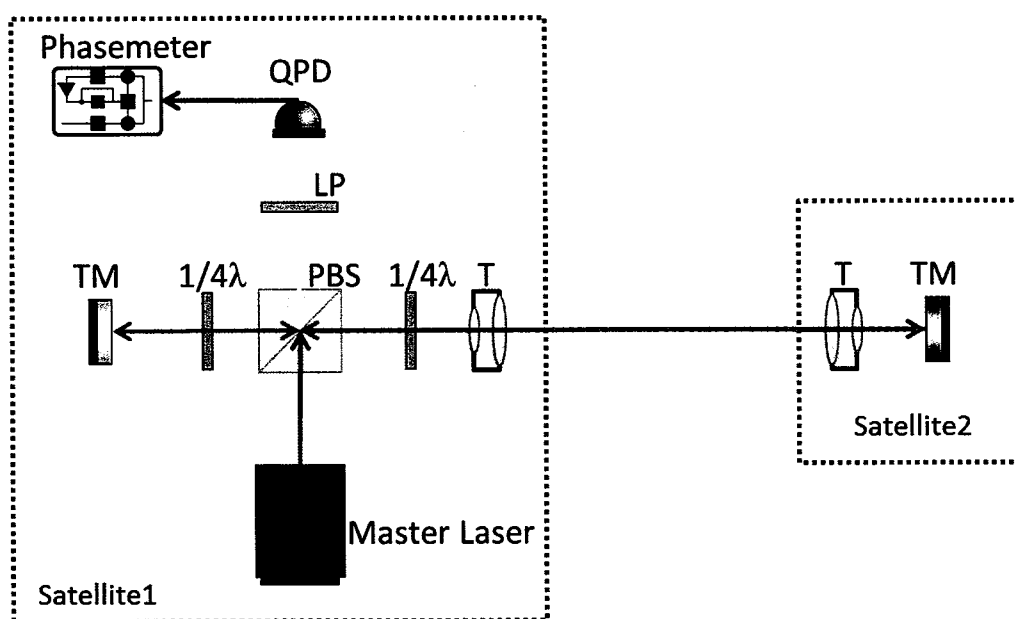


图 1.18 直接反射式激光干涉测距系统原理简图。其中 LP 为线性偏振片，Master Laser 为主激光器，PBS 为偏振分光镜，Phasemeter 为相位计，QPD 为四象限光电探测器，T 为望远镜，TM 为测试质量， $1/4\lambda$ 为 $1/4$ 波片。

基于直接反射式激光测距系统的局限，弱光锁相技术应运而生。如图 1.19 所示，它将携带目标信号的微弱入射激光与本地激光进行相位锁定，进而利用高功率的本地激光代替入射激光返回原航天器，以完成测距。对双程传播后的接收光功率而言，直接反射式干涉仪与星间距的四次方成反比，而弱光锁相式干涉仪

仅与星间距的平方成反比。随着星间距的增加，弱光锁相式干涉仪的优势愈加明显。

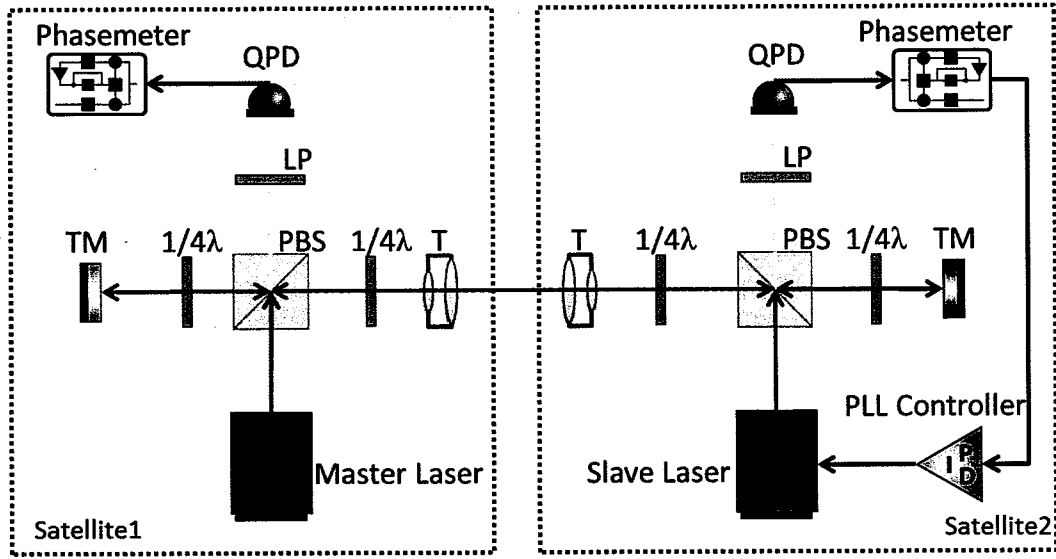


图 1.19 弱光锁相式激光干涉测距系统原理图。其中 LP 为线性偏振片，Master Laser 为主激光器，PBS 为偏振分光镜，Phasemeter 为相位计，PLL Controller 为锁相控制器，QPD 为四象限光电探测器，Slave Laser 为从动激光器，T 为望远镜，TM 为测试质量，1/4λ 为 1/4 波片。

超长干涉臂是空间引力波探测的特点和需求。这极大加剧了直接反射式星间激光干涉系统终端探测光强的衰减。尤其在面对百万公里量级长基线激光干涉测距系统时，这一问题愈加显著。激光经长距离传播后，被望远镜接收的光强如式 1.16 所示。以 LISA 为例，波长为 1064 nm、功率为 1 W 的激光从远端航天器出射后，经过 500 万公里的传播到达本地航天器，被 40 cm 望远镜所接收到的光信号衰减到原功率的 10^{-10} ，仅有 100 pW 量级^[10, 127]。若仅把本地航天器当作被动反射镜，经百万公里工作臂的往返传播，接收到的光信号衰减到原功率的 10^{-20} ，这显然无法实现引力波探测。因此，接收光功率的大小，直接影响散粒噪声水平，关乎空间引力波探测的成败。由公式 1.16 可以看出，在波长和距离一定的条件下，可改变出射光功率和望远镜尺寸两个因素，来提高接收光功率，降低散粒噪声：

1) 出射光功率

由公式 1.16 可知，接收激光功率与出射光功率成正比，提高出射光功率有

助于提高接收光功率，压制散粒噪声。但出射光功率的大小受限于航天器整体电源功率。为减低太阳风、太阳辐射和宇宙射线等因素对航天器的影响，LISA 太阳能电池板的尺寸有限，且不能外展。因此，必须合理分配并有效利用有限的能源，而不能一味增加出射激光功率。另外，提高激光功率会增大残余能量，对 LISA 的严格温控提出更大的挑战。因此，出射激光功率只能在统筹整体需求下，进行有限的提升，不能解决传统直接反射式激光干涉法的困难。

2) 望远镜尺寸

由式 1.16 可知，接收激光功率与望远镜直径的四次方成正比。增加望远镜尺寸能极大的提高接收光功率，但由公式 1.15 知，望远镜尺寸的增加会加剧激光指向噪声。因此，需权衡激光指向噪声和散粒噪声的影响，合理选取望远镜尺寸。

上述两种方法并不能解决直接反射式激光干涉方法在长基线星间测距中的技术难题。弱光锁相技术^[47, 128, 129]应运而生，远端航天器不再是直接反射镜，而是具备信号放大功能的主动转换器。弱光锁相技术将微弱的传播激光与本地激光相位锁定，利用高功率的本地激光代替微弱的传播激光返回原航天器，将 LISA 双程 10^{-20} 的功率衰减变为单程 10^{-10} ，使百万公里量级长基线星间激光干涉测距成为可能。

1.3.2 精密调相方法学探讨

传统激光相位的调制是通过温度调控、注入电流调控、压电偏摆镜调控等手段改变频率来实现的^[127, 130]。而空间引力波探测弱光锁相技术的本质是锁定本地激光和入射激光的相位，进而利用本地激光代替入射激光返回远端航天器。本文将采用电光相位调制器（EO-PM）作为锁相反馈回路的制动器，调控本地激光相位，实现对入射激光相位的锁定。EO-PM 调制技术利用线性电光效应（普克尔效应）对经过电光晶体的激光进行纯相位调制^[131-137]，其原理如图 1.20 所示。

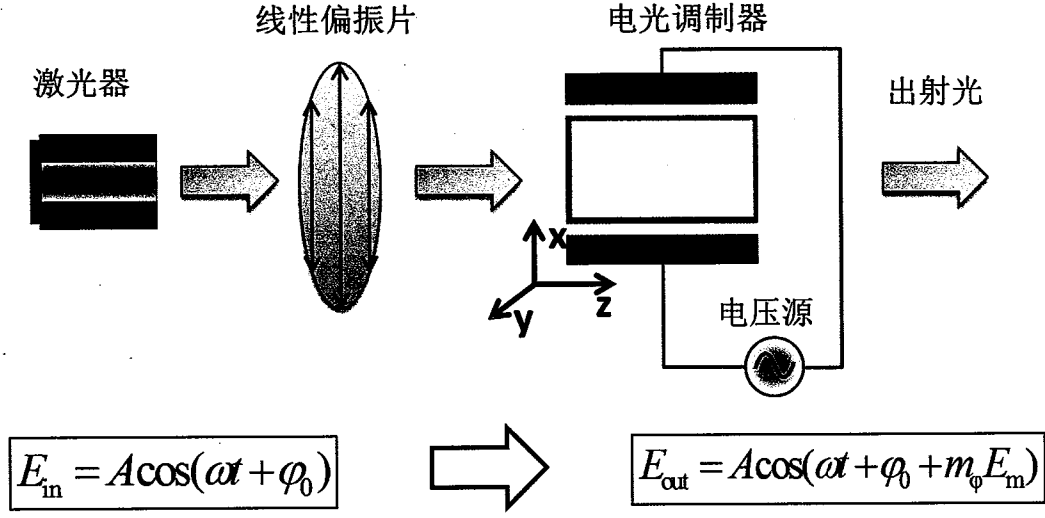


图 1.20 电光相位调制原理图

如图 1.20 所示，无电压调制时，出射激光为：

$$E_{\text{in}} = A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (1.22)$$

经过 x 方向线性偏振片，使出射激光偏振方向沿 x 轴。进入电光调制器后，激光将被相位调制。假设调制电压 E_m ，由普克尔电光调制效应知，调制相位为^[131, 132]：

$$\Delta\varphi = \frac{\pi n_0^3 \gamma L}{\lambda} E_m \quad (1.23)$$

其中， n_0 为折射率、 γ 为线性电光系数、 L 为电光作用长度、 λ 为激光波长。将 m_φ 定义为调制深度，即：

$$m_\varphi = \frac{\pi n_0^3 \gamma L}{\lambda} E_m \quad (1.24)$$

则出射激光为：

$$E_{\text{out}} = A \cos(\omega t + \varphi_0 + m_\varphi E_m) \quad (1.25)$$

1.3.3 研究现状与问题分析

空间长基线激光干涉系统越发广泛的应用，激发了人们对弱光锁相技术的需求和探索。从上世纪九十年代起，国际科研小组逐步开展弱光锁相技术的研究^[127, 128, 138-142]。其中，Kazovsky 研究小组对 300 pW 的弱光实现 22.7 mrad 的锁相精度；McNamara 研究小组对 17 nW 的弱光实现了外差式锁相；ASTROD 科研小

组分别对 2 nW、200 pW、20 pW 和 2 pW 的弱光进行了锁相研究，其最佳表现为对 2 nW 的弱光实现 57 mrad 的长时间锁相，但随光功率的降低，其锁相精度和控制时间均变差。德国 AEI 科研小组在 LISA 项目推动下，目前成功完成了 10 pW 量级的弱光锁相实验。当激光强度为 31 pW 时，在频率段 1 mHz-1 Hz，In-loop 锁相精度达到 $0.1 \text{ mrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ；但 out-of-loop 锁相结果随频率减低而迅速抬升至 $10 \text{ mrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级^[129]（如图 1.21）。尚无法满足空间引力波探测的弱光锁相精度要求。因此，弱光锁相技术的研究成为长基线空间激光干涉系统的必备关键技术，亟需解决。

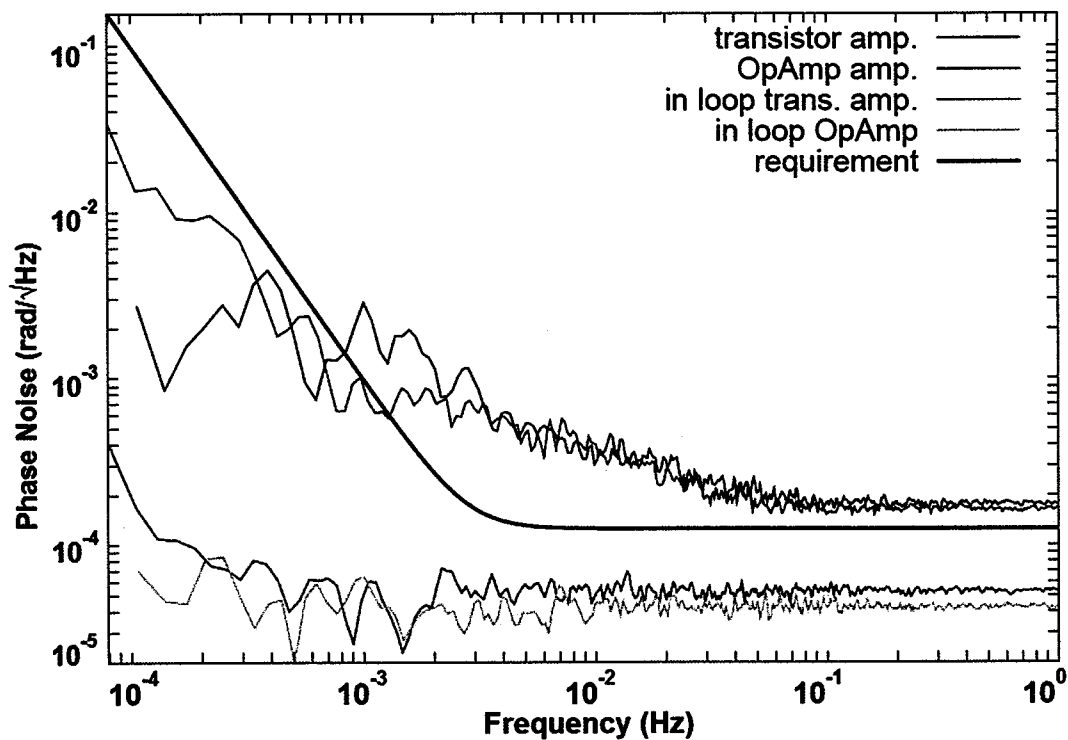


图 1.21 AEI 弱光锁相相位噪声幅度谱密度分析图^[129]

1.4 本文的科学和技术问题及主要研究内容

空间引力波探测具有重要的科学意义和应用价值，成为国际研究的热点。精密指向技术和弱光锁相技术是空间引力波探测的两项必备关键技术，亟需解决。为深入探究上述两项技术，本文将针对以下科学和技术问题开展研究。如何面向 LISA 需求，筛选核心器件和方法学，并进行实际应用分析？如何设计和构建地基模拟系统，并进行系统整体评估、分析和优化？如何系统分析噪声源，找出主

要噪声并提出相应抑噪声方案？如何利用所构系统实现原理和方法学验证，并在 LISA 敏感频段实现指向稳定性和锁相精度的演示？

针对上述问题，本文将从以下几方面开展研究：

1) 精密指向系统的地面实现和扩展应用。根据 LISA 对精密指向技术的需求，筛选器件与方法学。在此基础上，设计并构建地基模拟系统，以实现 LISA 精密指向技术的原理和方法学验证。进一步，综合评估系统性能，深入分析限制和主导所构系统的噪声源，并提出相应的抑噪方案。最终，优化地基指向系统，以期实现 LISA 测量频段 $10\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 指向稳定性，为 LISA 指向技术的研究奠定基础。同时，将所构精密指向系统扩展应用于星间激光通信，以实现其原理和方法学验证，并对关键系统性能指标进行测试和评估。

2) 弱光锁相系统的地面实现和深化模拟。根据 LISA 对弱光锁相技术的需求，筛选器件与方法学。在此基础上，设计并构建地基模拟系统，以实现 LISA 弱光锁相技术的原理和方法学验证。进一步，综合评估系统性能，深入分析限制和主导所构系统的噪声源，并提出相应的抑噪方案。最终，优化地基锁相系统，以期实现系统性能提升和 $10\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级锁相精度的演示，为 LISA 弱光锁相技术的研究奠定基础。由于国际弱光锁相研究未全面考虑 LISA 实际噪声对锁相控制的影响。为此，基于 LISA 弱光锁相物理图像，借助 Matlab/Simulink 平台，本章设计并构建了 LISA 弱光锁相软件模拟系统。为实现弱光锁相时域模拟，本文系统分析 LISA 频域噪声，并生成具备随机特性的相应时域噪声数据。利用所构软件模拟系统，以期分析不同阶段 LISA 噪声对弱光锁相的影响，并验证 LISA 弱光锁相技术的可行性。

第二章 精密指向系统的地面实现与扩展应用

2.1 引言

由于传播望远镜存在曲率偏差,当携带指向抖动的传播激光和本地激光干涉时,激光指向噪声将耦合并主导测距噪声。精密指向控制能提高指向稳定性,压制指向噪声,是 LISA 引力波探测的必要条件。为此,本章将设计并构建 DWS 精密指向地基模拟系统,以实现 LISA 精密指向控制技术的原理和方法学验证,并探究 LISA 敏感频段(1 mHz-1 Hz)的系统指向控制水平。进一步,深入分析影响和主导地基指向系统的主要噪声,提出抑噪方案并优化精密指向控制系统,以期实现 $10\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 指向稳定性,为 LISA 精密指向技术的提供技术支持。另外,将基于 DWS 技术的精密指向系统扩展应用于星间激光通信。实现集成精密指向技术的星间激光通信系统的设计,并构建地基模拟系统对动态响应和指向稳定性进行评估和分析。

2.2 精密指向系统设计与构建

LISA 需在 1 mHz 到 1 Hz 频段内,达到 $10\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 测距精度,以实现空间引力波探测。精密指向控制作为 LISA 干涉仪的必备关键技术,用于提高指向稳定性,压制指向噪声,使引力波探测成为可能。为实现精密指向技术的地基原理和方法学验证,首先需弄清嵌套精密指向技术的双星激光干涉测距系统的基本物理图像。为此,我们设计如图 2.1 所示的双星外差干涉测距系统,以简要阐述星间激光干涉测距原理及精密指向控制技术的应用。

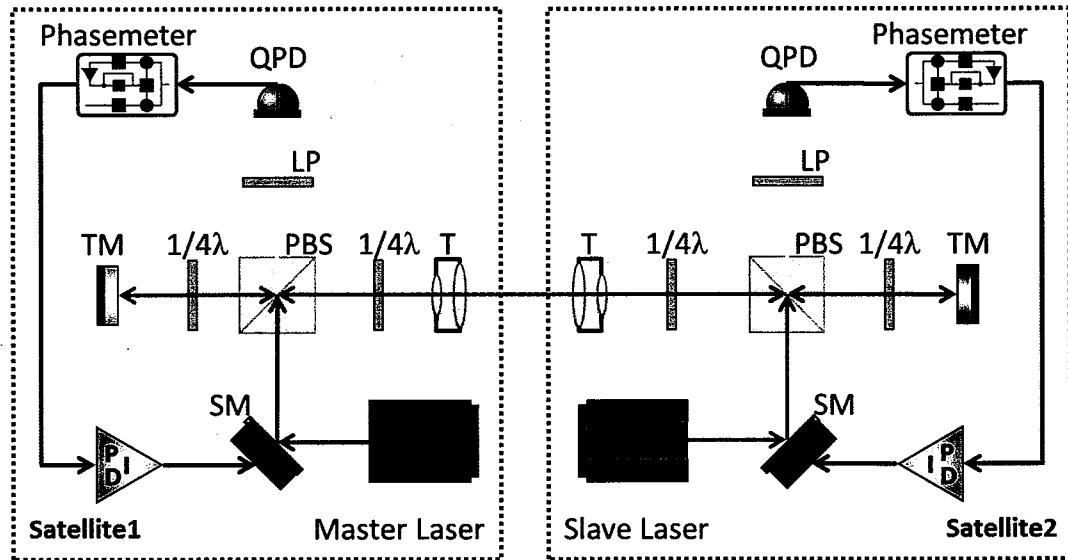


图 2.1 星间激光干涉仪精密指向控制原理图。其中 LP 为线性偏振片，Master Laser 为主激光器，PBS 为偏振分光镜，Phasemeter 为相位计，PID 为精密指向控制器，QPD 为四象限光电探测器，Satellite 为卫星，Slave Laser 为从动激光器，SM 为快速偏摆镜，T 为望远镜，TM 为测试质量， $1/4\lambda$ 为 $1/4$ 波片。

如图 2.1 所示，航天器 1、2 上两个自由悬浮测试质量间相对距离变化的精密测量通过如下过程实现。主激光出射后，经快速偏摆镜反射到达偏振分光镜。其中携带少量激光的 P 光透射，而携带绝大部分光强的 S 光反射，并经望远镜后出射。经过长距离传输，该激光被航天器 2 的望远镜接收。经过偏振分光镜时，它已经变为 P 光并透射。被测试质量反射后，再次经过偏振分光镜时变为 S 光，并反射。此时，传播激光与部分从激光干涉，其相位误差被读出系统精密探测，并用于反馈控制从激光器，实现两束激光的锁相。从而，利用高功率本地激光替代微弱的传播激光，并返回航天器 1。被航天器 1 接收后，经偏振分光镜透射。然后被测试质量反射，再次经过偏振分光镜时，变为 S 光并反射。此时该光束与主激光器的 P 光形成干涉，两束激光的相位误差恰好反映两测试质量间的相对距离变化，即实现星间测试质量间的精密测距。

如何在上述星间激光干涉测距系统中实现精密指向控制，压制激光指向噪声呢？如图 2.1 所示，航天器 2 中，传播激光和本地激光所形成的干涉信号被四象限计的四个象限同时独立探测，并分别由相位计实时检相。四路相位信号的平均值

被用做测距信号，而其相对关系则利用 DWS 技术精密测量两光束间的相对角度信息。利用 DWS 信号，激光指向控制器通过调制本地快速偏摆镜，改变本地激光角度，实现指向噪声的压制。同理，航天器 1 利用相似的途径，压制激光指向噪声，实现精密星间测距。

2.2.1 系统设计

明确了星间激光干涉测距系统精密指向技术的物理图像后，本节进一步设计并构建地基精密指向控制系统。如图 2.2 所示，地基指向系统分为两个功能部分：激光调制光路（图 2.2（a））和超稳干涉光路（如图 2.2（b））。激光调制光路用于产生两束具有稳定频率差的激光，用于模拟入射激光和本地激光；而超稳干涉光路处于真空腔内殷钢平台上，利用 Mach-Zehnder 干涉仪，将入射激光和本地汇聚形成干涉，以实现激光角度的精密测量和指向控制。

如图 2.2（a）所示，在激光调制光路中，针对空间应用需求，地基指向系统选用 1064 nm 固体激光器作为光源。激光出射后，经分光镜分为两束激光。经过一组声光移频器，两束激光的频差调制为 1 MHz。然后经过楔形片以校正有声光移频器所导致的激光倾斜。通过光阑，声光调制的一级 Bragg 衍射光束被选择，其它级的布拉格衍射光和杂散光被隔离，有效净化出射激光。最后，两束激光经由光纤耦合传输到真空腔内的超稳干涉平台，并分别用于模拟星间激光干涉系统中的传播激光和本地激光。

如图 2.2（b）所示，在超稳干涉光路中，激光首先从光纤耦合器出射。其中图中红线标记的激光被抖动模拟偏摆镜反射，用于模拟携带抖动信号的传播激光；另一束绿色标记被本地指向偏摆镜反射，用于模拟本地激光。两束激光在半反透镜处形成干涉，并被由四象计和相位计组成的角度敏感器探测。指向控制器利用其中一组角度敏感器精密测量的指向抖动信号反馈控制本地偏摆镜，调控本地激光方向，实现指向抖动噪声的压制。另一组角度敏感器输出 out-of-loop 数据，以测量和评估实际系统的指向控制水平。

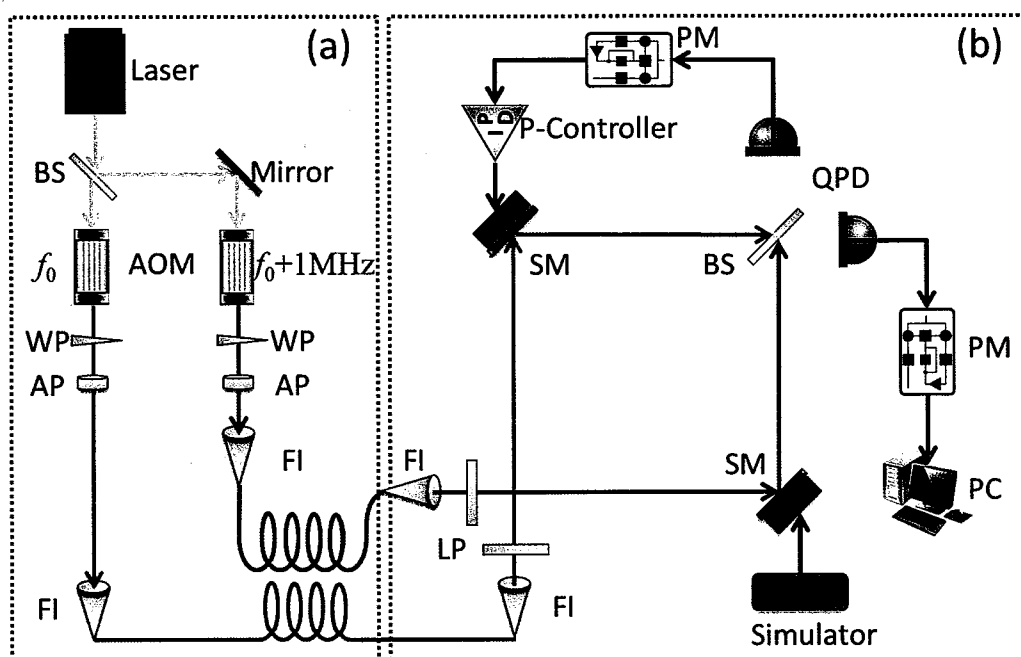


图 2.2 精密指向控制地面模拟实验原理图。其中 AOM 为 声光移频器， AP 为光阑， BS 为半反半透镜，FI 为光纤耦合器，Laser 为激光器，LP 为线性偏振片，PC 为电脑，P-Controller 为指向控制器，PM 为相位计，QPD 为四象计，Simulator 为指向抖动模拟器，SM 为快速偏摆镜，WP 为楔形片。

2.2.2 系统构建

根据精密指向技术的物理图像和上节地基精密指向设计,本节将构建地基精密指向系统。地基精密指向系统的构建将分为外围支撑系统构建和激光干涉系统构建两部分。

1) 外围支撑系统的构建

良好的外围支撑系统是实现精密指向技术的地面原理和方法学验证的基础。如图 2.3 所示, 外围支撑系统主要由以下三方面构成:

a) 超净间：超净间为整个精密指向控制系统提供基本环境需要。它的使用主要为了降低粉尘等污染源对光学镜片的影响。

b) 隔振系统: 隔振系统采用独立地基+隔振平台的二级隔振手段, 以降低地面振动对光学测量的影响。

c) 温控系统：为降低空气扰动和温度漂移对光学测量的影响，本实验采用亚克力隔离罩、真空腔和空调组成的温控系统。

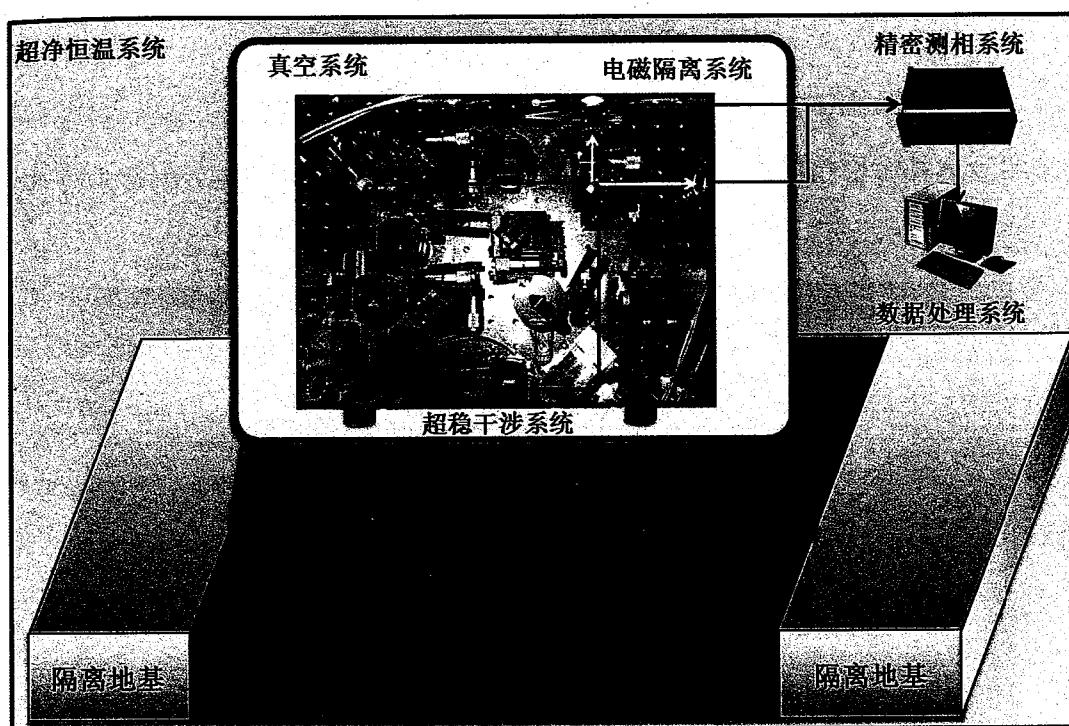


图 2.3 地基精密指向外围支撑系统图

基于以上三方面考虑，我们构建了实际外围支撑系统，如图 2.4 所示。

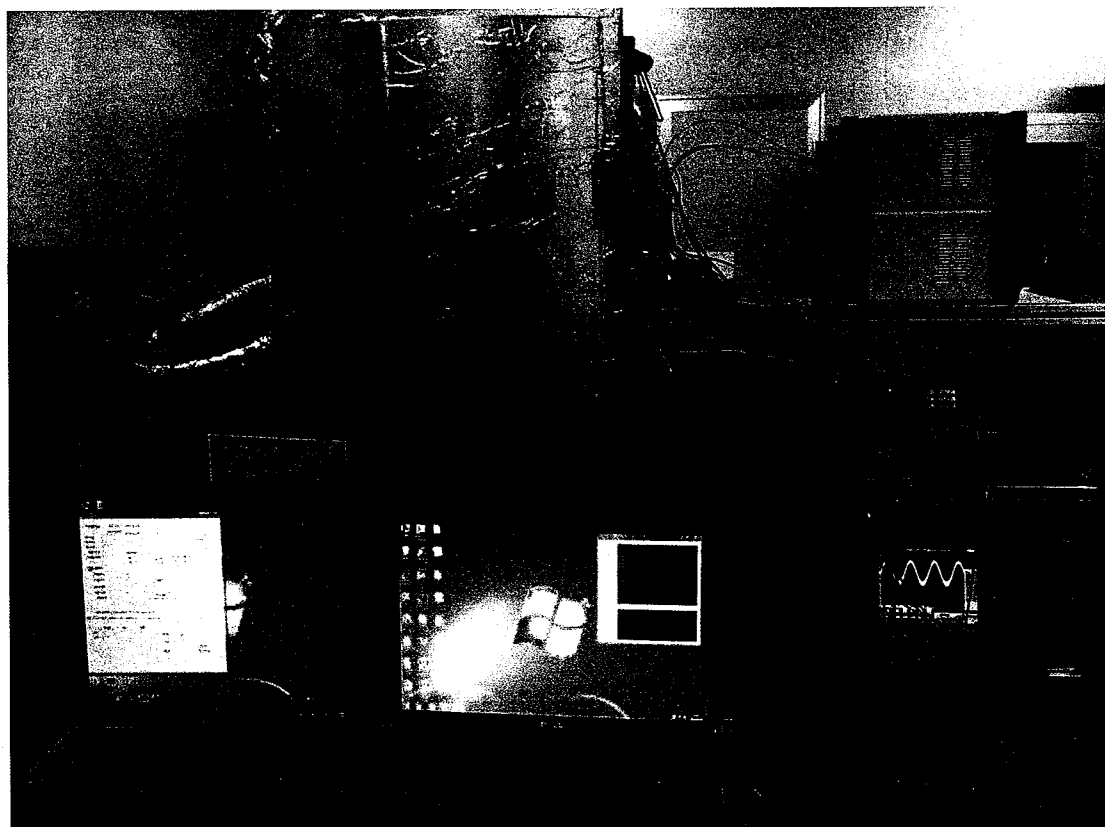


图 2.4 地基精密指向外围支撑系统实物图

2) 激光干涉系统构建

在良好的外围支撑系统的基础上，我们将按如图 2.2 所示的光路设计方案，构建实际地基精密指向系统。其中调制光路的构建如图 2.5 所示，超稳干涉光路的构建如图 2.6 所示，所用核心器件如附录 B 所示。

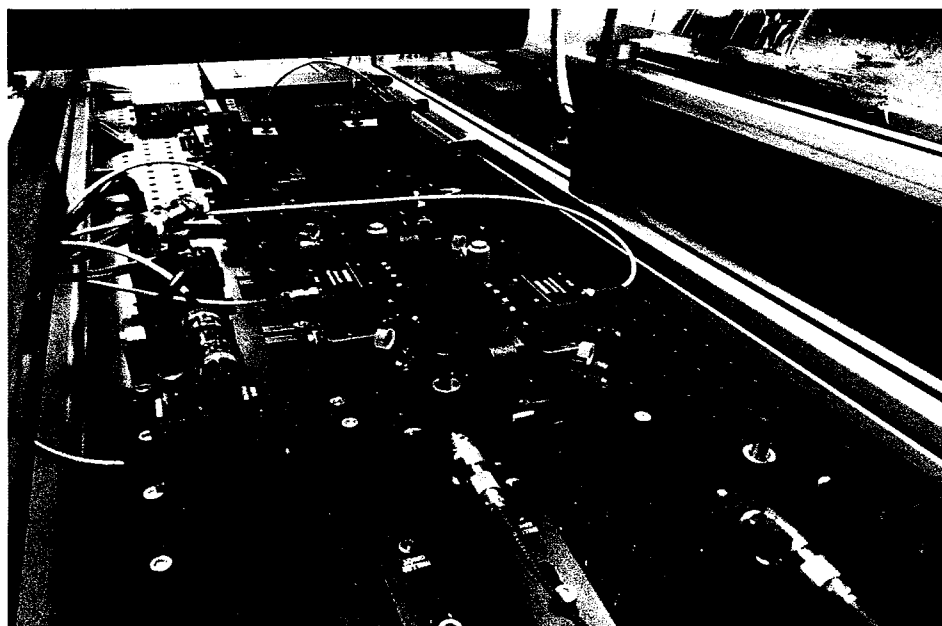


图 2.5 精密指向地基模拟系统调制光路实物图

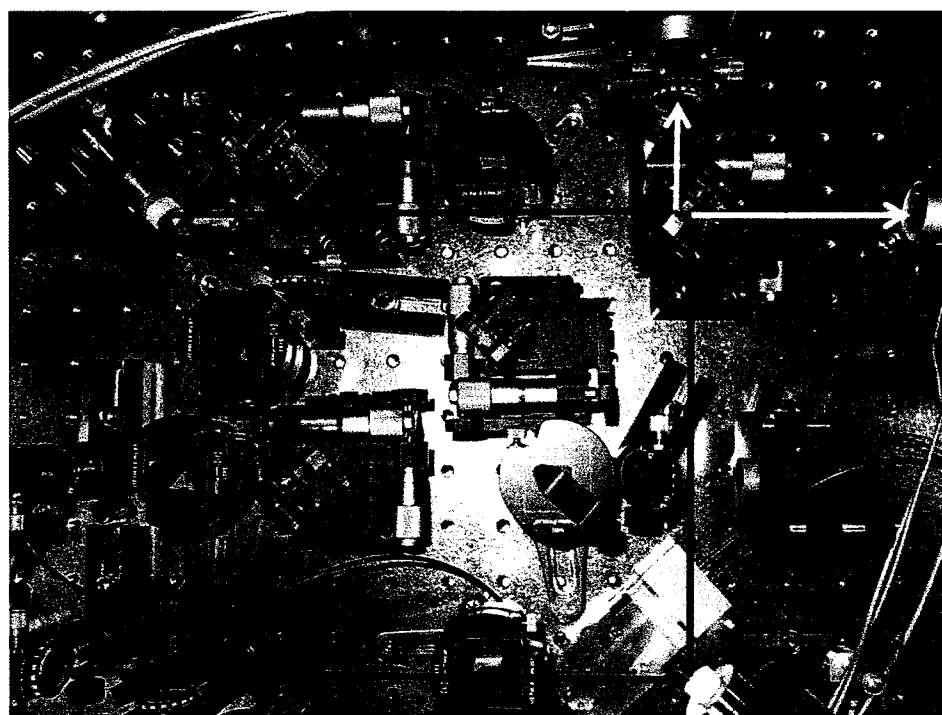


图 2.6 精密指向地基模拟系统超稳干涉光路实物图

2.3 精密指向系统评价与分析

在实现地基精密指向系统的设计和构建后,本节将测试并分析其核心功能模块,以实现对所构指向系统的性能评估。

2.3.1 DWS 测角模块评价与分析

1) 相角关系评价与分析

高精度的角度测量是精密指向控制的前提和基础。DWS 测角技术^[94, 101-106]具有高灵敏度、低噪声的特点,能更真实、准确的反映干涉激光间的相对夹角。为了实现精密指向技术地基模拟实验,首要任务是构建并分析 DWS 精密测角模块。

DWS 测角技术是一种高灵敏度的差分波前角度测量手段。如图 2.7 所示,对于小角度偏差, DWS 相位信号正比于激光相对夹角:

$$DWS \approx \frac{16r}{3\lambda} \cdot \alpha = k \cdot \alpha \quad (2.1)$$

其中 α 为相对波前偏差, r 为探测器光敏面半径, λ 为激光波长, k 为相角转化因子。

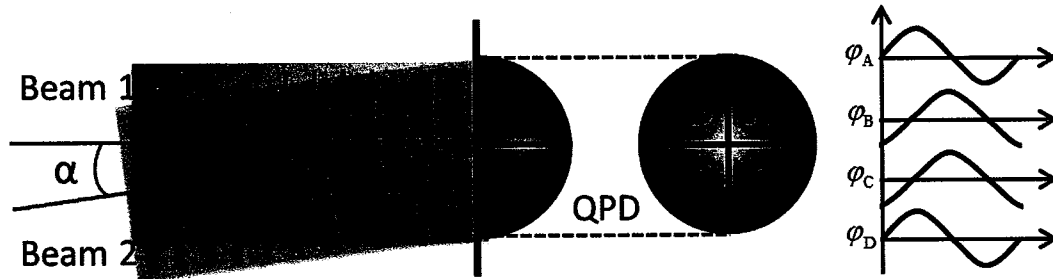


图 2.7 DWS 测角原理图。其中 Beam 1 为本地激光, Beam 2 为传播激光, QPD 为四象计, α 为相对夹角。

相角关系公式是测量相位与目标角度间的桥梁,但由于实际干涉激光并非理想高斯平顶光束,不能完全套用 DWS 相角关系。因此,精密指向控制实验之前,需构建 DWS 系统(如图 2.8),并在工作量程内对其相角转化关系予以评估。LISA 项目中精密指向的工作量程约为 $\pm 1 \mu\text{rad}$ ^[9, 89]。为准确反映此工作距内的相角转化关系,本论文将在 $\pm 100 \mu\text{rad}$ 范围内进行标定。实验中对 yaw 和 pitch 两个自

由度分别独立完成。首先，固定 pitch 角为零，控制 PI 偏摆镜从 $-100\ \mu\text{rad}$ 到 $100\ \mu\text{rad}$ 线性增加，以获取 yaw 方向相角转化关系。同理，可获取 pitch 方向的相角转化关系。所得激光相对夹角与 DWS 信号间相对关系的数据如图 2.9 所示。

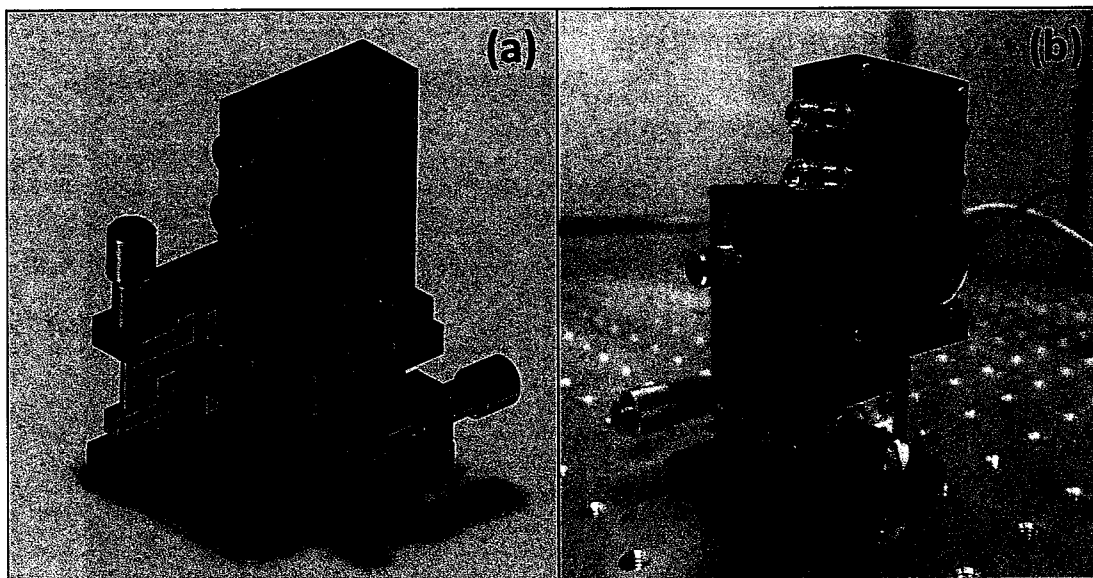


图 2.8 DWS 测角系统。其中 (a) 设计图，(b) 实物图。

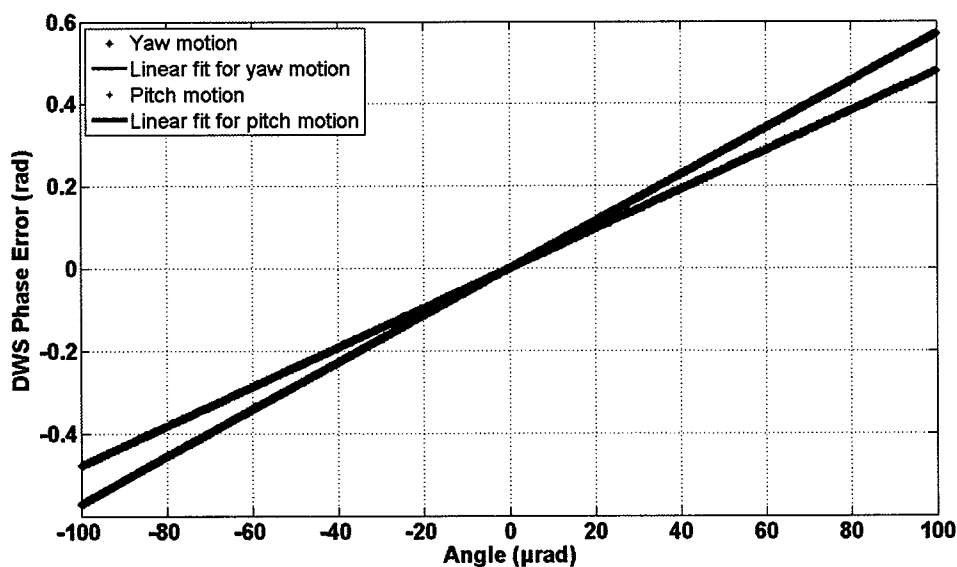


图 2.9 相角关系标定图。其中蓝色数据点为 yaw 方向 DWS 数据，绿色数据点为 pitch 方向 DWS 数据，红线和黑线分别为 yaw 和 pitch 方向的线性拟合曲线。

如图 2.9，获取相角转化关系后，本文利用 Matlab Curve Fitting Tool 对其进行线性拟合，可得 yaw 和 pitch 方向的线性相关因子分别为 0.999986 和 0.999981。相角关系的主要非线性误差来自以下四方面：一是实际波前与理想波前间的差异；

二是时域测量中的激光指向抖动；三是驱动器本身的非线性误差；四是非均匀光强导致的探测面不同位置的测量相位权重差异。但非线性效应十分微弱， $\pm 100 \mu\text{rad}$ 范围内，yaw 和 pitch 方向的激光相对夹角与 DWS 信号间有很好的线性关系，符合 DWS 理论预测。由图 2.9 线性拟合曲线斜率可获取相角转化因子：

$k_{\text{yaw}} \approx 5703 \text{ rad/rad}$ ， $k_{\text{pitch}} \approx 4790 \text{ rad/rad}$ 。相角转化因子在 yaw 和 pitch 方向的不同，主要因为激光的有效干涉区域及干涉强度的非对称性。至此，测量相位与目标角度间的桥梁已成功构建。

2) 干涉对比度评价与分析

两束激光间的相对夹角会影响其干涉对比度。为保证工作量程内获取有效干涉信号，我们设计实验对其进行测量和评估。实验利用 Tektronix DPO4054B 对 $\pm 400 \mu\text{rad}$ 相对夹角范围内的干涉信号强度进行实时采集和记录。所获取转化为相对对比度，并利用 Matlab 进行数据拟合，结果如图 2.10 所示。

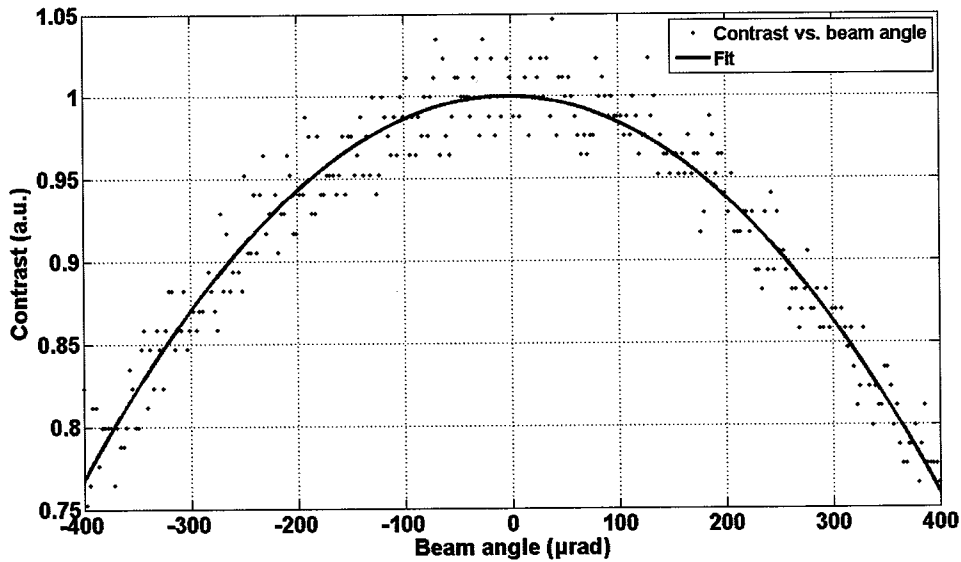


图 2.10 干涉对比度与激光夹角关系图。其中蓝色数据点表示不同激光相对夹角对应的相对对比度，红线为其数据拟合曲线。

如图 2.10 所示，利用二次多项式对激光夹角与对比度关系进行拟合，其拟合相关系数 $R^2 \approx 0.9393$ ，具有很好的拟合度。图中测量数据的随机分布噪声主要源自示波器的分辨率。当激光相对夹角在 $\pm 400 \mu\text{rad}$ 范围内时，相对对比度优于 0.75。在工作量程 $\pm 100 \mu\text{rad}$ 范围内，相对对比度优于 0.98，具有很好的干涉

效果，可满足精密指向实验的需求。

2.3.2 反馈控制模块评价与分析

反馈控制模块是整个精密指向系统灵魂。如何选取控制方法，构建控制流程，分析模块响应，将是本节的研究重点。

1) 反馈控制方法

PID (Proportional-Integral-Derivative, 比例-积分-微分) 控制是一种基于单变量系统设计，并经过长期工程实践总结出的一套行之有效的控制方法。它因原理简单，易于实现，鲁棒性强，而在工业过程控制、航空航天控制等领域占有 80% 以上的份额^[143-145]。我们将图 2.11 简要介绍 PID 控制基本原理。

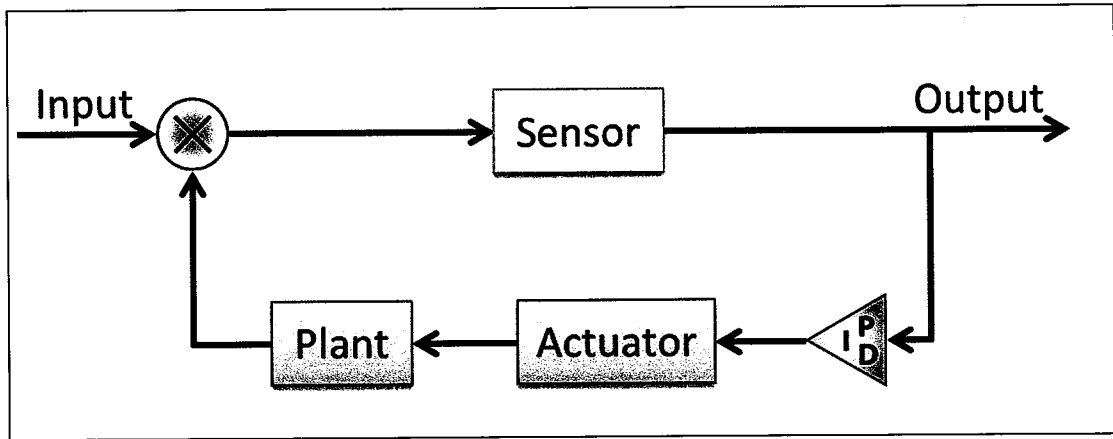


图 2.11 PID 控制图。其中 Sensor 为传感器，Actuator 为制动器，Plant 为被控对象。

如图 2.11 所示，被控对象与参考信号做比较后，其差值信号被传感器所测量。利用这一信号，PID 控制器驱动制动器，使得被控对象跟随输入参考信号而变化。

对于理想 PID 控制，其控制规律可表示为^[146]：

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

其传递函数为：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (2.3)$$

其中， $e(t)$ 为误差， K_p 为比例系数， K_i 为积分系数， K_d 为微分系数， T_i 为积分时

间常数, T_d 为微分时间常数。

传统 PID 控制存在一定缺陷^[146]。系统初始控制或受外界强干扰时, 短时间内系统偏差会过大, 造成控制积分项超调。为避免这一现象, 为积分控制设定阈值, 采取积分分离 PID 控制。当系统偏差过大时, 关闭积分控制, 以避免由此引起的超调现象。另外, 传统 PID 控制的积分系数固定。这导致在系统偏差大时易出现超调, 甚至积分饱和; 而在系统偏差小时又不能快速消除静态偏差。因此本文采取变积分 PID 控制, 使积分控制作用与系统偏差大小相对应, 即: 偏差越大, 积分系数越小; 反之积分系数越大。

2) 反馈控制流程分析

为有效模拟携带指向抖动的入射激光, 精密测量入射激光与本地激光间相对角度, 并有效驱动本地快速偏摆镜提供激光指向稳定性, 本节设计如图 2.12 所示的精密指向系统控制流程。

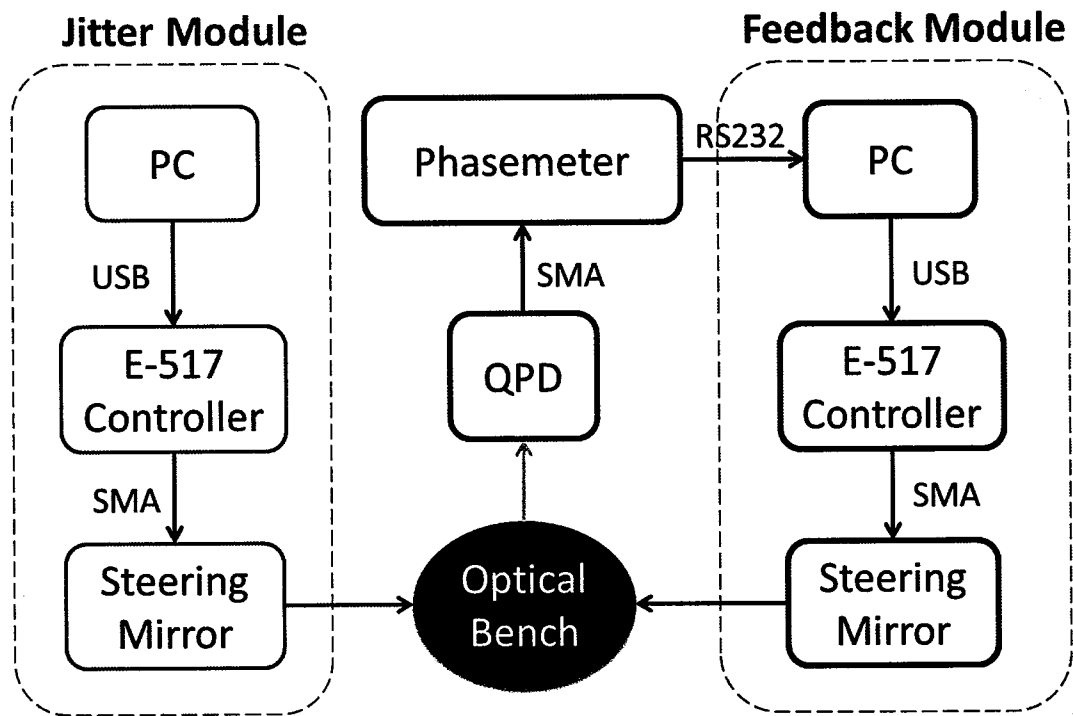


图 2.12 精密指向系统控制流程图。其中, E-517 Controller 为可编程精密电压源, Feedback Module 为反馈控制模块, Jitter Module 为抖动模拟模块, Optical Bench 为光学平台, Phasemeter 为相位计, QPD 为四象计, SMA 为射频连接线, Steering Mirror 为偏摆镜, USB 为串口通用总线。

如图 2.12 所示, 左侧绿色框图为激光指向抖动模拟模块。它通过电脑中 Labwindows 所编写的控制软件, 命令 E517 程控电源, 控制快速偏摆镜作正弦振动, 使得反射光束模拟航天器接收到的携带抖动信号的入射激光。入射激光与本地激光干涉后, 其相对夹角被由四象计和相位计组成的角度敏感器探测。图中红色框图为指向反馈控制模块。电脑中的控制软件利用 DWS 技术将接收角度敏感器所测相位数据处理并转化为角度信息, 通过优化的 PID 控制算法, 驱动本地快速偏摆镜, 使本地激光跟随入射激光方向, 进而提升系统激光指向稳定性。

3) 反馈控制模块时间响应分析

控制回路各个模块的响应时间将综合影响并限制指向系统的控制频率。基于精密指向系统的设计, 我们选用如图 2.13 所示的偏摆台和控制器。整个控制回路的中各部分的时间响应如图 2.14 所示。

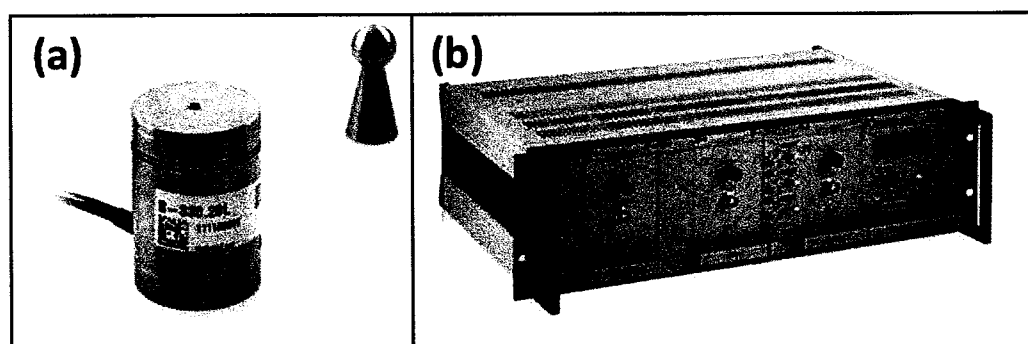


图 2.13 (a) PI-s330.2SL 偏摆台; (b) E517 控制器

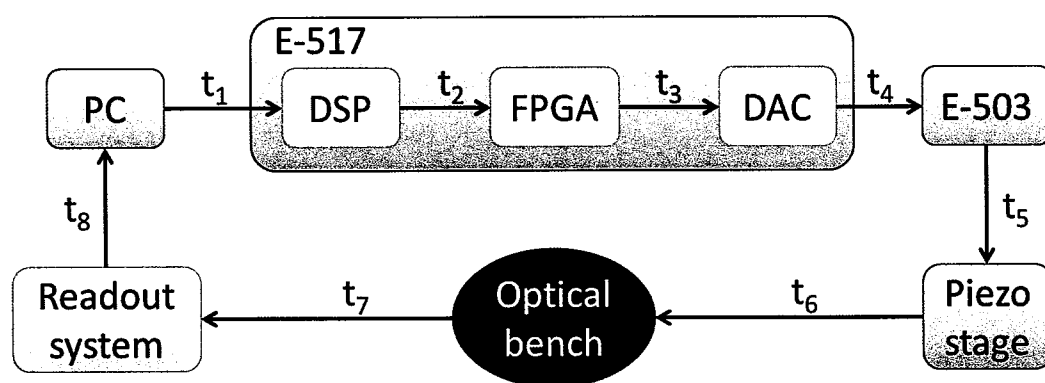


图 2.14 精密指向控制回路时间响应。其中 DAC 为数模转换器、DSP 为数字信号处理器、E503 为电压放大模块、Optical bench 为光学平台、Piezo stage 为压电偏摆镜响应平台、Readout system 为读出系统。

由图 2.14, 我们将控制环路主要时间流程分为 t_1 - t_8 。其中 t_1 是电脑的主控软件发送命令到 DSP 的时间, 由于采取 RS232 通信, 该时间约为 3 ms; t_2 为 DSP 设置新目标的时间, 由于采样率为 25 kHz, 所以此时间约为 40 μ s; t_3 为 FPGA 命令 DAC 的时间, 该时间约为 1.25 μ s; t_4 为 DAC 的设置时间, 约为 0.2 μ s; t_5 为放大处理时间, 由于此处为纯 IC 电路组件, 故响应时间小于 2 μ s; t_6 为偏摆镜响应到预定位置的时间, 由于响应频率为 2.6 kHz, 故该响应时间约为 0.38ms; t_7 为角度敏感器采样处理时间, 约为 50 ms; t_8 为测角数据传输到主控制器件所需时间, 约为 2 ms。因此, 限制目前指向控制回路时间响应的主要因素为角度敏感器的数据采集和处理时间 t_7 。由此可知, 精密指向反馈控制频率最高约为 20 Hz。由于 LISA 测量频段为 1 mHz 到 1 Hz, 在优化的控制方法下, 20 Hz 的反馈控制频率可以满足 LISA 需求。要想进一步提高控制频率, 需优化角度敏感器的软件算法, 提升其硬件指标, 并改善通信方式。

2.3.3 系统读出模块评价与分析

系统读出模块用于信号转化、测量和读出, 是精密指向系统的必备功能模块。系统读出噪声是评价和分析最佳系统性能的关键指标。本节将构建读出模块, 分析读出噪声, 评估系统性能。

1) 数据频谱分析方法

LISA 需对探测数据进行频谱分析, 以有效反演引力波信号。本论文同样采取频谱分析手段, 解析和评价精密指向控制结果。如何选取合理的频谱分析手段将是本节首先面临的问题。

频谱数据分析可分为: 功率谱分析、幅度谱分析、功率谱密度分析和幅度谱密度分析。为简化说明, 假设测量数据包含两部分: 正弦信号 S_t 和噪声 N_t 。其中, 信号形式为 $S_t = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi)$, 单位为 rad。假设噪声 N_t 是与频率无关的高斯白噪声, 其幅度谱密度为 N_0 , 单位为 rad。利用上述四种频谱分析处理所测数据, 可得图 2.15。

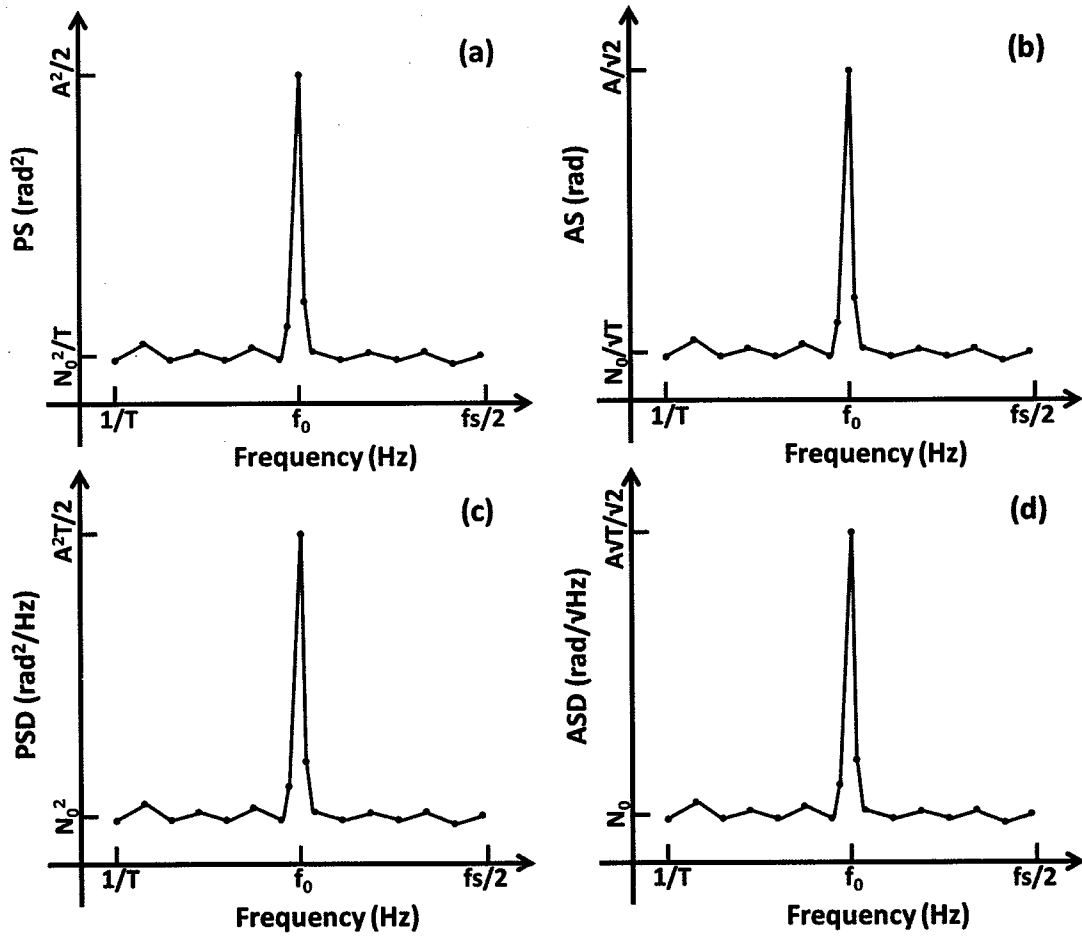


图 2.15 频谱分析图。其中 (a) 为 PS (Power Spectrum) 图, 即功率谱图; (b) 为 AS (Amplitude Spectrum) 图, 即幅度谱图; (c) 为 PSD (Power Spectrum Density) 图, 即功率谱密度图; (d) 为 ASD (Amplitude Spectrum Density) 图, 即幅度谱密度图。

图 2.15 (a) 和 (b) 分别为数据的功率谱分析图和幅度谱分析图。随数据采集时间的增加, 信号的大小不变, 而与频率无关的噪声谱的大小却随之减小。图 2.15 (c) 和 (d) 分别为数据的功率谱密度分析图和幅度谱密度分析图。随数据采集时间的增加, 与频率无关的噪声谱幅度大小不变, 而信号却随之增大。因此, 要准确反映信号大小, 需采用功率谱或幅度谱分析; 要准确反映噪声水平, 则采用功率谱密度或幅度谱密度分析更为合理。为准确反映噪声水平, 且与目标信号单位一致, 本论文采用幅度谱密度对测量数据进行分析。

上述频谱分析存在两个问题: 一是低频段的数据点少, 存在一定偶然性; 二

是高频段数据量大，难以直观显示信号大小。为此，德国马普协会爱因斯坦研究所在“固定周期平均修饰”实现的基础上，发明了新的数据处理方法，即对数频率轴幅度谱密度分析（LASD）^[147, 148]。与传统频谱分析方法相比，LASD 降低频率分辨率，以减少由于数据有限和缺陷造成的频谱估计噪声。另外，它在对数频率坐标下，为每个频率独立计算出最优频率分辨率。因此，为全面合理的分析数据，本论文采用 ASD 与 LASD 相结合的频谱数据处理方法。

2) 系统读出噪声测量与分析

系统读出噪声是指向系统现有信噪比的条件下，光电转化后探测器后端电路、射频传输线、BNC 转接头、模数转换器和相位计等器件所表现出的噪声水平，是现有系统的最佳噪声水平。系统读出噪声的测量如图 2.16 所示。

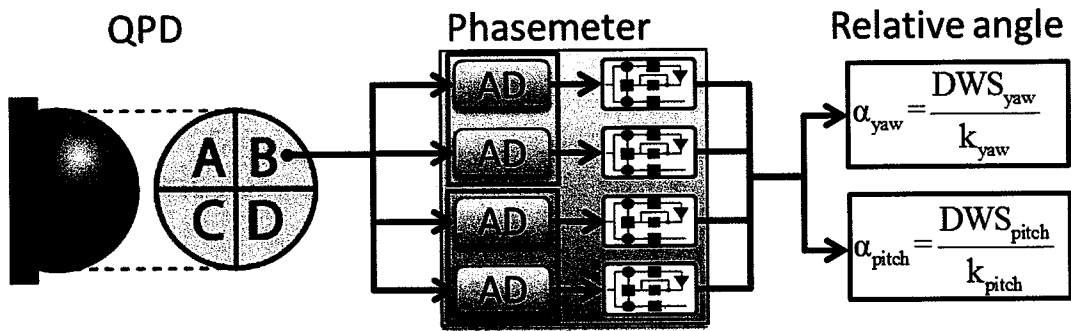


图 2.16 系统读出噪声测量原理图。其中 QPD 为四象计，AD 为模数转换器，Phasemeter 为相位计，Relative angle 为相对夹角。

由图 2.16 知，以四象限探测器的一个象限为基准，利用 BNC 将其分为等强度四路信号。经过等长度 SMA 射频传输线后，该信号同时被相位计探测。所测四路相位信号，经 DWS 相角转化成 yaw 和 pitch 方向的指向噪声。利用 ASD 和 LASD 进行频谱分析，得图 2.17。

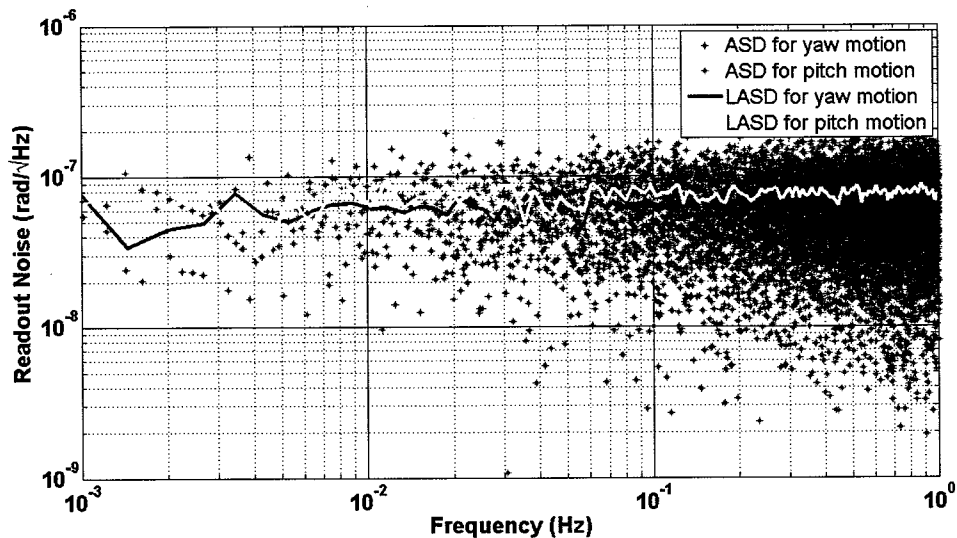


图 2.17 系统读出噪声幅度谱密度分析图。其中蓝点数据为 yaw 方向的读出噪声的幅度谱分析，绿点数据为 pitch 方向的读出噪声的幅度谱分析，红线和黄线分别为 yaw 和 pitch 方向的读出噪声的线性幅度谱分析。

由图 2.17 知，在 1 mHz 到 1 Hz 频段内，精密指向系统 yaw 方向的读出噪声小于 $70 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ；pitch 方向的读出噪声小于 $80 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。Yaw 和 pitch 方向不同的读出噪声主要源自两者不同的相角转化关系。

2.4 精密指向系统实验与讨论

在完成系统整体性能评估后，我们将利用精密指向系统对 1 mHz 到 1 Hz 频段内 LISA 指向稳定性进行实验和讨论。为模拟 LISA 激光抖动下的指向控制情况，本实验将驱动快速偏摆镜，使入射激光在 yaw 和 pitch 方向同时以频率 10 mHz、幅值 $50 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 做正弦抖动。在充分预热的前提下，实验整体运行 4 小时：前 2 小时自由运行，后 2 小时引入指向反馈控制。所得实验数据利用 ASD 和 LASD 分析，其中 yaw 方向结果如图 2.18 所示，pitch 方向结果如图 2.19 所示。

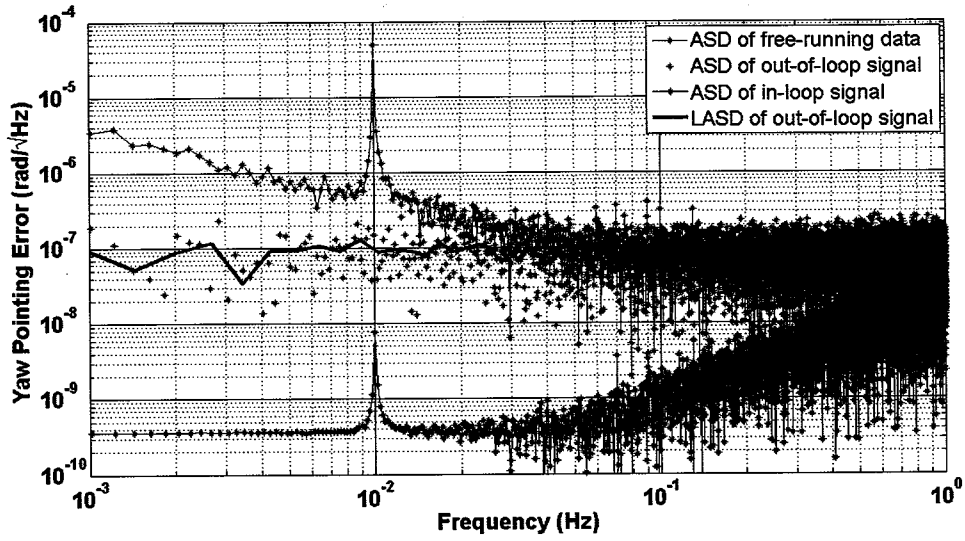


图 2.18 Yaw 方向指向控制结果。其中蓝色数据点为自由运行时的幅度谱密度分析，黑色数据点为 in-loop 控制幅度谱密度分析，绿色数据点为 out-of-loop 控制幅度谱密度分析，红色为其线性幅度谱密度分析。

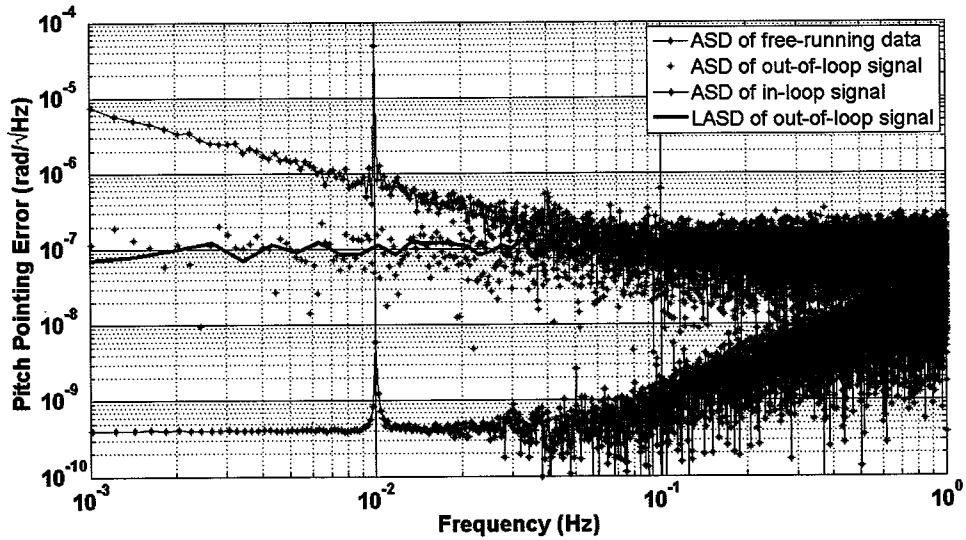


图 2.19 Pitch 方向指向控制数据幅度谱密度分析图。其中蓝色数据点为自由运行时的幅度谱密度分析，黑色数据点为 in-loop 控制幅度谱密度分析，绿色数据点为 out-of-loop 控制幅度谱密度分析，红色为其线性幅度谱密度分析。

由图 2.18 和图 2.19 知，自由运行时，指向稳定性随测量频率降低而减小，指向抖动模拟信号位于 10 mHz 处，幅值为 $50\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。引入指向控制后，由

in-loop 数据可知,在 20 mHz-1 Hz 频段,噪声随频率降低;在 1 mHz-1 Hz 频段,噪声基本持平,低于 $1\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$;模拟抖动信号由 $50\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$,压制到低于 $10\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。In-loop 控制将所测误差信号视作实际激光相对夹角予以控制,体现了指向系统的反馈控制能力。然而,实际控制过程中,in-loop 误差信号不仅包含真实的激光相对夹角,还存在系统读出噪声。虽然系统读出噪声作为伪激光相对夹角信号,被反馈调控和压制。但实际系统读出噪声是无法被反馈回路降低或消除的。因此,精密指向系统并行引入另一路读出系统,其输出信号称为 out-of-loop 数据,用于评价系统的实际指向控制水平。图 2.18 和 2.19 中绿色数据点即为 out-of-loop 数据的幅度谱密度分析,而红线为其线性幅度谱密度分析。由图可知,在 1 mHz 到 1 Hz 的 LISA 敏感频段内,精密指向系统 yaw 方向的实际指向水平为 $80\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$;pitch 方向的实际指向水平为 $90\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。虽然受系统噪声水平限制,其指向稳定性尚未达到 LISA 要求。但所构 DWS 精密指向系统具备提高指向稳定性,压制指向噪声的能力,为 LISA 精密指向技术提供原理和方法学验证。

2.5 精密指向系统噪声分析

通过对所构地基指向系统研究发现,虽然实现了原理和方法学验证,但其核心指标——指向稳定性,尚未达到 LISA 要求。为进一步优化系统,提高指向稳定性,本节将深入分析影响和限制地基指向系统的噪声源。

2.5.1 DWS 测角噪声分析

1) 探测器光敏面与标准入射光轴非垂直引入的噪声

理想情况下,若入射激光偏角为零,将与探测器光敏面垂直。然而,实际实验固定探测器时,光敏面总会偏离理想位置。如图 2.20,我们将讨论这一情况对精密指向系统的影响。



图2.20 四象计光电探测示意图。其中QPD为四象计,Laser Beam为入射激光束,Ideal Position为四象计光敏面理想位置,Real Position为四象计光敏面实际位置。

如图2.20所示,假设入射激光为高斯平顶光束,且光斑完全覆盖四象计光敏面。两光束已严格平行,但四象计相对于入射光轴方向并非严格垂直,存在偏离角度 γ 。现估算由此对左右偏角指向带来的误差。在距离探测敏感中心 x 处,两束激光的传播分别为:

$$E_1 = \cos(\omega_1 t - k_1(L_0 + x \sin \gamma) + \varphi_1) \quad (2.4)$$

$$E_2 = \cos(\omega_2 t - k_2(L_0 + x \sin \gamma) + \varphi_2) \quad (2.5)$$

其中 L_0 为探测面在理想位置是的入射光程, φ_1 、 φ_2 为两束激光的初始相位, k_1 、 k_2 为两束激光的波数。

两束激光干涉时,所得激光拍频信号为:

$$E = \cos(\Delta \omega t - \Delta k(L_0 + x \sin \gamma) + \varphi_{21}) \quad (2.6)$$

其中 $\Delta \omega = \omega_1 - \omega_2$, $\Delta k = k_1 - k_2$ 。

利用相位计对该点进行测相得:

$$\varphi_x = \Delta k(L_0 + x \sin \gamma) + \varphi_{21} \quad (2.7)$$

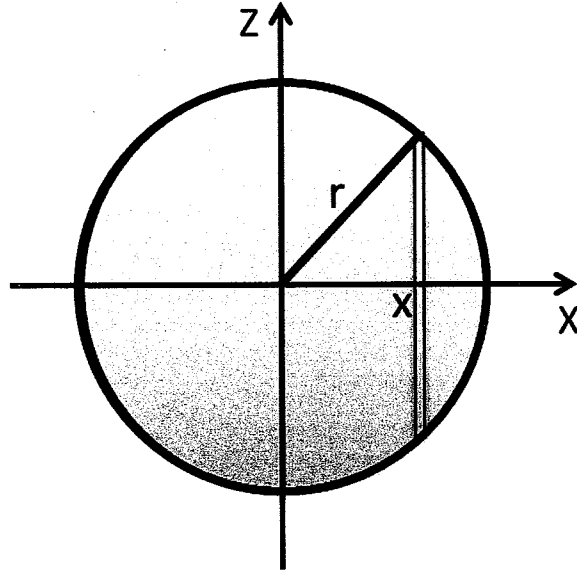


图 2.21 四象计敏感面相位积分示意图

如图 2.21 所示，除去通有的常数项 $\Delta k \cdot L_0 + \varphi_{21}$ ，我们对整个四象计光敏面进行相位积分，并分别计算左右半象限的相位：

$$\begin{aligned}
 \overline{\varphi_L} &= \frac{2}{\pi r^2} \int_{-r}^0 \Delta k \cdot x \cdot \sin \gamma \cdot 2\sqrt{r^2 - x^2} dx \\
 &= \frac{2}{\pi r^2} \int_{-r}^0 -\Delta k \cdot \sin \gamma \cdot \sqrt{r^2 - x^2} d(r^2 - x^2) \\
 &= \frac{2}{\pi r^2} \Delta k \cdot \sin \gamma \cdot \left(-\frac{2}{3}\right) (r^2 - x^2)^{\frac{3}{2}} \Big|_{-r}^0 \\
 &= -\frac{4\Delta k \cdot r \cdot \sin \gamma}{3\pi}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

$$\begin{aligned}
 \overline{\varphi_R} &= \frac{2}{\pi r^2} \int_0^r \Delta k \cdot x \cdot \sin \gamma \cdot 2\sqrt{r^2 - x^2} dx \\
 &= \frac{2}{\pi r^2} \int_0^r \Delta k \cdot \sin \gamma \cdot \sqrt{r^2 - x^2} d(r^2 - x^2) \\
 &= \frac{2}{\pi r^2} \Delta k \cdot \sin \gamma \cdot \left(-\frac{2}{3}\right) (r^2 - x^2)^{\frac{3}{2}} \Big|_0^r \\
 &= \frac{4\Delta k \cdot r \cdot \sin \gamma}{3\pi}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

由此，得到探测器右半象限和左半象限的相位差为：

$$\overline{\varphi_{R-L}} = \frac{8\Delta k \cdot r \cdot \sin \gamma}{3\pi} \quad (2.10)$$

对于 LISA, 假设激光差分频率 20 MHz, $r=1$ mm, 相角转化因子 5000 rad/rad, 为要想实现 1 nrad 的测角精度, 这探测面相对偏角:

$$\begin{aligned} \gamma &= \arcsin\left(\frac{3\pi \cdot \overline{\varphi_{R-L}}}{8\Delta k \cdot r}\right) \\ &= \arcsin\left(\frac{c}{\Delta\omega} \cdot \frac{3\pi \cdot \overline{\varphi_{R-L}}}{8r}\right) \\ &= \arcsin\left(\frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2\pi \cdot 20 \text{ MHz}} \cdot \frac{3\pi \cdot 5 \times 10^{-6} \text{ rad}}{8 \cdot 1 \text{ mm}}\right) \\ &\approx 14.1 \text{ mrad} \end{aligned} \quad (2.11)$$

对于目前地基模拟系统, 激光差分频率 1 MHz, $r=1$ mm, 相角转化因子 5000 rad/rad, 要想实现 1 nrad 的测距精度, 这探测面相对偏角:

$$\begin{aligned} \gamma &= \arcsin\left(\frac{3\pi \cdot \overline{\varphi_{R-L}}}{8\Delta k \cdot r}\right) \\ &= \arcsin\left(\frac{c}{\Delta\omega} \cdot \frac{3\pi \cdot \overline{\varphi_{R-L}}}{8r}\right) \\ &= \arcsin\left(\frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2\pi \times 1 \text{ MHz}} \cdot \frac{3\pi \times 5 \times 10^{-6} \text{ rad}}{8 \text{ mm}}\right) \\ &\approx 285.1 \text{ mrad} \end{aligned} \quad (2.12)$$

由上式可知, 只要四象计探测面相对偏角小于 285.1 mrad (约 16.3°), 即可满足 1 nrad 测角要求。而实际探测面偏角远小于 285.1 mrad, 由此引起的测角误差远小于 1 nrad, 可忽略不计。

2) 快速偏摆镜旋转中心与入射光斑中心非重合引入的噪声

激光干涉光路搭建时, 需调节快速偏摆镜旋转中心与入射光斑中心重合。但实际上, 受到温度漂移的影响, 入射光斑中心总会偏离快速偏摆镜旋转中心, 本节将讨论由此引入的噪声。假设入射激光为高斯平顶光束, 且光斑完全覆盖四象计光敏面。如图 2.22 和 2.23 所示, A_0 为旋转中心, 反射点 A_1 距离 A_0 为 x_0 。假设参考光路快速偏摆镜偏转角为零, 反射到四象计的光程为 $L=2d$ 。当测量光路偏摆镜偏转角为 β 时, B_1 点处的光反射到四象计中心, 该点相位为:

$$\begin{aligned}\varphi_{x_0} &= k_1 L - k_2 L' = k_1 (2d) - k_2 (2d - 2d \sin^2 \beta - x_0 \sin 2\beta) \\ &= \Delta k (2d) + k_2 (2d \sin^2 \beta + x_0 \sin 2\beta)\end{aligned}\quad (2.13)$$

快速偏摆镜旋转中心与入射光斑中心重合时测量相位可表示为：

$$\begin{aligned}\bar{\varphi} &= \frac{1}{\pi r^2} \int_{-r}^r [\Delta k (2d) + k_2 (2d \sin^2 \beta + x_0 \sin 2\beta)] 2\sqrt{r^2 - x^2} dx \\ &= \Delta k (2d) + 2k_2 d \sin^2 \beta\end{aligned}\quad (2.14)$$

快速偏摆镜旋转中心与入射光斑中心非重合时测量相位可表示为：

$$\begin{aligned}\bar{\varphi}' &= \frac{1}{\pi r^2} \int_{-r+x_0}^{r+x_0} [\Delta k (2d) + k_2 (2d \sin^2 \beta + x \sin 2\beta)] 2\sqrt{r^2 - (x-x_0)^2} dx \\ &= \Delta k (2d) + 2k_2 d \sin^2 \beta + k_2 x_0 \sin 2\beta\end{aligned}\quad (2.15)$$

由式 2.14 和 2.15 可得，由快速偏摆镜旋转中心与入射光斑中心不重合引入的额外相位误差为：

$$\Delta\varphi = \bar{\varphi}' - \bar{\varphi} = k_2 x_0 \sin 2\beta \quad (2.16)$$

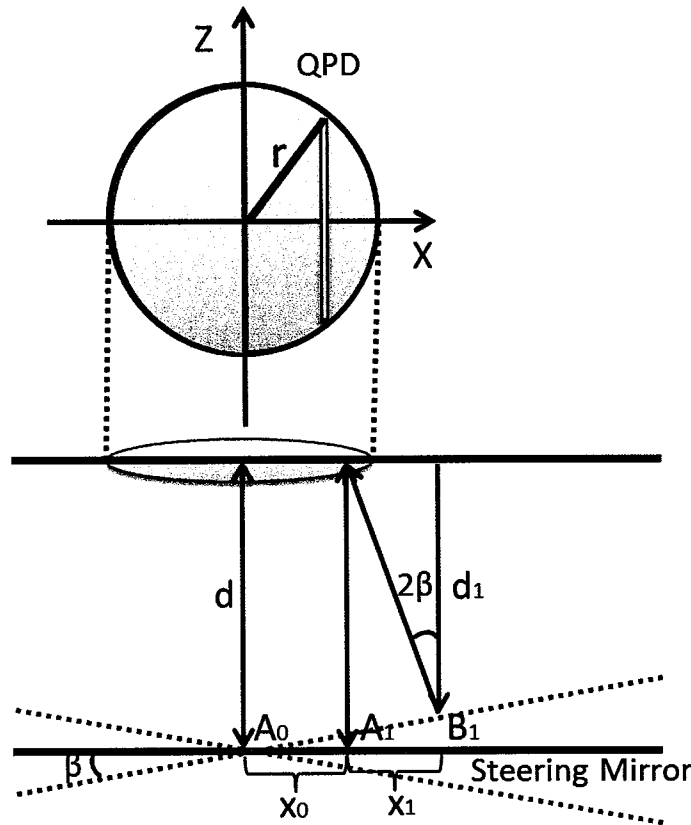


图 2.22 快速偏摆镜旋转中心与入射光斑中心重合时的激光传播情况。其中 QPD 为四象计，Steering Mirror 为快速偏摆镜。

下面我们将具体讨论旋转中心与入射光斑中心是否重合对精密角度测量和控制所产生的影响。

a) 两心重合

在旋转中心与入射光斑中心重合时，对于 DWS 角度测量技术而言，需分别独立测量探测器四个象限的平均相位，并通过象限做差运算，反演角度信息。由于相位数据 φ_{x_0} 的前两项 $2d(\Delta k + 2k_2 d \sin^2 \beta)$ 对左半象限和右半象限的贡献相同而相互抵消。因此在计算左右半象限相位差时忽略前两项，只考虑非重合相位误差。如图 2.22 所示，分别对左右半象限积分得：

$$\begin{aligned}\overline{\varphi_L} &= \frac{2}{\pi r^2} \int_{-r}^0 k_2 x \sin 2\beta \cdot 2\sqrt{r^2 - x^2} dx \\ &= \frac{2}{\pi r^2} \left(-\frac{2}{3}\right) k_2 \sin 2\beta \cdot (r^2 - x^2)^{\frac{3}{2}} \Big|_{-r}^0 \\ &= -\frac{4k_2 r \sin 2\beta}{3\pi}\end{aligned}\quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}\overline{\varphi_R} &= \frac{2}{\pi r^2} \int_0^r k_2 x \sin 2\beta \cdot 2\sqrt{r^2 - x^2} dx \\ &= \frac{2}{\pi r^2} \left(-\frac{2}{3}\right) k_2 \sin 2\beta \cdot (r^2 - x^2)^{\frac{3}{2}} \Big|_0^r \\ &= \frac{4k_2 r \sin 2\beta}{3\pi}\end{aligned}\quad (2.18)$$

由此得到右半象限和左半象限的相位差为：

$$\overline{\varphi_{R-L}} = \overline{\varphi_R} - \overline{\varphi_L} = \frac{8k_2 r \sin 2\beta}{3\pi} \quad (2.19)$$

b) 两心非重合

当快速偏摆镜旋转中心与入射光斑中心非重合时，如图 2.23 所示，分别对左右半象限积分得：

$$\begin{aligned}\overline{\varphi_L} &= \frac{2}{\pi r^2} \int_{-r+x_0}^{x_0} k_2 x \sin 2\beta \cdot 2\sqrt{r^2 - (x-x_0)^2} dx \\ &= \frac{2}{\pi r^2} \left(-\frac{2}{3}\right) k_2 \sin 2\beta \cdot (r^2 - y^2)^{\frac{3}{2}} \Big|_{-r}^0 + k_2 x_0 \sin 2\beta \\ &= -\frac{4k_2 r \sin 2\beta}{3\pi} + k_2 x_0 \sin 2\beta\end{aligned}\quad (2.20)$$

$$\begin{aligned}
 \overline{\varphi_R} &= \frac{2}{\pi r^2} \int_0^{r+x_0} k_2 x \sin 2\beta \cdot 2\sqrt{r^2 - (x-x_0)^2} dx \\
 &= \frac{2}{\pi r^2} \left(-\frac{2}{3} \right) k_2 \sin 2\beta \cdot (r^2 - y^2)^{\frac{3}{2}} \Big|_0^r + k_2 x_0 \sin 2\beta \\
 &= \frac{4k_2 r \sin 2\beta}{3\pi} + k_2 x_0 \sin 2\beta
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

由此得到右半象限和左半象限的相位差为：

$$\overline{\varphi_{R-L}} = \overline{\varphi_R} - \overline{\varphi_L} = \frac{8k_2 r \sin 2\beta}{3\pi} \tag{2.22}$$

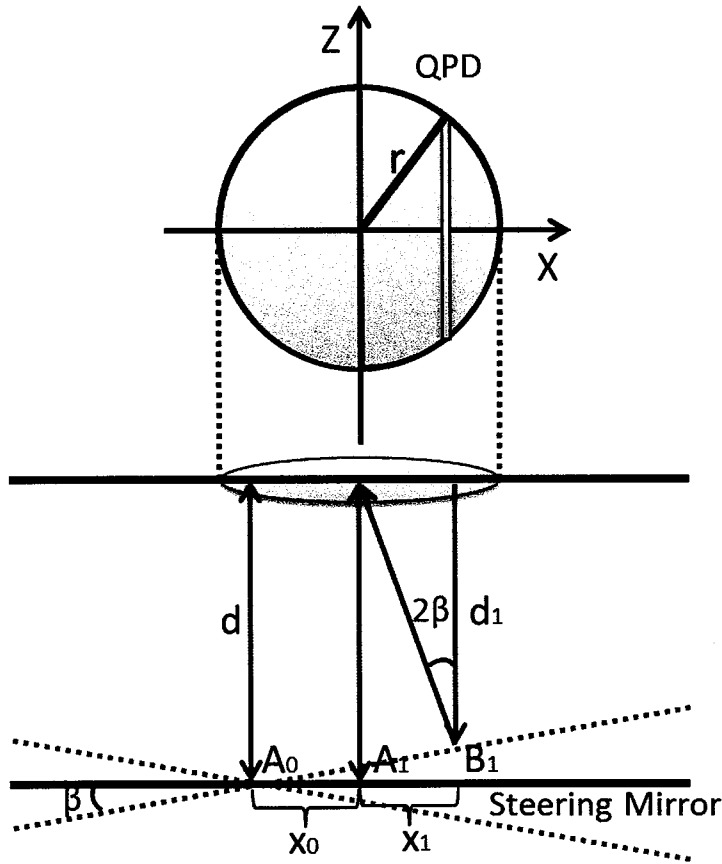


图 2.23 快速偏摆镜旋转中心与入射光斑中心非重合时的激光传播情况。其中 QPD 为四象计，Steering Mirror 为快速偏摆镜。

由此可见，探测器相对象限的相位差与旋转中心和入射光斑中心是否重合无关。由反射关系易知，激光偏角 α 是快速偏摆镜偏角 β 的两倍，由此可知：

$$\overline{\varphi_{R-L}} = \frac{8k_2 r \sin \alpha}{3\pi} = \frac{8r \sin \alpha}{3\pi} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{16r \sin \alpha}{3\lambda} \tag{2.23}$$

当激光偏角 α 为小于 10^{-4} rad 时，可得 DWS 技术的相角关系：

$$DWS_{yaw} = \overline{\varphi_{R-L}} \approx \frac{16r}{3\lambda} \cdot \alpha = k_{yaw} \cdot \alpha \quad (2.24)$$

综上，旋转中心和入射光斑中心是否重合对 DWS 角度测量和控制无影响，且由此可推出 DWS 相角转化公式。

3) 温度漂移噪声

LISA 采用超稳材料 ZERODUR（热膨胀系数为 10^{-8} K^{-1} ）对干涉仪进行一体化设计。因此，控制温度扰动优于 $10^{-5} \text{ K}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，即可保证由此引起的测距噪声达到 LISA 要求。在实际地面指向模拟系统中，调制光路光学平台采用钢制（热膨胀系数 10^{-5} K^{-1} ），超稳干涉光路平台采用殷钢（热膨胀系数 10^{-7} K^{-1} ），并对光学元件采取夹持固定方式。这种光学平台设计方式，使低频段（ $<0.2 \text{ Hz}$ ）随频率减低，光学位置噪声越发显著，无法满足 LISA 要求。

4) 系统读出噪声

系统读出噪声是现有信噪比的条件下，由光电转化后探测器后端电路、射频传输线、BNC 转接头和相位计等器件所表现出的噪声水平，是现有系统的最佳噪声水平。根据 2.3.3 节对读出模块的分析可知，在 1 mHz 到 1 Hz 频段内，地基精密指向系统 yaw 方向的读出噪声优于 $70 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ；pitch 方向的读出噪声优于 $80 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。对比精密指向控制结果图 2.18、2.19 和读出噪声分布图 2.17 可知，系统读出噪声是限制目前精密指向系统表现的主要噪声。

2.5.2 控制器噪声分析

控制器是整个控制回路的核心，是控制方法实施的媒介。如图 2.24 所示，整个控制模块分为软件和硬件两部分。软件包括顶层控制程序和底层实施程序。借助电脑中的 Labwindows 开发环境，顶层控制程序用于实现核心 PID 控制理念。接收到顶层控制程序命令后，底层实施程序利用 DSP 和 FPGA 组成的处理器，实现控制命令的准确转换和实施。

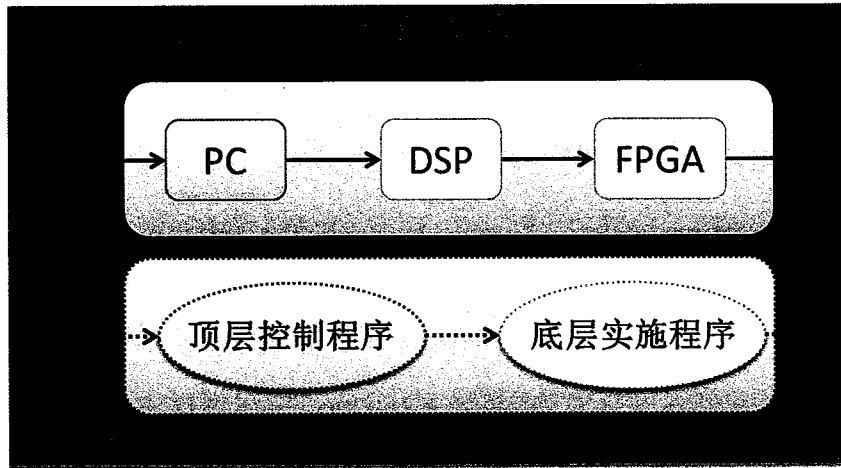


图 2.24 控制模块的软硬件构成

作为反馈控制回路的中枢，控制器所引起的误差将被视为指向误差而影响 in-loop 控制结果。由精密指向控制结果图 2.18 和 2.19，我们可以简化得到 in-loop 噪声分析图 2.25。由图 2.25 可知，无论是 yaw 方向还是 pitch 方向，在 LISA 敏感频段，in-loop 噪声远低于 out-of-loop 噪声表现。所以，控制器噪声并非限制目前系统精密指向精度的主要噪声。

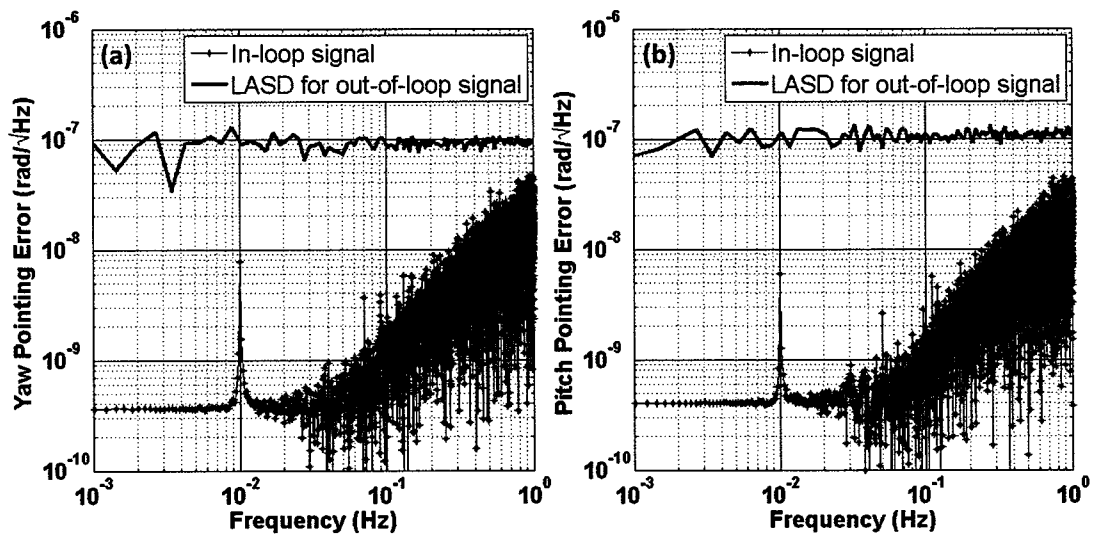


图 2.25 精密指向控制 in-loop 信号分析。其中 (a) yaw 方向信号分析；(b) pitch 方向信号分析。

2.5.3 驱动器噪声分析

驱动器是整个精密指向控制回路的执行模块，负责驱动偏摆镜以改变激光角度。驱动器的性能直接影响和决定了整个精密指向控制的灵敏度。如图 2.26 所示，快速偏摆镜驱动器由四块压电陶瓷组成。偏摆镜 yaw 方向的制动是通过 PZT-yaw1 和 PZT-yaw2 一组对称压电陶瓷的运动实现的。同理，PZT-pitch1 和 PZT-pitch2 的对称运动实现了 pitch 方向偏摆。下面，我们将从线性度和不同自由度间的串扰两个方面测试和分析驱动器对精密指向的影响。

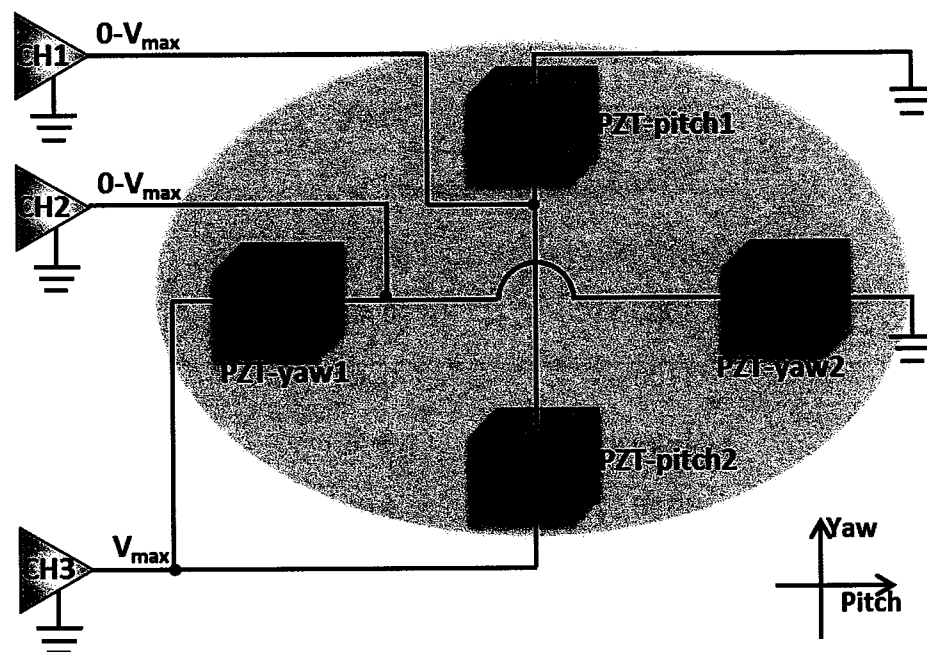


图 2.26 驱动器制动原理图

1) 驱动器线性度分析

作为执行者，驱动器的实际制动效果总和控制器的理论要求存在一定的偏差。驱动偏差将直接影响精密指向控制的精度。为此，我们利用所购 PI-s330K 驱动器的测试结果对其线性度进行分析。实验中分别对 yaw 和 pitch 方向进行测试：首先固定 pitch 方向，驱动 yaw 方向以 $100.00\ \mu\text{rad}$ 为步进，从 $0.00\ \mu\text{rad}$ 到 $2000.00\ \mu\text{rad}$ 旋转并记录测试结果如表 2-1 所示；同理，固定 yaw 方向，驱动 pitch 方向以 $100.00\ \mu\text{rad}$ 为步进，从 $0.00\ \mu\text{rad}$ 到 $2000.00\ \mu\text{rad}$ 旋转并记录测试结果如表 2-2 所示。

表 2-1 驱动器 yaw 方向测试

输入 (μrad)	输出 (μrad)	非线性偏差 (μrad)	非线性百分比 (%)
0	0	0	0
100	101.42	1.32	0.07
200	202.03	1.83	0.09
300	301.81	1.52	0.08
400	401.46	1.07	0.05
500	501.45	0.96	0.05
600	601.03	0.44	0.02
700	700.68	-0.01	0
800	800.67	-0.12	-0.01
900	900.66	-0.23	-0.01
1000	1000.51	-0.48	-0.02
1100	1100.23	-0.86	-0.04
1200	1200.42	-0.76	-0.04
1300	1300.27	-1.01	-0.05
1400	1399.92	-1.46	-0.07
1500	1500.25	-1.23	-0.06
1600	1600.59	-1	-0.05
1700	1700.64	-10.4	-0.05
1800	1800.84	-0.94	-0.05
1900	1901.44	-0.44	-0.02
2000	2001.98	0	0

利用表 2-1，我们可以得到驱动器在 yaw 方向的线性度测试结果。进一步，我们作图 2.27 和 2.28 对驱动器线性度测试结果和非线性度百分比展开分析。

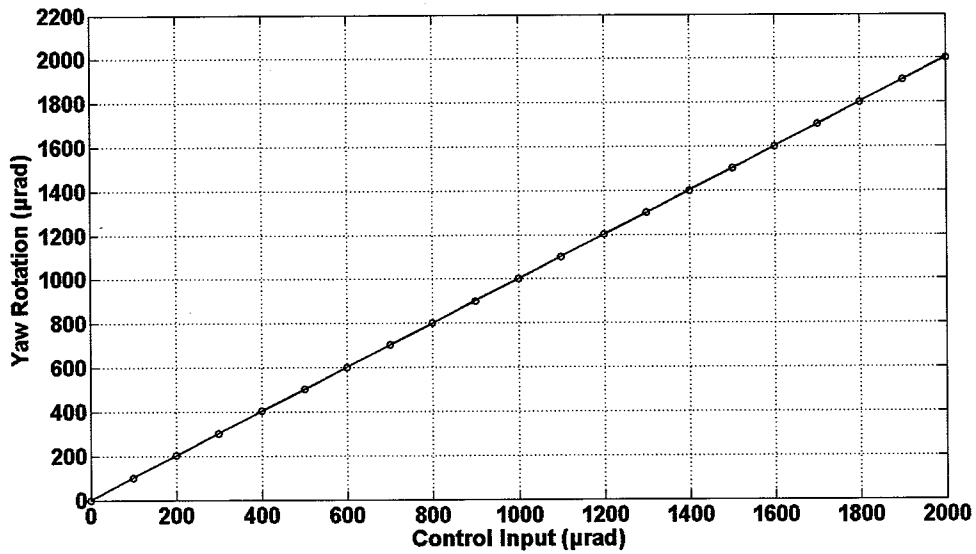


图 2.27 驱动器 yaw 方向线性度测试结果

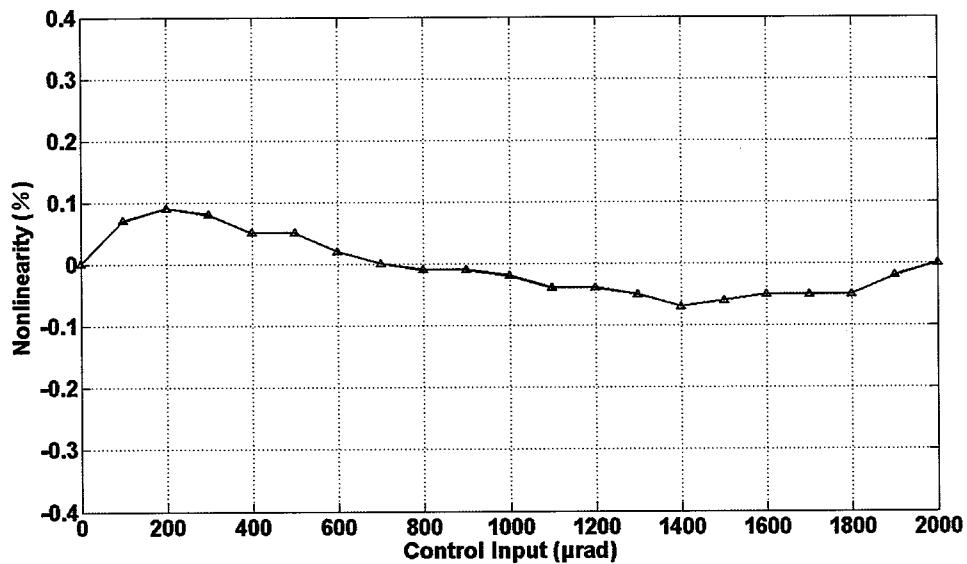


图 2.28 驱动器 yaw 方向非线性百分比

由图 2.27 和 2.28 分析可知，在 yaw 方向，非线性偏离小于 0.1%，实际角度与理论角度间有很好的线性关系。

表 2-2 驱动器 pitch 方向测试

输入 (μrad)	输出 (μrad)	非线性偏差 (μrad)	非线性百分比 (%)
0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	101.27	1.22	0.06
200.00	202.65	1.54	0.08
300.00	301.55	1.39	0.07
400.00	401.38	1.18	0.06
500.00	501.55	1.30	0.06
600.00	601.11	0.81	0.04
700.00	700.67	0.31	0.02
800.00	800.92	0.51	0.03
900.00	900.68	0.22	0.01
1000.00	1000.24	-0.27	-0.01
1100.00	1100.21	-0.36	-0.02
1200.00	1200.11	-0.51	-0.03
1300.00	1299.81	-0.86	-0.04
1400.00	1399.84	-0.87	-0.04
1500.00	1500.22	-0.55	-0.03
1600.00	1600.12	-0.70	-0.03
1700.00	1700.03	-0.85	-0.04
1800.00	1800.40	-0.52	-0.03
1900.00	1900.92	-0.05	0.00
2000.00	2001.03	0.00	0.00

利用表 2-2，我们可以得到驱动器在 pitch 方向的线性度测试结果。进一步，我们作图 2.29 和 2.30 对驱动器线性度测试结果和非线性度百分比展开分析。

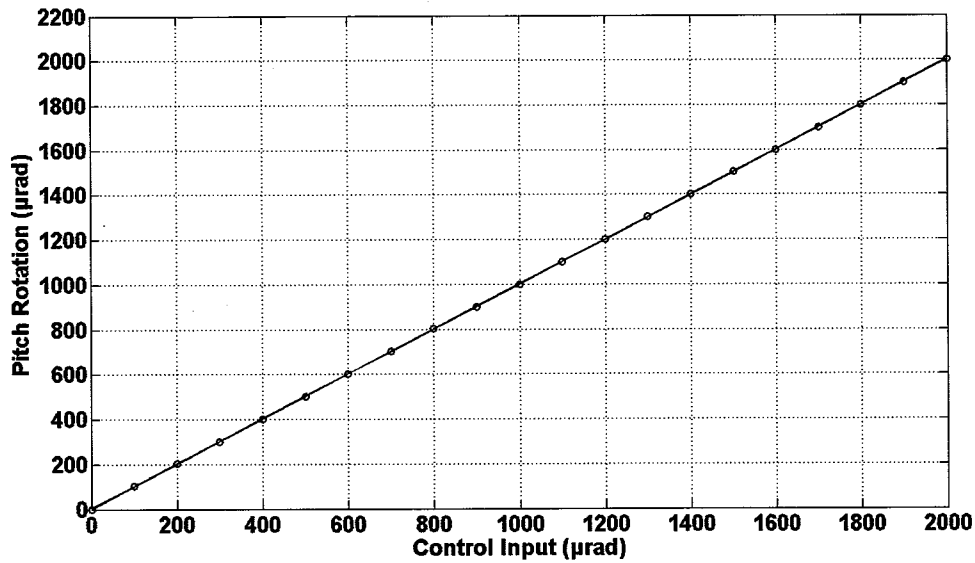


图 2.29 驱动器 pitch 方向测试结果

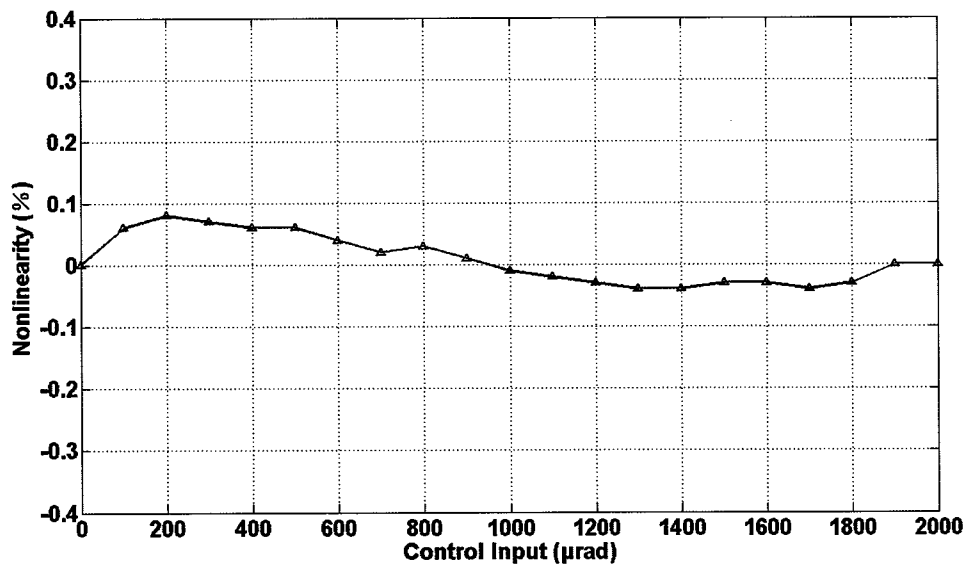


图 2.30 驱动器 pitch 方向线性度表现

由图 2.29 和 2.30 分析可知，在 pitch 方向，非线性偏离小于 0.1%，实际角度与理论角度间有很好的线性关系。综合所述，驱动器无论是 yaw 方向还是 pitch 方向，具有良好的线性度，为精密指向控制提供基础。

2) 驱动器不同自由度间串扰

如图 2.26 所示, 快速偏摆台单轴运动时并非完全独立, 由此引起的串扰将会影响精密指向控制的精度。为此, 本节设计实验, 测量不同自由度间的串扰, 并分析对精密指向系统的影响。首先固定快速偏摆镜 pitch 角度为零, 控制偏摆镜沿 yaw 方向以 $\pm 100 \mu\text{rad}$ 振幅、1 mHz 频率作正弦运动, 测量 yaw 方向对 pitch 方向的串扰, 结果如图 2.31 所示。同理, 可测得 pitch 方向对 yaw 方向的串扰, 结果如图 2.32 所示。

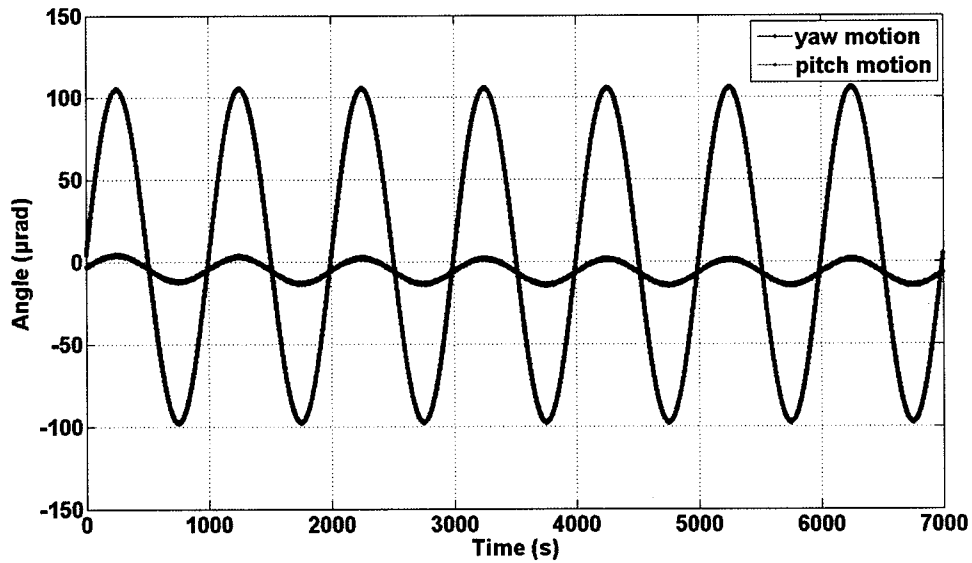


图 2.31 Yaw 对 pitch 方向串扰图。其中蓝色数据点为 yaw 方向角度数据, 绿色数据点为 pitch 方向引起的角度串扰数据。

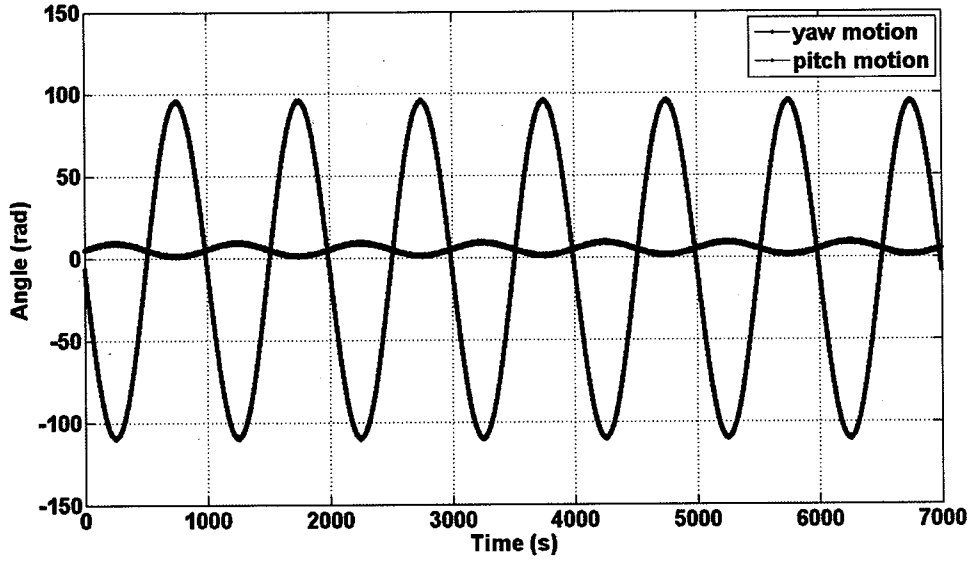


图 2.32 Pitch 对 yaw 方向串扰图。其中蓝色数据点为 yaw 方向角度数据，绿色数据点为 pitch 方向引起的角度串扰数据。

由图 2.31 和 2.32 知，yaw 对 pitch 方向的串扰为 6.58%；pitch 对 yaw 方向的串扰为 3.38%。Yaw 和 pitch 方向间的相互串扰来自以下两方面：一是精密指向系统构建时，手动校准驱动器方向所带来的偏差；二是由于驱动器本身在单轴方向运动时，所引起另一方向的耦合。为解决这一问题，精密指向控制实验前，将测量并标定不同自由度间的串扰耦合因子。在核心控制方法中，将引入解耦程序，最大限度的抑制不同自由度间的串扰。

2.5.4 干涉仪噪声分析

干涉仪噪声是 LISA 面临的主要噪声。本节参照 LISA 面临的主要干涉仪噪声，并将角度作为最终目标量，综合分析该噪声对地基指向系统的影响。

1) 散粒噪声

散粒噪声是影响和限制 LISA 的最佳灵敏度的主要噪声。它是激光粒子性的体现，是接收光子涨落引起的光学测量噪声，可表示为：

$$\delta\varphi_{\text{sn}} = \sqrt{\frac{hc}{\lambda\eta P_{\text{rec}}}} \quad (2.25)$$

其中， h 为普朗克常数， c 为光速， λ 为激光， η 为探测器光电转换效率， P_{rec} 为接收光功率^[10]。假设接收光功率 100 pW，光电转换效率 0.65 A/W，则散粒噪声

引起的光路位置噪声为：

$$\begin{aligned}\delta\varphi_{\text{sn}} &= \sqrt{\frac{hc}{\lambda\eta P_{\text{rec}}}} = \sqrt{\frac{6.626 \times 10^{-34} \times 2.998 \times 10^8}{1.064 \times 10^{-6} \times 0.68 \times 10^{-10}}} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}} \\ &\approx 5.24 \times 10^{-5} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}\end{aligned}\quad (2.26)$$

散粒噪声是限制 LISA 高频段（2 mHz 以上）灵敏度的主要噪声。但对于地面指向模拟系统，由于接受光强在毫瓦量级，由此导致的散粒噪声为：

$$\begin{aligned}\delta\varphi_{\text{sn}} &= \sqrt{\frac{hc}{\lambda\eta P_{\text{rec}}}} = \sqrt{\frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{1.06 \times 10^{-6} \times 0.61 \times 10^{-3}}} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}} \\ &\approx 1.8 \times 10^{-8} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}\end{aligned}\quad (2.27)$$

可知，目前地面模拟系统的散粒噪声远低于 LISA 的散粒噪声水平。所以，散粒噪声对目前指向模拟系统的噪声贡献忽略不计。

2) 激光频率噪声

激光频率噪声是激光频率的不稳定性在不等臂干涉仪上引起的光学位置噪声。假设 LISA 干涉臂长为 L ，则本地激光与经两个臂长传播的入射激光干涉后，器相位差为^[8-10]：

$$\varphi = 2L \frac{2\pi f}{c} = \frac{4\pi f L}{c} \quad (2.28)$$

其中， f 为激光频率， c 为光速。对于缓变的激光频率和干涉臂长，上式作变分得：

$$\delta\varphi = \frac{4\pi}{c} (L\delta f + f\delta L) = \frac{4\pi f L}{c} \left(\frac{\delta f}{f} + \frac{\delta L}{L} \right) \quad (2.29)$$

干涉臂长变化所引起的相位变化是目标待测物理量。但由上式可知，激光频率变化会产生类似臂长变化所引起的测量相位，即激光频率涨落将伪装成待测信号而引入测量误差。可表示为：

$$\delta\varphi = \delta L \frac{2\pi}{\lambda} = \Delta L' \frac{\delta f}{f} \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi \Delta L' \delta f}{c} \quad (2.30)$$

其中 $\Delta L'$ 为两个干涉臂的臂长差。由上式可知，当频率变化一定时，两干涉臂长差越小，由此导致的光路位置噪声越小。LISA 卫星编队的三颗星间的相对距离理论值为 $L = 5 \times 10^6 \text{ km}$ ^[64]。而实际地面后处理时，采用时延干涉仪（Time Delay Interferometer, TDI）处理。因此，我们真正关注的是 LISA 臂长的扰动。由实际

的轨道设计可知,星间距 L 并非固定不变,而是不停的缓慢变化。这种由轨道游离所导致的臂长变化最大值 $\Delta L' \approx 10^5 \text{ km}$ 。因此,对 LISA 而言,要想使频率扰动引起的光路噪声低于 $1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$, 激光频率稳定性需达到

$$\delta f \leq \frac{c\delta\varphi}{2\pi\Delta L'} = \frac{2.99 \times 10^8 \times 5.9 \times 10^{-6}}{2\pi \times 10^8} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (2.31)$$

$$\approx 2.8 \times 10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$$

然而适于 LISA 的 Nd:YAG 激光器自由运行时频率稳定性约为 10^{-6} , 即:

$$\delta f = \frac{c}{\lambda} \times 10^{-6} = \frac{2.998 \times 10^8}{1.064 \times 10^{-6}} \times 10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \approx 3 \times 10^8 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (2.32)$$

距离 $2.8 \times 10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的激光频率稳定性有 14 个量级的差距。因此,激光频率不稳定性有效压制,是决定 LISA 引力波探测计划成败的关键。为此 LISA 准备采取三步法对激光频率噪声进行压制,如表 2-3 所示。

表 2-3 激光频率不稳定性压制三步法^[8-10, 149]

技术	压制后激光频率不稳定性
PDH 预稳技术	$30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$
锁臂技术	$10^{-4} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$
TDI 技术	$10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$

PDH 技术是通过将激光频率与由超稳材料 ULE 制作的 FP 腔的谐振频率进行锁相的方法,以提高激光频率稳定性。超稳材料 (ULE) 和超精密温控 ($10^{-6} \text{ K}/\sqrt{\text{Hz}}$), 使得预稳后的激光频率达到 $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的水平^[10, 133]。

激光锁臂技术是通过将激光频率锁定到 LISA 干涉臂长,以提高激光频率稳定性的手段^[150, 151]。虽然 LISA 臂长存在 $1 \times 10^5 \text{ km}$ 量级的扰动,但由频谱分析可知,该变化主要集中在 10^{-8} Hz 的低频段。而在 LISA 测量敏感频段 (1 mHz - 1 Hz), 臂长扰动噪声极低。通过锁臂技术,激光频率稳定性将有望达到 $10^{-4} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的量级^[152, 153]。

TDI 技术是通过平移测量数据,并重新组合成等效的等臂长干涉仪测量数据,以压制激光频率噪声的数据后处理方法^[154-158]。通过该方法可最终实现 LISA 对激光频率稳定性的要求。

激光频率噪声是限制 LISA 灵敏度的关键噪声。为最大限度的减低激光频率噪声对地基精密指向系统的影响,我们首先采用单激光器结合声光移频器,生成两束具有一定稳定频差的激光。然后采用等臂长干涉仪设计,进一步压制激光频率抖动对测量结果的影响。最后,在利用 DWS 技术角度反演时,将激光频率噪声共模抑制。通过以上方法的有机结合,最大限度的降低激光频率噪声对精密指向控制的影响。

3) 时钟噪声

时钟噪声是 LISA 所必须面对的另一重要噪声源。如图 2.33 所示,由于计时误差的存在,当待测信号数模转换时,时钟噪声影响和限制 LISA 测距精度。假设激光差分频率为 20 MHz 的信号,要想实现低于 $1\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测距噪声,时钟计时误差需在 1 mHz 到 1 Hz 频段内低于 $10^{-13}\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[10, 159-161]。如图 2.34 所示,目前适于空间的超稳晶振在 1 mHz 到 1 Hz 频段内,具有 $7\times 10^{-14}\text{Hz}/f\cdot\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的稳定性^[160],无法满足 LISA 的测量要求。

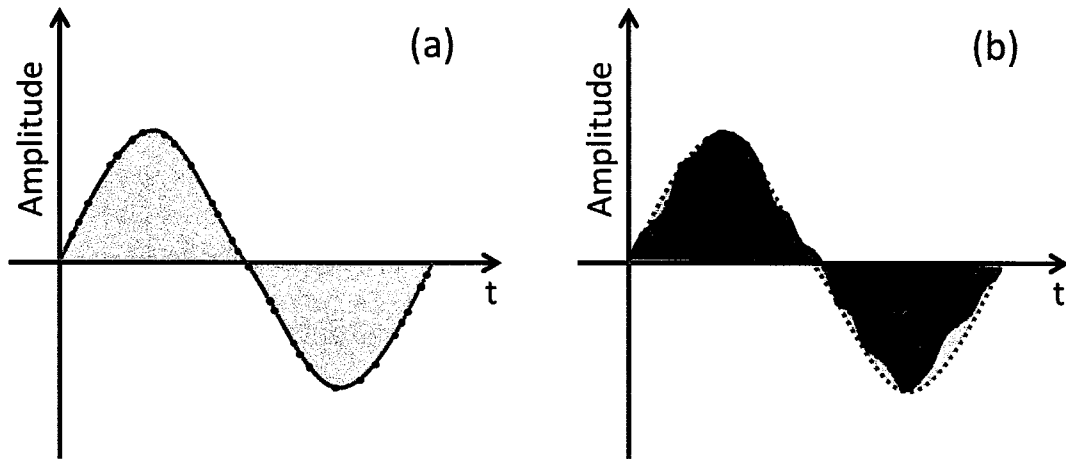


图 2.33 时钟噪声示意图。其中左图信号采样,右图是信号还原,绿色为原始信号,红色为采样后的还原信号^[161]。

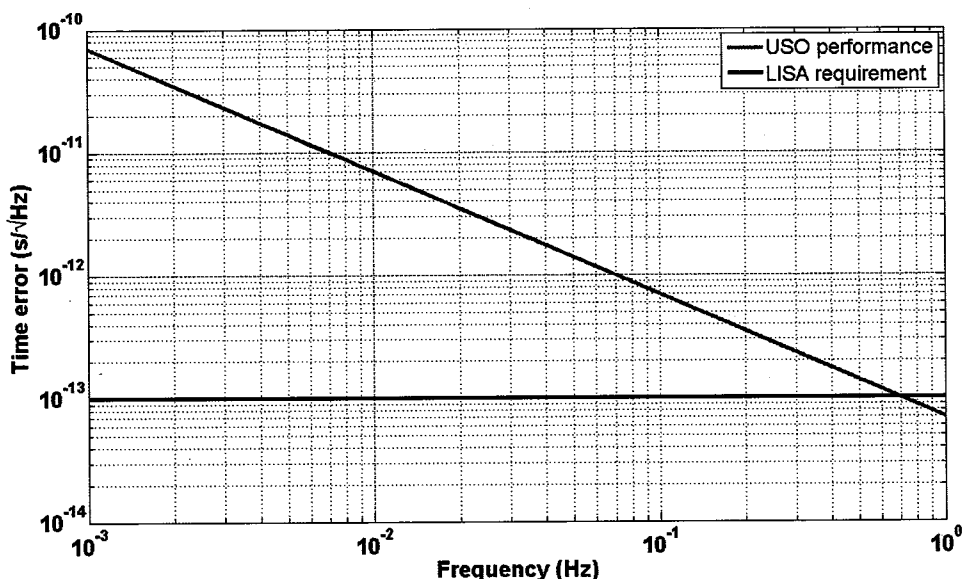


图 2.34 超稳时钟计时误差图。其中蓝色数据线条为目前空间超稳时钟计时误差表现，黑色数据线条为 LISA 计时误差需求^[160]。

目前 LISA 计划采用边带-边带方案压制时钟噪声^[162]。即首先将时钟倍频至 GHz 量级，利用电光效应将本地激光调制成一个主激光和两个功率为主激光十分之一的边频激光，代替原激光实现干涉测距。如此，边频干涉激光携带时钟噪声。最后，通过后处理技术，对时钟噪声予以压制^[163, 164]。

在地基指向系统中，四个模数转换器采用同一时钟驱动，实现差分干涉信号的采样。而且，最终利用 DWS 关系获取激光角度信息时，进一步将时钟噪声共模抑制。因此，精密指向控制技术地基实验中，可忽略时钟噪声的影响。

2.6 精密指向系统优化与提升

2.6.1 主要噪声分析与抑制

通过深入噪声分析可知，限制地基指向系统的主要噪声源有两个：温度漂移噪声和系统读出噪声。在现有的干涉平台和温控系统的条件下，难以进一步压制温度漂移噪声的影响。所以，只有深入分析和优化系统读出噪声，才有可能实现精密指向控制精度的提升。下面，我们将深入解析系统读出噪声的具体来源，探究压制手段，以期实现指向稳定性的提升。

由读出噪声分析图 2.17 知，地基指向系统 yaw 方向的读出噪声小于

$70 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ；pitch 方向的读出噪声小于 $80 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。Yaw 和 pitch 方向不同的读出噪声源自两者不同的相角转化关系。根据噪声来源，我们将读出噪声分为两部分：前端噪声和后端噪声。前端噪声是光信号干涉并被四象计光电转化后的信号噪声。后端噪声是探测器输出的电信号经 BNC 连接头、射频传输线、AD 转化器和相位计所产生的噪声。下面，我们设计实验，深入分析系统读出噪声的来源。

实验利用高信噪比的信号发生器代替光电探测器的信号输出，以压制前端噪声，分析后端噪声的影响。如图 2.35 所示，模拟信号从信号发生器输出后，同样由 BNC 转接头分为四路，并经过同样的射频传输线至相位计。最终所得数据经 DWS 相角转化为 yaw 和 pitch 的角度信息，并利用 ASD 分析和 LASD 分析，结果如图 2.36 所示。

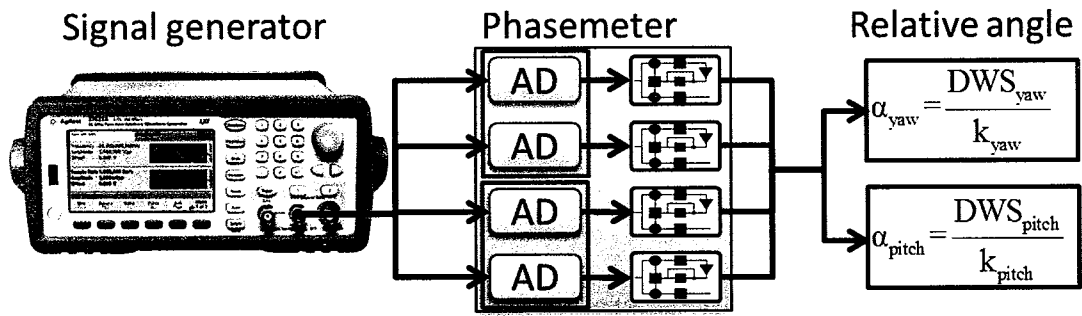


图 2.35 信号发生器替代光路系统读出噪声测量原理图。其中 Signal generator 为信号发生器，AD 为模数转换器，Phasemeter 为相位计，Relative angle 为相对夹角。

由图 2.36 可知：在 1 mHz 到 1 Hz 频段内，系统读出噪声远小于 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。具体而言，在 40 mHz 到 1 Hz 的高频段，yaw 和 pitch 方向的读出噪声低于 $1 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ；而在低于 1 mHz 到 40 mHz 的低频段，随测量频率减低读出噪声逐渐升至 $5 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 左右。其高频段噪声主要来自信号源的电子噪声，而低频段噪声主要由于不同通道间的不对称性所引入的温度漂移噪声。对比图 2.17 和 2.36 可知，实际指向系统的读出噪声主要来自前端噪声。

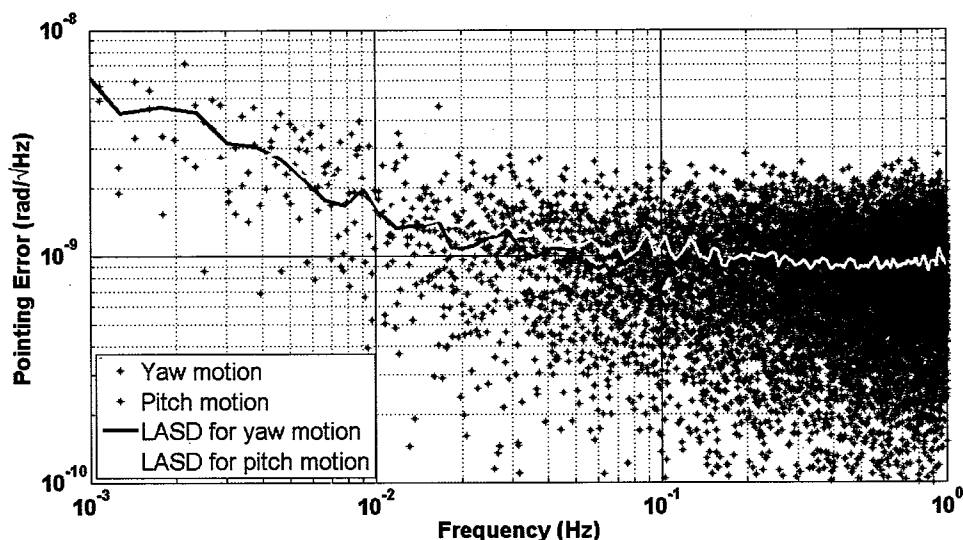


图 2.36 后端读出噪声频谱分析。其中蓝色数据点为 yaw 方向噪声 ASD 分析，绿色数据点为 pitch 方向噪声 ASD 分析，红线为 yaw 方向噪声 LASD 分析，黄线为 pitch 方向噪声 LASD 分析。

由于系统电子噪声受载波频率影响显著，所以我们将进一步分析差分频率对系统读出噪声的影响。如图 2.37 所示，实验中将控制声光调制器以改变并测量差分频率对读出噪声的影响。在声光调制器和光电探测器的响应范围内，避开系统共振频率点，实验中激光差分频率从 1 MHz 到 10 kHz 的跨度下实现读出噪声的测量。获取实验结果后，将每个差分频率对应的数据进行 ASD 和 LASD 分析。进而将各差分频率对应的平均幅度谱密度值汇总，如图 2.38 所示。

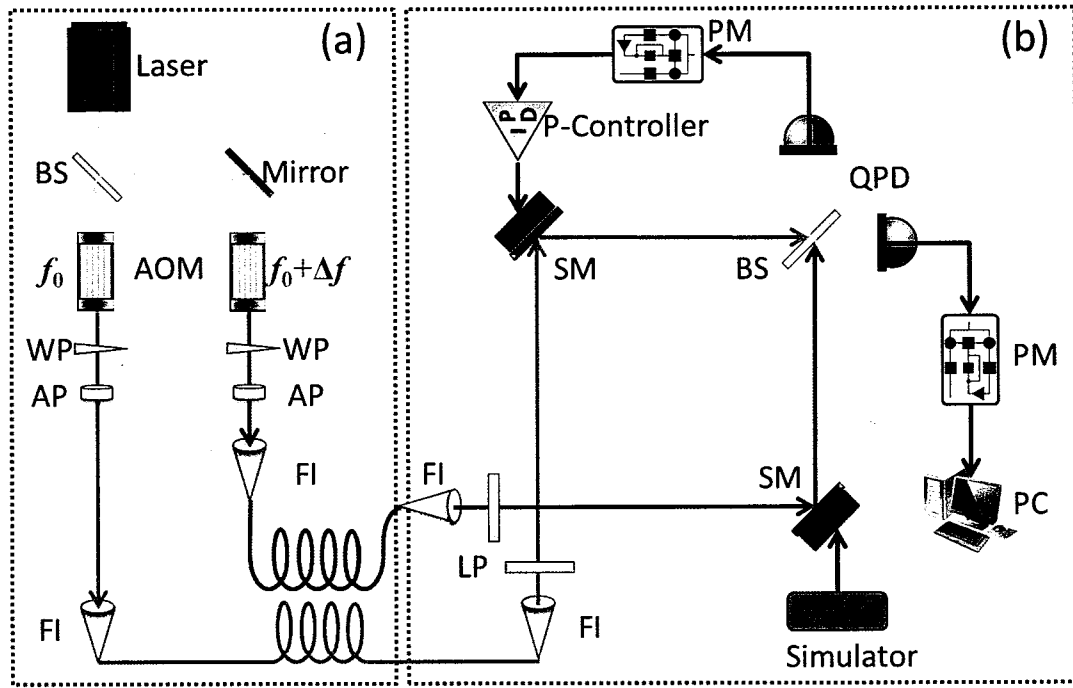


图 2.37 不同激光差分频率下读出噪声测量原理图。其中 AOM 为 声光移频器，AP 为光阑，BS 为半反半透镜，FI 为光纤耦合器，Laser 为激光器，LP 为线性偏振片，PC 为电脑，P-Controller 为指向控制器，PM 为相位计，QPD 为四象计，Simulator 为指向抖动模拟器，SM 为快速偏摆镜，WP 为楔形片。

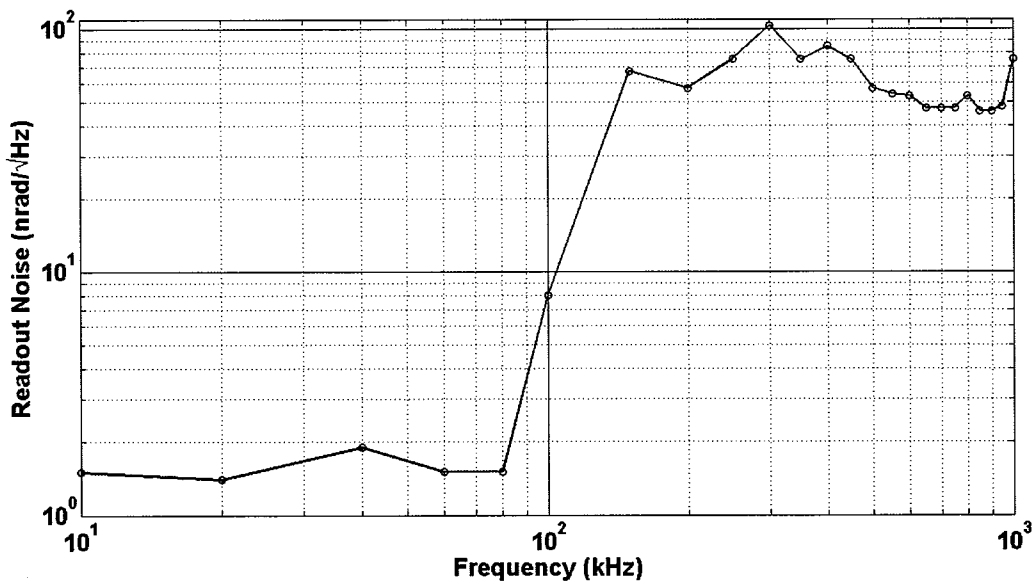


图 2.38 不同激光差分频率下系统读出噪声线性幅度谱密度分析总结图

由图 2.38 分析可知,系统读出噪声受激光差分频率影响显著。在激光差分频率为 10 kHz-80 kHz 时,系统读出噪声低于 $2\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$;当激光差分频率增加到 100 kHz 附近,系统读出噪声迅速由 $\text{nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级提升至几十 $\text{nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$;当激光差分频率在 150 kHz-1 MHz 频段时,系统读出噪声维持在 $50-100\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的水平。因此,我们希望通过优化激光差分频率,改善系统读出噪声,以提高地基系统的指向稳定性。

2.6.2 优化系统评价与分析

基于主要噪声分析,我们选择在 10 kHz 到 80 kHz 激光差分频率下,改进精密指向系统。通过优化对比,最终选择构建 40 kHz 激光差分频率下的精密指向控制系统。下面,将对优化后的地基指向系统关键性能和指向稳定性进行实验评估与分析。

1) DWS 相角关系分析

在完成地基指向系统优化后,需重新标定并评价 DWS 相角转化关系。实验中分别完成 yaw 和 pitch 方向的相角关系测量。首先,固定 pitch 方向角为零,控制 PI 偏摆镜以 50 nrad 为步进,从 $-100\text{ }\mu\text{rad}$ 到 $100\text{ }\mu\text{rad}$ 线性调控,以获取 yaw 方向相角转化关系。同理,固定 yaw 方向角为零,控制 PI 偏摆镜以 50 nrad 为步进,从 $-100\text{ }\mu\text{rad}$ 到 $100\text{ }\mu\text{rad}$ 线性调控,以获取 pitch 方向相角转化关系。为进一步评估相角关系,我们利用 Matlab 作图并对其进行线性拟合,如图 2.39。由图可知,yaw 和 pitch 的线性相关因子分别为 0.999994 和 0.999996。这说明在 $\pm 100\text{ }\mu\text{rad}$ 范围内,yaw 和 pitch 方向的激光相对夹角与 DWS 信号间有很好的线性关系,符合 DWS 理论预测。对比优化前地基系统相角关系图 2.9 可知,优化后的指向系统具备更好的线性度。由线性拟合曲线斜率可获取相角转化因子:
 $k_{\text{yaw}} \approx 5829\text{ rad/rad}$, $k_{\text{pitch}} \approx 4849\text{ rad/rad}$ 。Yaw 和 pitch 方向相角转化因子的不同主要因为激光的有效干涉区域及干涉强度的非对称性。

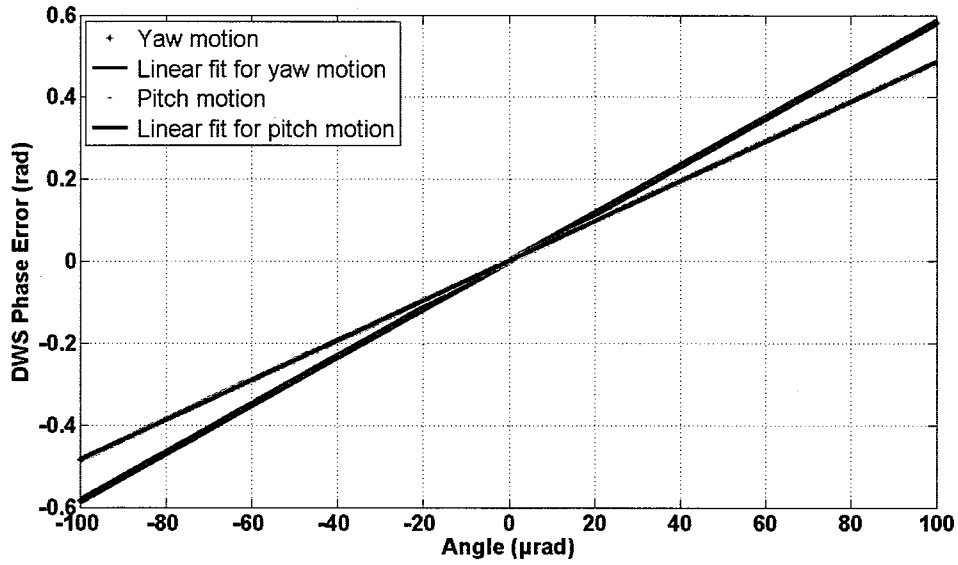


图 2.39 相角转化因子标定图。其中，蓝色数据点为 yaw 方向 DWS 数据，绿色点为 pitch 方向 DWS 数据，红线和黑线分别为 yaw 和 pitch 方向的线性拟合曲线。

2) 系统读出噪声分析

系统读出噪声是评价指向系统最佳灵敏度的重要指标。在 40 kHz 差分频率下，实验测量系统读出噪声，并将所得数据进行幅度谱密度分析和线性幅度谱密度分析，如图 2.40 所示。

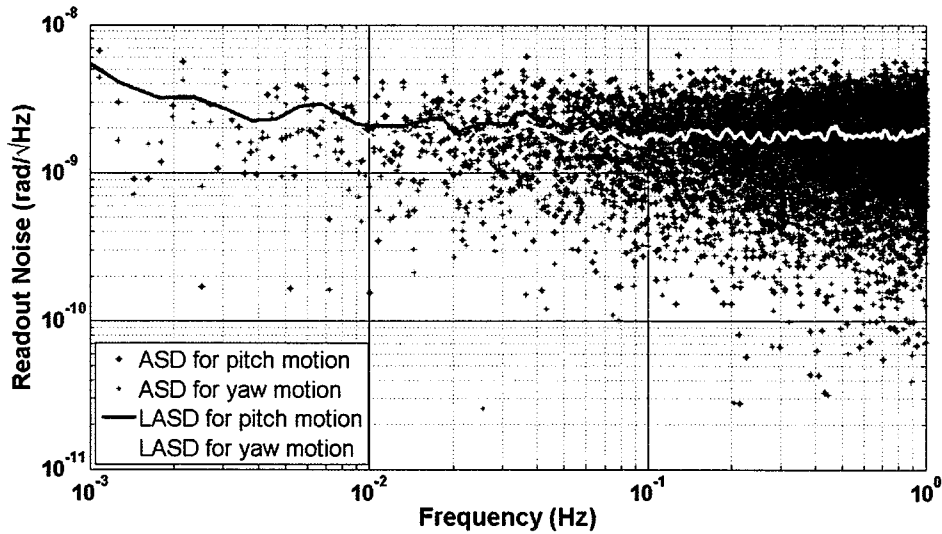


图 2.40 系统读出噪声幅度谱密度分析图。其中蓝点数据为 yaw 方向的读出噪声的幅度谱分析，绿点数据为 pitch 方向的读出噪声的幅度谱分析，红线和黄线分别为 yaw 和 pitch 方向的读出噪声的线性幅度谱分析。

由图 2.40 分析可知, 在 1 mHz-1 Hz 频段内, 精密指向系统 yaw 方向的读出噪声 $\alpha_{\text{yaw}} \approx 2.0 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$; pitch 方向系统的读出噪声 $\alpha_{\text{pitch}} \approx 2.3 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在接近 1 mHz 的低频段, 受不同通道间温度不对称性的影响, 读出噪声有所抬升。对比优化前系统读出噪声图 2.17 可知, 优化后系统读出噪声有量级上的改善, 为指向稳定性的提升奠定基础。

3) 系统指向稳定性分析

在完成地基指向系统优化和评估后, 我们将对其核心指标——指向稳定性进行测试与分析。实验中驱动入射光路中的快速偏摆镜, 使入射激光在 yaw 和 pitch 方向同时以频率 10 mHz、幅值 $5 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 做正弦运动。在充分的系统预热后, 实验整体运行 4 小时: 前 2 小时自由运行; 后 2 小时引入指向反馈控制。所得实验数据利用 ASD 和 LASD 分析, 结果如图 2.41 和 2.42 所示。

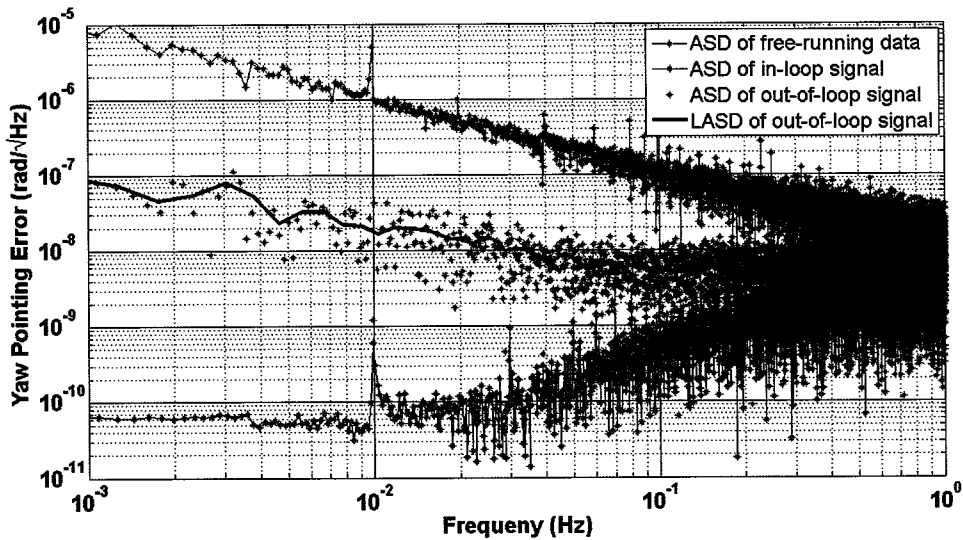


图 2.41 Yaw 方向指向控制数据频谱分析图。其中蓝色数据点为自由运行时的幅度谱密度分析, 黑色数据点为 in-loop 控制幅度谱密度分析, 绿色数据点为 out-of-loop 控制幅度谱密度分析, 红色为其线性幅度谱密度分析。

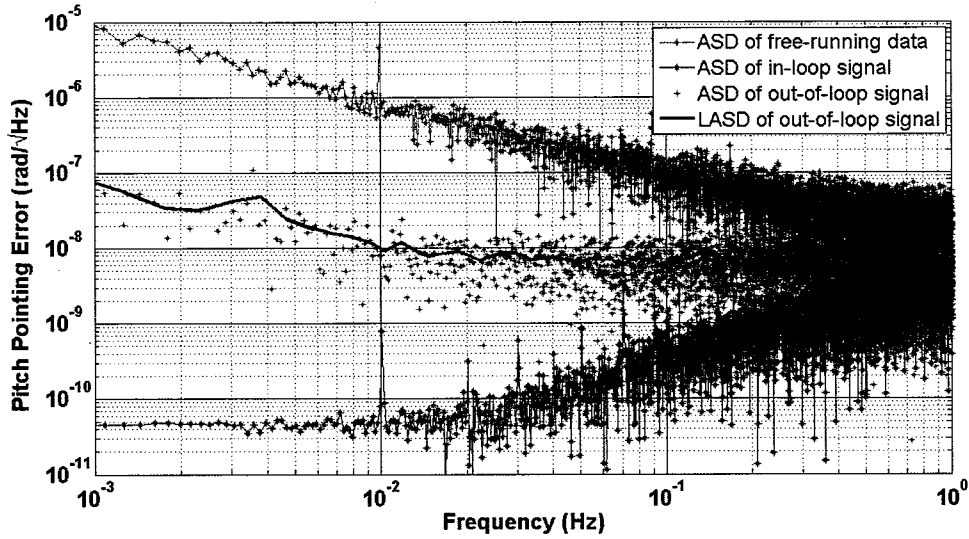


图 2.42 Pitch 方向指向控制数据频谱分析图。其中蓝色数据点为自由运行时的幅度谱密度分析，黑色数据点为 in-loop 控制幅度谱密度分析，绿色数据点为 out-of-loop 控制幅度谱密度分析，红色为其线性幅度谱密度分析。

由图 2.41 和 2.42 中蓝色数据点可知，自由运行时，指向噪声随频率减低由 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级逐渐增加到 $10 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。指向抖动模拟信号位于 10 mHz 处，幅值为 $5 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。引入指向反馈控制后，由黑色 in-loop 数据点可知，指向噪声随频率降低迅速压制到 $1 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下。地基系统的实际指向控制水平将由图中绿点数据点和红色数据线，即 out-of-loop 数据的幅度谱密度分析和线性幅度谱密度分析获取。由图可知，在 10 mHz 到 1 Hz 的高频段内，受系统电子噪声的影响和主导，yaw 和 pitch 方向的指向噪声低于 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ；在 1 mHz 到 10 mHz 频段内，受温度漂移噪声影响，随测量频率降低，yaw 和 pitch 方向指向噪声将逐渐抬升至 $90 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。与原地基系统指向控制结果图 2.18 和 2.19 对比可知，优化后地基系统精密指向控制水平提升了近一个量级。优化地基系统更好的实现 LISA 精密指向技术的原理和方法学验证，并实现 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 指向稳定性，为 LISA 空间引力波探测提供很好的技术积累。

2.7 精密指向系统的扩展应用

近年来,星间激光通信以其高传输速率和可靠性而得到迅速发展^[165-168]。精密指向技术是关乎星间激光通信成败的关键技术。若激光指向抖动噪声未得到很好的抑制,星间激光通信质量将会降低,甚至无法实现^[169-173]。为此,本节将设计集成精密指向技术的星间激光通信系统。进一步,为星间激光通信精密指向技术构建地基模拟系统,以实现原理和方法学验证,并对其动态响应和指向稳定性进行研究。

星间激光通信是一种自由空间光通信,它将激光作为信息载体,在卫星间实现通信。与微波通信相比,激光通信有以下几点优势^[166-168, 173-175]:一是传输速率高,激光(频率约 10^{14} Hz)比微波(频率约 10^9 Hz- 10^{11} Hz)有更高的载波频率;二是可靠性高,抗电磁干扰能力强;三是功耗低,激光的发散角远小于微波,所产生的功率损失更小;四是结构紧凑,激光通信具有更加小巧、轻便的激光收发装置。

星间激光通信因其显著的特点得到国际研究机构的重视和大力发展。尤其在2000年以后,激光通信进入蓬勃发展的阶段。欧洲、美国和日本先后展开研究,并取得了突破性的进展。欧空局 SILEX (Semiconductor Laser Interferometer Link Experiment)系统从1985年开始实施,用于验证星间激光通信的关键技术^[176-187]。2001年,搭载 SILEX 通信终端的 ARTEMIS 高轨卫星与法国低轨卫星 SPOT4 实现了首次单向星间激光通信(如图 2.43)。它在相距 40000 km 的星间距上实现了 50 Mbps 的通信速率,其误码率为 10^{-6} ^[185-190]。2005年,搭载 SILEX 通信终端的 ARTEMIS 高轨卫星又与日本搭载 LUCE 卫星终端的 OICETS 低轨卫星成功建立双向激光通信链路(如图 2.44)。它在 45000 km 工作距上实现了 2 Mbps 的上行通信速率和 50 Mbps 的下行通信速率,其误码率仅为 10^{-7} ^[184, 191-198]。德国的 TerraSAR-X 遥感卫星搭载的 LCTSX 激光通信终端采用零差二进制相移键控相干探测技术^[199-201]。2008年,它与美国的 NFIRE 卫星在 5000 km 的工作距上,实现双向 5.6 Gbit/s 的超高速率星间激光通信^[202-206] (如图 2.45)。

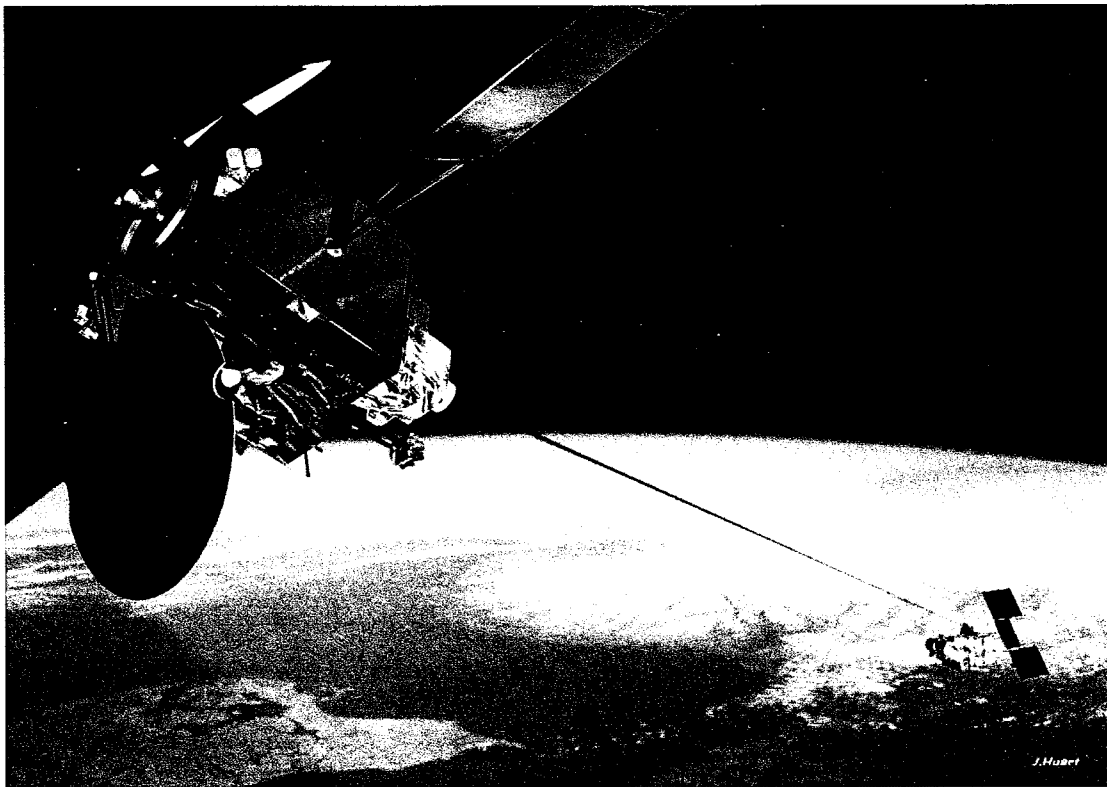


图 2.43 ESA 高轨卫星 ARTEMIS 与法国低轨卫星 SPOT4 间激光通信示意图^[207]

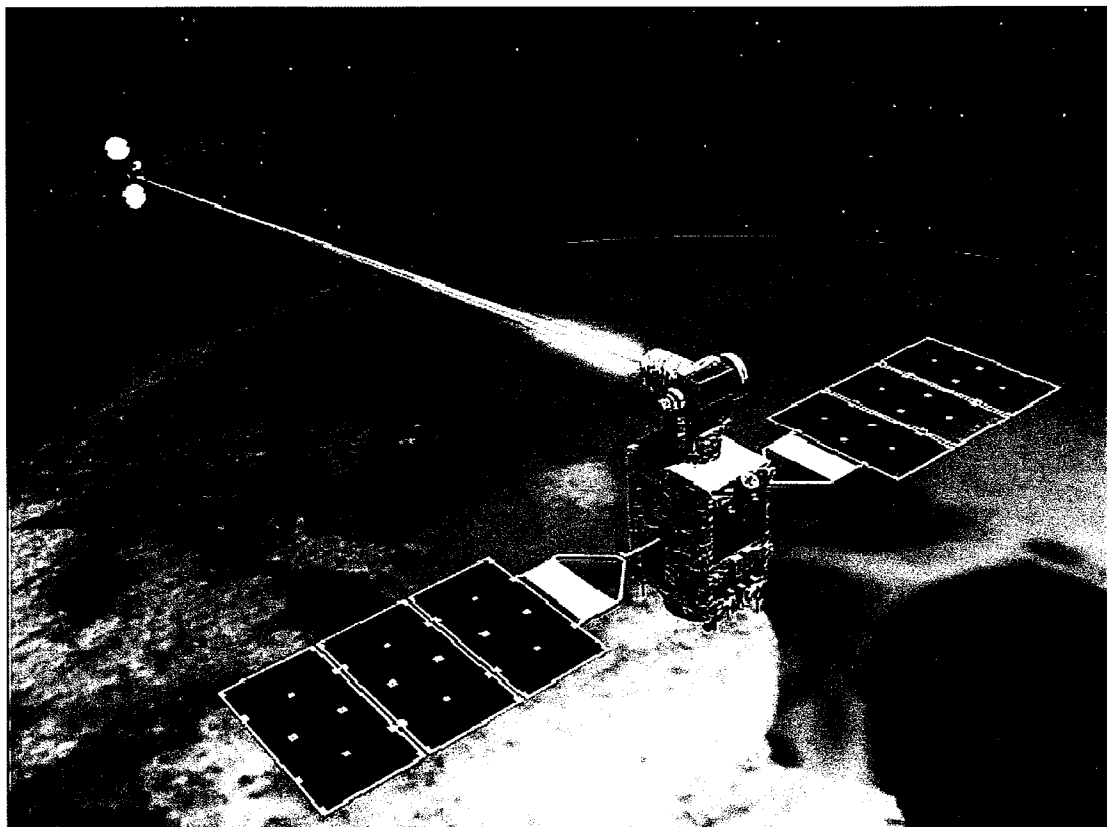


图 2.44 SILEX 卫星终端与日本 OICETS 卫星通信终端 LUCE 成功建立通信链路示意图^[208]

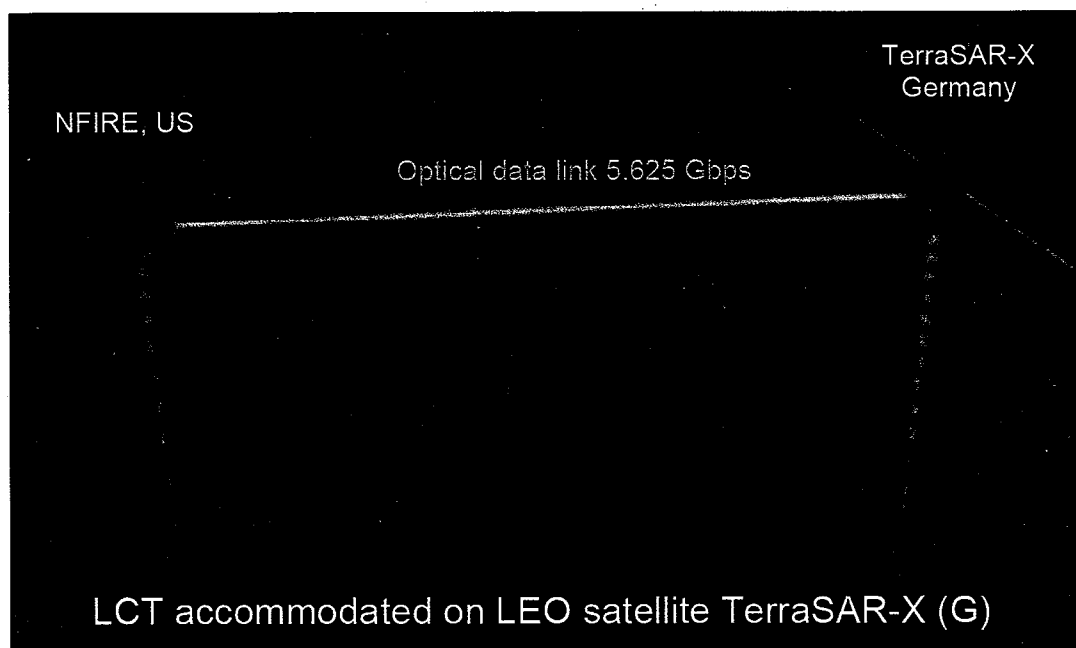


图 2.45 搭载卫星通信终端的德国的 TerraSAR 卫星与美国 NFIRE 卫星间通信链路示意图^[209]

星间激光通信同样引起国内研究机构的兴趣，并从上世纪 90 年代开始相关关键技术的研究。其中电子科技大学（激光通信系统设计与仿真），长春理工大学（机载和地面激光通信及其通信网络建立），哈尔滨工业大学（星间与星地激光通信），华中科技大学（对潜激光通信），北京大学（星间光通信窄带滤波技术）和中国科学院（激光通信大气传输特性、自适应激光通信）等大学和研究机构开展卓有成效的研究并取得一定的成果^[210-213]。

相较于星间微波通信，激光通信出射激光的发散角仅有 $10\ \mu\text{rad}$ 左右。这一特点使得激光通信比微波通信具备更低的功率损耗和更好的保密性，但同时也增大了激光捕获和星间激光链路构建的难度。在复杂的空间环境中，卫星受太阳风、太阳辐射、宇宙射线、残余电磁场、静态引力失衡和结构间互扰等非保守力作用而发生抖动。虽然被扰动抑制系统最大限度的压制，残余抖动噪声仍会耦合到携带通信数据的出射激光。经过长距离传播后，当激光被远端航天器接收时，激光指向抖动将耦合并主导通信噪声。若不加以抑制，将降低星间激光通信质量，甚至使其无法实现^[166-173]。要想成功实现星间长基线、高速率激光通信，激光指向抖动需压制到亚微弧度量级^[174, 191, 214-216]。为此，我们将设计耦合精密激光指向控制技术的星间激光通信系统，压制指向噪声，并实现高速率、高质量星间激光

通信。

2.7.1 星间激光通信精密指向系统设计

星间激光通信指向控制可分为三个过程：信号捕获、粗指向和精密指向。信号捕获和粗指向调控用于构建基本的星间激光通信链路。然而，要实现高速率、低误码率星间激光通信，必须对激光指向抖动进行精密控制。为此，基于 DWS 测角技术，我们设计如图 2.46 所示耦合精密指向技术的星间激光通信原理图。

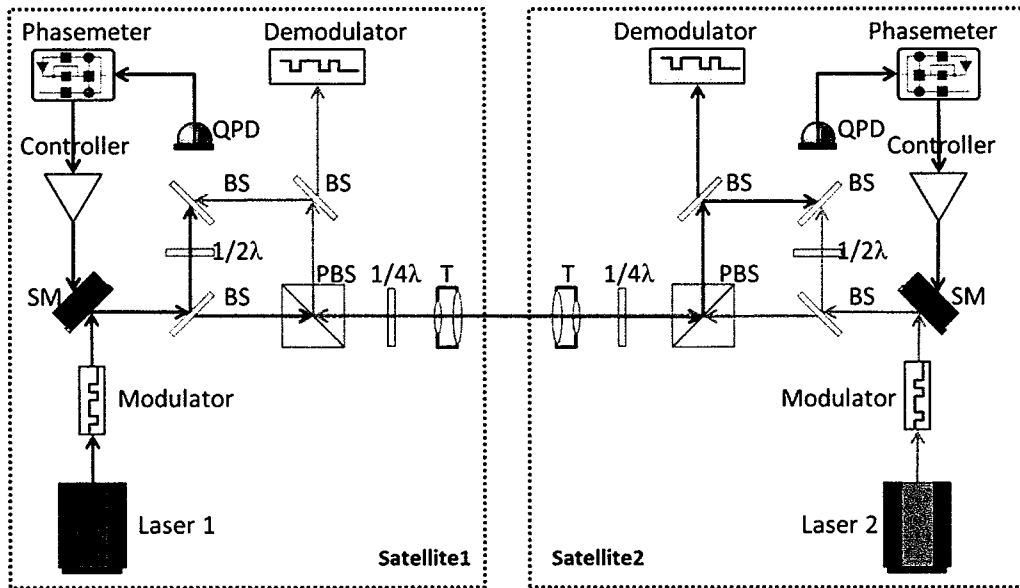


图 2.46 星间激光通信原理图，其中 BS 为分光镜，Controller 为指向控制器，Demodulator 是信号解调器，Laser 为激光器，Modulator 为信号调制器，PBS 为偏振分光镜，Phasemeter 为相位计，QPD 为四象限光电探测器，Satellite 为航天器，SM 为偏摆镜，T 为望远镜， $1/4\lambda$ 为 $1/4$ 波片， $1/2\lambda$ 为 $1/2$ 波片。

如图 2.46 所示，航天器 1 上激光器 1 发出 P 偏振激光，经信号调制器后携带通信信号。被偏摆镜反射，部分激光透过分光镜，并在偏振分光镜处完全透射后，由本地望远镜发射。经过长距离星间传播和两个 $1/4$ 波的作用，被航天器 2 接收后，入射激光为 S 偏振，并被偏振分光镜完全反射。在经过分光镜时，部分激光透射用于通信数据解调，部分激光反射，并与本地激光干涉。两束激光的相对角度抖动，被基于 DWS 技术的角度敏感器测得，并反馈控制航天器 2 的激光出射方向，压制指向抖动噪声信号。同理，航天器 2 上激光的出射与上述过程类

似。在到达航天器 1，并与其激光干涉后，测得两束激光的指向抖动，控制本地激光方向，以实现指向抖动噪声的压制。航天器 1、2 上的两套精密指向控制系统的协同工作，能有效压制激光指向抖动噪声，保证高速率、高质量星间激光通信的正常进行。

2.7.2 地基指向系统评价与分析

基于星间激光通信精密指向技术的物理图像和技术需求，本节构建地基模拟系统，实现其原理和方法学验证，并对所构系统的整体性能进行评估与分析。

1) DWS 测角评价与分析

为研究星间激光通信精密指向控制系统在大角度偏差时动态响应，我们将地面模拟系统的工作量程拓宽到 $\pm 300 \mu\text{rad}$ 。为准确测量和控制 $\pm 300 \mu\text{rad}$ 量程内的激光偏角，DWS 测角系统需对此工作距内的相角转化关系进行精密标定和评价。首先，固定 pitch 角为零，控制 PI 偏摆镜使反射激光以 50 nrad 为步进，沿 yaw 方向从 $-300 \mu\text{rad}$ 到 $300 \mu\text{rad}$ 线性增加，以获取 yaw 方向相角转化关系。同理，固定 yaw 角为零，控制 PI 偏摆镜使反射激光以 50 nrad 为步进，沿 pitch 方向从 $-300 \mu\text{rad}$ 到 $300 \mu\text{rad}$ 线性增加，以获取 pitch 方向相角转化关系。所得激光相对夹角与 DWS 信号间相对关系的数据如图 2.47 所示。

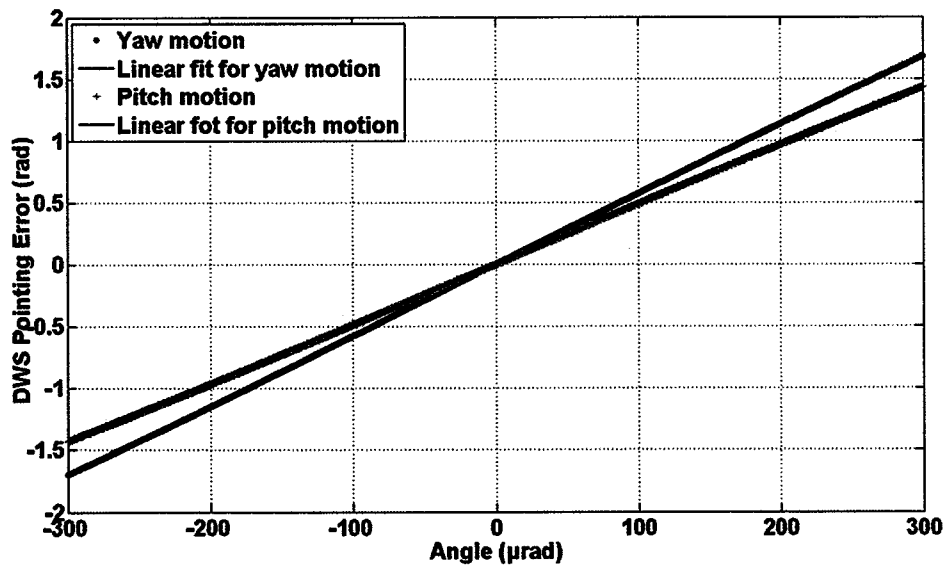


图 2.47 相角转化因子标定图。其中黑色数据点为 yaw 方向 DWS 数据，绿色点为 pitch 方向 DWS 数据，红线和绿线分别为 yaw 和 pitch 方向的线性拟合曲线。

如图 2.47, 利用 Matlab 对所得相角转化关系进行线性拟合, 可得 yaw 和 pitch 和线性相关因子分别为 0.99995 和 0.99996, 呈现出很好的线性关系。这说明在 $\pm 300 \mu\text{rad}$ 范围内, yaw 和 pitch 方向的激光相对夹角与 DWS 信号间有很好的线性关系, 符合 DWS 理论预测。进一步, 由线性拟合曲线斜率可获取相角转化因子: $k_{\text{yaw}} \approx 5689 \text{ rad/rad}$, $k_{\text{pitch}} \approx 4815 \text{ rad/rad}$ 。良好的线性度和高相角转化因子为星间激光通信精密指向技术的研究提供保障。

2) 系统读出噪声评价与分析

系统读出噪声是反映地基指向系统最佳灵敏度的重要指标。如图 2.16 所示, 为测量系统读出噪声, 将探测器的信号均分为四路, 并独立、同时由相位计测相。利用 DWS 相角转化关系, 将所得四路相位数据转化为激光相对角度信息。利用 Matlab 对角度信息进行幅度谱密度分析和线性幅度谱密度分析, 如图 2.48 所示。

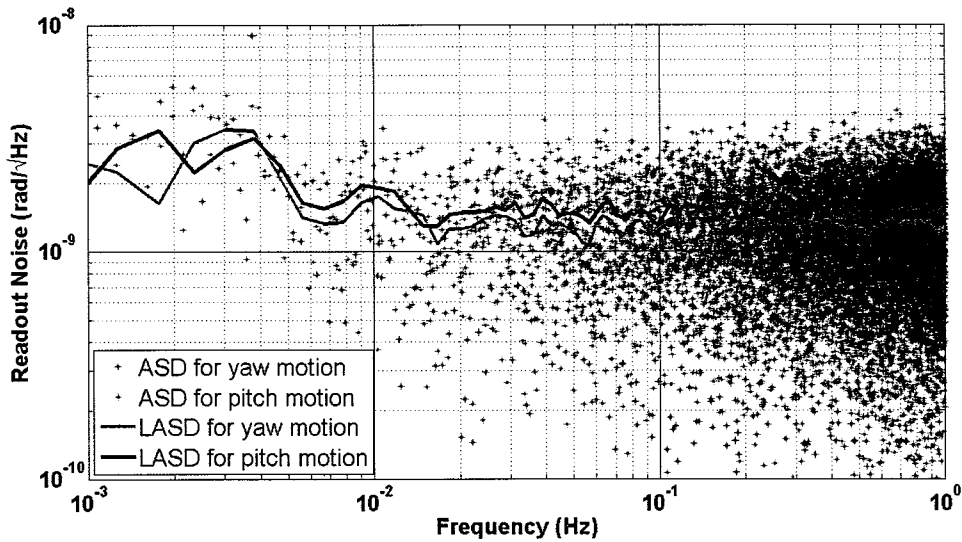


图 2.48 系统读出噪声频谱分析图。其中蓝色数据点为 yaw 方向读出噪声幅度谱密度分析, 红线为其线性幅度谱密度分析; 绿色数据点为 pitch 方向读出噪声幅度谱密度分析, 黑线为其线性幅度谱密度分析。

由图 2.48 系统读出噪声分析可知, 在 10 mHz-1 Hz 频段, yaw 方向和 pitch 方向读出噪声均低于 $2 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$; 在 1 mHz-10 mHz 频段, 由于通道间的器件不对称受温度噪声的影响, 系统读出噪声抬升至 $4 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 附近。整体而言, 系

统读出噪声水平远低于 $10\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，为精密指向控制提供基础。

2.7.3 地基指向实验结果与讨论

通过上节系统性能评估可知，所构地基指向模拟系统具备良好的 DWS 测角性能和相位读出性能。本节将针对影响星间激光通信的两项精密指向控制指标——动态响应和指向稳定性，设计实验并对结果展开讨论。

1) 系统动态响应

精密指向控制系统的动态响应是关系星间激光通信的重要指标。为此，本实验调制入射光路快速偏摆镜，使入射激光在 yaw 和 pitch 方向分别存在大于 $100\text{ }\mu\text{rad}$ 的角度偏置。自由运行 20 s 后，开启闭环指向控制系统，其指向控制效果如图 2.49 和图 2.50 所示。

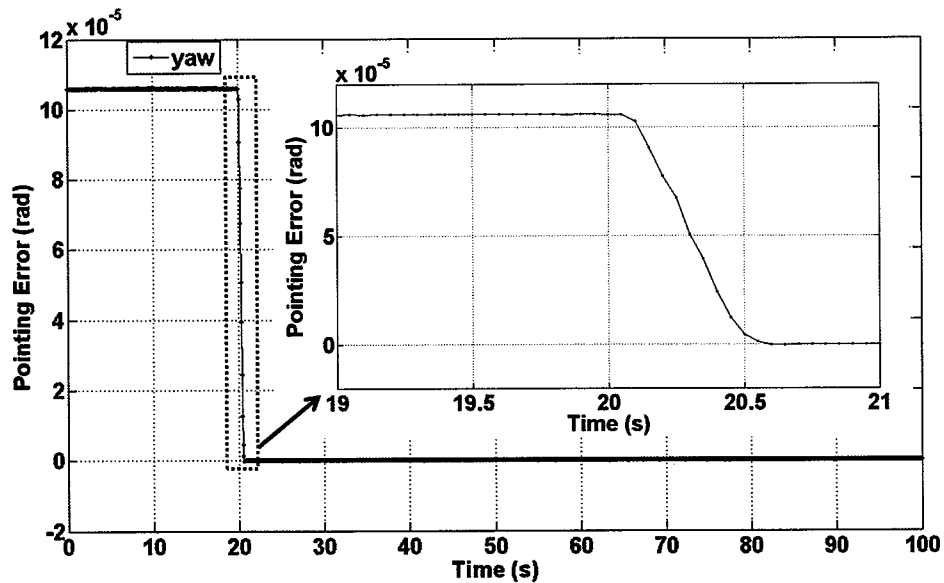


图 2.49 Yaw 方向 $100\text{ }\mu\text{rad}$ 角度偏置时的指向控制效果

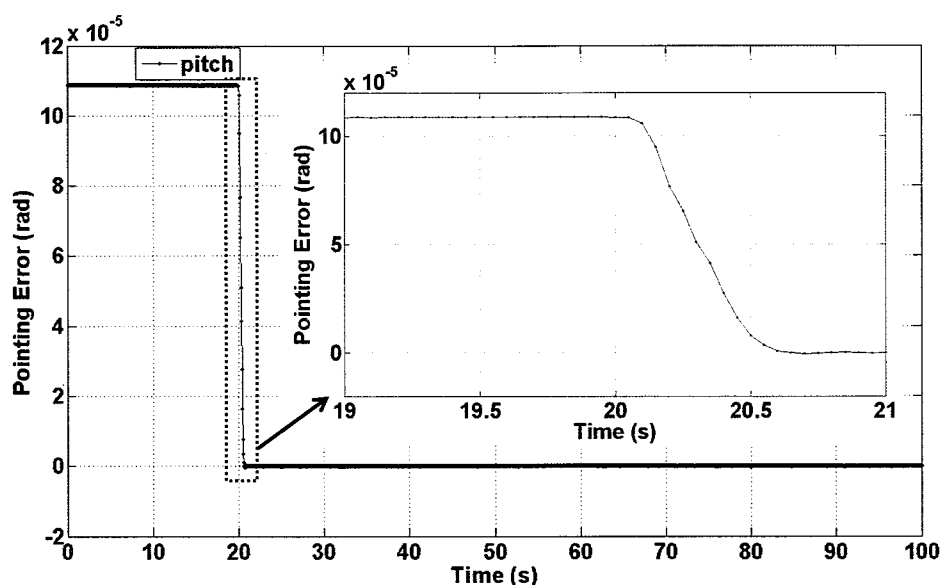
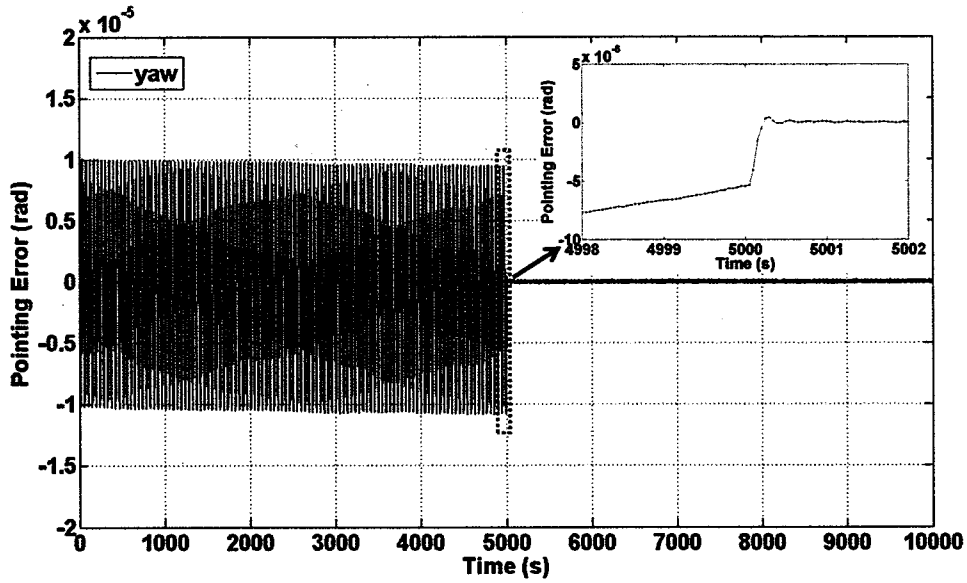
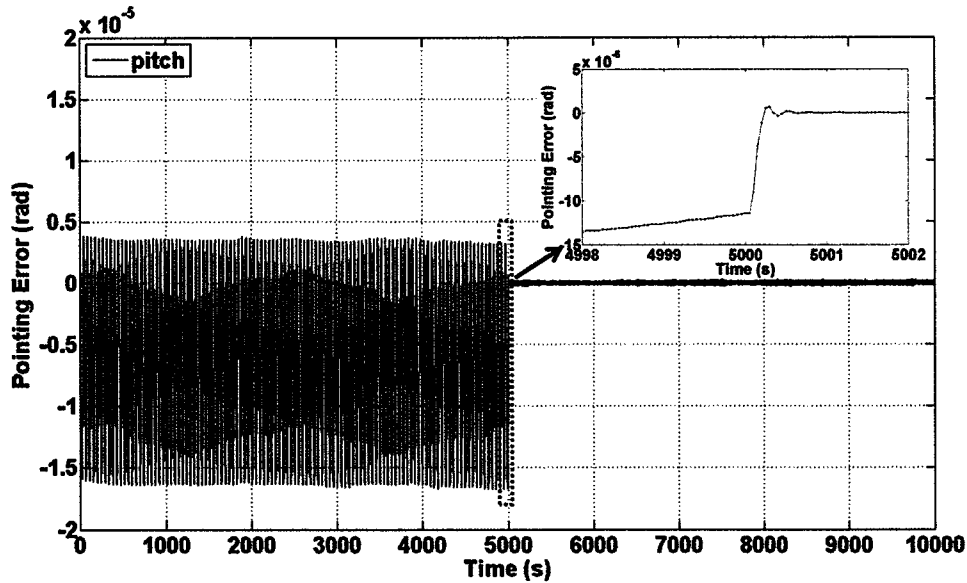


图 2.50 Pitch 方向 $100\ \mu\text{rad}$ 角度偏置时的指向控制效果

由图 2.49 和图 2.50 可知, 在 0-20 s 内, yaw 方向和 pitch 方向的角度偏置均大于 $100\ \mu\text{rad}$ 。开启指向反馈控制系统后, yaw 和 pitch 方向的指向偏置在 0.5 s 内迅速压制到优于 $100\ \text{nrad}$ 水平。这说明地基指向控制系统具备良好的大角度动态响应。

2) 系统指向稳定性

激光指向稳定性直接影响星间激光通信的误码率, 决定高速率激光通信的成败。要想实现高速率、高质量星间激光通信, 需达到亚微弧度量级的指向稳定性^[214-217]。为此, 我们将设计实验分析所构地基系统的指向稳定性。实验中, 调制入射光路快速偏摆镜, 使入射激光方向以 $20\ \mu\text{rad}$ 的峰峰值做正弦运动。自由运行 5000 s 后, 开启指向反馈控制系统, 其控制效果如图 2.51 和 2.52 所示。

图 2.51 Yaw 方向 20 μrad 指向抖动控制图图 2.52 Pitch 方向 20 μrad 指向抖动控制图

由图 2.51 可知，在 yaw 方向，指向控制系统将抖动噪声的均方根误差由 7.1 μrad 压制到 40 nrad。由图 2.52 可知，在 pitch 方向，指向控制系统将抖动噪声的均方根误差由 7.0 μrad 压制到 62 nrad。地基指向控制系统将指向噪声压制到优于亚微弧度量级，达到星间激光通信对指向稳定性的要求。

综上所述，所构地基指向模拟系统具备良好的动态响应和指向稳定性，为星间激光通信精密指向技术的研究奠定基础。

2.8 本章小结

本章针对 LISA 精密指向控制的需求,设计并构建地基 DWS 精密指向模拟系统。所构地基模拟系统实现精密指向原理和方法学验证,并在 1 mHz-1 Hz 频段内实现 $100\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 指向稳定性的演示。进一步,通过对 DWS 测角模块、控制模块、驱动模块和干涉模块的噪声分析,发现读出噪声是限制地基指向系统表现的主要噪声。为此,在 10 kHz-1 MHz 差频内测量和分析读出噪声,并优选构建 40 kHz 精密指向系统。在优化的精密指向系统下,实现优于 $10\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的指向稳定性。另外,首次将基于 DWS 技术的精密指向系统应用于星间激光通信链路的设计,并构建地基模拟系统用于方法学验证。该系统在 0.5 s 内将大于 100 μrad 的指向偏置迅速压制到优于 100 nrad; 将 20 μrad 的指向抖动控制到 50 nrad 左右。这说明所构系统具备良好的动态响应和指向稳定性,为精密指向技术的控制应用奠定基础。

第三章 弱光锁相系统的地面实现和深化模拟

3.1 引言

500 万公里的星间距和 40 厘米直径的望远镜，使弱光锁相成为 LISA 引力波探测的必备关键技术。为此，本章将基于普克尔电光相位调制技术，设计构建地基锁相模拟系统。进一步，分析限制系统表现的主要噪声，并提出抑噪方案。在优化的地基模拟系统下，实现锁相控制精度的提升和 LISA 锁相控制的方法学验证。最后，鉴于地基弱光锁相模拟系统的硬件限制，为深化 LISA 弱光锁相模拟水平，本章将依据弱光锁相物理图像，基于 Matlab/Simulink 平台，设计构建 LISA 弱光锁相软件模拟系统，并分析各类 LISA 噪声对弱光锁相的影响和限制。

3.2 实验设计与系统构建

清晰的物理图像是设计与构建 LISA 弱光锁相地基模拟系统的前提。为此，如图 3.1 所示，我们以空间长基线外差式激光干涉测距系统为例，分析并突出弱光锁相技术的重要性。

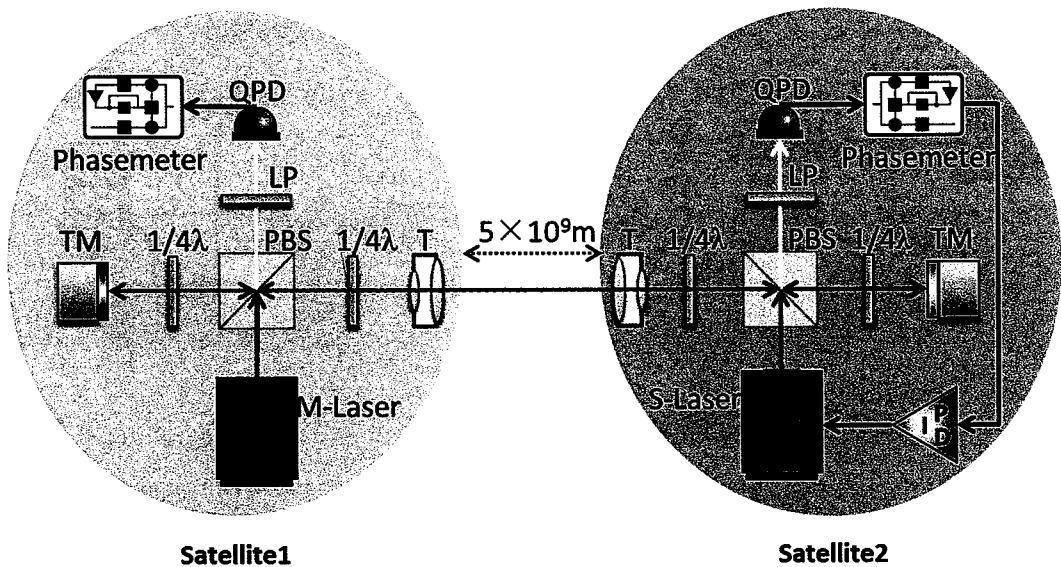


图 3.1 LISA 弱光锁相控制技术原理图。其中 LP 为线性偏振片，M-Laser 为主激光器，PBS 为偏振分光镜，Phasemeter 为相位计，PID 为锁相控制器，QPD 为四象限光电探测器，Satellite 1 为航天器 1，Satellite 2 为航天器 2，S-Laser 为从动激光器，T 为望远镜，TM 为测试质量， $1/4\lambda$ 为 $1/4$ 波片。

如图 3.1 所示, 航天器 1 中, 携带大部分功率的主激光经望远镜发往航天器 2。经过约 500 万公里传播后, 激光半径发散到公里量级。受限于望远镜的尺寸, 仅有极少部分传播激光被航天器 2 接收。对 LISA 而言, 1 W 的出射激光中仅有 100 pW 量级的光强被远端航天器接收。若不经特殊处理直接反射回原航天器, 干涉仪终端接收光强仅有 10 zW 量级, 无法实现光学测量, 引力波探测更无从谈起。为此, 远端航天器中引入弱光锁相技术, 将本地激光与接收到的传播激光相位锁定。进而, 利用高功率的本地激光携带原传播激光的相位信息, 发射到原航天器, 并与主激光干涉。如此, 可实现双星测试质量间相对距离的精密测量, 以反演引力波信号。

3.2.1 系统设计

基于上述 LISA 弱光锁相物理图像, 我们设计如图 3.2 所示的地基模拟系统。该系统用于实现 LISA 弱光锁相技术的原理和方法学验证, 并测试和评估反馈系统的锁相精度。

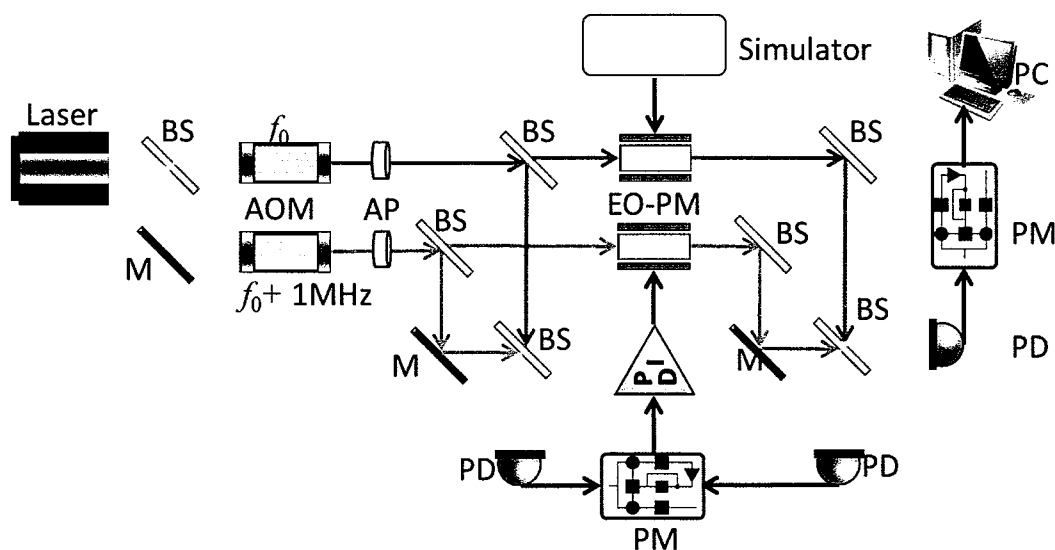


图 3.2 激光锁相技术地面模拟系统原理图。其中 AOM 为 声光移频器, AP 为 光阑, BS 为半反半透镜, EO-PM 为电光相位调制器, M 为反射镜, PID 为锁相控制器, PD 为光电探测器, PM 为相位计, Simulator 为信号模拟器, WP 为楔形片。

LISA 弱光锁相的本质是实现传播激光和本地激光的相位锁定，而非两台激光器的锁频。因此，地基模拟实验的核心在于构建反馈控制系统，利用激光相位调制实现入射激光和本地激光的相位锁定。本章采取单激光器和一组声光调制器，用于生成两束具有稳定频差的干涉光源；利用普克尔电光相位调制技术构建相位调制模块，实现激光相位的精密调控。如图 3.2 所示，激光出射后，首先经过分光镜形成两束等光强激光。通过一组声光调制器后，一级布拉格衍射光被光阑选择，其它衍射光和杂散光被有效隔离。此时，红线标记激光束用于模拟传播激光；绿色标记激光束用于模拟本地激光。经过一组光学镜片，从主光路中分束的两激光交汇，形成参考干涉仪并用于相位参考。主光路中入射激光经过由模拟器控制的电光调制系统，用于模拟目标信号。本地激光经过由锁相反馈系统调控的电光调制器，用于跟踪入射激光相位。两束激光交汇形成干涉，其相位误差信号被读出系统测量，并用于反馈控制本地激光相位以实现两束激光的锁相。同时，干涉信号被另一读出系统测量并频谱分析，以评估地基模拟系统的实际锁相控制能力。

3.2.2 系统构建

地基弱光锁相系统的构建是在外围支撑系统的基础上完成的。如图 3.3 所示，外围支撑系统建立在百级净化间内，利用二级隔振系统压制振动噪声，通过亚克力隔离罩减弱空气扰动和温度漂移的影响。系统实物构建如图 3.4 所示。

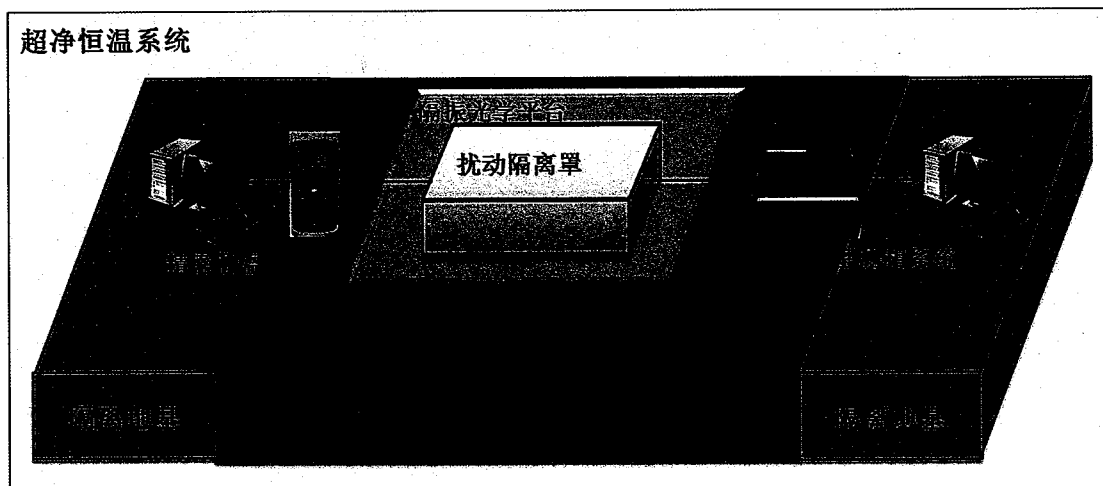


图 3.3 外围支撑系统图

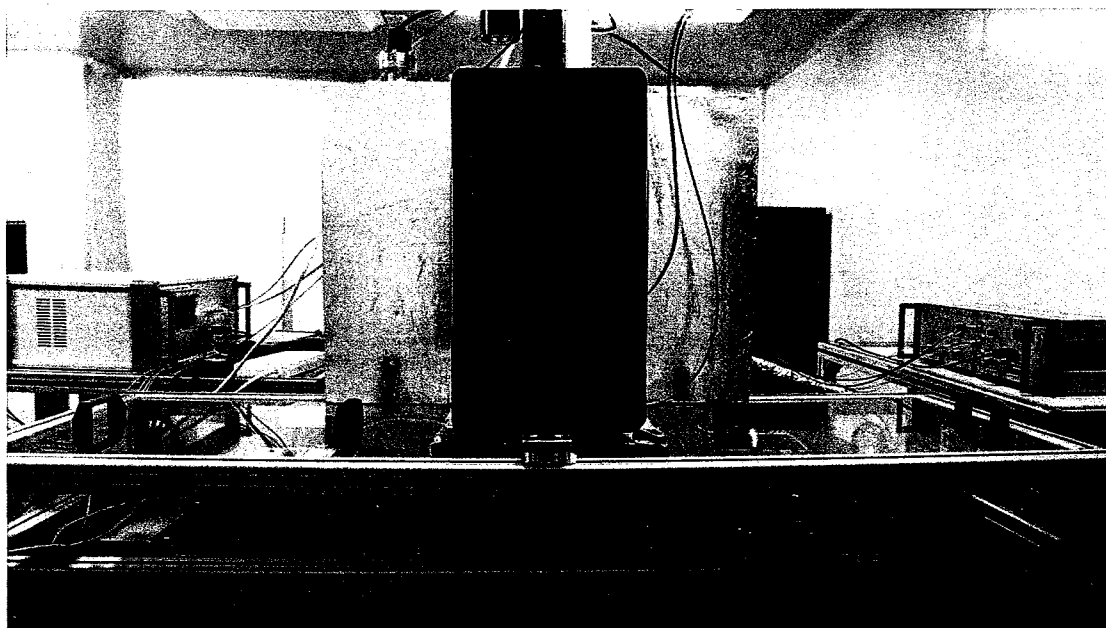


图 3.4 外围支撑系统实物图

良好的外围支撑系统为地基弱光锁相控制的实现提供稳定的外部环境。在此基础上，根据光路原理图 3.2，我们在扰动隔离罩内构建了地基弱光锁相模拟系统，如图 3.5 所示。

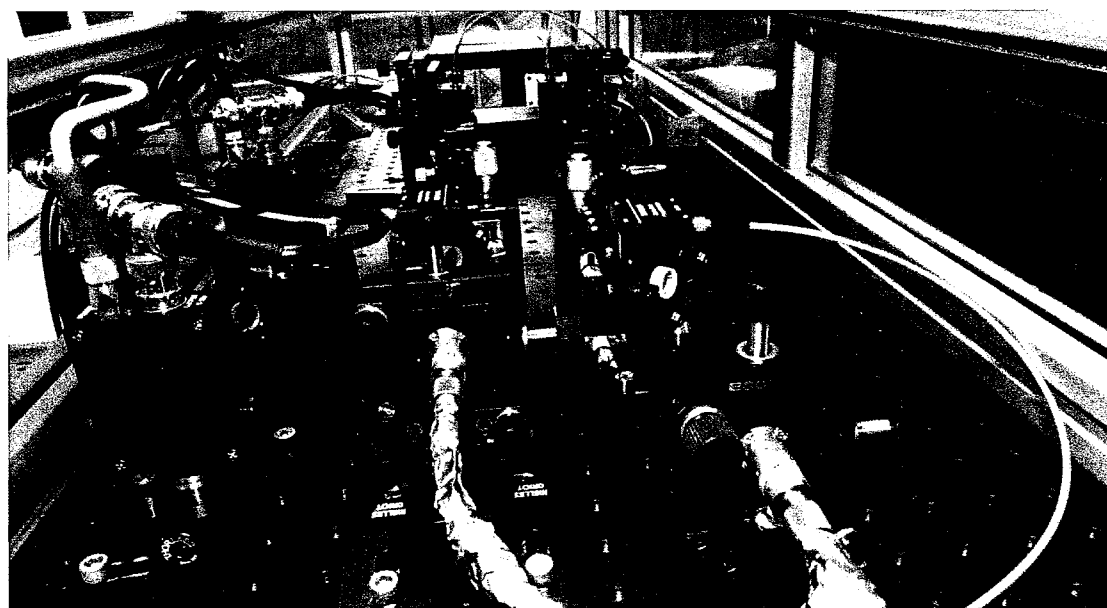


图 3.5 激光锁相技术地面模拟系统实物图

3.3 地基锁相系统评价与分析

在实现地基弱光锁相模拟系统的设计和构建后，本节将测试并分析其核心功

能模块，以实现对所构系统的性能评估。

3.3.1 电光调相模块评价与分析

高精度的相位调制是精密弱光锁相的前提和基础。电光调相模块是弱光锁相控制技术地面模拟实验的核心制动模块。如图 3.6 所示，它利用线性电光效应（普克尔效应），将经过电光调制器的入射激光 $E_{\text{in}} = A\cos(\omega t + \varphi_0)$ 进行纯相位调制，由此输出激光变为 $E_{\text{out}} = A\cos(\omega t + \varphi_0 + m_\varphi E_m)$ ，其中 m_φ 为电光相位调制深度， E_m 为调制电压。

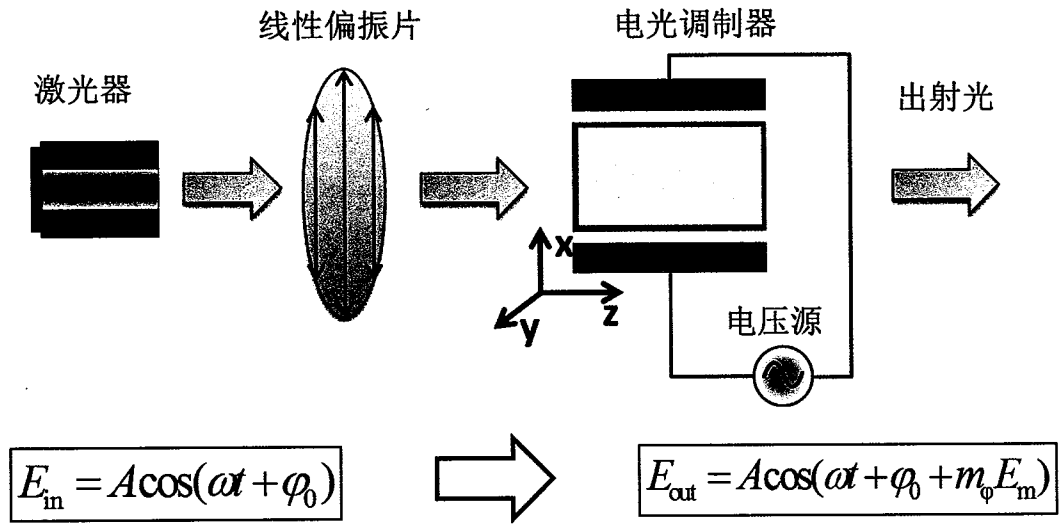


图 3.6 电光相位调制原理图

为获取良好的电光相位调制效果，如图 3.7 所示，本章将采用 Thorlabs 生产的调制波长范围：900 nm-1250 nm 的 EO-PM-NR-C2 电光相位调制器。

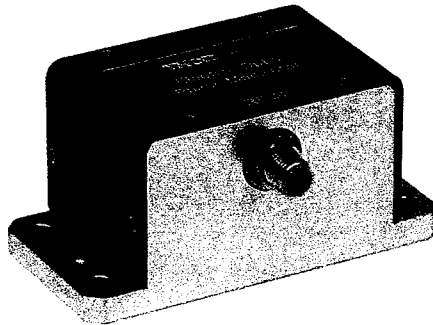


图 3.7 Thorlabs-EO-PM-NR-C2 电光相位调制器

电光相位调制深度 m_ϕ 是调制电压和激光相位间纽带，关系到弱光锁相控制的准确性。虽然 EO-PM-NR-C2 电光相位调制器给出理想相位调制深度，但实际值将发生偏离。为此，我们设计实验对电光相位调制深度进行测量、标定和评估。在系统充分预热后，控制本地光路程控电压源从 0 V-100 V 线性增加，测量数据如图 3.8 所示。

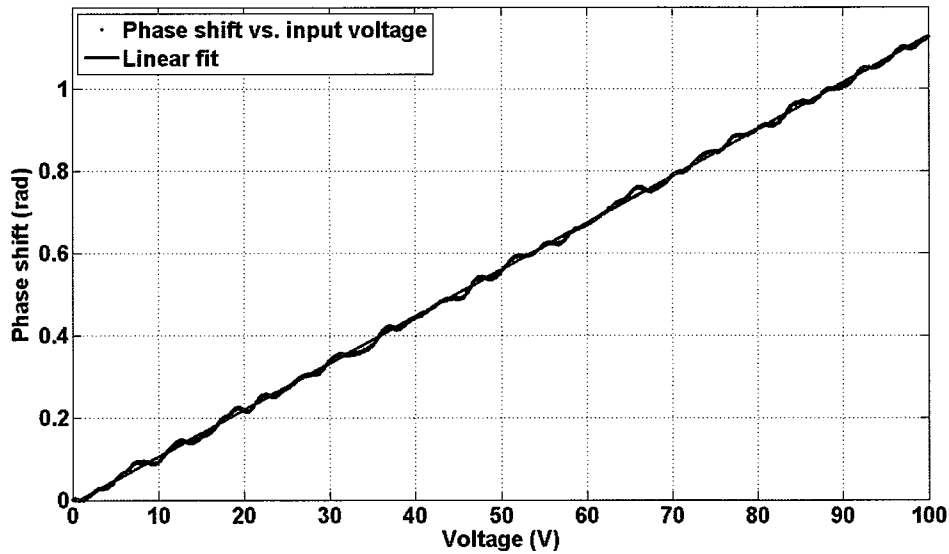


图 3.8 电光相位调制深度标定图。其中蓝色数据点为电压驱动下电光相位调制，红线为其线性拟合。

由图 3.8 可知，通过 Matlab 对电压-相位关系的线性拟合，可得电光调制系数 m_ϕ 为 11.37 mrad/V。同时，可知线性拟合相关系数 R^2 为 0.9995，显示了很好的线性相关度，为弱光锁相系统的精密调相提供前提。另外，图 3.8 中蓝色数据点围绕红色线性拟合曲线上下波动。这一波动误差主要来自外界温度漂移对光学平台和光学器件的扰动。

3.3.2 反馈控制模块评价与分析

反馈控制模块是整个地基弱光锁相模拟系统灵魂。本章在优化的 PID 控制方法的基础上，结合实际系统噪声分布，对弱光锁相系统进行控制。为有效调控激光相位，构建反馈控制回路，实现入射激光和本地激光的相位锁定，我们设计如图 3.9 所示的系统控制流程。

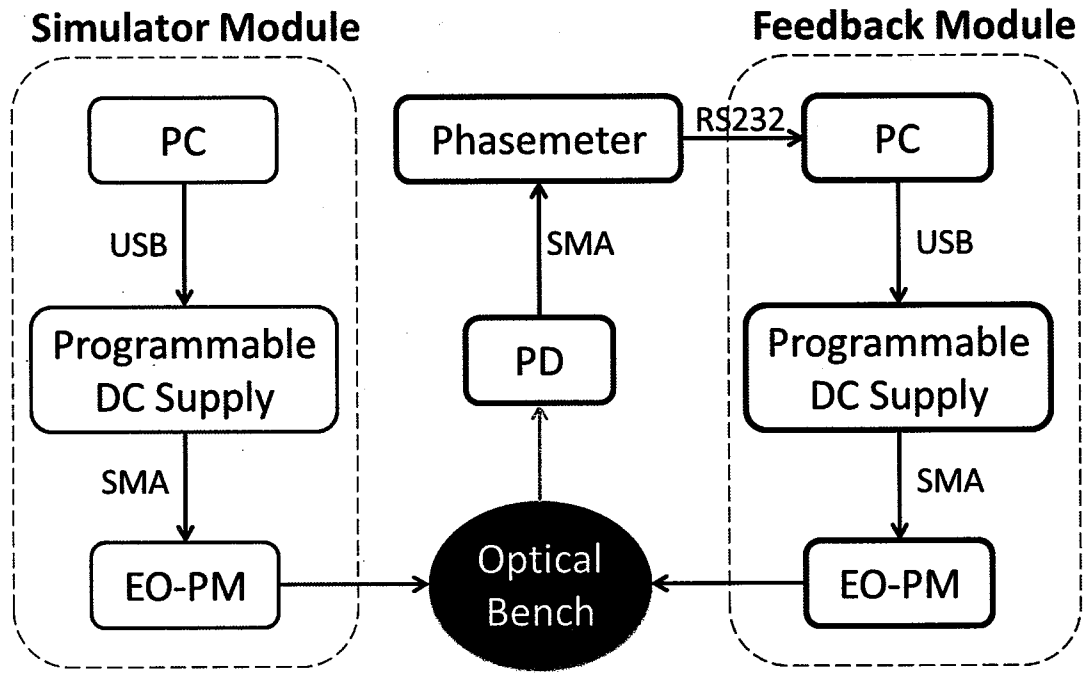


图 3.9 空间激光干涉仪弱光锁相技术地面模拟系统控制流程图。其中，EO-PM 为电光相位调制器，Feedback Module 为反馈控制模块，Jitter Module 为抖动模拟模块，PD 为光电探测器，Phasemeter 为相位计，Programmable DC Supply 为可编程直流电压，SMA 为射频连接线，USB 为串口通用总线。

如图 3.9 所示，绿色框图为入射激光模拟模块。它通过电脑中 Labwindows 所编写的控制软件，命令可编程直流电压源，控制电光相位调制器，以实现入射激光的模拟。入射激光与本地激光在光路中干涉，其相对相位被由光电探测器和相位计组成的读出系统所探测。图中红框所示为锁相反馈控制模块，它借助电脑中的控制软件，利用接收到的相位误差信号，通过优化的 PID 控制算法，命令本地可编程控制直流电压源，控制本地光路中的电光调制器，实现本地激光相位对入射激光相位的跟踪锁定。

控制回路各个模块的响应时间将综合影响并限制地基锁相系统的控制频率。为进一步明确主导目前系统控制频率的主要原因，我们对系统时间响应进行分析，如图 3.10 所示。

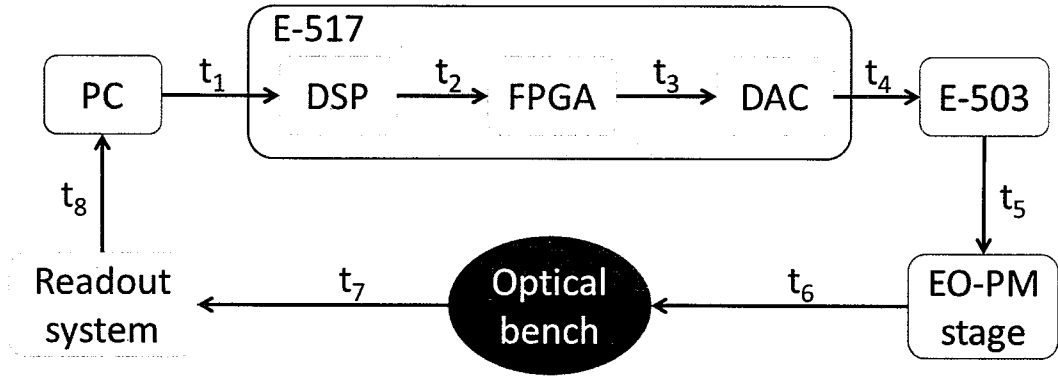


图 3.10 激光锁相反馈控制回路时间响应示意图。其中 DAC 为数模转换器、DSP 为数字信号处理器、E503 为电压放大模块、Optical bench 为光学平台、EO-PM stage 为电光相位响应平台、Readout system 为角度读出系统。

精密指向控制中 PI 偏摆镜的程控电源模块 E517 具有动态范围大、调制精度高等优点。优化对比后，本章将其引入锁相控制模块，并作为程控电源调控 EO-PM。如图 3.10 所示，我们将控制环路主要时间流程分为 t_1 - t_8 。其中 t_1 是电脑的主控软件发送命令到 DSP 的时间，由于采取 RS232 通信，该时间约为 3 ms； t_2 为 DSP 设置新目标的时间，由于采样率为 25 kHz，所以此时间约为 40 μ s； t_3 为 FPGA 命令 DAC 的时间，该时间约为 1.25 μ s； t_4 为 DAC 的设置时间，约为 0.2 μ s； t_5 为放大处理时间，由于此处为纯 IC 电路组件，故响应时间小于 2 μ s； t_6 为 EO-PM 调制相位到达预定位置的时间，由于响应频率大于 100 MHz，故该响应时间小于 10 ns，可忽略不计； t_7 为读出系统相位采样和处理时间，约为 50 ms； t_8 为相位测量并传输到主控制器件所需时间，约为 2 ms。

综上所述，限制目前控制回路时间响应的主要因素为读出系统的测相时间 t_7 。由此导致地基锁相系统的最高闭环控制频率约为 20Hz。在优化的控制算法下，这一控制频率可以满足 LISA 测量频段的控制要求。要想进一步提高控制频率，需优化测相系统的软件算法，提升其硬件指标，并改善通信方式。

3.3.3 系统读出模块评价与分析

系统读出噪声水平是评价地基锁相模拟系统性能的重要参数。为此，如图 3.11 所示，我们设计实验对系统读出噪声进行测量和分析。

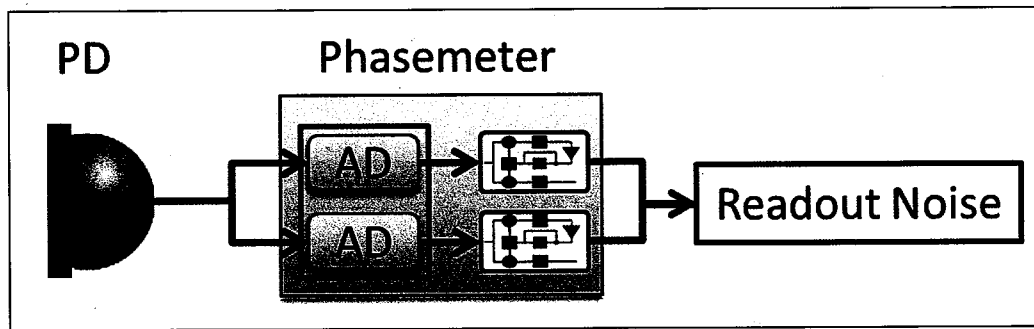


图 3.11 锁相控制系统读出噪声测量。其中 AD 为模数转换器，PD 为探测器，Phasemeter 为相位计，Readout Noise 为读出噪声。

如图 3.11 所示，在系统充分预热后，利用 BNC 转接头将探测器输出信号均分为两路，分别同时通过相位计，测量和记录相位误差信号。所得时域数据如图 3.12 所示。进一步，将所得数据进行 ASD 和 LASD 分析，得到系统读出噪声。如图 3.13 所示，在 1 mHz-1 Hz 频段内，系统读出噪声分布平坦，约为 $90\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，为弱光锁相控制的研究提供基础。

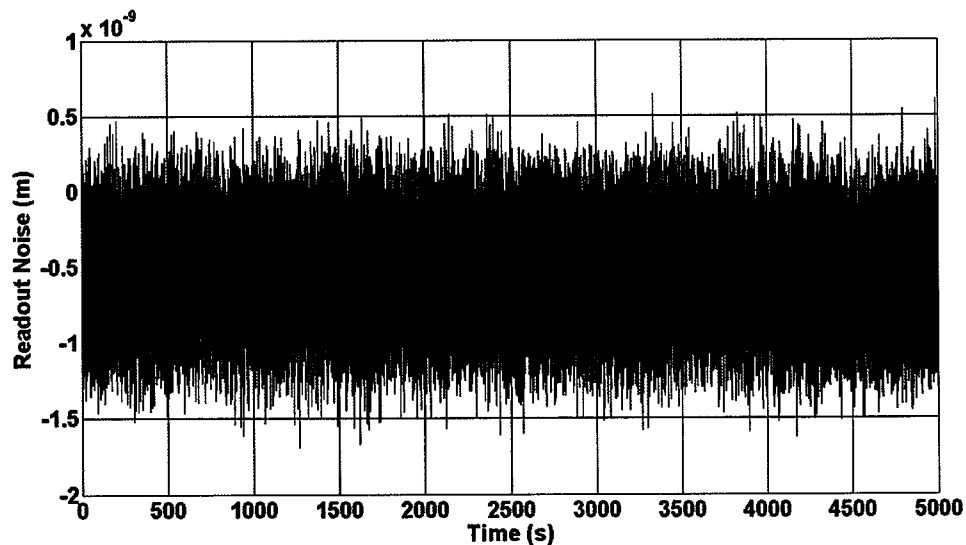


图 3.12 系统读出噪声时域分析

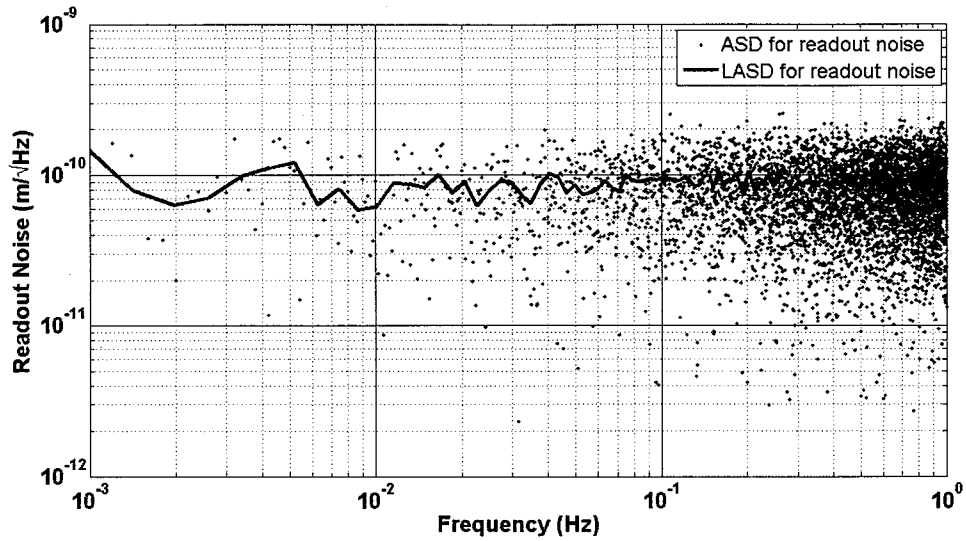


图 3.13 系统读出噪声频域分析。其中蓝色数据点为读出噪声的幅度谱密度分析，黑线为其线性幅度谱密度分析。

3.4 锁相控制系统实验与分析

在完成系统整体性能评估后，我们将利用地基模拟系统对 LISA 弱光锁相技术进行研究和讨论。在地基锁相系统充分预稳后，系统自由运行 5000 s，开启锁相反馈控制系统，运行 5000 s，得到锁相控制时域分布，如图 3.14 所示。

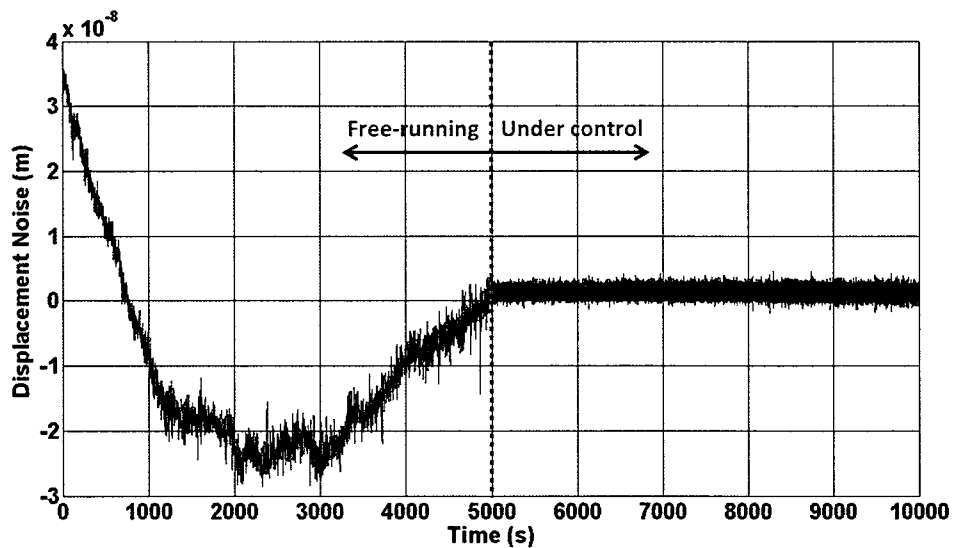


图 3.14 弱光锁相地基实验结果时域数据图

如图 3.14, 系统自由运行时, 入射激光和本地激光相位无相关性, 其相位误差随时间而漂移; 引入锁相反馈控制后, 两激光相位误差迅速压制到零附近, 即实现本地激光对入射激光的相位跟踪和锁定。进一步, 利用幅度谱密度和线性幅度谱密度分析, 对所得数据实现频域分析, 如图 3.15 所示。

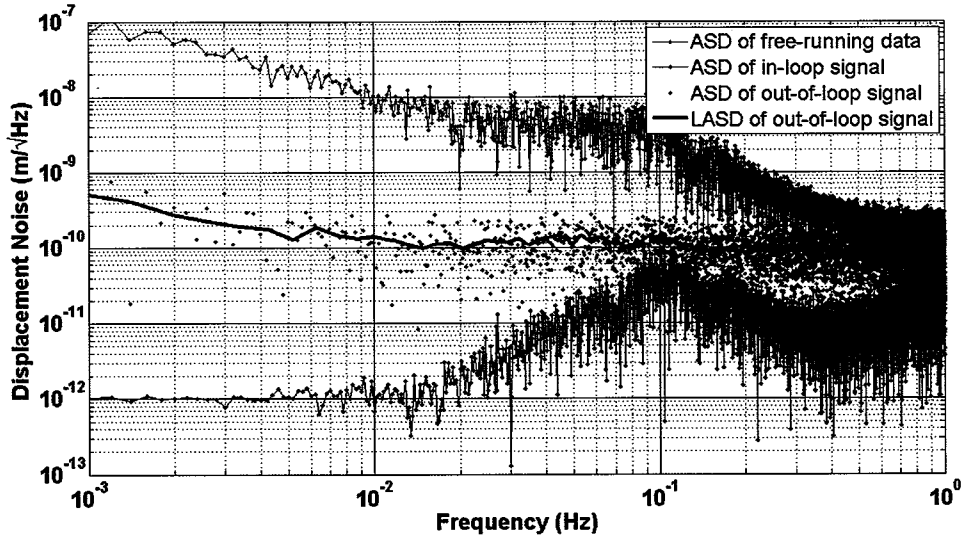


图 3.15 弱光锁相地基实验结果幅度谱密度分析。其中蓝色数据点为自由运行数据的幅度谱密度分析, 黑色数据点为锁相控制后 in-loop 信号幅度谱密度分析, 绿色数据点为 out-of-loop 信号幅度谱密度分析, 红线为其线性幅度谱密度分析。

如图 3.15 所示, 系统自由运行时, 在 1 Hz-0.1 Hz 频段, 随频率降低, 锁相噪声由 $100 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 迅速升至 $10 \text{ nm}/\sqrt{\text{Hz}}$; 在 0.1 Hz-1 mHz, 随频率降低, 锁相噪声缓慢抬升至 $100 \text{ nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。引入锁相反馈控制后, 由 in-loop 数据可知, 随频率降低, 控制效果越好。在 1 mHz-1 Hz 频段, 锁相噪声整体低于 $50 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。进一步, 借助 out-of-loop 数据可知实际系统的锁相控制水平。在 10 mHz-1 Hz 频段, 锁相控制水平为 $100 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$; 在 1 mHz-10 mHz 频段, 锁相控制噪声缓慢抬升至 $300 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。通过对地基锁相模拟系统整体控制效果分析可知, 本实验成功利用线性电光调制实现激光相位的调控, 所构模拟系统完成了锁相控制原理和方法学验证, 并在 1 mHz 到 1 Hz 频段内, 实现百皮米量级锁相控制精度的演示。

3.5 地基锁相系统主要噪声源分析

通过上章 2.5 节和 2.6 节对地基干涉系统的噪声分析可知，限制和主导目前地基干涉系统的主要噪声为：低频段的温度漂移噪声和高频段的系统读出噪声。通过分析地基锁相系统读出噪声图 3.13 和锁相控制图 3.15，进一步验证了上述分析。为此，本节将针对弱光锁相模拟系统，深入分析温度漂移噪声和系统读出噪声对锁相控制的影响。

3.5.1 温度漂移噪声

温度漂移噪声是限制地基锁相系统低频表现的主要噪声，其产生机理如图 3.16 所示。入射激光和本地激光在分光镜处汇聚，形成干涉并被探测器检测。理论上分光镜两端的探测器应完全对称，类似于同一个探测面的响应结果。但实际上，两个探测器并非完全对称，我们可以将非对称部分等效为图 3.16 所示的四象限的相邻象限。由 DWS 原理可知，当两束激光相对夹角发生变化时，会引起相邻象限间相位差的变化，并将直接影响地基锁相系统的控制精度。

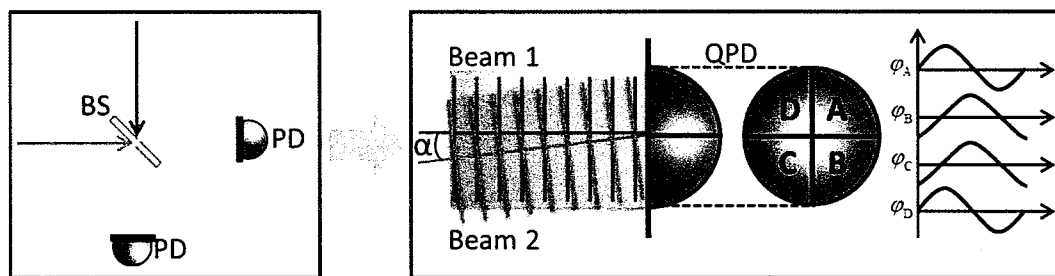


图 3.16 温度偏移引起锁相噪声示意图。其中 BS 为分光镜，Beam 1 为激光束 1，Beam 2 为激光束 2，PD 为光电探测器，QPD 为四象限光电探测器， α 为激光相对夹角。

温度漂移引起锁相噪声的流程如图 3.17 所示。地基锁相系统一方面采用钢制光学平台和对光学器件采用夹持固定方式；另一方面采用空调和亚克力隔离罩，并无精密的温控系统。当环境温度发生漂移时，光学组件之间会发生相对位移，进而导致激光指向的偏转。根据 DWS 原理，这种激光指向扰动将引起分光镜两端读出系统所测相位的相对变化。综上，环境温度漂移将最终影响锁相控制，并引起低频段，特别是 1 mHz-10 mHz 频段的相位噪声。

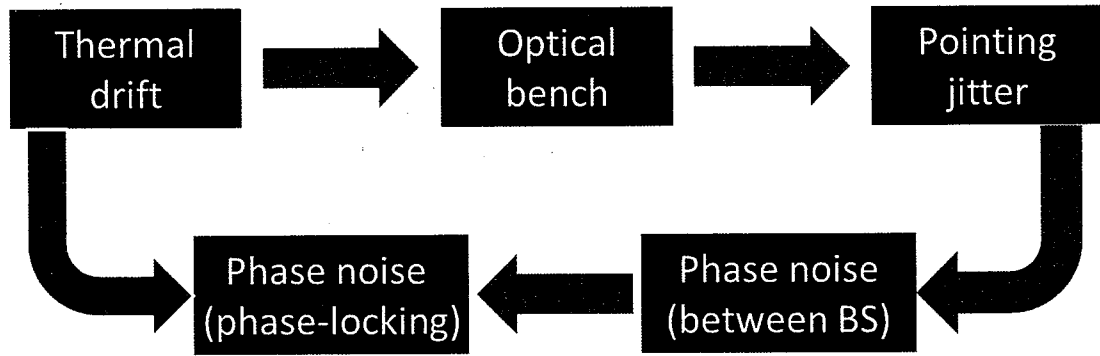


图 3.17 温度偏移导致锁相噪声的流程图。其中 Thermal drift 为温度漂移, Optical bench 为光学平台, Pointing jitter 为指向抖动, Phase noise (between BS) 为分光镜两端相位噪声, Phase noise (phase-lock) 为锁相噪声。

为放大温度漂移噪声对弱光锁相系统的影响, 我们设计实验测量有无温控系统时, 分光镜两端读出系统所测相位误差信号。在无温控系统时, 系统自由运行 5000 s, 记录分光镜两端读出系统所测相位误差信号; 然后打开温控系统, 将地基锁相系统充分预稳后, 运行 5000 s, 记录分光镜两端读出系统所测相位误差信号。将所得数据进行 ASD 和 LASD 分析, 如图 3.18 所示。

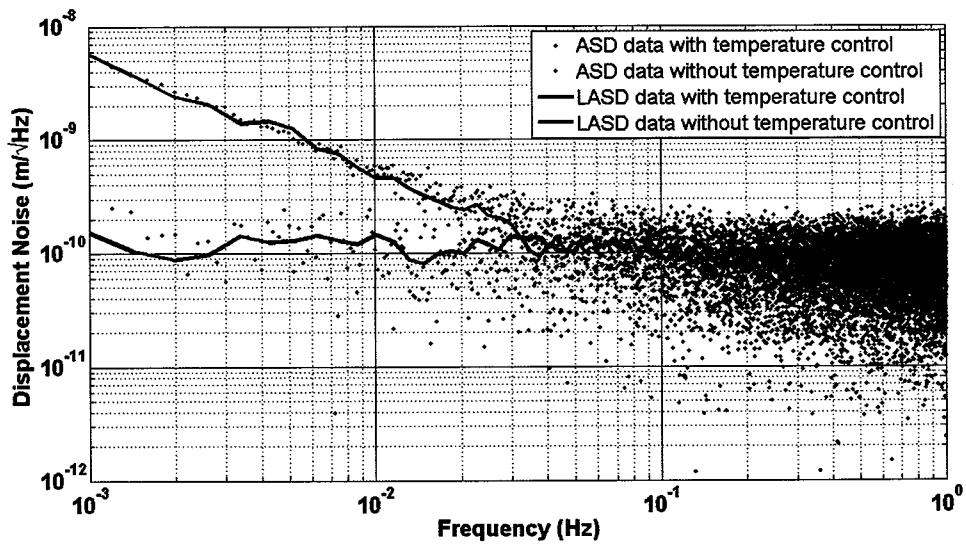


图 3.18 温度偏移噪声对弱光锁相影响分析图。其中蓝色数据点为温控系统工作时的幅度谱密度分析, 绿色数据点为无温控系统的幅度谱密度分析, 黑色和红色数据线条分别为其线性幅度谱密度分析。

如图 3.18 所示, 有无精密温控系统对于 40 mHz 以上的高频段无显著影响, 噪声水平约为 $100 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在 1 mHz 到 40 mHz 的低频段, 温控系统影响显著, 精密温控系统能将噪声压制在 $100 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平附近; 但若无精密温度控制, 系统噪声将随频率降低而迅速抬升至 $6 \text{ nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平。实验结果说明温度漂移噪声对地基锁相控制精度的影响。要进一步改善系统温度稳定性, 需从以下几方面考虑: 一采用超稳干涉平台结合光粘技术, 以提高平台和器件抑制温度扰动的能力; 二采用真空腔结合高精度温控技术, 以提高系统的温度稳定性。但上述改进需彻底颠覆系统设计, 目前尚不具备这一条件。为此, 我们在现有系统硬件支持下, 通过实验分析, 优化系统预稳条件, 为弱光锁相实验提供保障。

3.5.2 系统读出噪声

不同于精密指向系统, 地基弱光锁相模拟系统采用单象限光电探测器实现激光干涉信号的探测、转化和放大。为进一步明确系统读出噪声源自探测器光电转化的前端噪声, 还是电信号经 BNC 连接头、射频传输线、AD 转化器和相位计所产生的后端噪声。下面, 我们将设计实验, 深入分析真正限制指向系统表现的噪声来源。

我们用高信噪比的信号发生器代替原光电探测器的信号输出。如图 3.19 所示, 经 BNC 转接头一路信号分为两路, 并被相位计两个通道同时独立检相。将所得两路相位数据作差, 得时域数据分布, 如图 3.20 所示。进一步, 将所得数据进行 ASD 和 LASD 分析, 结果如图 3.21 所示。

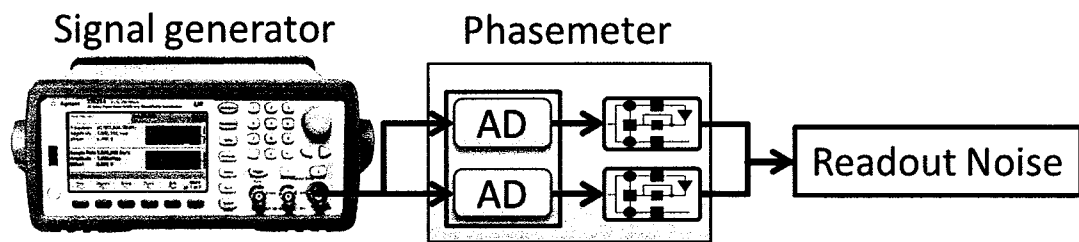


图 3.19 信号发生器替代探测器测量读出噪声。其中 Signal generator 为信号发生器, Phasemeter 为相位计, Readout noise 为读出噪声。

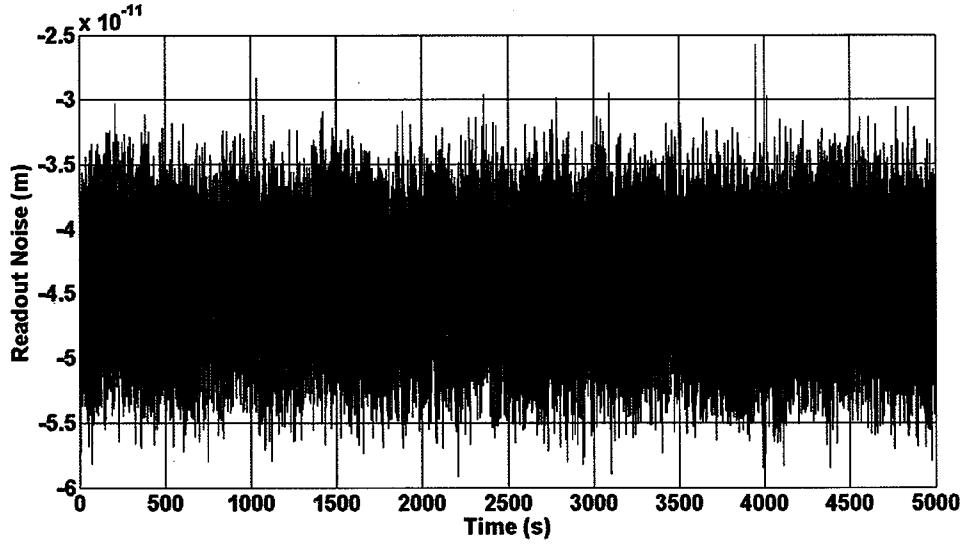


图 3.20 电路系统读出噪声时域数据图

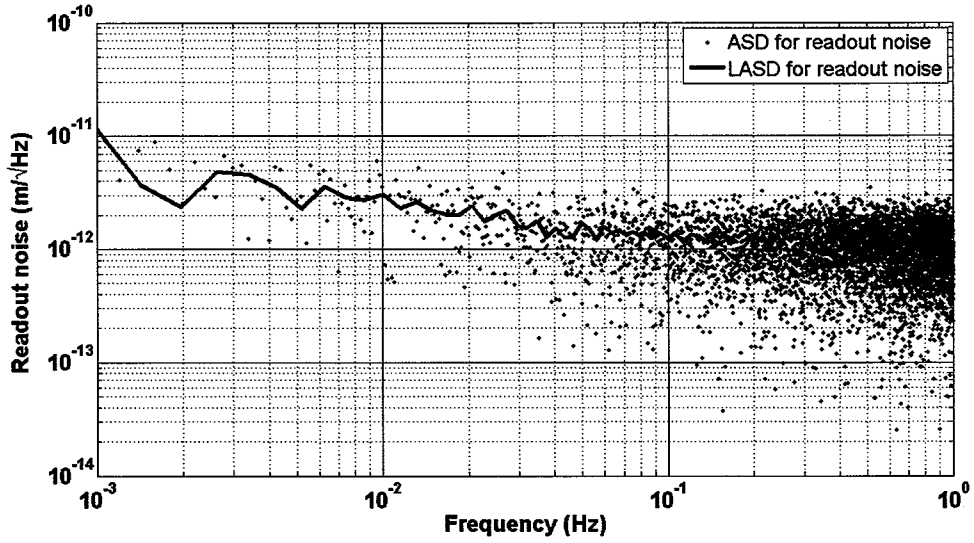


图 3.21 后端读出噪声频谱图。蓝色数据点为 ASD 分析；黑线为 LASD 分析。

由图 3.21 可知：在 0.1 Hz 到 1 Hz 频段内，系统读出噪声可以约为 $1\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ ；在 1 mHz 到 0.1 Hz 频段内，随着测量频率降低系统读出噪声由 $1\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 逐渐增加到 $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。该系统高频段噪声主要来自信号源的电子噪声，而低频段噪声主要由两路硬件不对称性所引入的温度漂移噪声。对比图 3.13 和 3.21 可知，实际地基锁相系统的读出噪声主要来自探测器进行光电转化所引入的系统电子噪声。由于系统电子噪声受载波频率影响显著，所以我们将进一步设计实验（如图 3.22），分析激光差分频率对系统读出噪声的影响。

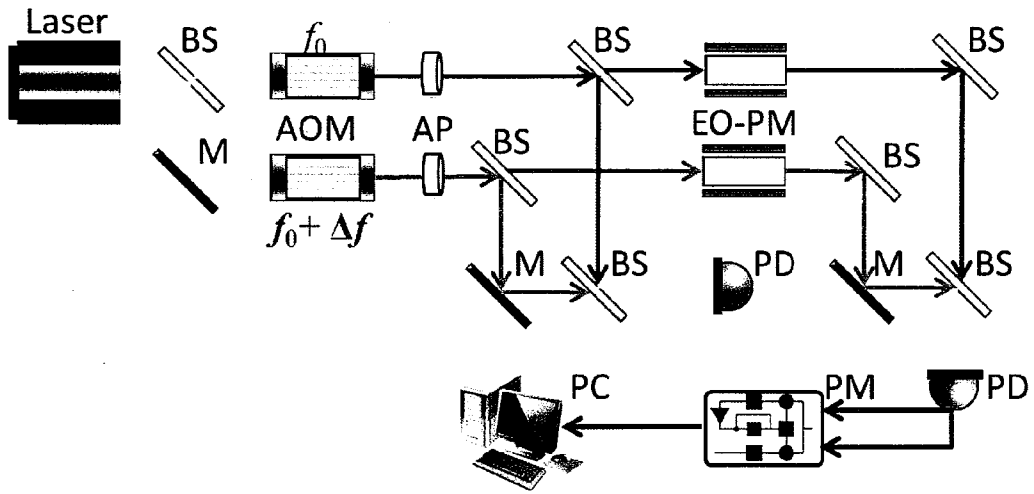


图 3.22 不同激光差分频率下系统读出噪声测量原理图。其中 AOM 为 声光移频器，AP 为光阑，BS 为半反半透镜，EO-PM 为电光相位调制器，M 为反射镜，PC 为电脑，PD 为光电探测器，PM 为相位计， WP 为楔形片。

如图 3.22 所示，系列实验中通过改变声光移频器，使激光差分频率从 10 kHz 到 1MHz 间变化。为反映不同差分频率下的系统读出噪声，我们在系统响应范围内，规避噪声共振频率，选取差分频率为 1 MHz、600 kHz、200 kHz、100 kHz、60 kHz、20 kHz 和 10 kHz。利用 BNC 转接头将探测器输出信号均分为两份，有相位计同时独立检相。如图 3.23 所示，将所得相位误差数据进行 LASD 分析。

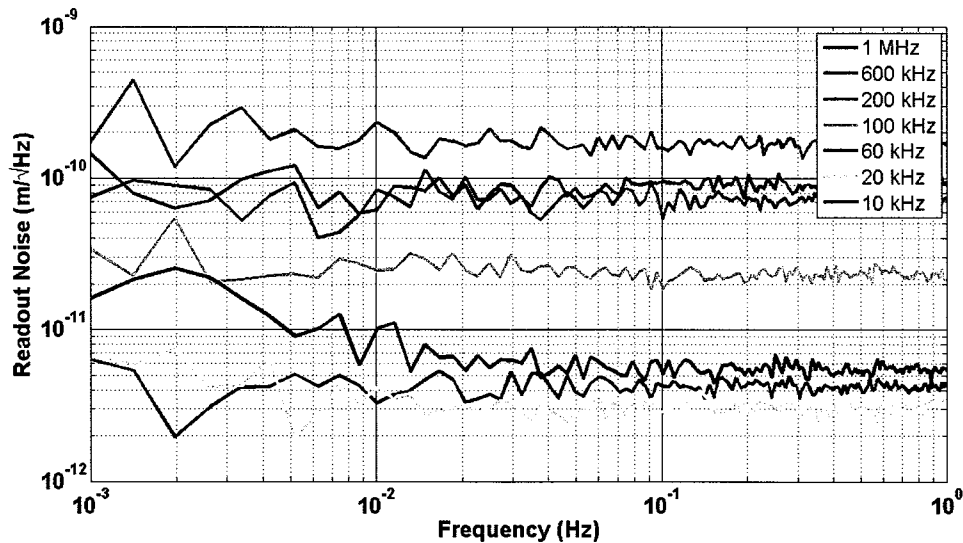


图 3.23 不同激光差分频率下系统读出噪声线性幅度谱密度分析图。其中深蓝线、绿线、红线、天蓝线、紫线、黄线和黑线分别为 1MHz、600kHz、200kHz、100kHz、60kHz、20kHz、和 10kHz 激光差分频率下读出噪声的 LASD 分析。

图 3.23 显示在 1 mHz 到 1 Hz 频段内,不同激光差分频率下的系统读出噪声水平。为突出系统读出噪声随激光差分频率的变化趋势,我们将其总结简化,如图 3.24 所示。当激光差分频率小于 100 kHz 时,系统读出噪声在 $5\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 左右;当激光差分频率增加至接近 100 kHz 左右时,系统读出噪声随之迅速增大至 $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级;当激光差分频率继续增大时,系统读出噪声随之增大并相对稳定在 $100\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 附近。通过上述分析可知,系统读出噪声存在两段稳定区和一段阶跃区。为此,我们希望通过减小差分频率至 10 kHz 量级,以降低系统读出噪声,改善激光锁相控制结果。

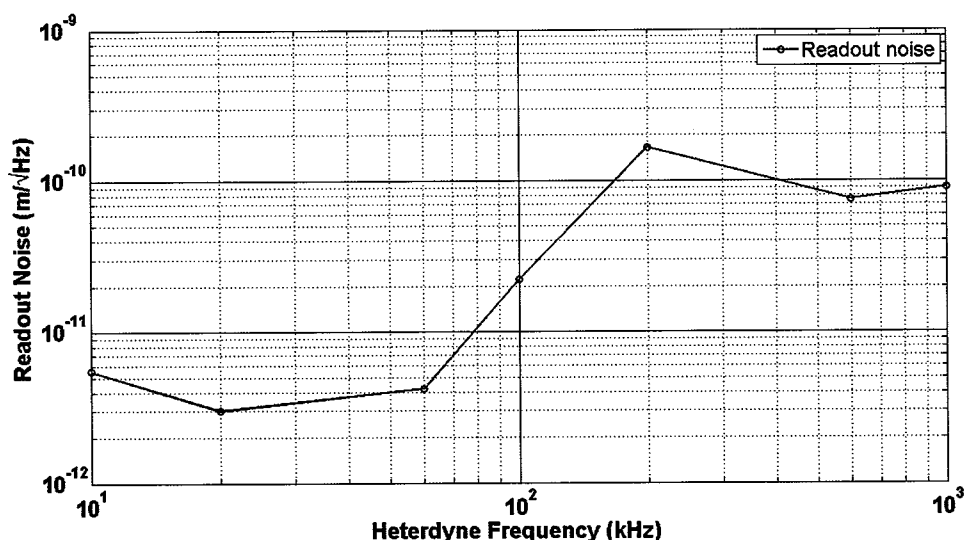


图 3.24 不同激光差分频率下系统读出噪声水平汇总

3.6 系统优化提升与结果讨论

由上节分析可知,限制地基锁相系统的主要噪声为温度偏移噪声和系统读出噪声。在现有硬件水平下,难以改进干涉仪材料和光学镜片固定方式,也无法大幅提升系统温控水平。因此,合理优化并选取激光差分频率,降低系统电子噪声,将是提升地基模拟系统锁相控制水平的有效手段。根据图 2.24 中系统读出噪声表现,结合实际激光差频下的控制效果,我们选取并构建激光差频为 20 kHz 的地基模拟系统,用于锁相控制技术的研究。

为研究优化后系统的锁相控制水平,我们设计如下实验。在系统充分预稳后,

自由运行 5000 s, 然后开启锁相反馈控制回路, 运行 5000 s, 所得数据时域分析如图 3.25 所示。

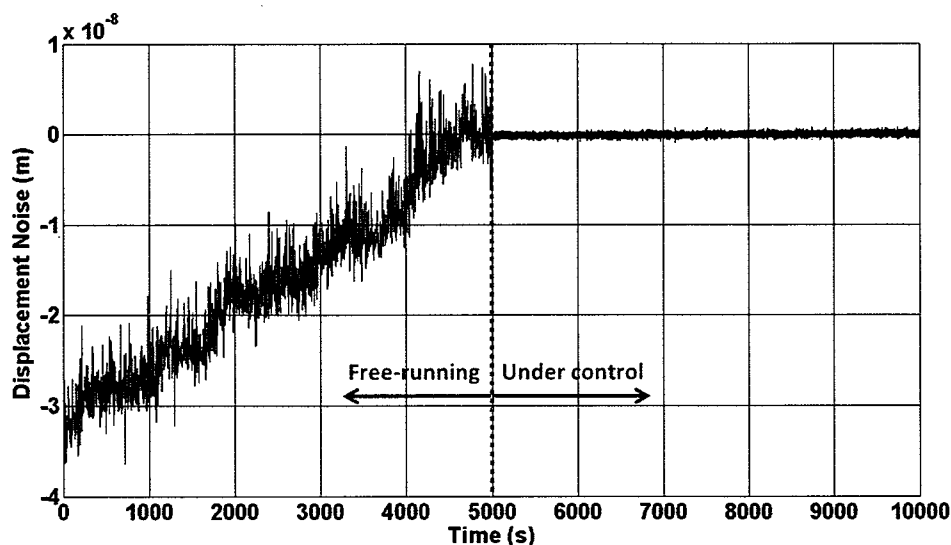


图 3.25 激光差分频率为 20kHz 下的锁相控制结果时域图

由图 3.25 可知, 自由运行时, 入射激光相位和本地激光相位相互独立, 且受温度漂移噪声影响, 其相位误差信号随时间而漂移。开启锁相反馈控制后, 本地激光迅速跟踪并锁定入射激光相位, 其相位误差维持在零附近。进一步, 将所得实验数据进行 ASD 和 LASD 分析, 如图 3.26 所示。

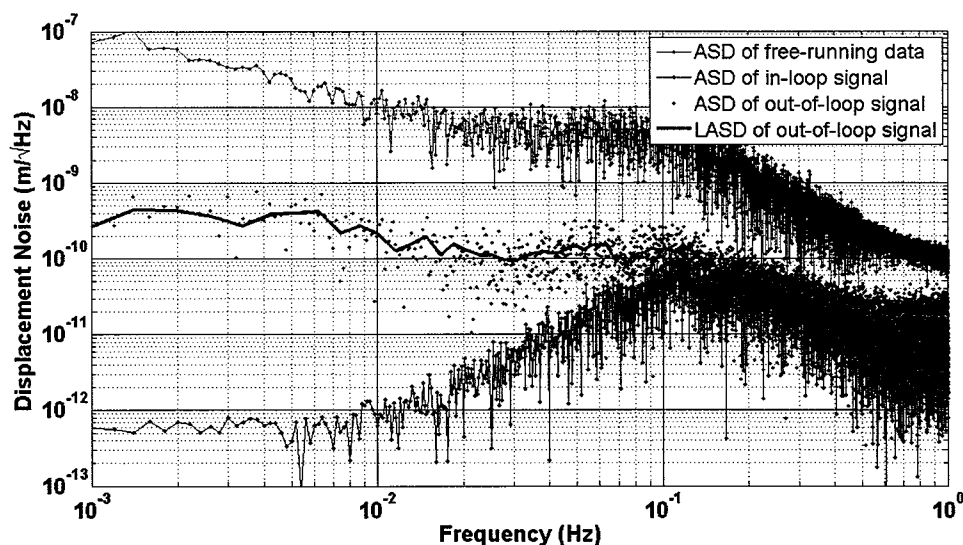


图 3.26 激光差分频率为 20kHz 下的锁相控制频谱分析。其中蓝色数据点为自由运行的 ASD 分析, 黑色数据点为 in-loop 信号 ASD 分析, 绿色数据点为 out-of-loop 信号 ASD 分析, 红线为 out-of-loop 信号的 LASD 分析。

由图 3.26 知, 系统自由运行时, 在 0.1 Hz-1 Hz 频段, 随频率降低, 锁相噪声由 $100\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 迅速升至 $10\text{nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平; 在 10 mHz-0.1 Hz 频段, 随频率降低, 锁相噪声相对稳定并维持在 $10\text{nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平; 在 1 mHz-10 mHz 频段, 随频率降低, 锁相噪声逐渐抬升至 $100\text{nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。引入锁相反馈控制后, 由图中黑色 in-loop 数据线可知, 整体锁相控制水平优于 $100\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$, 具有很好的控制效果。

受到自由运行噪声的迅速抬升, in-loop 控制在 0.1 Hz 处存在 $4\times 10^{-4}\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的特征噪声峰。为获取地基系统的实际锁相控制水平, 我们进一步分析 out-of-loop 信号。在 1 mHz 频段附近, 受温度漂移噪声的影响, 锁相噪声达到 $100\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级; 随着测量频率的增加, 温度漂移噪声影响逐渐减弱, 系统电子噪声将逐渐影响和主导锁相控制水平; 在 1 Hz 频段附近受到系统电子噪声的限制, 锁相控制水平达到 $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级。

对比优化前地基锁相控制结果图 3.15 可知: 受限于温度漂移噪声, 在 1 mHz 到 50 mHz 频段内, 系统锁相控制水平无明显改善; 在 50 mHz 到 1 Hz 频段内, 系统最佳锁相控制水平由 $100\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 提升至 $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级, 有显著改善。但是, 对比不同激光差分频率下系统读出噪声图 3.23 可知, 弱光锁相水平并未和系统读出噪声一样, 在 1 mHz 到 1 Hz 的全频段实现量级上的提高。这一现象主要由两方面原因: 一温度漂移噪声影响和主导 mHz 频段的锁相控制水平; 二 out-of-loop 结果体现不同探测器间非共模噪声无法通过共模抑制而消除。通过上述锁相控制实验, 完成了 LISA 弱光锁相技术的原理和方法学验证, 实现 1 mHz 到 1 Hz 频段内锁相控制精度的演示和分析, 为 LISA 弱光锁相技术的研究提供支持。

3.7 LISA 弱光锁相的深化模拟

本论文通过设计并构建地基模拟系统, 实现了 LISA 弱光锁相技术原理和方法学验证。但受到系统硬件的限制, 无法在 1 mHz 到 1 Hz 全频段内实现 LISA 弱光锁相控制要求。同时, 国际上弱光锁相研究中未完全考虑 LISA 实际噪声水

平的影响^[127, 139, 140, 218]。为进一步分析 LISA 不同阶段, 各类噪声对弱光锁相控制的影响, 以及弱光锁相系统的可行性, 本节将基于 LISA 弱光锁相物理图像, 利用 Matlab/Simulink 平台, 设计构建并分析 LISA 弱光锁相软件模拟系统。

3.7.1 模型构建与验证

如图 3.1, 本章首先讨论并明确了 LISA 弱光锁相的物理图像。为构建 LISA 弱光锁相数学模型, 首先需简化物理图像以突出目标参量。如图 3.27 所示, 主激光经长距离传播后与从激光干涉, 其相位误差被读出系统测量并用于反馈控制从激光器, 以实现从激光对主激光的跟踪和锁定。传播激光的相位 φ_1 包含了可能存在的引力波信号和各类噪声, 如散粒噪声、频率噪声、时钟噪声、指向噪声和加速度噪声等。当干涉信号被检相时, 又受到相位计噪声和探测器噪声的影响。为此, 我们讲全面考虑上述噪声影响, 设计并构建 LISA 弱光锁相软件模型。

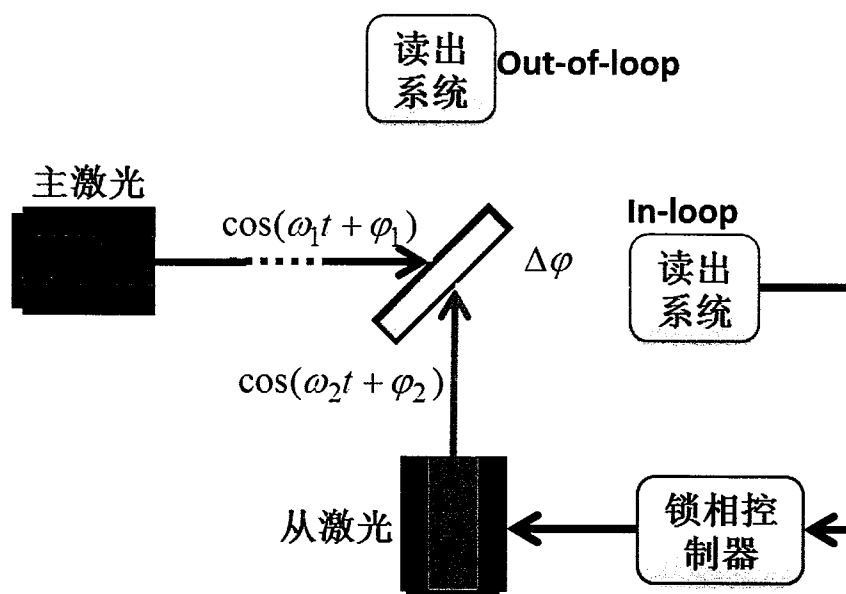


图 3.27 弱光锁相控制系统简化图

清晰认识 LISA 弱光锁相物理图像和噪声分布后, 我们基于 Matlab/Simulink 平台设计并构建了 LISA 弱光锁相软件模拟系统, 如图 3.28 所示。作为测量和跟踪对象, 传播激光相位信号含有可能存在的引力波信号、IMS 噪声和加速度噪声。该信号与含有散粒噪声和相位漂移的从激光相位信号交汇并发生干涉。激光干涉信号在被读出系统探测时引入读出噪声。锁相反馈控制器利用该相位误差信号,

并控制从激光相位，使从激光与传播激光同相。

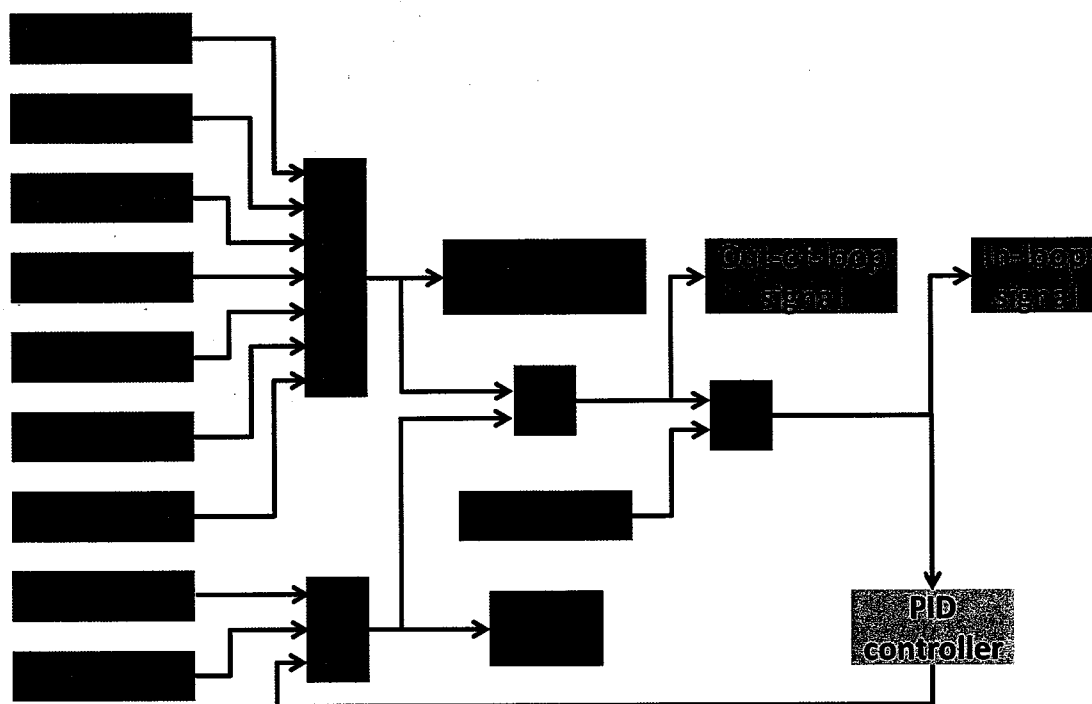


图 3.28 LISA 弱光锁相控制系统 Matlab/Simulink 模拟程序图。其中 Acc_noise 为加速度噪声，Clo_noise 为时钟噪声，Fre_noise 为频率噪声，GW signal 为引力波信号，In-loop signal 为 In-loop 信号，OIM_noise 为其它光学噪声，Out-of-loop signal 为 Out-of-loop 信号，Phase drift 为相位漂移，PID controller 为 PID 锁相控制器，Poi_noise 为指向噪声，Rea_noise 为读出噪声，Sho_noise 为散粒噪声，Slave laser 为从激光，Transmitting laser 为传播激光。

借助 LISA 弱光锁相物理图像，构建软件模拟系统后，首先要对其有效性进行验证。为此，本论文利用地基锁相系统实际噪声数据，将如图 3.25 所示的 20 kHz 激光差频下的时域数据引入并运行弱光锁相软件模拟系统，所得 in-loop 和 out-of-loop 数据利用 ASD 和 LASD 分析，如图 3.29 所示。对比地基系统的实际控制效果图 3.26 可知：软件模拟系统与地基锁相具有类似的控制效果，其 out-of-loop 锁相结果均受限于系统噪声和温度漂移噪声，说明所构建的 LISA 软件模拟系统有效。

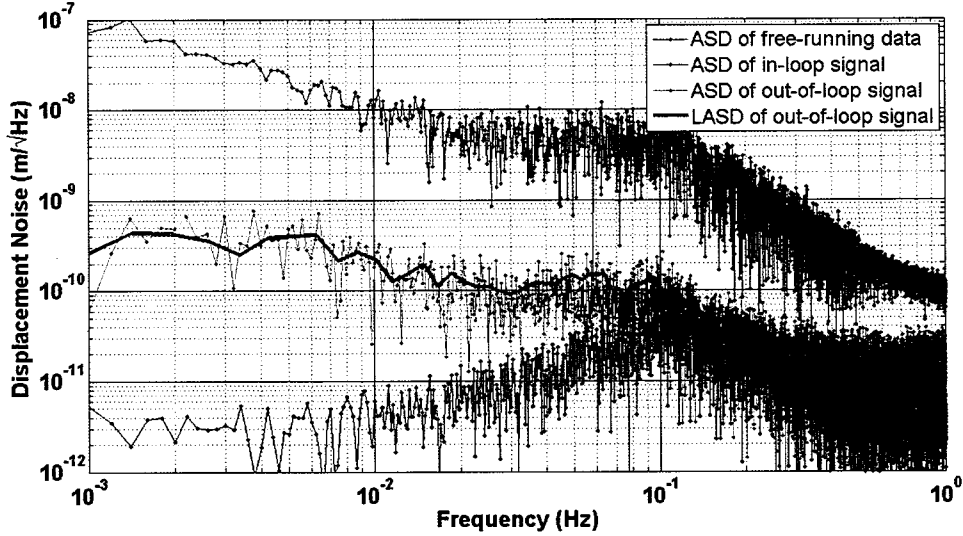


图 3.29 LISA 弱光锁相软件模拟系统有效性验证图。其中蓝色数据点为地基锁相系统实际自由运行数据的幅度谱密度分析，黑色数据点为经软件系统控制后 in-loop 信号幅度谱密度分析，绿色数据点为经软件系统控制后 out-of-loop 信号幅度谱密度分析，红线为 out-of-loop 信号的线性幅度谱密度分析。

3.7.2 LISA 噪声源分析

在构建并验证 LISA 弱光锁相软件模拟系统的有效性后，需进一步明确 LISA 各类噪声分布。根据作用形式，我们将 LISA 噪声分为 IMS 噪声和加速度噪声两类。

1) IMS 噪声

IMS 噪声由散粒噪声、激光频率噪声、时钟噪声、激光指向噪声、干涉仪噪声等光路位置噪声组成，将限制高频段 LISA 噪声水平。下面我们将逐个分析其产生机制和 LISA 要求。

a) 散粒噪声

当出射激光功率一定时，散粒噪声主要受限于双星间距和望远镜尺寸，是 LISA 系统的主要噪声源^[9, 10]。由散粒噪声等效成的位置噪声可以表示为^[9]：

$$\delta L = \sqrt{\frac{\hbar c}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{P_{\text{avail}}}} \quad (3.1)$$

其中， $\hbar$ 为约化普朗克常数、 c 为真空光速、 λ 为激光波长、 P_{avail} 为接收光功率。

对 LISA 而言,接收光功率约为 100 pW 量级,由此导致的光路位置噪声在 0.1 mHz 到 1 Hz 频段内约为 $7.7 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ [9]。

对于从激光而言,仅有约 200 μW 的小部分激光本用于与振荡源与传播激光干涉。由此所引入的等效光路位置噪声约为 $1 \text{ fm}/\sqrt{\text{Hz}}$,可忽略不计。

b) 激光指向噪声

受残余非保守力影响,传播激光的指向抖动将耦合并主导光路位置噪声,LISA 的又一主要噪声源^[94, 96, 97],可表示为:

$$\delta\varphi \approx \frac{1}{32} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^3 d D^2 \theta_{\text{dc}} \delta\theta \quad (3.2)$$

其中, λ : 激光波长; d : 波前曲率误差; D : 接收望远镜直径; θ_{dc} : 指向静态偏转误差; $\delta\theta$: 激光指向抖动。为实现空间引力波探测, LISA 需要在 0.1 mHz-1 Hz 频段内,将激光指向稳定性提高至 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平,使激光指向抖动噪声压制到 $5.3 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8\text{mHz}/f)^4}$ [9]。

c) 激光频率噪声

激光频率噪声是激光频率不稳定性在不等臂干涉仪上的体现。由此导致的等效光路位置噪声可表示为^[9, 79]:

$$\delta L = \frac{\delta f}{f_i} \Delta L \quad (3.3)$$

其中 f_i 为激光频率, δf 为激光频率不稳定性, ΔL 为干涉光束间光程差。而激光自由运行时,频率稳定性仅为 $10^4 \text{ Hz}/f \cdot \text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$,由此导致的激光频率噪声在 0.1 mHz-1 Hz 频段内为 $0.17 \text{ Hz}/f \cdot \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。这将远远超过 LISA 对激光频率噪声 $2 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8\text{mHz}/f)^4}$ 的要求。为此, LISA 提出了三步噪声压制法,即:频率预稳、锁臂技术、TDI 技术^[219]。首先通过 PDH 频率预稳技术^[220, 221],在 LISA 测量频段内,将激光频率稳定性提高至 $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8\text{mHz}/f)^4}$,相应的频率噪声压制到 $5 \times 10^{-4} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8\text{mHz}/f)^4}$ 。进一步,通过锁臂技

术^[150, 222]，将激光频率稳定性提高两个量级，由此导致的激光频率噪声可被压制到 $5 \times 10^{-6} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8\text{mHz}/f)^4}$ 。最后，通过 TDI 后处理手段^[157, 162, 223]，将激光频率噪声最终压制到 $2 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8\text{mHz}/f)^4}$ ，并满足 LISA 需求^[9]。在 LISA 弱光锁相软件模拟实验中，我们将突出表现不同激光频率噪声水平对弱光锁相控制的影响。

d) 时钟噪声

时钟噪声是由计时误差引起的光路位置噪声。由于目前尚无满足 LISA 要求的空间超稳时钟，时钟噪声将是我们重点考虑的另一重要噪声源^[159, 164]。由计时误差导致的时钟噪声可表示为^[160, 162]：

$$\delta L = \Delta f \cdot \delta t \cdot \lambda \quad (3.4)$$

其中， Δf 是差分频率， δt 是时钟的稳定性， λ 是激光波长。自由运行超稳时钟的稳定性为 $7 \times 10^{-14} \text{ Hz}/f \cdot \text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，由此导致的光路位置噪声在 1 mHz 到 1 Hz 的 LISA 测量频段为 $1.49 \text{ Hz}/f \cdot \text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。因此，必须经过地面后处理技术^[9, 160]才能实现 LISA 对时钟噪声 $2 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8\text{mHz}/f)^4}$ 的要求。

e) 读出噪声

读出噪声是由探测器和相位计组成的读出系统所产生的噪声^[224-228]。它是影响 LISA 相位读出精度的重要指标。为了满足 LISA 的测量需求，系统读出噪声需在 0.1 mHz-1 Hz 频段内实现 $3.16 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8\text{mHz}/f)^4}$ ^[9]。

f) 其它 IMS 噪声

除上述五类 IMS 噪声外，LISA 还包含其它 IMS 噪声，如强度噪声、望远镜光路噪声、光学平台光路噪声等等^[9]。这些噪声将影响 LISA 系统灵敏度。在本次模拟实验中，我们将其视为一个整体，在 0.1mHz 到 1Hz 频段内，由此引起的光学位置噪声和为 $5.6 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8\text{mHz}/f)^4}$ ^[9]。

2) 加速度噪声

测试质量受到的残余非保守力影响而产生的称为加速度噪声。加速度噪声将

主导低频段，特别是 0.1mHz-1mHz 频段的 LISA 噪声表现。LISA 需要借助测量两自由悬浮测试质量间的距离扰动以反演引力波信号。空间运行过程中，测试质量会受到静电力、布朗效应、航天器磁力、航天器耦合、星间磁力、热效应等作用的影响而产生加速度。尽管被无拖曳控制压制，残余非保守力仍然存在，并等效光路加速度噪声。在空间运行时，由残余加速度 δa 等效成的光路位置噪声可表示为^[9]：

$$\delta L = \frac{\delta a}{(2\pi f)^2} \quad (3.5)$$

通过式 3.5 可知，对 LISA 空间引力波探测而言，在不考虑系统冗余的前提下，残余加速度 $1.95 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2 / \sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (f/8\text{mHz})^4} \cdot \sqrt{1 + (0.1\text{mHz}/f)}$ 所引起的光路位置噪声为 $0.77 \text{ pm} / \sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (8\text{mHz}/f)^4} \cdot \sqrt{1 + (0.1\text{mHz}/f)}$ 。若考虑系统冗余度，残余加速度为 $3 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2 / \sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (f/8\text{mHz})^4} \cdot \sqrt{1 + (0.1\text{mHz}/f)}$ ，由此导致的光路位置噪声为 $1.19 \text{ pm} / \sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (8\text{mHz}/f)^4} \cdot \sqrt{1 + (0.1\text{mHz}/f)}$ 。考虑 TDI 后处理时，将综合考虑不同干涉仪中测试质量的影响，由此导致的无冗余时加速度引起的光路位置噪声为 $1.54 \text{ pm} / \sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (8\text{mHz}/f)^4} \cdot \sqrt{1 + (0.1\text{mHz}/f)}$ ；含冗余时的光路位置噪声为 $2.37 \text{ pm} / \sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (8\text{mHz}/f)^4} \cdot \sqrt{1 + (0.1\text{mHz}/f)}$ 。在 LISA 弱光锁相软件模拟实验中，我们将根据不同 LISA 阶段的实际情况，引入并分析不同加速度噪声对弱光锁相的影响。

3.7.3 时域数据生成与分析

为了更加切合 LISA 弱光锁相的实际情况，上节具体分析并明确了 LISA 各类噪声的幅度谱密度分布。然而，实际 LISA 弱光锁相软件模拟需在时域空间里运行和完成。为此，本节将基于 LISA 各类噪声的幅度谱密度分布，为软件模拟生成相应时域模拟数据。下面我们将具体讨论时域数据的生成方法，并对所生成的信号进行反向验证。

1) 频谱时谱转化方法研究

如图 3.30 所示，我们将以含冗余 IMS 整体噪声为例，讨论和分析 LISA 弱

光锁相时域数据生成方法。通过上节分析可知,在 LISA 敏感频段,含冗余 IMS 幅度谱密度分布为 $18\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1+(2.8\text{mHz}/f)^4}$ 。理论上直接将其进行反傅里叶变换,即可获得相应时域数据。但是,关键问题是这一频谱分布曲线仅是对 IMS 噪声分布平均水平的近似描述。为了更符合 LISA 实际信号,我们引入高斯随机分布,结合反傅里叶变换,生成了一套行之有效的频域-时域信号转化方法。

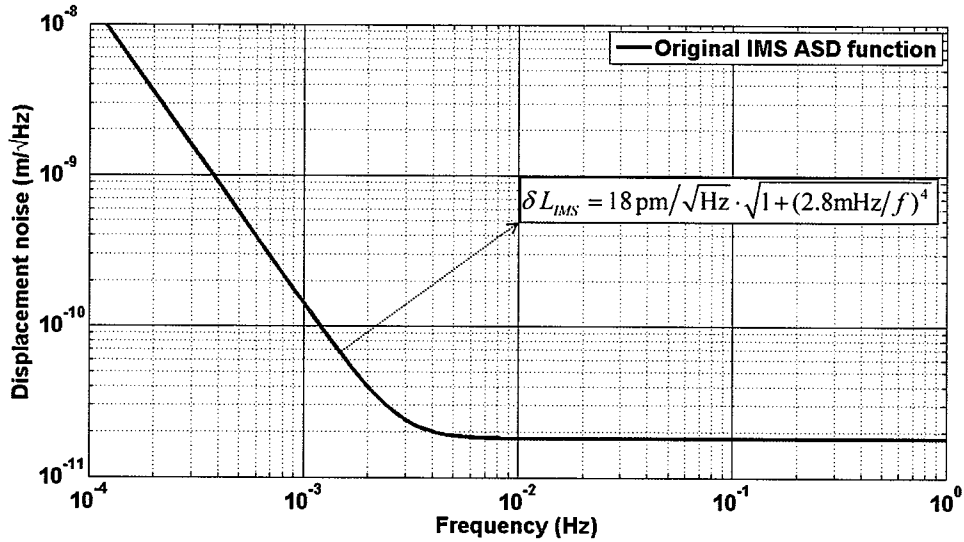


图 3.30 含冗余的 IMS 噪声幅度谱密度分布理论曲线

如图 3.31 所示,为将随机分布引入 LISA 弱光锁相模拟时域信号,实验首先生成一组具备高斯白噪声特性的时域数据。借助傅里叶变换将时域数据转化为频域分布数据。进一步将其归一化并作限带处理,生成平均频谱幅值为 1 的限带高斯白噪声 ‘fun1’。与此同时将已知 LISA 频谱分布噪声数据作对称变换,并与原数据合并生成 0.1 mHz-20 Hz 频段内对称分布的频域信号 ‘fun2’。此时,将上述限带高斯白噪声 ‘fun1’ 和对称分布的频域噪声信号 ‘fun2’ 对应频率处幅值做乘积,得到目标频谱分布信号 fun。最后将其傅里叶逆变换,即可生成所需 LISA 弱光锁相软件模拟时域分布噪声数据。

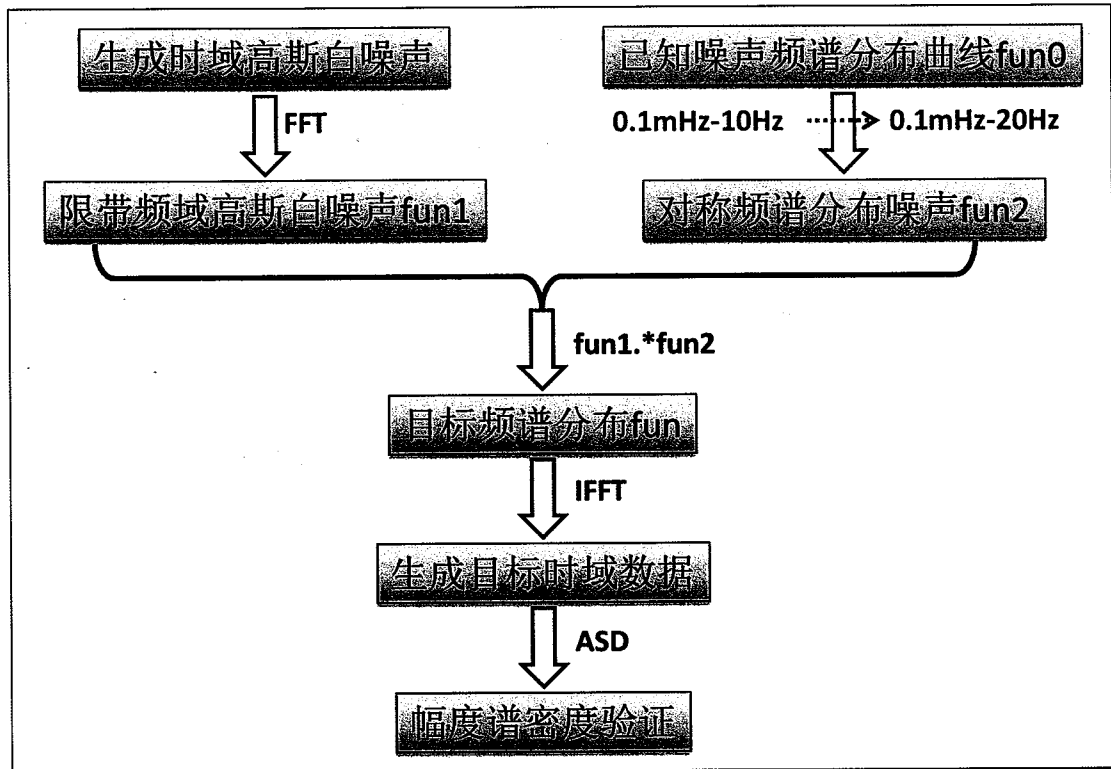


图 3.31 时域噪声生成逻辑图

2) 幅度谱密度验证

实现 LISA 弱光锁相软件模拟时域噪声数据生成后,为检验该数据的有效性,我们将其幅度谱密度展开,并与官方理论曲线对比。下面我们将以含冗余的 IMS 光学位置噪声 ($\delta L_{\text{IMS}} = 18 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8 \text{ mHz}/f)^4}$)、包含冗余的加速度噪声 ($\delta L_{\text{ACC}} = 2.37 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (8 \text{ mHz}/f)^4} \cdot \sqrt{1 + (0.1 \text{ mHz}/f)}$) 和包含冗余的系统整体噪声 ($\delta L = \sqrt{\delta L_{\text{IMS}}^2 + \delta L_{\text{ACC}}^2}$) 为例,生成相应时域噪声数据,并验证其合理性,如图 3.32、3.33 和 3.34 所示。

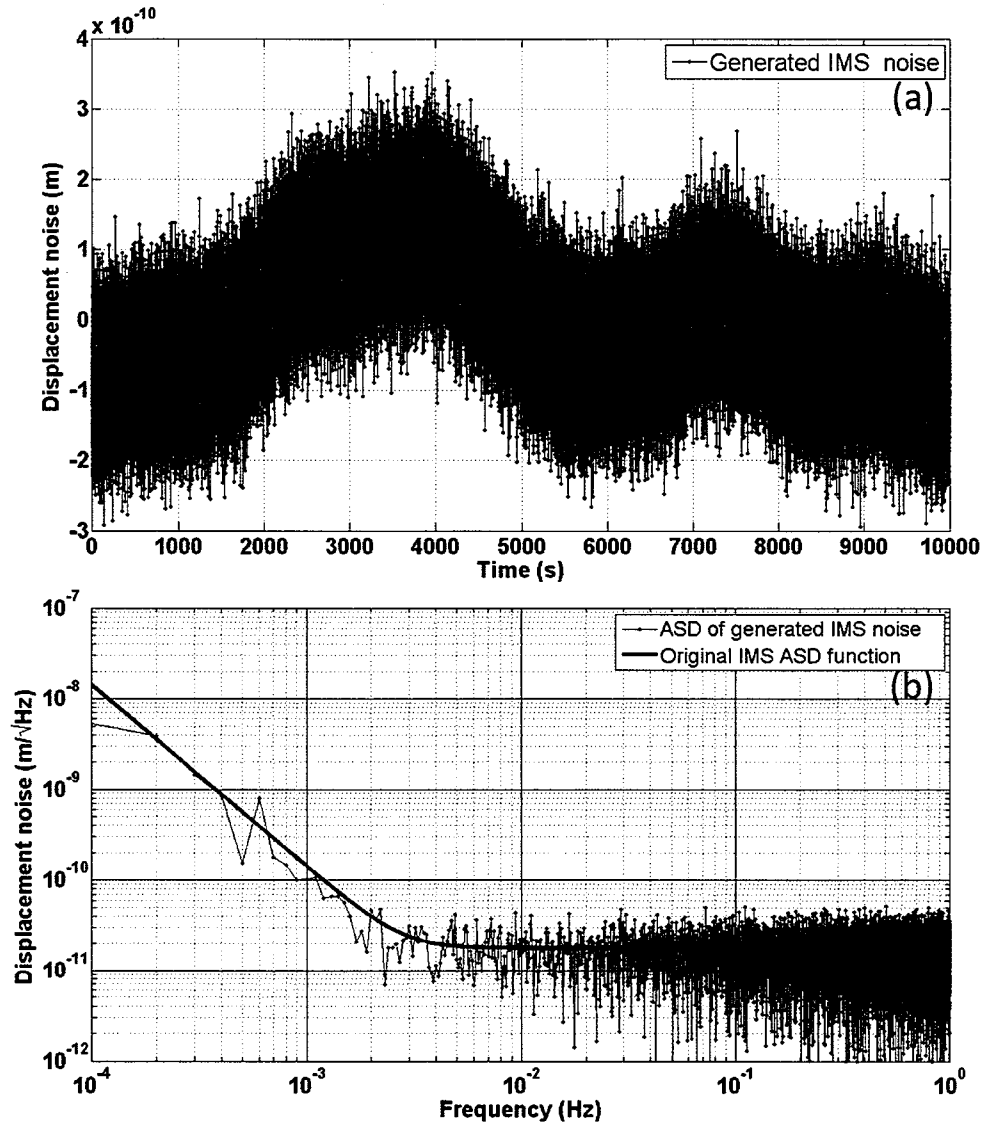


图 3.32 生成 IMS 噪声分析。(a) IMS 时域数据图；(b) IMS 数据幅度谱密度分布与官方理论 IMS 噪声函数曲线对比图。

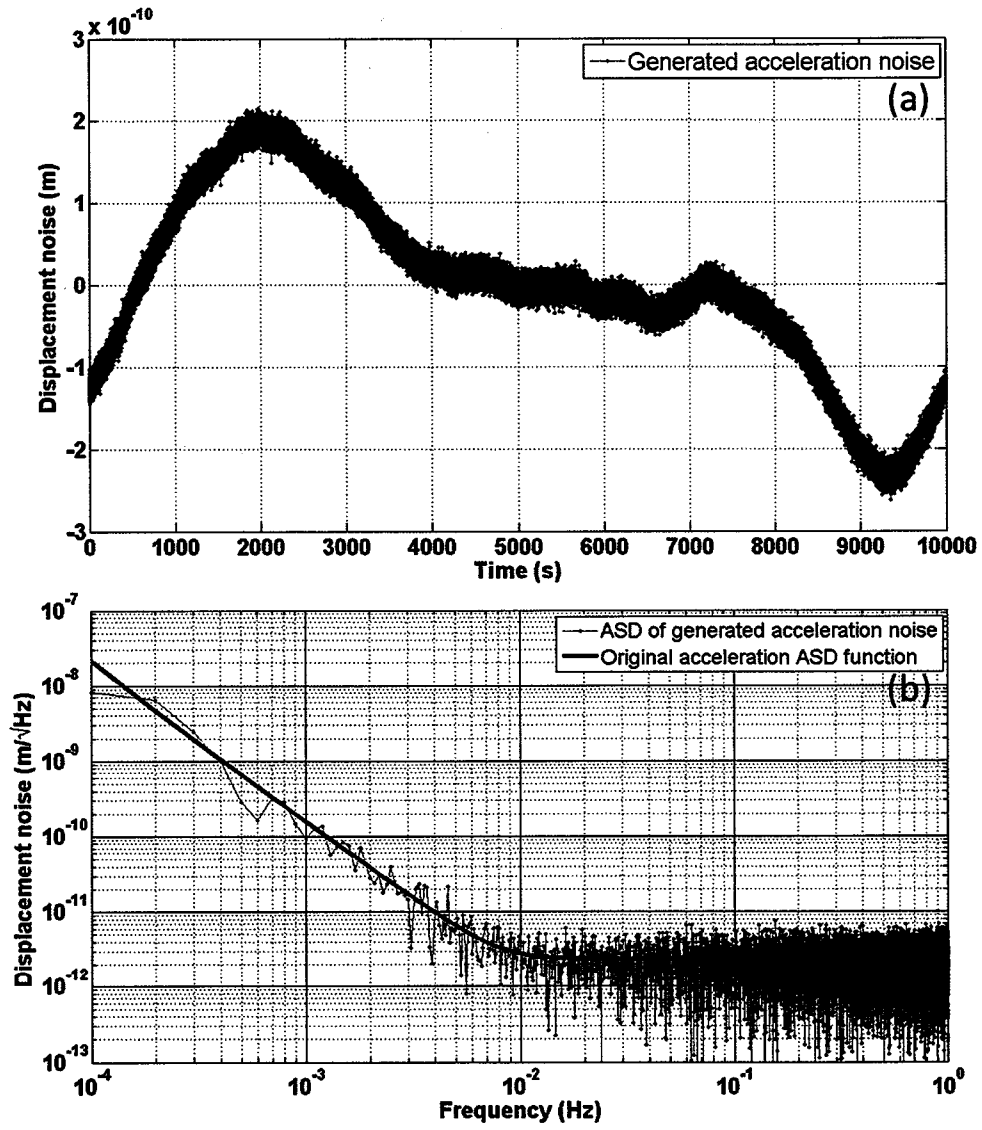


图 3.33 生成加速度噪声分析。(a) 加速度噪声时域数据图；(b) 加速度噪声数据幅度谱密度分布与官方理论加速度噪声函数曲线对比图。

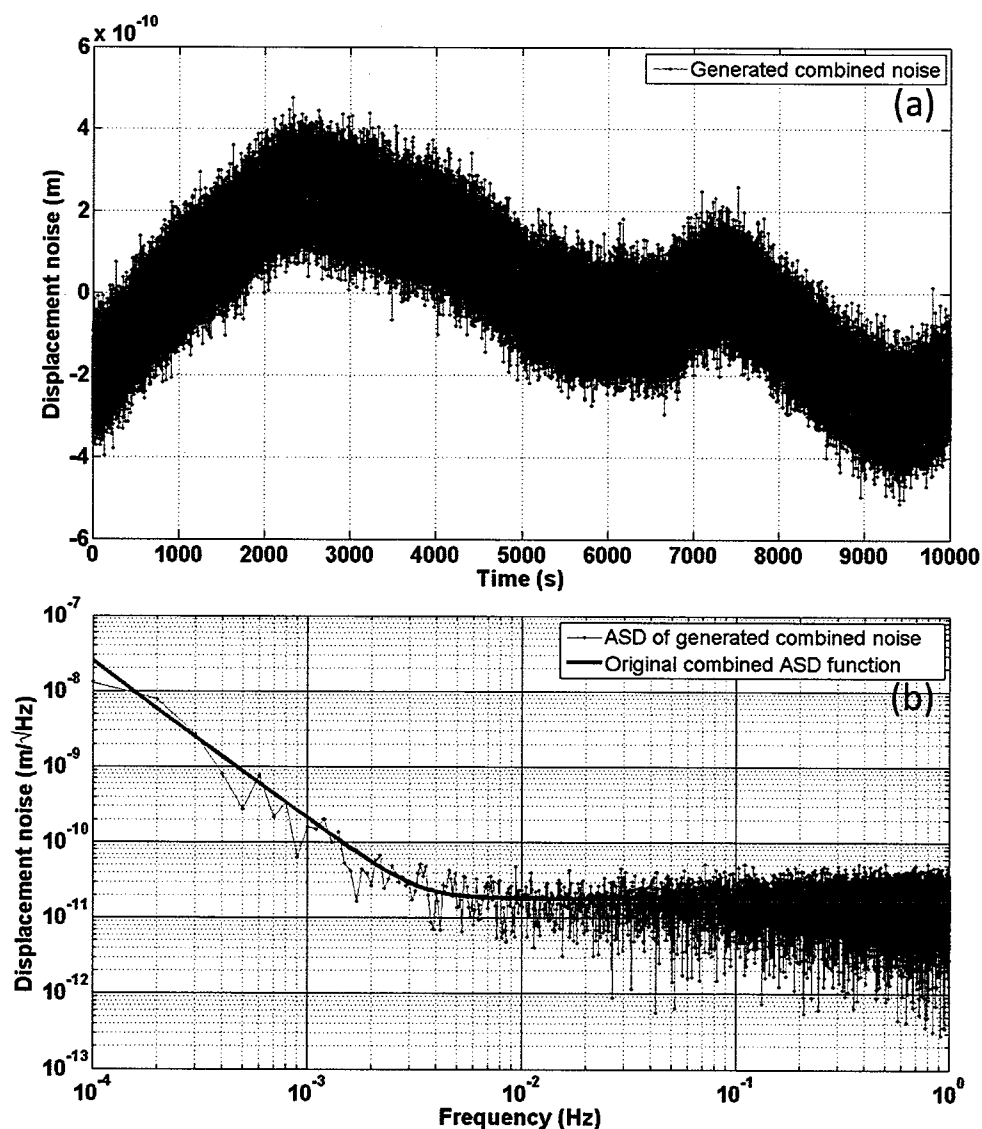


图 3.34 生成系统整体噪声分析。(a) 整体噪声时域数据图；(b) 整体噪声数据幅度谱密度分布与官方理论整体噪声函数曲线对比图。

由图 3.32、3.33 和 3.34 可知，所生成的时域 IMS 噪声、加速度噪声和整体噪声，在 0.1 mHz 到 1 Hz 频段内与 LISA 官方给定噪声频谱分布相符，验证了该时域噪声数据生成方法的可行性，为 LISA 弱光锁相软件模拟提供前提。

3.7.4 结果与讨论

基于 LISA 弱光锁相物理图像（图 3.1）及其锁相控制软件模型（图 3.28），我们将设，具体分析不同 LISA 阶段各类噪声，特别是激光频率噪声和时钟噪声对 LISA 弱光锁相控制水平的影响。实验中引入 3 mHz 处 $100\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的正弦信

号模拟引力波，并作为参照分析 LISA 弱光锁相的噪声表现。所述五组实验中：前三组实验是在自由运行的时钟噪声下，频率噪声分别处于由自由运行、预稳定和锁臂状态；而后两组实验将 LISA 各类噪声分别压制到无冗余和有冗余的 TDI 水平。在整个模拟实验中，我们将分析不同阶段影响和主导 LISA 的噪声源及弱光锁相水平。下述实验中，将模拟后的传播激光、从激光、in-loop 信号和 out-of-loop 信号用幅度谱密度分析，并分别用深蓝色、绿色、红色和宝石蓝色来表示。所需 LISA 噪声本底表示为黑色实线，作为对照，以表现弱光锁相前后的噪声水平。

1) 实验 1：自由运行下的频率噪声和时钟噪声

为研究这一情形下 LISA 弱光锁相控制表现，需首先明确激光频率噪声和时钟噪声的幅度谱密度分布。在 0.1 mHz 到 1 Hz 频段内，自由运行的频率噪声为 $\delta L_{f, fre} = 0.17 \text{ Hz}/f \cdot \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，时钟噪声为 $\delta L_{c, fre} = 1.49 \text{ Hz}/f \cdot \text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。如图 3.35 所示，激光频率噪声将主导 LISA 传播激光的噪声水平。随测量频率减低，传播激光噪声由 $0.1 \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 逐渐增大大致 $10^3 \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级。引入锁相控制后，由于 in-loop 噪声水平远大于系统读出噪声，所以与 out-of-loop 噪声水平基本一致。弱光锁相噪声基本维持在 $0.1 \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平，远大于所需 LISA 噪声水平。另外，从幅度谱密度分布上看，从激光可以很好的跟踪传播激光，实现锁相功能。

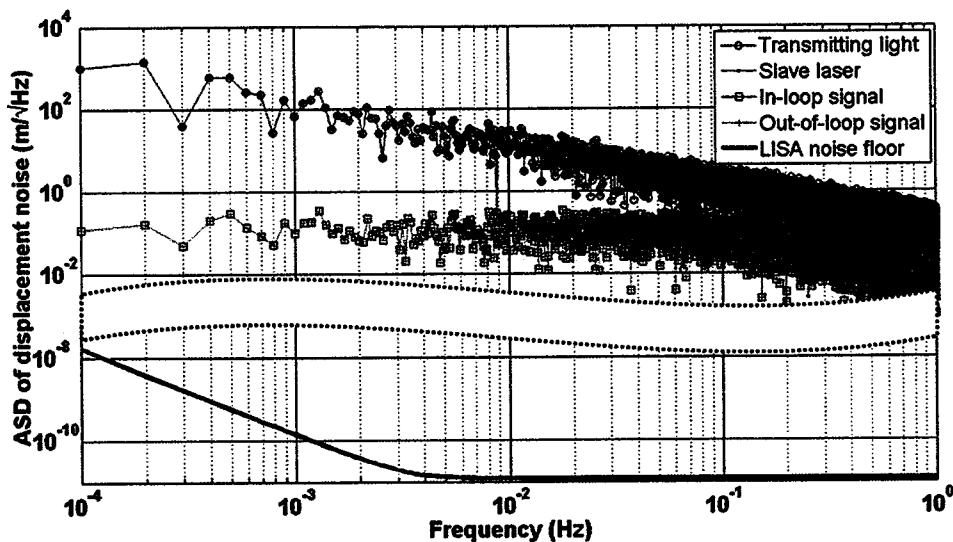


图 3.35 条件 1 下的锁相数据幅度谱密度分析

2) 实验 2: 自由运行下的时钟噪声和预稳定的频率噪声

本实验中, 时钟噪声在 0.1 mHz 到 1 Hz 频段内仍保持自由运行状态, 其幅度谱密度分布为 $\delta L_{c, fre} = 1.49 \text{ Hz}/f \cdot \text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$; 而激光器经 PDH 技术预稳后, 其激光频率噪声变为 $\delta L_{f, pre} = 5 \times 10^{-4} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8 \text{ mHz}/f)^4}$ 。激光频率噪声虽然被压制了接近四个量级, 但仍将主导 LISA 噪声水平。如图 3.36 所示, 传播激光相位噪声相比于实验 1 有大幅下降。在 2 mHz 到 1 Hz 高频段内, 传播激光相位噪声约为 $5 \times 10^{-4} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$; 在 0.1 mHz 到 2 mHz 的低频段, 传播激光相位噪声随测量频率降低而逐渐增加到 $0.1 \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级。引入锁相控制后, in-loop 噪声水平仍远大于系统读出噪声, 并与 out-of-loop 噪声水平基本一致。弱光锁相噪声基本维持在 $10^{-5} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平, 仍远大于所需 LISA 噪声水平。从幅度谱密度分布上看, 从激光可以很好的跟踪传播激光。

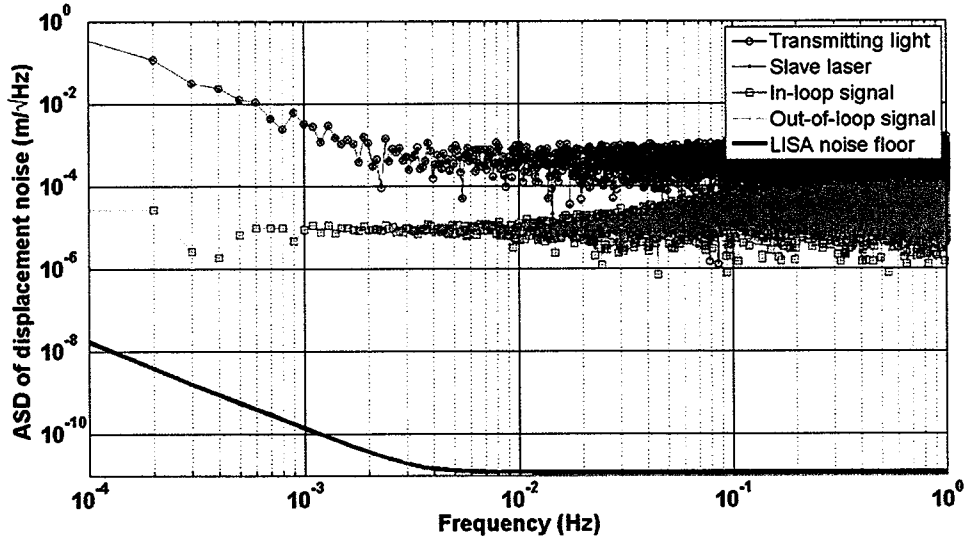


图 3.36 条件 2 下的锁相数据幅度谱密度分析

3) 实验 3: 自由运行下的时钟噪声和锁臂时的频率噪声

本实验中, 时钟噪声在 0.1 mHz 到 1 Hz 频段内仍保持自由运行状态, 其幅度谱密度分布为 $\delta L_{c, fre} = 1.49 \text{ Hz}/f \cdot \text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$; 而经锁臂技术后, 激光频率噪声变为 $\delta L_{f, arm} = 5 \times 10^{-6} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8 \text{ mHz}/f)^4}$ 。激光频率噪声被进一步压制两个量

级,但仍将主导 LISA 噪声水平。如图 3.37 所示,传播激光相位噪声相比于实验 2 有下降两个量级。在 2 mHz 到 1 Hz 高频段内,传播激光相位噪声约为 $5 \times 10^{-6} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$; 在 0.1 mHz 到 2 mHz 的低频段,传播激光相位噪声随测量频率降低而逐渐增加到 $10^{-3} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级。引入锁相控制后, in-loop 噪声水平仍大于系统读出噪声,并与 out-of-loop 噪声水平基本一致。弱光锁相噪声基本维持在 $10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平,仍大于所需 LISA 噪声水平。从幅度谱密度分布上看,从激光可以很好的跟踪传播激光。

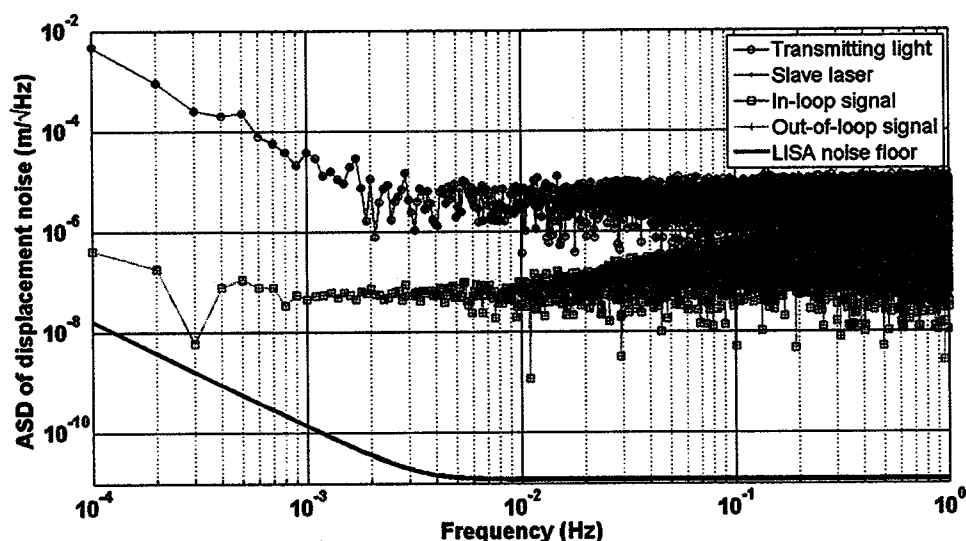


图 3.37 条件 3 下的锁相数据幅度谱密度分析

4) 实验 4: 无冗余时 TDI 下的各类噪声

在本实验中,激光频率噪声和时钟噪声均被 TDI 等技术压制到 LISA 所需水平 $\delta L = 2 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8 \text{ mHz}/f)^4}$ 。此时激光频率噪声将和其它噪声一起,综合影响 LISA 弱光锁相控制水平。如图 3.38 所示,从幅度谱密度分布上看,从激光可以很好的跟踪传播激光。In-loop 噪声被压制到 $1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下,并将和读出噪声一起限制和影响 out-of-loop 噪声水平。

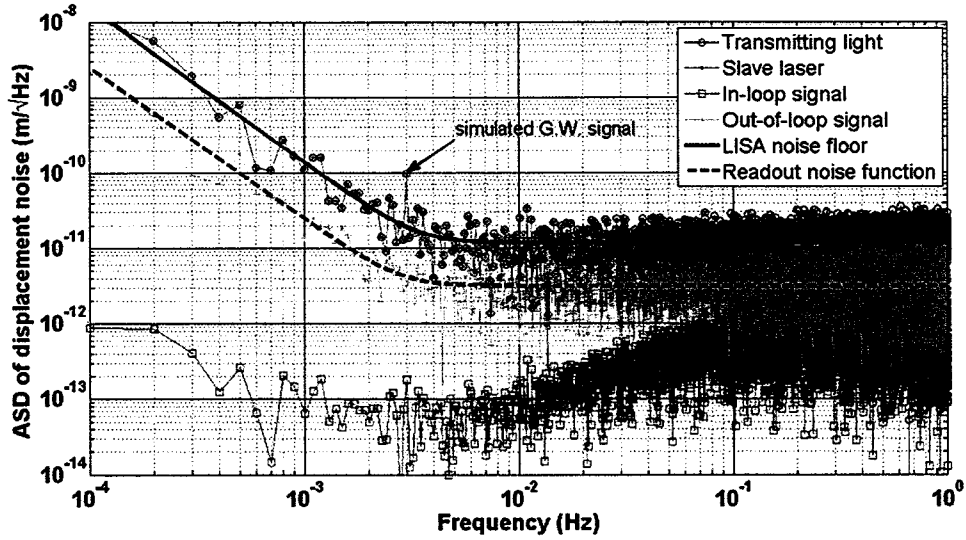


图 3.38 条件 4 下的锁相数据幅度谱密度分析

5) 实验 5: 含冗余时 TDI 下的各类噪声

考虑到科学实验的意外性, 本次模拟将引入系统冗余量。在 0.1 mHz 到 1 Hz 频段内, 整体 IMS 噪声为 $\delta L_{IMS} = 18 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (2.8 \text{ mHz}/f)^4}$; 加速度噪声为 $\delta L_{ACC} = 2.37 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \cdot \sqrt{1 + (8 \text{ mHz}/f)^4} \cdot \sqrt{1 + (0.1 \text{ mHz}/f)}$ 。由图 3.39 可知, 传播激光、从激光、in-loop 信号和 out-of-loop 信号的幅度谱密度分布均相对于实验 4 上涨百分之六十。但从激光仍能很好的跟踪传播激光, 实现弱光锁相功能。

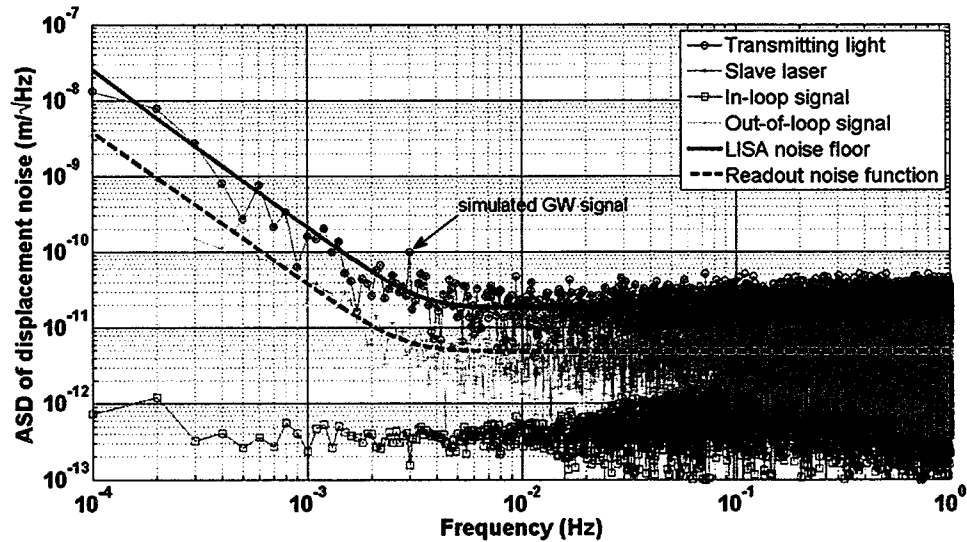


图 3.39 条件 5 下的锁相数据幅度谱密度分析

3.8 本章小结

依据 LISA 弱光锁相的需求, 基于普克尔电光相位调制技术, 本章设计构建地基锁相控制系统, 并在 1 mHz 到 1 Hz 频段实现 $100\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 锁相控制精度的演示。进一步, 通过对 10 kHz-1 MHz 差分频率下系统读出噪声的测量和分析, 优选得到 20 kHz 的地基锁相模拟系统, 并实现 $10\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级锁相精度。由于地基锁相系统受温度漂移噪声和读出噪声限制, 尚未达到 LISA 锁相要求。考虑 LISA 利用弱光锁相物理图像, 利用 Matlab/Simulink 软件平台, 构建 LISA 弱光锁相软件模拟系统, 并利用实际地基实验结果验证该模型的有效性。继而, 分析具体 LISA 噪声, 如散粒噪声、频率噪声、指向噪声、时钟噪声等光学位置噪声和加速度噪声的幅度谱密度分布, 借助反幅度谱密度分析方法, 生成具备随机分布的上述 LISA 噪声时域数据, 将其引入并运行软件模拟系统。模拟结果表明 LISA 空间运行时, 激光频率噪声是限制弱光锁相水平的主要噪声; 通过 TDI 处理后, 本地激光能很好的跟踪锁定传播激光, 其锁相噪声主要受限于读出噪声, 且优于 $10\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的 LISA 要求, 验证弱光锁相的可行性。

第四章 总结与展望

4.1 总结

作为空间引力波探测的代表, LISA 有望直接验证广义相对论, 并为宇宙探索提供新的窗口。精密指向技术和弱光锁相技术是 LISA 引力波探测必备的两项关键技术。针对上述两项技术, 本论文完成以下工作:

1) 精密指向系统的地面实现。针对 LISA 精密指向技术的需求, 基于 DWS 角度敏感技术, 设计构建地基精密指向系统, 并在 1 mHz 到 1 Hz 频段内, 实现 $100\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 指向稳定性的演示。进一步, 深入分析测角模块、控制模块、驱动模块和干涉模块对指向稳定性的影响, 发现读出噪声是限制指向系统表现的主要噪声。为此, 在 10 kHz-1 MHz 激光差频范围内测量和分析系统读出噪声, 优选构建 40 kHz 地基系统, 实现 LISA 精密指向技术的原理验证, 并在 1 mHz-1 Hz 的 LISA 敏感频段, 实现了 $10\text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 指向稳定性的演示。

2) 精密指向系统的扩展应用。星间激光通信具备高传输速率、高保密性等优点而备受瞩目, 但通信质量受限于指向动态响应和指向稳定性。为此, 本文将基于 DWS 角度敏感技术的指向控制系统应用于星间激光通信, 实现精密指向与激光通信的集成化设计和地基模拟系统构建。该系统在 0.5 s 内将大于 100 μrad 的指向偏置迅速压制到优于 100 nrad, 具备良好的动态响应; 将 20 μrad 的指向抖动噪声压制到 50 nrad, 具有良好的指向稳定性。

3) 锁相控制系统的地面实现。针对 LISA 弱光锁相的技术需求, 基于普克尔电光相位调制效应, 设计构建地基锁相控制系统, 并在 1 mHz 到 1 Hz 频段内, 实现 $100\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 锁相稳定性的演示。进一步, 在 10 kHz-1 MHz 激光差频范围内优化得到 20 kHz 的地基锁相模拟系统, 并实现 $10\text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级锁相稳定性的提升, 初步实现 LISA 锁相技术的原理和方法学验证。

4) LISA 弱光锁相技术的深入模拟。受温度漂移噪声和系统读出噪声的影响, 所构地基锁相系统尚未达到 LISA 锁相要求。而国内外对弱光锁相的研究局限于激光锁相本身, 未全面考虑实际 LISA 噪声对整个锁相控制的影响。为此, 本论

文考虑 LISA 弱光锁相物理图像, 借助 Matlab/Simulink 平台, 设计并构建 LISA 弱光锁相软件模拟系统。系统分析 LISA 各类噪声, 如散粒噪声、频率噪声、指向噪声、时钟噪声等光路位置噪声和加速度噪声, 并借助反幅度谱密度分析方法, 生成具备随机特性的上述时域噪声数据, 并将其引入 LISA 弱光锁相软件系统。模拟结果表明 LISA 空间运行时, 激光频率噪声是限制弱光锁相水平的主要噪声; 通过 TDI 处理后, 本地激光能很好的跟踪锁定传播激光, 其锁相噪声主要受限于读出噪声, 且优于 $10\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的 LISA 要求, 初步验证 LISA 弱光锁相的可行性。

4.2 展望

本论文针对 LISA 引力波探测的精密指向和弱光锁相两项关键技术, 设计构建地面模拟系统, 实现原理方法学验证和控制精度的演示。但所构系统距离工程样机, 以至飞行模型还有很长的路要走。下面将从三个方面讨论下一步的发展思路:

1) 纵向发展。虽然所构系统实现了原理方法学验证, 但受到硬件限制, 相关指标并不能完全达到 LISA 要求。为实现进一步实现 LISA 模拟, 首先需考虑引入皮瓦量级高斯平顶光束, 以模拟接收到的传播激光。皮瓦量级弱光是长基线激光干涉所必须面临的问题, 它的引入将暴露和突出很多毫瓦量级光强下所无法遇到的实际问题。其次引入光粘技术和超稳干涉平台, 以降低温度漂移噪声对低频段测量精度的影响。温度漂移噪声是限制目前系统低频表现的主要噪声。超稳干涉平台和光粘技术的引入将压制温度漂移噪声的影响, 提供系统低频表现。最后需考虑读出系统的深入研究。读出系统承载的信号光电转化、滤波、放大、相位测量等核心功能, 是限制目前系统高频精度的主要噪声来源。因此, 要想进一步提升系统性能, 对读出系统的深入研究迫在眉睫。

2) 横向发展。横向发展包括两个方面: 一是同目标量、不同层次技术的综合研究; 二是同上层系统、不同关键技术间集成研究。具体而言, 第一方面的研究, 如 LISA 的全程指向调控。LISA 的全程指向调控包括星敏感器初指向, CCD 粗指向和 QPD 精密指向三个部分。实现精密指向后, 有必要综合考虑初指向和

粗指向过程，并将三者有机结合。另一方面如干涉仪各项关键技术的集成研究。弱光锁相技术和精密指向技术同为 LISA 激光干涉仪的关键技术。两项技术的研究均在相互独立的状态下完成的。下一步，有必要综合各项干涉仪关键技术，整体运行并综合考虑各项技术间的相互影响。

3) 领域扩展。在 LISA 引力波探测的背景下，催生和发展了很多关键技术。这些关键技术不仅能为 LISA 服务，更有望扩展到其它领域，并推动其发展。在地基精密指向和弱光锁相系统成功构建的基础上，适当的领域扩展也是发展所需。

附录 A: 缩写词注释

英文缩写	英文全称	中文全称
ADC	Analogue-Digital Converter	模数转换器
ALIA	Advanced Laser Interferometer Antenna	先进激光干涉仪
AOM	Acousto-Optical Modulator	声光调制器
AP	Aperture	光阑
AS	Amplitude Spectrum	幅度谱
ASD	Amplitude Spectrum Density	幅度谱密度
ASTROD	Astroynamical Space Test of Relativity using Optical Devices	激光天文动力学相对论 检测
BBO	Big Bang Observer	宇宙大爆炸观测器
BS	Beam Splitter	分光镜
CCD	Charge-Coupled Device	电荷耦合器
DAC	Digital-to-Analog Converter	数模转换器
DSP	Digital Signal Processor	数字信号处理器
DWS	Differential Wave-front Sensing	差分波前敏感
EO-PM	Electro-Optic Phase-Modulator	电光相位调制器
ESA	European Space Agency	欧空局
FI	Fiber Injector	光纤耦合器
FPGA	Field Programmable Gate Array	现场可编程门阵列
LASD	Logarithmic frequency axis Amplitude Spectrum Density	对数频率轴幅度谱密度
LCGT	The Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope	大型低温引力波望远镜
LCTSX	Laser Communication Terminal on TerraSAR-X	TerraSAR-X 卫星激光通 信终端
LIGO	Laser Interferometer Gravitational wave	美国 LIGO 地面引力波

	Observatory	探测器
LISA	Laser Interferometer Space Antenna	空间激光干涉天线
LP	Linear Polarizer	线性偏振片
LUCE	Laser Utilizing Communications Equipment	LUCE 激光通信终端
NASA	National Aeronautics and Space Administration	美国航空航天局
OATM	Optical Assembly Tracking Mechanism	光学自组装跟踪机制
P-Controller	Pointing Controller	指向控制器
PBS	Polarizing Beam Splitter	偏振分光镜
PD	Photodiode	光电探测器
PDH	Pound-Drever-Hall	PDH 技术
PID	Proportional-integral-derivative	比例-积分-微分
PLL	Phase-Locked Loop	锁相环
PM	Phasemeter	相位计
PS	Power Spectrum	功率谱
PSD	Power Spectrum Density	功率谱密度
PZT	Piezo-electric transducer	压电换能器
QPD	Quadrant Photodiode	四象限探测器
SILEX	Semiconductor-laser Inter-satellite Link Experiment	半导体星间激光链路实 验
SM	Steering Mirror	偏摆镜
STR	Star Tracker	星敏感器
T	Telescope	望远镜
TDI	Time Delay Interferometry	时延干涉测量技术
TM	Test Mass	测试质量
WP	Wedge Plate	楔形片

附录 B: 主要器件清单

名称	商家&型号	主要指标
激光器	北京奥普光太 ECL2000	波长: 1064 nm, 频率稳定性: 1 MHz/3h, 功率: 100 mW, 功率稳定性: 0.5%
声光调制器	中电 26 所 YGSMN-2	中心频率: 70 MHz, 差频范围: 1 kHz-2 MHz, 频率稳定性: $10^{-7}/2$ h
电光相位调制器	Thorlabs EO-PM-NR-C2	波长范围: 900nm-1250nm, 调制频率: DC-100MHz, 半波电压: 240V@1064nm
快速偏摆台 1	Physik Instrument S330.2SL	调制范围: ± 1 mrad, 分辨率: 50 nrad, 线性度: $\pm 0.15\%$, 响应频率: 3.7 kHz
快速偏摆台 2	哈尔滨芯明天 XS330.2SL	调制范围: ± 1.5 mrad, 分辨率: 100 nrad, 线性度: $\pm 0.1\%$, 响应频率: 3.7 kHz
示波器 1	Tektronix DPO4045	采样率: 2.5 GS/s, 带宽: 500 MHz, 垂 直分辨率: 8 位, 记录长度: 20 M
示波器 2	Tektronix TDS2024	采样率: 2.0 GS/s, 带宽: 200 MHz, 垂 直分辨率: 8 位, 记录长度: 2.5 K
信号发生器	Agilent 33522A	采样率: 250 MS/s, 频率范围: 1 μ Hz-30 MHz, 相位分辨率: 0.001°
光功率计	Thorlabs PM200&S114C	波长范围: 800-1700 nm, 功率范围: 1 μ W-500 mW, 线性度: $\pm 0.5\%$
光电探测器	Thorlabs PDA36A	波长范围: 350-1100 nm, 带宽: 17 MHz, 响应效率 0.29 A/W
四象计	中电 44 所 定制	波长范围: 900-1700 nm, 带宽: 5 MHz, 响应效率 0.60 A/W
相位计	中科院力学所 自研	通道数: 4, 输出速率: 20 Hz, 相位噪 声: 10^{-6} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1 mHz-1 Hz