

激光与光电子学进展

空间引力波探测中的激光干涉多自由度测量技术

徐欣^{1,2†}, 谈宜东^{1,2*†}, 穆衡霖^{1,2}, 李岩^{1,2}, 王加刚¹, 金景峰³

¹清华大学精密仪器系, 北京 100084;

²清华大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 北京 100084;

³陆军装备项目管理中心, 北京 100072

摘要 在空天探索领域, 空间引力波探测是当前国际研究热点, 核心技术是测量相距数百万千米的两测试质量间的平动转动等多个自由度, 探测灵敏度需要在 $1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ 频段达到 $\sim 1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 以及 $\sim 1 \text{ nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ 水平。目前, 激光干涉是实现如此远距离的两个物体之间多自由度测量的最精密的手段, 本文介绍了面向空间引力波探测的激光外差多自由度超精密测量技术, 概述了其光路结构、测量原理、相位信号处理方法, 回顾了近三十年国内外相关研究进展, 并分析了空间引力波探测中外差干涉测量的噪声源作用机制以及相关研究进展。最后, 对激光外差干涉多自由度超精密测量技术的发展趋势和前景作了展望。

关键词 测量; 空间引力波探测; 激光外差干涉; 多自由度测量; 差分波前传感

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222694

Laser Interferometric Multi-Degree-of-Freedom Measurement Technology in Space Gravitational-Wave Detection

Xu Xin^{1,2†}, Tan Yidong^{1,2*†}, Mu Henglin^{1,2}, Li Yan^{1,2}, Wang Jiagang¹, Jin Jingfeng³

¹Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

³Army Equipment Project Management Center, Beijing 100072, China

Abstract Space gravitational-wave detection is currently an international hotspot. The core technology is to measure the multi-degree-of-freedom motions between two test masses with a distance of few million kilometers. The test sensitivity needs to reach the level of $\sim 1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ and $\sim 1 \text{ nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ within the frequency band of 1 mHz and 1 Hz . At present, laser interferometer is one of the most precise methods to achieve ultra-precision displacement measurement. In this paper, we introduce the ultra-precision multi-degree-of-freedom measurement using laser heterodyne interferometry for space gravitational-wave detection. The optical design, measurement principle, phase demodulation, and relative research progress at home and abroad are introduced. We also analyze the main noises of laser heterodyne interferometry in space gravitational-wave detection, and the current research of these noise sources are also introduced. Finally, the development trend and prospect of laser heterodyne interferometry for ultra-precision multi-degree-of-freedom measurement are forecasted.

Key words measurement; space gravitational-wave detection; laser heterodyne interferometry; multi-degree-of-freedom measurement; differential wavefront sensing

1 引言

在四维时空中, 大质量天体之间的并合过程会对周围空间造成极大的扰动, 能量以波动的形式向外传播,

这个时空的波动“涟漪”被称为引力波^[1]。2016年初, LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)科学合作组织宣布使用 Advanced LIGO (臂长 4 km 的巨型迈克耳孙干涉仪)首次探测到了来

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2022-10-31; 录用日期: 2022-11-04; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC2200204, 2020YFC2200101)

通信作者: *tanyd@tsinghua.edu.cn

[†]共同第一作者

自双黑洞合并的引力波信号,LIGO 天文台光路示意以及引力波信号如图 1^[2]所示。这是对一百年前爱因斯坦关于引力波预言的实验验证,也是对广义相对论的再一次证实,成功完成了广义相对论实验验证中最后一块缺失的拼图,标志着人类对引力波的研究进

入到一个新的阶段。作为人类观测宇宙的新窗口,引力波将为人类探索早期黑洞合并、超新星爆发等宇宙结构形成过程提供观测手段,对探索宇宙起源与演化起到重要的作用。

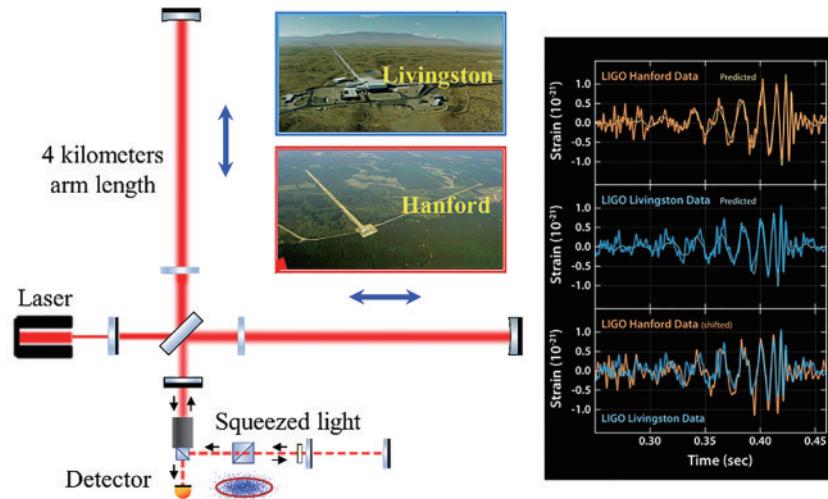


图 1 LIGO 光路示意图及引力波信号^[2]

Fig. 1 Optical layout of LIGO and the detected gravitational-wave signal^[2]

目前引力波的探测手段都是基于激光干涉超精密测量技术,即测量两测试质量(TM)的微弱间距变化。当引力波经过干涉仪的测量臂时,测量臂光程发生变化,进而引起相位差变化,通过锁相装置对相位信号跟踪分析,即可实现对引力波的测量。不同频段的引力波波源包含不同的物理现象,但多数引力波源都在 mHz 频段,因此引力波的探测装置都以这一波段为重点。例如,欧洲航天局(ESA)和美国航空航天局(NASA)合作的引力波探测计划 LISA(Laser Interferometer Space Antenna)将探测 0.1 mHz 到 1 Hz

等中低频引力波^[3]。若想要达到 mHz 波段的探测水平,干涉臂的长度需要达到百万千米的量级,如此巨大的干涉臂长显然在太空中更易于实现。而且,将干涉仪放置在太空中能够摆脱地表振动和地球引力梯度噪声的影响。目前,空间引力波探测器布局采用三颗相同的卫星(S/C 1/2/3),如图 2^[3]所示,组成边长为百万千米的等边三角形,航天器间组成 3 个非独立的夹角为 60° 的迈克耳孙干涉仪,监测两测试质量之间的间距变化来测量由引力波引起的“时空涟漪”。

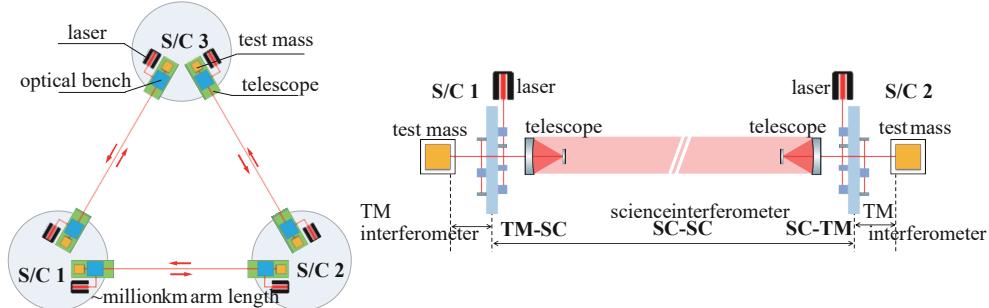


图 2 空间引力波探测激光干涉测量示意图^[3]

Fig. 2 Laser interferometric measurement for space gravitational-wave detection^[3]

除此之外,一些类似的科学任务如太极、天琴、DECIGO 等,也将进行亚赫兹频段空间引力波探测^[4-6]。在这些任务中,核心技术是构建激光外差干涉多自由度超精密测量系统,监测两个自由悬浮的测试质量之间的距离变化。当发生双星合并、超新星爆炸等天体活动时,引力源运动引起时空结构改变,产

生相应的几何曲率振荡,即使在几十万千米长的测量臂上也仅能引起皮米或亚皮米量级的形变。为了成功探测到这一极其微弱的引力波信号,激光干涉测量系统的平动测量灵敏度需要在 1 mHz 到 1 Hz 频段内达到 $1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。想要在百万千米臂长的长基线干涉仪中达到如此高的精度要求,需要保持两测试质量之

间沿外差干涉光轴方向的位置相对稳定,也需要具备 $1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 平动灵敏度以及 $1 \text{ nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ 转动灵敏度的测量能力,这对现有的激光外差干涉测量技术提出了更高的精度以及臂长要求。此外,激光外差干涉多自

由度测量信号也会用于实现质量块位置的反馈控制以及航天器间的光束指向和锁定^[7]。图 3 为空间引力波探测干涉测量系统的终端测试质量及其平动转动的示意图。

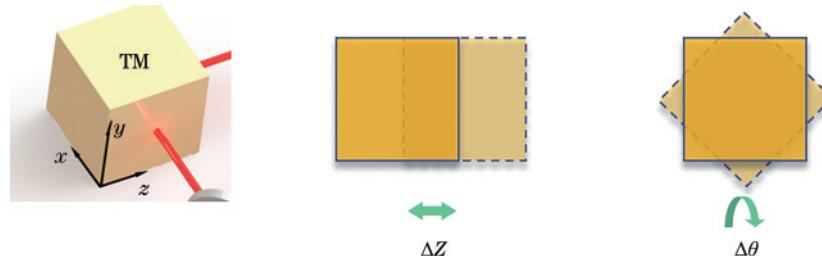


图 3 测试质量及其平动转动示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test mass and translation rotation

多自由度测量是现代化超精密计量领域中最基本且重要的需求,自激光器问世以来,已经发展了很多用于多自由度测量的光学类测试技术,如激光零差干涉^[8]、激光外差干涉^[9-10]、激光三角法、激光内反射法、法拉第旋光效应、光栅法、激光自混合干涉^[11]、调频连续波法、图像视觉等,这些技术能够实现配合目标(测试质量、反射镜等强反射率目标)和非配合目标(纸板、铝等弱反射率目标)的非接触平动转动测量。除了激光多自由度测量外,一些其他方法,包括机械式测量(多齿分度台)、超声波位移检测、电学式传感(电容、电磁、霍尔效应、时栅)等,也能够实现平动或转动的精密测量,在自动控制、机器人技术、超精密加工等多个领域都有着广泛的应用。但是,现有多自由度测量技术的测量精度往往只能达到纳米/亚微弧度量级,且工作距离较短,无法满足空间引力波探测皮米/纳弧度以及百万千米探测距离的测量需求。因此,国内外学者开展了大量面向空间引力波探测的激光外差干涉多自由度超精密测量技术研究。

为了更好地掌握现有的测试质量多自由度超精密测量技术发展趋势,本文首先从激光外差干涉的基本概念出发,介绍空间引力波探测中的多自由度测量以及相位解调原理。随后,回顾了面向引力波探测中测试质量多自由度测量的激光外差干涉技术的国内外研究进展,分析了测试质量位移和角度变化测量中的噪声来源并介绍现有相关研究进展。最后,本文对面向空间引力波探测的激光外差干涉多自由度超精密测量技术的发展提出了展望。

2 激光外差干涉多自由度测量原理

目前,空间引力波探测任务需要实现对测试质量皮米量级的平动测量以及纳弧度量级的转动测量,核心技术单元包括激光外差干涉(LHI)、差分波前传感(DWS)以及高精度相位测量(PM)三部分,如图 4 所示,通过测量两测试质量以及卫星平台的平动转动,获得其间距变化信息,从而验证引力波信号。

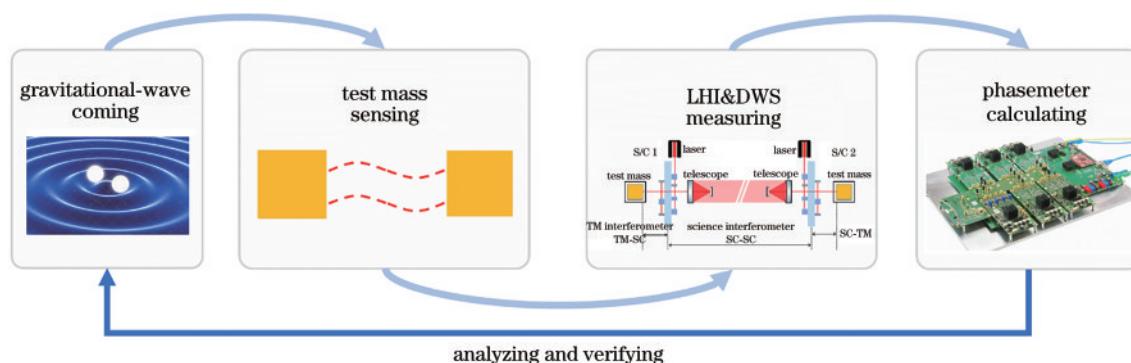


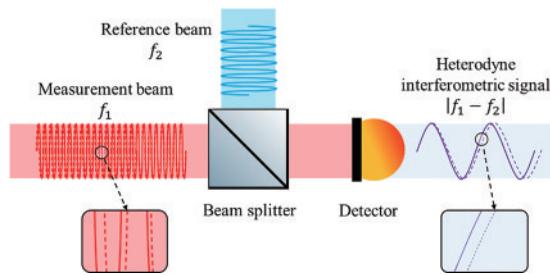
图 4 面向空间引力波探测的激光外差干涉多自由度超精密测量技术示意图

Fig. 4 Ultra-precision laser heterodyne interferometry for translation and tilt measurement in space gravitational-wave detection

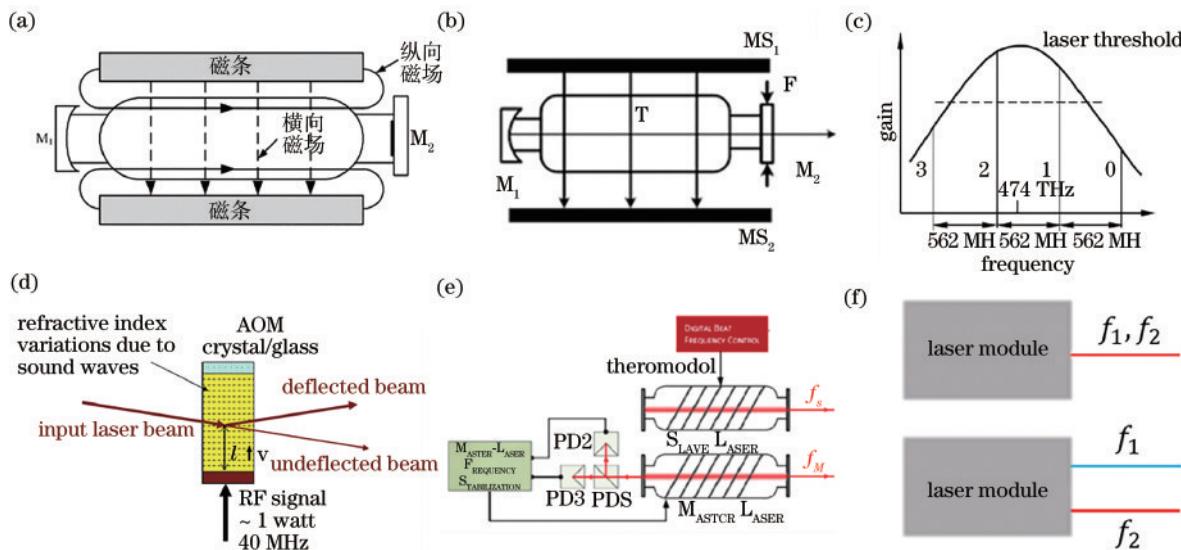
2.1 激光外差干涉

激光外差干涉又称为双频干涉,是在激光零差干涉基础上发展起来的一种精密相位测量技术,其测量原理如图 5^[12] 所示。区别于零差干涉条纹,激光外差

干涉会产生“拍频”现象,即频率相近的两束激光(测量光频率 f_1 ,参考光频率 f_2)合束后,合成波(频率为 $f_1 + f_2$)会叠加一个包络,其频率为 $|f_1 - f_2|$,也被称为外差频率。

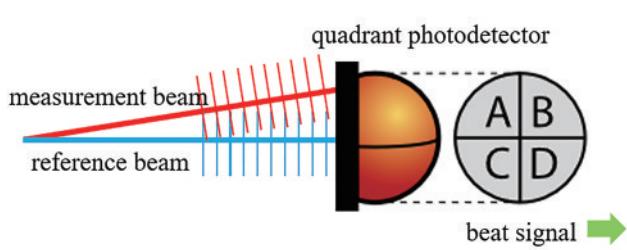
图 5 激光外差干涉原理示意图^[12]Fig. 5 Laser heterodyne interferometric principle^[12]

当测试质量沿测量光传播方向发生运动状态改变,或者引力波信号来临时,干涉仪的测量臂光程发生变化,表现为外差干涉信号的相位波动,即图 5 中虚线部分。以经典迈克耳孙干涉结构为例,外差干涉信号相位的一个周期变化对应位移变化半波长(光程变化一个波长),有

图 6 双频光产生方式。(a) 塞曼效应^[13]; (b) 应力双折射塞曼效应^[14]; (c) 双纵模; (d) 声光调制移频; (e) 双光源锁定^[18]; (f) 空间重合双频和空间分离Fig. 6 Dual-frequency laser source. (a) Zeeman effect^[13]; (b) birefringence-Zeeman effect^[14]; (c) dual-mode compete; (d) acousto-optic modulated; (e) dual-laser locking^[18]; (f) space-overlapping and space-separated

2.2 差分波前传感

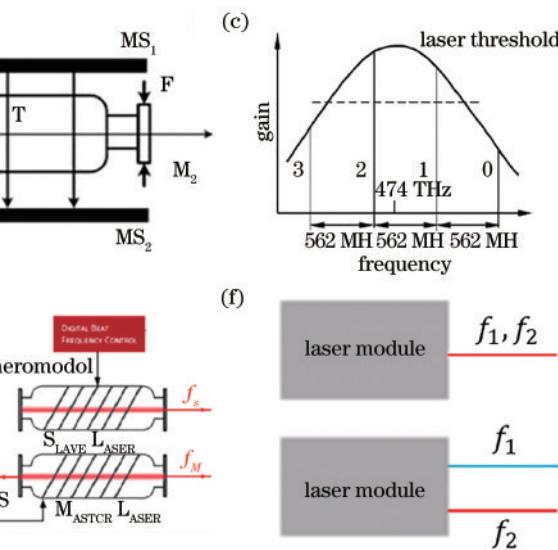
差分波前传感是一种比较激光波前相位的高精度角度测量方法,测量原理如图 7^[25]所示。测量光与参考光合束后入射至四象限探测器表面,两束光满足

图 7 差分波前传感和四通道拍频信号波形示意图^[25]Fig. 7 Differential wavefront sensing and four-channel beat frequency signals^[25]

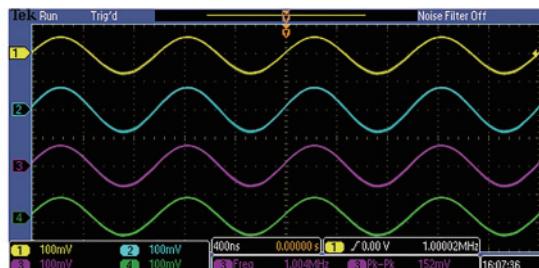
$$L = \frac{\lambda}{2} \times \frac{\varphi}{2\pi}, \quad (1)$$

式中: λ 为激光输出波长; L 为测试质量的等效位移; φ 为外差干涉信号的相位。

可用于外差干涉的双频激光产生方法有:塞曼效应^[13]、应力双折射塞曼效应^[14-15]、双纵模^[16]、声光调制移频^[17]、双光源锁定^[18],如图 6 所示。前三种方法产生空间重合的双频激光,其频差为定值,难以调节,且输出光偏振态并非理想的正交状态,存在频率混叠,会引入额外的位移测量非线性误差^[19]。此外,考虑到两两航天器之间并非完全相对静止,会在测量光频率的基础上叠加一多普勒频移。因此,在地面模拟测试以及空间引力波探测计划中,主要采用空间分离方式,使用单频窄线宽激光器作为干涉光源,输出的单频光经两个声光移频器调制后产生双频光,外差频率可调,一般处于 1 kHz~25 MHz 之间^[20-24]。



干涉条件产生拍频现象,经探测器光电转化后产生四路交流信号,即外差干涉信号。当测量目标发生平动时,四路外差干涉信号相位发生相应波动,这与采用普通光电探测器的原理相一致;当测量目标发生转动

图 7 差分波前传感和四通道拍频信号波形示意图^[25]Fig. 7 Differential wavefront sensing and four-channel beat frequency signals^[25]

时,测量光的波前相对参考光发生变化,由于四象限探测器具有一定的空间间距,四路外差干涉信号的相位波动并不相同,通过对比不同象限相位信号差异,可以反演得到测量目标的转动信息(水平方向和竖直方向),有

$$\begin{cases} \theta_h = k_h \cdot (\phi_A - \phi_B + \phi_C - \phi_D) \\ \theta_v = k_v \cdot (\phi_A + \phi_B - \phi_C - \phi_D) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: θ_h 为水平方向转动; θ_v 为垂直方向转动; $\phi_{A/B/C/D}$ 为外差干涉信号的相位变化; k 为比例系数,由光束参数以及四象限探测器几何参数共同决定,实验中常常采用偏摆镜配合自准直仪进行标定。除了差分波前传

感之外,还可以利用四象限探测器四路输出的强度信息进行角度测量,即差分功率传感,可以用于光束的定位与指向偏移监测^[26]。

2.3 高精度相位测量

高精度相位测量可以通过锁相放大器或者相位表来实现,其基本原理如图 8 所示,外差干涉信号经探测器光电转化为电信号,与本地时钟或外部参考及其正交信号做乘法混频运算,低通滤波后分别得到 Q 信号和 I 信号,通过计算 I/Q 反正切值并作相位解包裹得到相位差, Q 信号作为相位误差信号反馈至本地可调时钟,更新本地时钟输出频率从而保持与输入外差干涉信号频率一致,形成锁相环路。

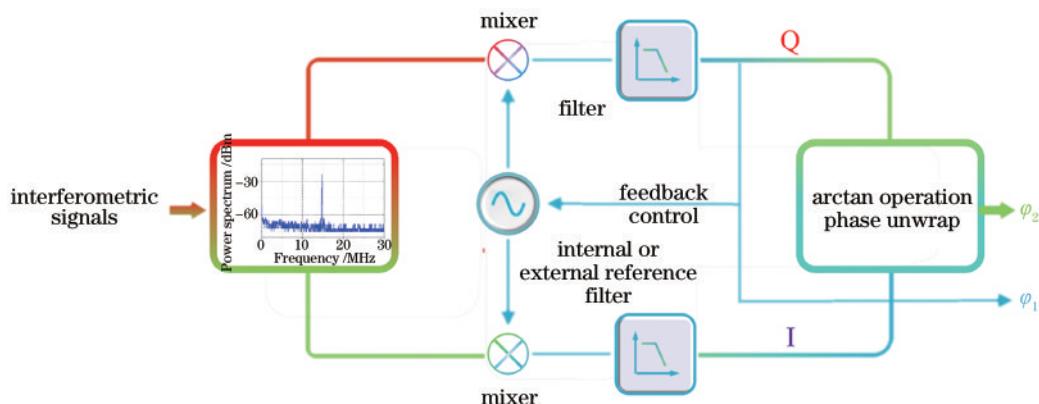


图 8 相位测量基本原理

Fig. 8 Basic principle of phase measurement

目前,市面上有成熟的商业相位计产品可以满足皮米位移的测量解调精度要求,如澳大利亚 Liquid Instruments、瑞士 Zurich Instruments 等,可以用于地面模拟测试^[27-28]。表 1 给出了 Moku: Pro 相位解调模块(锁相放大器和相位表)的典型参数。但是,在空间引

力波探测应用中,解调信号一般有 16 或者 32 通道,且该模块输出的模拟电压信号还作为部分稳定反馈控制模块的误差信号,因此,高精度星载相位测量模块仍需要自主开发研制^[29-31]。

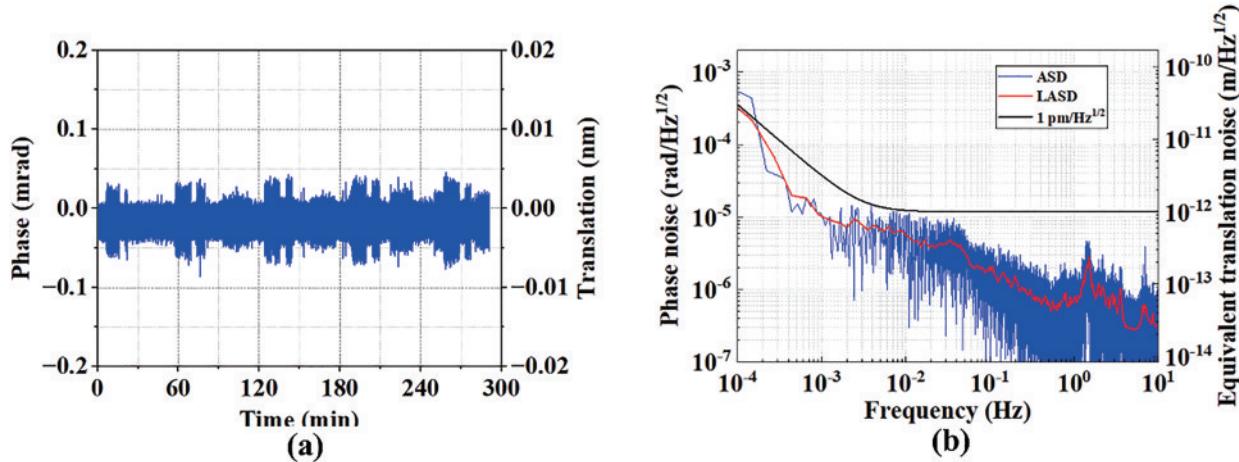
表 1 锁相放大器与相位表参数比对

Table 1 Parameter comparison between phase-locked amplifier and phase meter

Local oscillator/reference source	Lock-in amplifier		Phasemeter	
	Built in/external	Built in/external	Built in/external	Built in/external
Carrier frequency	1 mHz to 600 MHz		1 kHz to 300 MHz	
Demodulation bandwidth	700 mHz to 12.4 MHz		10 Hz to 1 MHz	
Measurable variable	Amplitude, phase		Amplitude, phase, frequency	
Phase demodulation accuracy	—		6 μ rad/Hz ^{1/2}	
Phase linearity tolerance	<2π		>16000000 π	
Analog output	Amplitude, phase		Phase, sine(NCO)	
Maximum detection channels in single instrument mode	1 signal input, 1 phase detector		1~4 signal input, 4 phase detector	
Maximum detection channels in multi instrument parallel mode	1~4 signal inputs, 1~4 phase detectors		1~4 signal inputs, 8 phase detectors	

面向空间引力波探测的测试质量多自由度测量是通过高精度相位计测量拍频信号的相位变化,根据外差干涉以及差分波前传感测量公式反演得到目标的平动与转动结果,并对其做噪声谱密度分析来表征平动

和转动测量的灵敏度。一组典型时域测量结果如图 9(a)^[32]所示,利用完全相同的外差干涉拍频信号送入锁相放大器或者相位表,解调得到相位随时间的漂移,为了准确反映 1 mHz 的测试灵敏度,一般采集

图 9 相位测量。(a)时域结果^[32]; (b)噪声谱密度结果^[33]Fig. 9 Phase measurement. (a) Time-domain results^[32]; (b) noise spectrum density results^[33]

10000 s 以上的零漂数据,然后对时域结果做幅度谱密度(ASD)以及线性幅度谱密度(LASD)变换,如图 9(b)^[33]所示,从而分析其频域灵敏度是否满足空间引力波探测平动和转动的测量需求,即

$$S_{\text{translation}} \leqslant 1 \times 10^{-12} \sqrt{1 + \left(\frac{2.8 \text{ mHz}}{f}\right)^4} (\text{m}/\text{Hz}^{1/2}), \quad (3)$$

$$S_{\text{tilt}} \leqslant 1 \times 10^{-9} \sqrt{1 + \left(\frac{2.8 \text{ mHz}}{f}\right)^4} (\text{rad}/\text{Hz}^{1/2})。 \quad (4)$$

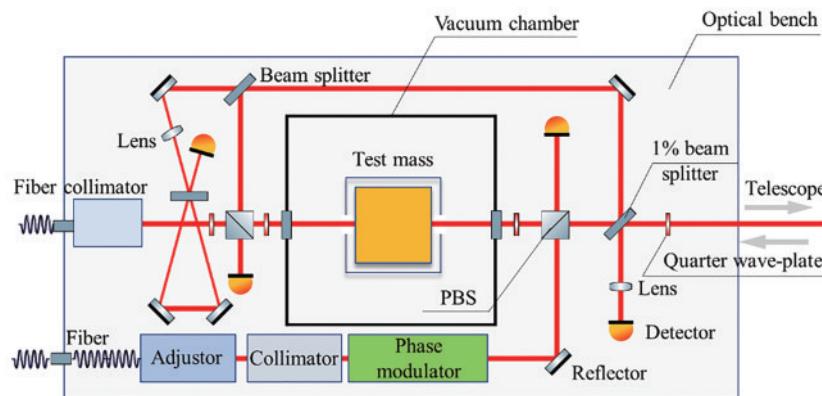
3 国内外研究进展

3.1 LISA

LISA 是于 1992 年发起的一项探测 1 mHz~1 Hz 频段引力波信号的科学研究计划^[20],这是最早开始发展的空间激光干涉引力波探测项目,也是目前国

际上发展最成熟的空间引力波探测计划,其中一项关键技术是实现测试质量的超高精度多自由度测量。

1998 年,LISA 先导计划确立了引力波探测基本方案,采用三星结构,如图 2 所示,每颗卫星载荷有两个光学干涉平台,其中光学干涉平台的光路布局如图 10^[34] 所示,每个光学干涉平台包含两种干涉仪,一种用于本地光与远地光干涉,测量本地航天器与远地航天器之间的测试质量间距变化,即科学干涉仪,另一种用于本地光与另一光学平台的本地光干涉,测量本地航天器两测试质量间的多自由度变化,即测试质量干涉仪。从图 10 可以看出,类似于常见的双频干涉结构,LISA 方案也采用四分之一波片和偏振分光棱镜的方式实现测试质量的外差干涉测量,并使用四象限探测器同时获取测试质量的平动和转动信息。

图 10 LISA 光学干涉平台光路布局^[34]Fig. 10 LISA optical interferometric bench layout^[34]

2000 年 4 月,LISA 在先导计划的研究基础上,改进了光学干涉平台光路布局,包括:移除参考腔至平台外部以增加热稳定性;改进相位调制模块以提升激光使用效率;将偏振分光棱镜与四分之一波片粘接以提升干涉仪稳定性;增加光敏传感器以优化光路准直和

光束捕获等^[35]。LISA 针对测试质量多自由度测量的光路布局及许多设计理念为后续干涉测量系统的构建和优化打下了良好的研究基础。

2003 年,为了验证空间引力波探测计划的可行性和可靠性,LISA 团队提出了 LISA Pathfinder 计划,旨

在测量间距约 40 cm 的两测试质量之间的微弱间距变化,其设计的测试质量干涉仪平动灵敏度指标为 $10 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 3 mHz~30 mHz,用于进行相关核心技术的实施论证,包括无拖曳控制技术、激光外差干涉技术、惯性传感技术、微推进技术等。其中,测试质量的多自由度超精密测量主要由主光学平台完成。LISA Pathfinder 光学平台光路设计包含四种干涉仪,如图 11^[36]所示。测量干涉仪 x1 和测量干涉仪 x1-x2 用来监测两测试质量的平动和转动状态,为了消除测量干涉仪中的激光频率噪声以及前端光程噪声,不同于 LISA 先导计划中的初步方案,Pathfinder 中还设计了频率干涉仪和参考干涉仪,前者将激光器的频率波动

噪声反映到相位波动上,正比于不等臂长,后者测量输入两测试质量之前的光束相位噪声,并与测量干涉仪输出作差,从而消减前端光程噪声。为了降低温度噪声对干涉测量的影响以及提升光学平台抗震性,干涉仪主体基座由低膨胀材料如微晶玻璃进行支撑,并采用光粘技术将干涉仪镜组固定于基座上,从而进一步提高了测试质量的多自由度测量精度。2004 年,LISA 团队对 Pathfinder 光学平台部分进行了地面模拟测试,测试系统实物及结果如图 12 所示,平动测量灵敏度在 10 mHz~1 Hz 优于 $5 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$,转动测量灵敏度达到 $10 \text{ nrad}/\text{Hz}^{1/2}$,满足计划预设指标^[37-38]。

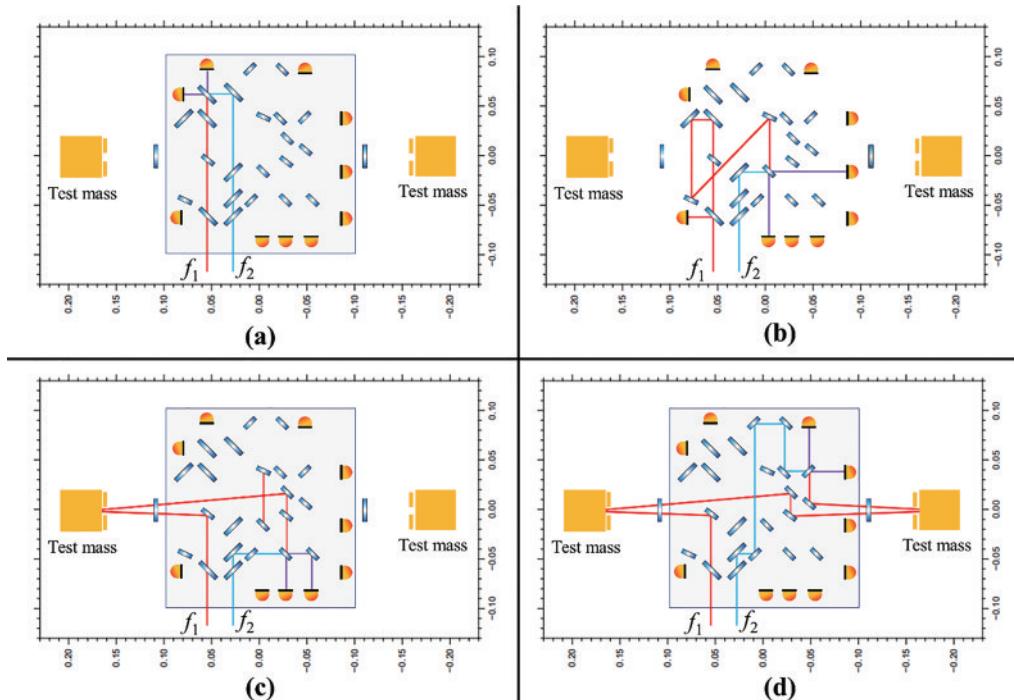


图 11 LISA Pathfinder 干涉光路^[36]。(a)频率干涉仪;(b)参考干涉仪;(c)测量干涉仪 x1;(d)测量干涉仪 x1-x2

Fig. 11 LISA Pathfinder interferometric system design^[36]. (a) Frequency interferometer; (b) reference interferometer; (c) x1 measurement interferometer; (d) x1-x2 measurement interferometer

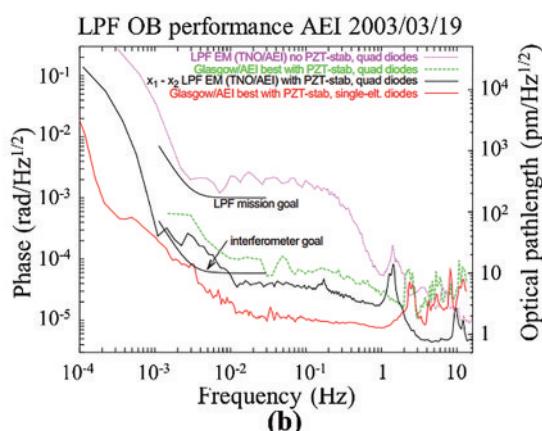
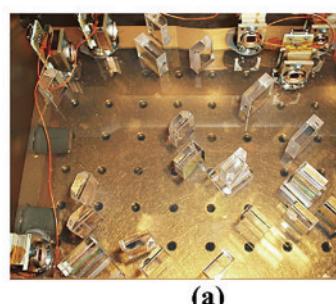


图 12 测试系统实物及结果。(a)LISA Pathfinder 系统实物;(b)平动测量初步结果^[38]

Fig. 12 Physical objects and results of test system. (a) LISA Pathfinder optical bench; (b) initial results of translation measurement^[38]

2006年,ESA&NASA详细描绘了空间激光干涉引力波探测任务LISA,包括任务目标、系统设计、发射安排、集成测试等,其中在载荷设计部分提出了一种可用于空间引力波探测的光路设计,如图13(a)^[39]所示。尽管有许多模块功能相同,如激光频率参考、科学干涉仪、TM干涉仪、CCD捕获、功率监测等,但新的光学干涉平台不同于先导计划中设计的双光束对射光路布局,主体采用镜组与微晶玻璃基座粘接的方式,提高干涉仪稳定性,而且利用转向镜装置传输激光上至望远

镜,下至测试质量,更加适合三星之间的空间干涉布局。2009年,该团队在此基础上优化了光路,包括增加备份光源、移除频率参考、指向测量、支撑结构测量,如图13(b)^[40]所示。2012年,欧洲学者提出了一种覆盖新引力波探测计划(NGO)需要的激光干涉平台设计,如图14^[41]所示,干涉仪整体集成在氢氧化物催化键合的Zerodur圆形基座上,并且在测量干涉仪接收端前增加了成像透镜组,用以抑制光束抖动和平动转动耦合噪声,其余模块功能与之前的设计基本一致。

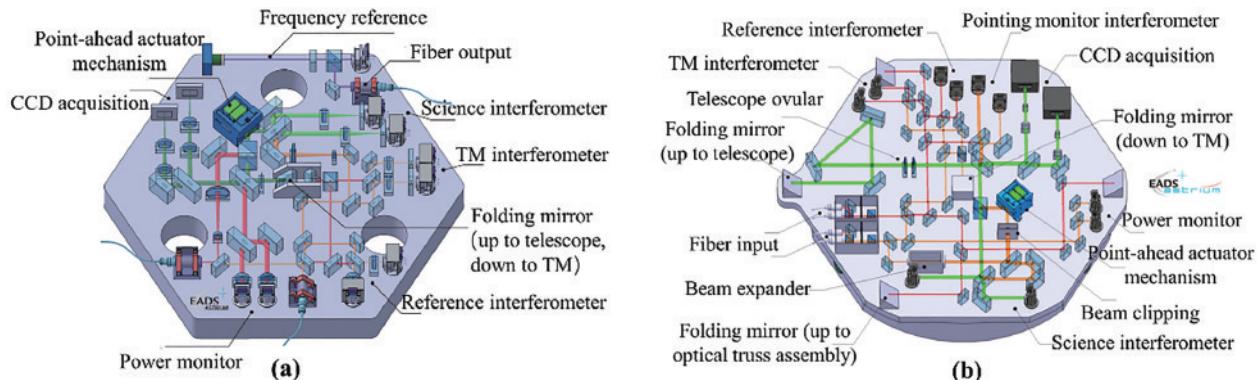


图13 LISA光学干涉平台。(a) 2006^[39]; (b) 2009^[40]

Fig. 13 LISA optical interferometric bench. (a) 2006^[39]; (b) 2009^[40]

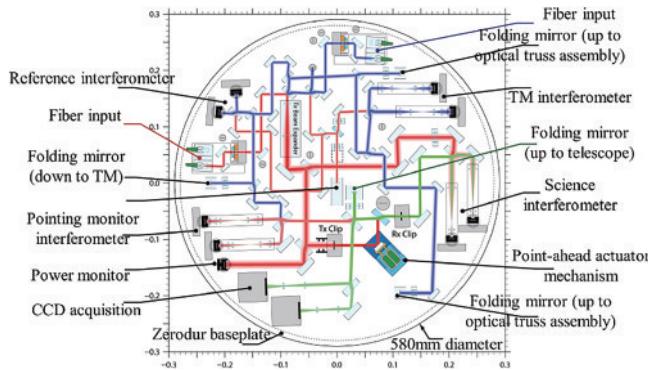


图14 LISA光学干涉平台(2012)^[41]

Fig. 14 LISA optical interferometric bench (2012)^[41]

2012年,马克斯·普朗克科学促进协会Dehne等^[42]设计搭建了一套用于验证测试质量干涉仪噪声源及其消除技术的激光外差干涉测量系统,如图15所示,整体光路结构与LISA Pathfinder类似,都包含有频率干涉仪和参考干涉仪,用于消除激光频率噪声以及前端光程漂移带来的误差,也包含了与Pathfinder中x1-x2测量干涉仪类似的非偏振干涉仪,用反射镜代替测试质量作为测量目标。而且,为了验证LISA需要使用的偏振分光模块,系统还设计了一路偏振干涉仪,也用来测量反射镜的平动转动。偏振干涉仪和非偏振干涉仪都实现了10 mHz~1 Hz频段优于1 pm/Hz^{1/2}的平动测量灵敏度,即使在1 mHz处位移测量噪声也不

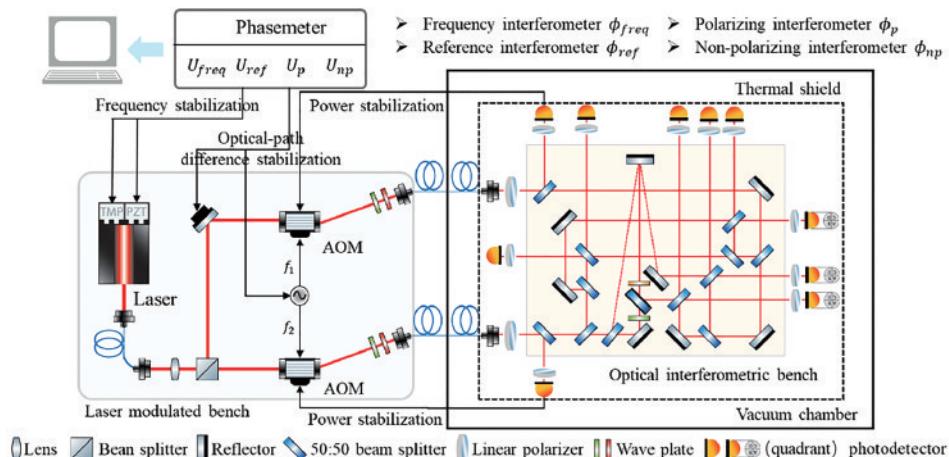


图15 激光外差偏振干涉仪和非偏振干涉仪光路^[42]

Fig. 15 Laser heterodyne polarization interferometer and non-polarization interferometer system^[42]

到 $5 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。团队采用的干涉仪优化措施包括：1)相比原先使用铝制支架及基座，干涉仪整体由低膨胀材料熔融石英制成，减小热形变噪声；2)干涉仪置于真空罐，增加隔热罩，降低空气以及温度扰动；3)采用稳频光源，频率噪声优于 $28 \text{ kHz}/\text{Hz} @ 1 \text{ mHz}$ ；4)增加光强探测闭环锁定模块，减小强度漂移；5)保持激光偏振态稳定；6)采用平衡探测方案，以抑制杂散光；7)对前端光程进行锁定，以抑制非线性误差。除此之外，团队还研究了部分噪声作用机制，包括激光频率波动、指向漂移、强度波动、杂散光等，成功将平动灵敏度优化至 $1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 以下^[43]。

2013年，LISA Pathfinder开展了卫星发射前的地面模拟测试，在高低温测试中光学干涉平台的目标频段灵敏度优于 $6.4 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 以及 $20 \text{ nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ ，并于2015年12月成功发射^[44-45]。卫星飞行至目标轨道后展开了调试，在第二年3月开始测试，一直到2017年7月停止运行。最新的测试结果如图16^[45]所示，LISA Pathfinder上的测试质量干涉仪平动灵敏度达到了 $0.032 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2} @ 1 \text{ Hz}$ ，是目前空间引力波探测中测试质量激光外差干涉超精密测量技术的最高水平^[46]。但是，测试质量不能完全保持自由悬浮状态，仍存在缓

慢移动，导致低频处的平动灵敏度测量曲线未能满足 $1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 的 LISA 空间干涉测量要求。

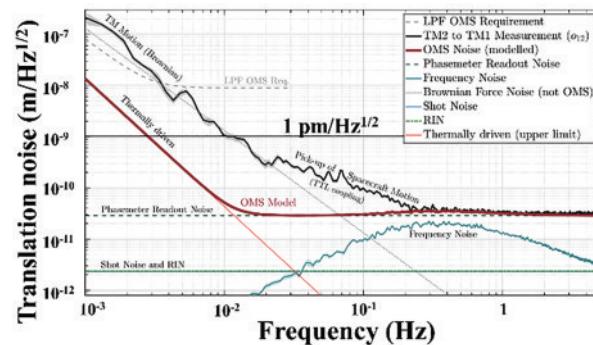


图16 LISA Pathfinder测试质量平动灵敏度最新测试结果^[45]
Fig. 16 The test mass translation measurement results of LISA Pathfinder^[45]

2017年，LISA对光学干涉平台进行了优化，利用基座正反面布置干涉仪，缩小整体体积，如图17(a)^[3]所示。2022年，LISA提出了一种新的光学干涉平台布局，如图17(b)^[47]所示，三种测量干涉仪设计仍然保持不变，但通过透反射设计实现了干涉仪探测模块的备份，降低了光学干涉平台单路探测失败的风险。而

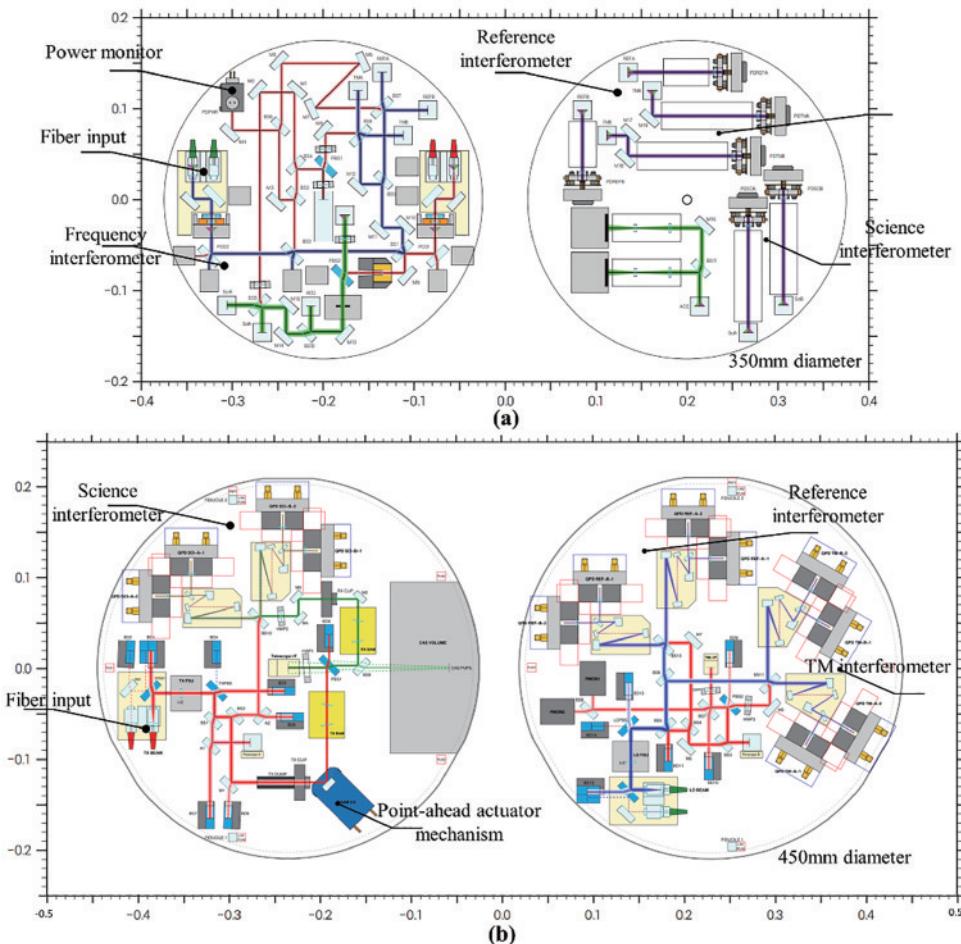


图17 LISA光学干涉平台。(a) 2017^[3];(b) 2022^[47]
Fig. 17 LISA optical interferometric bench. (a) 2017^[3]; (b) 2022^[47]

且,不同于以往抑制平动转动耦合噪声(TTL)的折射成像系统设计,最新光路布局采用反射成像镜组进行 TTL 噪声压制,且同样满足 $13 \mu\text{m}/\text{rad}$ 的平动转动耦合指标。

总结而言,图 18 给出了 LISA 激光干涉平动转动测量技术发展时间线,该计划从提出、地面模拟论证、技术卫星验证、噪声源探索、光路布局优化测试等,已经开展

了三十年,其中用于测试质量多自由度测量的激光外差干涉技术灵敏度已经突破 $1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 和 $1 \text{ nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ 。目前光学干涉平台布局处于优化设计阶段,用于空间引力波探测的三星光路干涉结构仍未完全确定,激光外差干涉超精密测量技术是否能够实现百万千米距离的两测试质量之间的皮米级平动测量并成功探测到宇宙深处的引力波仍然需要时间来给出答案。

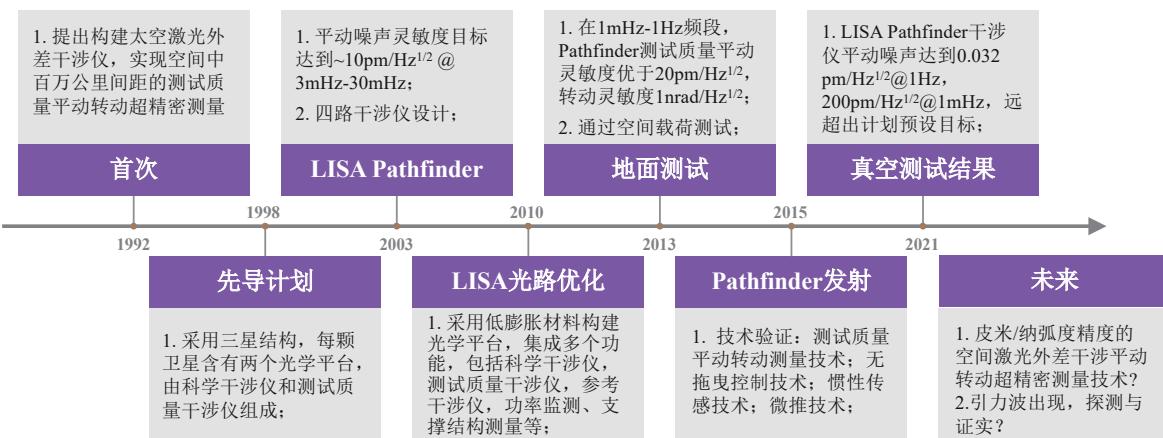


图 18 激光干涉平动转动测量技术发展时间线(LISA)

Fig. 18 Timeline of development of laser interferometry for translation and tilt measurement technology (LISA)

3.2 太极&天琴

2011年,为了验证空间引力波探测中激光外差干涉位移测量以及高精度相位解调技术,华中科技大学将外差干涉测量系统放置在圆柱形真空罐中,并利用压电陶瓷推动反射镜来模拟测试质量的平动位移,测量光路如图 19^[30]所示,固体激光器出射的单频光经声光移频器调制后通过单模保偏光纤引入光学干涉平

台,一部分形成参考干涉仪,另一部分的测量光经 10 m 真空管道传输至远端反射镜并返回与参考光干涉,形成 10 m 基线测量干涉仪,两路拍频信号送入相位计解调并计算得到位移信息。实验结果表明,该团队研制的 10 m 基线激光外差干涉仪的测量灵敏度主要受激光器频率噪声限制,在 1 Hz 处小于 $1 \text{ nm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

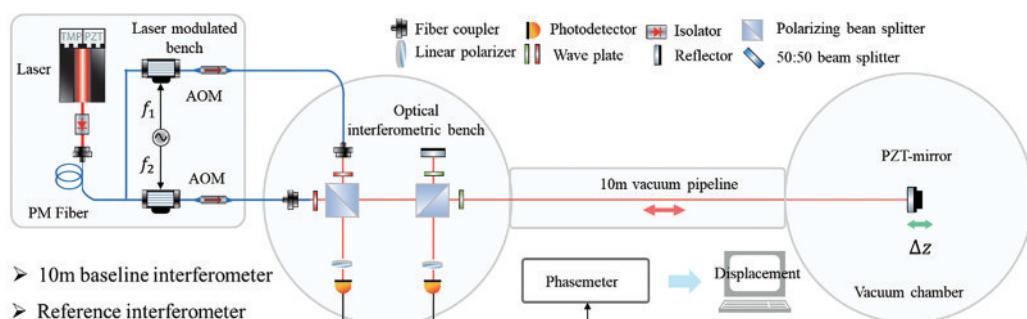


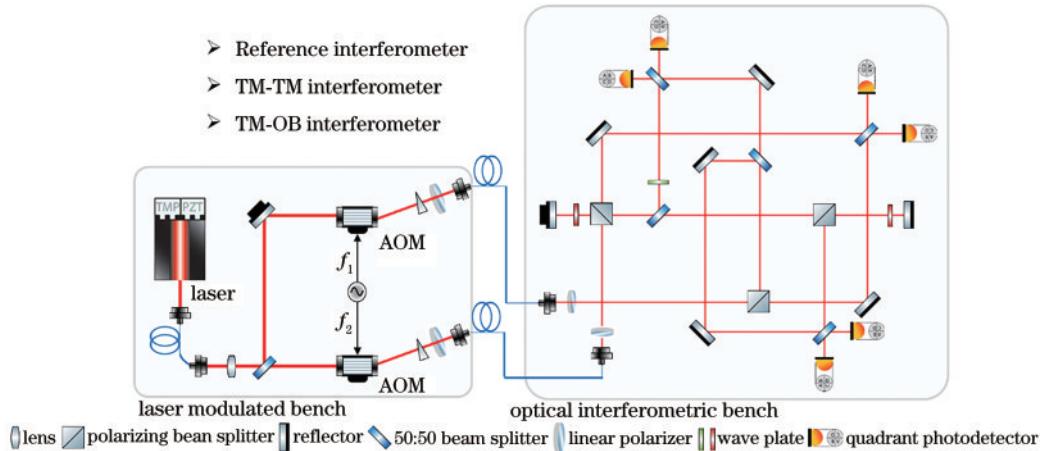
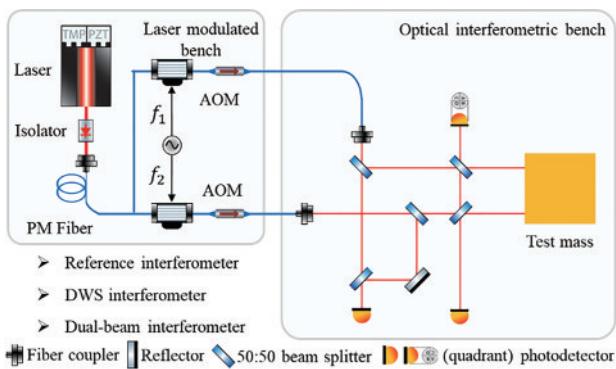
图 19 10 m 臂长激光外差干涉仪^[30]

Fig. 19 10 m arm length heterodyne interferometer^[30]

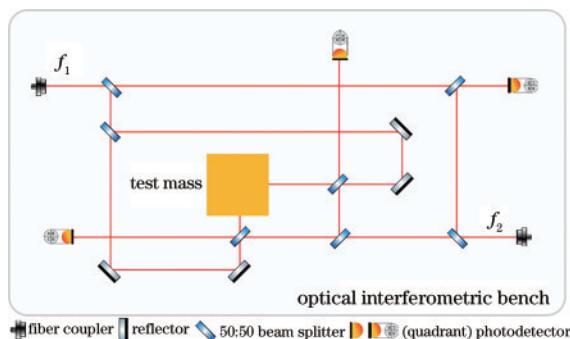
2012年,中国科学院力学研究所设计搭建了面向空间引力波探测应用的激光外差干涉测量系统,并根据太极计划研究需求,对光路布局进行了多次优化^[48-52],该团队研究的一种典型干涉光路如图 20^[53]所示,系统包含两部分,即提供双频光源的激光调制平台以及光学干涉平台,设计了三种干涉仪,包括参考干涉仪、测试质量-测试质量干涉仪和测试质量-光学平台干涉仪,并利用压电陶瓷促动器推动反射镜模拟测试质量的平动转动,用以验证未来空间引力波探测中测

试质量的多自由度激光外差干涉测量技术。2020年,该团队基于上述干涉光路,搭建了一套皮米位移测量系统并置于真空罐中进行测试,最终实现了 $10 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 10 mHz 的平动测量^[53]。2021年,该团队提出构建臂长 8 m 的激光外差干涉仪,用于验证空间引力波探测关键技术,目前正处于建设中^[54]。

2015年,中山大学设计搭建了一套测试质量平动转动测量系统,系统光路如图 21^[55]所示,包括激光调制平台和光学干涉平台两部分,平动转动信息既可以

图 20 激光外差干涉光路示意图^[53]Fig. 20 Laser heterodyne interferometric system^[53]图 21 测试质量平动转动激光外差干涉测量示意图^[55]Fig. 21 Laser heterodyne interferometric system for translation and tilt measurement of test mass^[55]

通过差分波前干涉仪获得,也可以由双光束干涉仪进行测量。通过对测量系统的温度、激光频率以及前端光程调制测试并逐项优化,最终实现了 $30 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 10 mHz 和 $8 \text{ nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 10 mHz 的平动转动测量^[56]。在此基础上,该团队结合差分波前传感和多路分光外差干涉,分别实现了测试质量五自由度(图 22)^[57]以及六自由度测量^[58],也达到了亚纳米以及亚微弧度的平动转动测量精度,有望为空间引力波探测中测试质量

图 22 测试质量五自由度激光外差干涉光路^[57]Fig. 22 Laser heterodyne interferometric system for five degree of freedom measurement of test mass^[57]

的姿态监测与反馈控制提供新的光路结构设计。

同 LISA 一样,太极和天琴计划于 2019 年分别发射了太极一号和天琴一号技术验证卫星,其光学干涉平台如图 23 所示,前者采用殷钢材料制作光学干涉平台基座,后者则采用微晶玻璃光粘的方式来提高干涉装置的热稳定性,两者都包含有前端光程参考干涉和测试质量测量干涉仪。测试实验最新结果表明,空间激光干涉仪可以实现亚赫兹频段皮米量级的位移超精密测量,标志着我国在空间引力波探测中针对测试质量多自由度测量的激光外差干涉技术研究正逐渐走向国际前列^[59-63]。

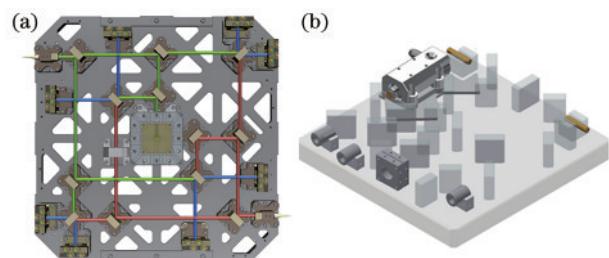


图 23 我国空间引力波探测技术验证卫星激光干涉平台。

Fig. 23 Optical bench of laser interferometry for space gravitational wave detection in China. (a) Taiji-1^[59]; (b) Tianqin-1^[61]

3.3 国内外其他平动转动外差干涉测量技术研究

目前,国外除了 LISA 外,许多团队也开展了面向空间引力波探测应用的激光外差干涉超精密测量研究,而国内方面尽管激光外差干涉技术已经发展了几十年,但面向空间引力波探测的干涉测量技术研究仍然较少。除了太极和天琴团队,我国以往的激光外差干涉多自由度测量技术更多地关注时域测量特性,侧重于仪器化和工业应用,如机床校准、光刻机定位等,出现了一批激光外差干涉精密测量仪器和产品,但采用噪声谱密度来分析多自由度测量灵敏度较少,也缺

少对具有超长臂长的空间激光外差干涉测量技术的研究,这一领域仍处于起步阶段。

国外方面,2007 年,德国 Schuldt 等^[64-65]提出了一种双光束多自由度测量干涉光路,如图 24^[64]所示,双频光经过分光棱镜产生平行光束后,分别输入至(偏振)分光棱镜分光并合束,产生参考信号和测量信号,

比较两者相位差即可获得目标的平动转动信息。经过强度稳定以及前端光程稳定等优化后,该系统实现了 $1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ 频段 $20 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ 和 $75 \text{ nrad/Hz}^{1/2}$ 的平动转动测量,其中在 1 Hz 处达到了 $3 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ 以及 $4 \text{ nrad/Hz}^{1/2}$ 的噪声水平,并成功用于超稳材料的热膨胀形变测量。

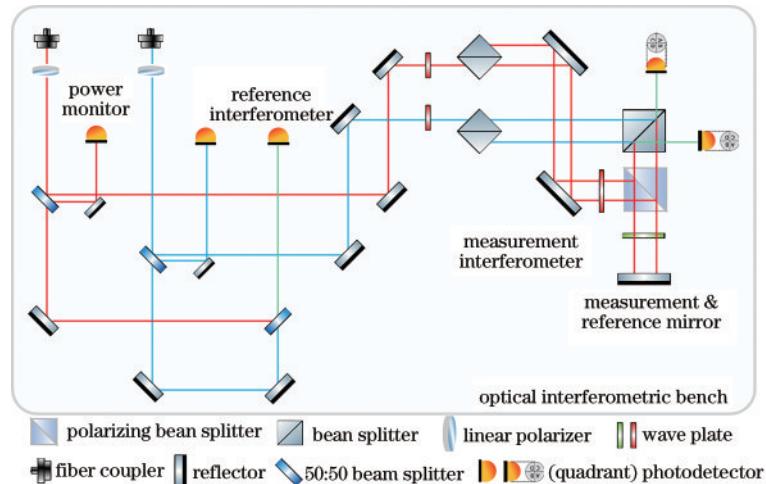


图 24 双光束激光外差干涉光路示意图^[64]

Fig. 24 Optical layout of dual-beam heterodyne interferometric system^[64]

2017 年,德国联邦物理技术研究院(PTB)研制了一种差分外差干涉编码器^[66],利用双声光移频器产生外差光源,并结合光栅调制实现了垂直于光轴方向的平动测量,30 s 稳定性(标准差)优于 289 pm ,3600 s 稳定性优于 808 pm ,非线性误差小于 30 pm 。

2019 年,NASA 的 Fulda 等^[67]搭建了一套短臂长多自由度测量干涉仪,在 35 mHz 以上频段实现了 $1 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ 平动测量、 100 mHz 以上频段实现了 $1 \text{ nrad/Hz}^{1/2}$ 转动测量,并讨论了多个噪声源(激光频率、激光强度、温度、相位计、探测器、光纤、偏振态、振动等),研究认为杂散光引入的测量误差是目前限制干涉仪测量灵敏度的主要因素。

2021 年,美国德州农工大学提出了一种一体式外差干涉仪,将分光镜波片等关键镜组胶粘成一个整体,提升干涉仪稳定性,并通过抽真空、被动控温、噪声建模消减等措施最终实现了 $33 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ @ 0.1 Hz 的平动测量^[68]。

国内方面,哈尔滨工业大学针对微电子光刻机等高端装备的高速位移精密测量需求,研制了一系列超精密激光外差干涉测量仪器,位移分辨率达到 0.077 nm ,光学非线性误差处于亚纳米甚至皮米量级^[69-70]。

清华大学针对光刻机等苛刻测量环境中实现多自由度干涉测量的需求,提出了基于棱镜误差矢量分析的单体集成多轴干涉仪组件设计方法,研发出从 2 轴到 5 轴的系列化单体式多自由度干涉仪组件,成果获评“2019 中国光学领域十大社会影响力事件”^[71]。

2022 年,清华大学提出了一种适用弱反射或漫反

射目标的非接触式平动转动测量技术^[72],在 1 Hz 处实现了 $50 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ 平动和 $0.9 \text{ nrad/Hz}^{1/2}$ 转动测量,但低频部分的测量灵敏度仍受激光频率波动和测试环境漂移的影响。同年,该团队提出了一种用于测试质量五自由度测量的偏振复用双光束干涉仪,光路设计如图 25 所示,包含参考干涉仪(RHI)、双光束干涉仪(DBHI)和偏振复用干涉仪(PMHI),初步实验实现了 $1 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ @ 1 Hz 以及 $0.5 \text{ nrad/Hz}^{1/2}$ @ 1 Hz 的测量灵敏度,如图 26^[32] 所示。

4 噪声源

回顾面向空间引力波探测的激光外差干涉测量技术的发展历程,我们不难发现,该技术得以实现皮米量级测量精度的最关键之处在于压制噪声。但是,不同于以往的面向工业应用的纳米精度激光外差干涉技术,空间引力波探测中的激光外差干涉测量技术需要实现百万千米臂长的皮米量级测量精度,传统干涉测量中的噪声溯源模型已经不再适用,且出现了很多新的噪声源。因此,为了更好地认识和理解面向空间引力波探测的激光外差干涉测量技术,我们对其主要噪声以及相关研究进展进行介绍。

4.1 激光频率噪声

当外差干涉仪的测量臂和参考臂存在臂长差时,激光通过两臂的时间不一致,此时测量臂由激光频率波动引起的相位变化无法与参考臂完全抵消,从而导致测量误差,激光频率噪声引入的相位测量误差

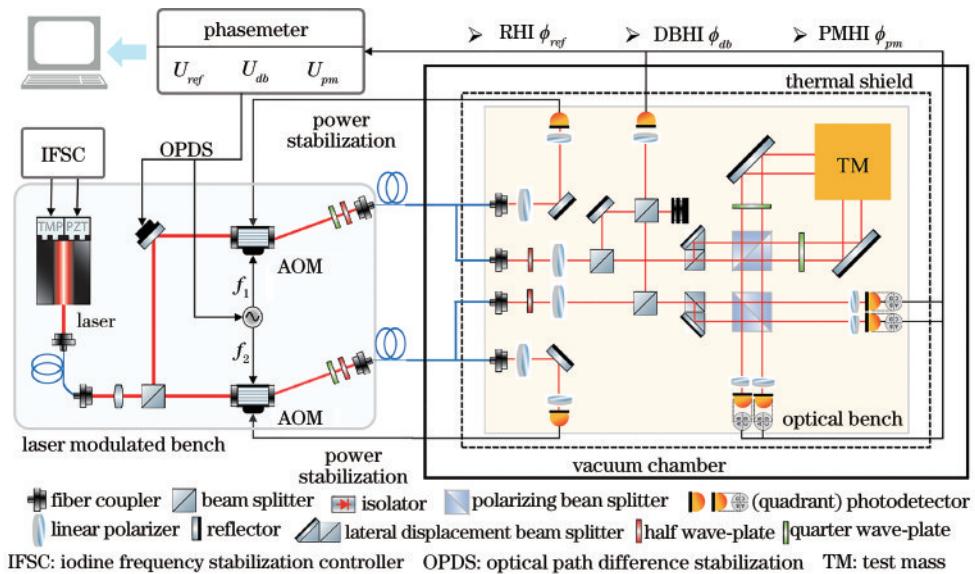
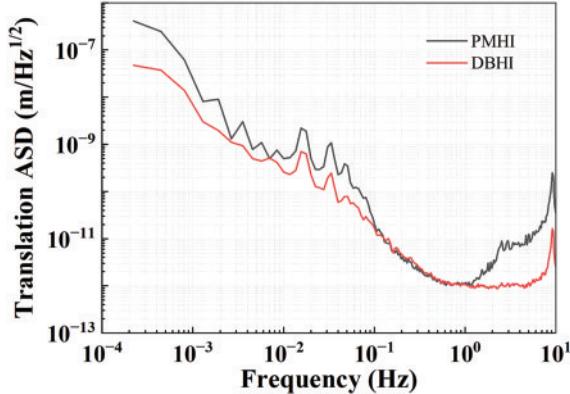


图 25 偏振复用双光束激光外差干涉五自由度测量系统

Fig. 25 Five degree of freedom measurement system based on polarization multiplexing double beam laser heterodyne interference

图 26 偏振复用双光束干涉仪初步测试结果^[32]Fig. 26 Preliminary test results of polarization multiplexing double beam interferometer^[32]

$\delta\varphi_{\text{frequency}}$ (单位:rad/Hz^{1/2})和位移测量误差 $\delta L_{\text{frequency}}$ (单位:m/Hz^{1/2})为

$$\delta\varphi_{\text{frequency}} = \frac{4\pi\Delta L}{c} \delta f, \quad (5)$$

$$\delta L_{\text{frequency}} = \Delta L \frac{\delta f}{f}, \quad (6)$$

式中: f (单位:Hz)为激光频率; c (单位:m/s)为光速; ΔL (单位:m)为干涉臂长差; δf (单位:Hz/Hz^{1/2})为激光频率变化。因此,如需平动测量灵敏度指标满足式(3),则不同臂长差条件下激光器的频率稳定性有不同的指标要求。图 27 还给出了固体激光器(Coherent Prometheus 系列)自由运转和稳频状态下的频率噪声曲线。当不等臂长为 1 mm 时,自由运转激光器的频率噪声已经不满足实现 1 pm/Hz^{1/2} 测量的精度要求,此时必须使用稳频光源。

PDH(Pound-Drever-Hall)是一种广泛应用于激光器稳频的技术^[73],其核心是反馈控制,即伺服调谐激

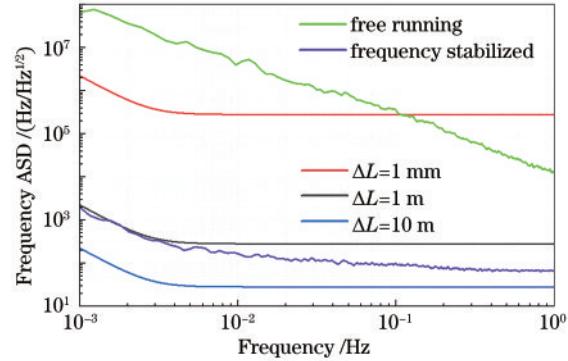


图 27 不同不等臂长时的激光器频率噪声要求曲线

Fig. 27 Laser frequency noise requirement with different unequal arm lengths

光器的腔长和温度,使得激光器输出频率锁定到超稳法布里-珀罗(FP)腔的共振频率上。2005年,Tröbs^[74]根据 LISA 项目需求研制了一套 PDH 激光稳频装置,噪声在 3 mHz~1 Hz 频段优于 30 Hz/Hz^{1/2},更低频部分噪声主要由参考腔所在环境的温度缓漂导致。2011年,NASA/ESA 联合研制了一套用于空间干涉测量的星载 PDH 稳频激光系统并成功用于地球重力场测量(GRACE follow-on, 2017年)中,噪声在 1 mHz~1 Hz 频段优于 30 Hz/Hz^{1/2},也满足 LISA 的指标要求^[75-76]。2018年,ESA 测试评估了一套可用于 LISA 计划的超稳光源集成系统,包括出光功率、频率噪声、强度噪声、频率复现性、使用寿命等,使用 PDH 稳频后的频率噪声能够达到 10 Hz/Hz^{1/2},满足空间引力波探测需要^[77]。2020年,中国科学院精密测量科学与技术创新研究院陈李生团队基于 PDH 稳频技术构建了两套 1064 nm Nd:YAG 超稳激光实验系统,激光频率噪声优于 10 Hz/Hz^{1/2}@1 mHz~1 Hz^[78]。2021年,中山大学研制了一套面向空间应用的 PDH 稳频光源系统,激

光频率噪声在 $10 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ 频段达到 $30 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 水平^[79]。

PDH 稳频技术还可以用于超稳材料的结构稳定性探测,即将待测材料制成 FP 腔,用腔的几何形变表征结构稳定性能,通过 PDH 稳频后的激光器频率来描述,将单点形变转化为频率波动。2020 年,美国佛罗里达大学 Kulkarni 等^[80-82]基于 PDH 技术测试证明了商用镜组结合微晶玻璃的光学平台稳定性优于 $1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ @ $1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$,并将这一技术应用到望远镜镜组和支撑结构的形变稳定性测试中。

另一种实现激光频率稳定的方法是碘分子稳频,即利用分子碘的超精细跃迁作为参考谱线进行激光器频率锁定,一般相较于腔稳方式具有更好的长期稳定性。2012 年,Döringshoff 等^[83-85]设计研制了一种面向空间干涉仪的碘稳频粘接式激光系统,激光频率噪声在 $1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ 频段达到了 $10 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级,并于 2019 年成功安装在探空火箭上展开测试,可以作为空间引力波探测任务中干涉仪或者链路模块的备选光源。国内方面:2007 年,中国计量科学研究院 Zang 等^[86]利用调制转移光谱技术,通过增加激光在碘室中往返次数从而增大有效光程,选择 $^{127}\text{I}_2$ R(56)32-0: a₁₀ 线作为激光器锁定的参考谱线,实现了 532 nm 波段的碘稳频激光输出,频率稳定度达到 2.3×10^{-14} @1 s,150000 s 内激光频率偏移不超过 175 Hz;2018 年,中国科学院上海光学精密机械研究所杜娟等^[87]研制了一种小型化 1064 nm 激光器,碘分子吸收池长度仅为 50 mm,10000 s 阿伦偏差精度优于 0.1 MHz;2021 年,华中科技大学程飞虎^[88]构建了一套准一体化碘稳频激光系统,如图 28^[88] 所示,激光频率稳定度为 2.7×10^{-14} @1 s,激光频率噪声在 $1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ 频段优于 $500 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

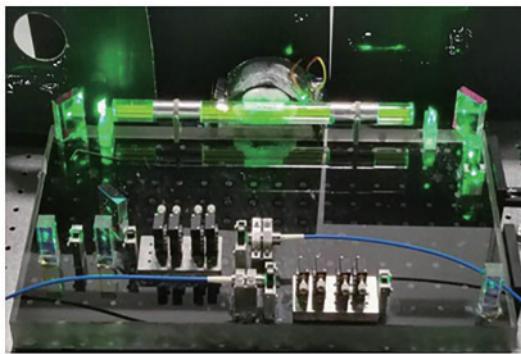


图 28 准一体化碘稳频激光系统^[88]

Fig. 28 Quasi-integrated iodine stabilized laser system^[88]

不管是 PDH 稳频还是碘分子稳频,激光频率噪声在目标频段处于 $10 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级,但在空间引力波探测中,激光外差干涉系统具有几十万千米的不等臂长,意味着激光频率噪声在 $1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ 频段需要达到 $10^{-6} \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级才能实现满足位移测量指标要求。

针对这一问题,LISA 提出首先利用 PDH 稳频技术将激光器频率噪声压制到 $30 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$,然后,由于双星间距在 $1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ 频段是十分稳定的,可以利用锁定技术将激光频率噪声压制到 $10^{-4} \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级。最后,利用时间延迟干涉技术(TDI)采集航天器间的相位测量数据来构建等臂长的虚拟干涉仪,从而达到压制频率噪声的目的^[89-90]。TDI 技术最早由 Tinto 等^[91]提出,通过将三星间的激光外差干涉相位测量数据进行适当的时域延迟并线性组合,消除激光频率波动带来的相位测量噪声,同时还保留引力波信号。国内方面太极和天琴团队也开展了 TDI 技术地面验证实验,利用干涉信号的不等延迟模拟空间引力波探测中的双星不等臂长,通过相位数据间的线性组合来压制激光频率噪声^[92-93]。

4.2 激光强度噪声

激光强度噪声是指干涉光路中的光功率发生波动(光源出光功率波动、卫星跳动、测试质量运动等),导致相位测量失准,可以用相对强度噪声(RIN,单位: $1/\text{Hz}^{1/2}$)来描述,定义为光功率波动与平均光功率的比值^[94]。

一方面,由于光压效应,测试质量表面存在由测量光引起的压力,当光束强度发生变化时,压力波动会改变目标运动状态,使测试质量发生十分微弱的位移,其数值大小取决于目标质量、目标表面反射率、入射光功率及其波动。由于地面模拟测试时,一般将反射镜固定用来充当测试质量,所以由光压效应引起的位移噪声可以忽略。另一方面,在解调带宽内,相对强度噪声会在外差频率及其二倍频处耦合到干涉仪相位输出中,造成测量误差。2017 年,Wittchen 等^[95]分析并定性测试了 LISA Pathfinder 的在轨相对强度噪声作用机制,发现其在 DC 处对相位测量没有影响,在外差频率处可以通过平衡探测方式消除相对强度噪声,而外差频率二倍频处的相对强度噪声可以利用锁定前端参考光程的方式进行压制。该团队还在 2022 年理论推导了相对强度噪声作用机制,并利用对称式干涉仪平台开展了实验论证^[96]。

4.3 非线性误差噪声

非线性误差是指测量目标发生线性位移时,干涉仪的测量结果偏移线性的部分。引起干涉仪非线性误差的来源主要包括:1)干涉过程中实际光束的偏振态与设计偏振态存在偏差。一般可能由单模保偏光纤、偏振分光棱镜、波片等导致^[42];2)杂散光。由光学干涉平台中的镜面虚反射引入,如波片、分光棱镜后表面等^[70];3) AOM 射频驱动谐波边带^[97]。

这些非线性误差源会导致干涉仪外差信号在频域上出现除了主拍频峰外的其他杂散峰,在相位解调带宽内可表示为

$$I_{\text{PD}} \propto \cos(2\pi\Omega t + \Delta\varphi) + \kappa_i \cos(2\pi\Omega t + \varphi_i), \quad (7)$$

式中: Ω 为外差频率; $\Delta\varphi$ 为测量光相位变化; κ_i 和 φ_i 分别为非线性项的振幅和相位。

根据相位解调原理, 经过低通滤波后 I/Q 分量为

$$I = \sin(\Delta\varphi) + \sum_i^n \kappa_i \sin(\varphi_i), \quad (8)$$

$$Q = \cos(\Delta\varphi) + \sum_i^n \kappa_i \cos(\varphi_i). \quad (9)$$

如图 29(a) 所示, 当存在若干个非线性项时, 解调测量光的相位变化存在误差, 一般地, 外差干涉仪中非线性项的振幅很小, 相位解调误差可近似为

$$\delta\varphi_m = \arctan\left(\frac{I}{Q}\right) - \Delta\varphi = \arctan\left[\frac{\sin(\Delta\varphi) + \sum_i^n \kappa_i \sin(\varphi_i)}{\cos(\Delta\varphi) + \sum_i^n \kappa_i \cos(\varphi_i)}\right] - \Delta\varphi \approx -\sum_i^n \kappa_i \sin(\Delta\varphi - \varphi_i). \quad (10)$$

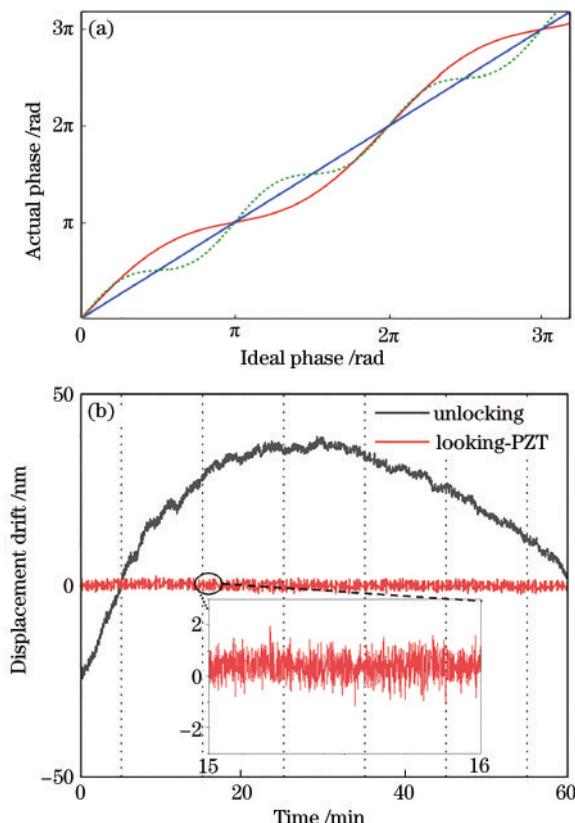


图 29 激光外差干涉光程测量。(a) 非线性误差;(b) PZT 光程锁定

Fig. 29 Optical path measurement by laser heterodyne interference. (a) Nonlinear error ;(b) PZT optical path locking

因此, 非线性位移误差 $\delta L_{\text{nonlinear}}$ (单位: m/Hz^{1/2}) 为

$$\delta L_{\text{nonlinear}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sum_i^n \kappa_i \sin(\Delta\varphi - \varphi_i) \leqslant \sum_i^n \kappa_i \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi} |\varphi_i| \right). \quad (11)$$

由此可见, 非线性项引入的位移误差由振幅 κ_i 以及相位 φ_i 决定, 如果按非线性振幅 $\kappa = 0.01$ 计算, 需要相位 $\varphi_{\text{nonlinear}}$ (单位: rad/Hz^{1/2}) 满足

$$\varphi_{\text{nonlinear}} \leqslant 1.18 \times 10^{-3} \sqrt{1 + \left(\frac{2.8 \text{ mHz}}{f} \right)^4}, \quad (12)$$

式中: f 为频率。

为了减小非线性项引入的位移测量误差, 一般采用两种方式: 1) 优化干涉光路降低非线性项振幅, 如采用高性能偏振器件^[42]、镀增透膜^[98]、优化 AOM 驱动谐波^[42]、倾斜虚反射面^[99-100]等; 2) 利用光程调制器件锁定相位 $\varphi_{\text{nonlinear}}$, 如 PZT 推动反射镜^[101]、PZT 拉伸光纤^[101]、改变移频器驱动频率^[102]等。图 29(b) 给出了一组利用 PZT 驱动反射镜的光程锁定结果, 空气环境下干涉仪前端光程漂移处于 100 nm/h 量级, 经过锁定后光程标准差小于 0.5 nm/h。

4.4 光程噪声

根据激光外差干涉测量公式, 当光束传输介质折射率 n 和光束经过的臂长 L 发生波动时, 相位会产生误差, 即光程噪声导致位移测量失准。

不管是折射率变化, 还是镜片/光纤/机械件发生形变, 其引入的光程噪声往往与温度噪声耦合在一起, 共同作用到干涉仪相位输出上, 即

$$\delta L_{\text{optical pathlength}} = k \Delta T, \quad (13)$$

式中: k (单位: m/K) 为耦合系数; ΔT (单位: K/Hz^{1/2}) 为温度变化。

2012 年, Dehne 等^[42] 研究了不同测试环境下的温度噪声以及它对干涉仪输出的影响, 结果如图 30 所示, 真空隔热层内温度噪声可以达到 0.1 mK/Hz^{1/2}@1 mHz 以下。

2018 年, 哈尔滨工业大学研究了一种一体式非共光路干涉镜组, 双层干涉光路结构对称设计保证热稳定性小于 2 nm/K, 对应温度噪声需要在目标频段优于 0.5 mK/Hz^{1/2}^[103]。

2022 年, Beck^[104] 提出了一种可调式皮米超稳干涉仪测试系统, 利用微晶玻璃与机械件结合的方式搭建外差干涉光路, 适当舍弃光粘方式的稳定性, 却大大增加了干涉仪的灵活性, 可设计多种干涉光路用于地面技术验证。Beck 结合温度噪声曲线及器件耦合系数(热膨胀系数), 定量评估了由微晶玻璃基座和机械支撑件热变形引入的位移测量误差是否低于 1 pm/Hz^{1/2}。

4.5 散粒噪声

散粒噪声是光学测量最基本的噪声之一, 主要是由光子数的涨落引起, 这种涨落服从泊松统计。假设激光的功率为 P , 那么单位时间内的光子数为

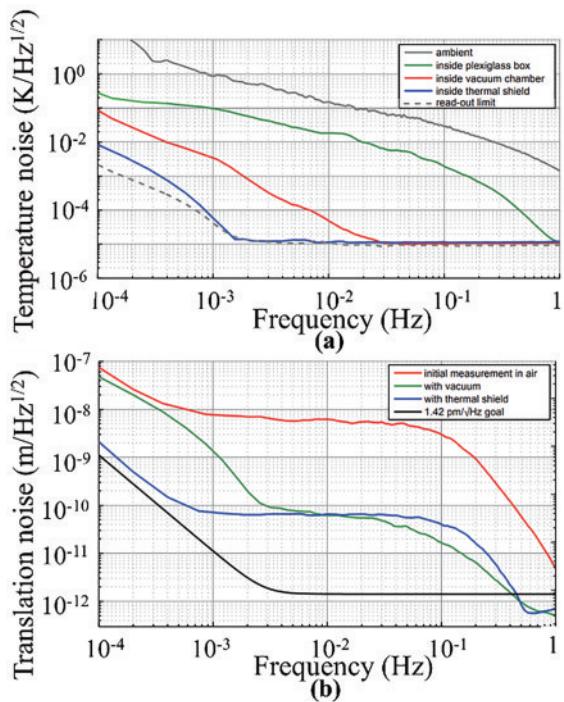
图 30 温度噪声及干涉仪位移测量结果^[42]

Fig. 30 Temperature noise and interferometer displacement measurement results^[42]

$$N = \frac{P}{h\nu}. \quad (14)$$

光子数的涨落满足泊松分布 $\Delta N = \sqrt{N}$, 根据量子力学不确定关系, 激光的相位涨落 $\Delta\varphi$ 和光子数涨落 ΔN 满足 $\Delta\varphi\Delta N \geq 1$ 。因此, 相位涨落也会对干涉仪位移测量产生影响

$$\delta L_{\text{shot}} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{h\lambda c}{P}}, \quad (15)$$

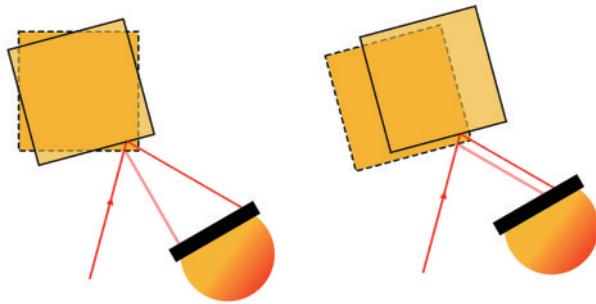
式中: h (单位: J·s)为普朗克常数; λ (单位: m)为激光波长; c (单位: m/s)为真空中光速; P (单位: W)为激光输出功率。

4.6 平动转动耦合噪声

平动转动耦合噪声是指由于测试质量反射面横向或转向跳动引入的相位测量误差, 它被认为是空间引力波探测激光外差干涉测量系统中的主要噪声源之一。

2016年, Schuster等^[105-107]提出利用双透镜成像系统设计抑制平动转动耦合噪声, 在 $\pm 400 \mu\text{rad}$ 范围内 TTL 耦合系数不大于 $\pm 15 \mu\text{m}/\text{rad}$, 在此基础上研究了透镜成像系统对测试质量干涉仪和长臂长科学干涉仪中的 TTL 噪声抑制效果。2022年, Hartig等^[108-109]详细推导了 TTL 噪声作用机制及其数学模型, 将其分为几何类和非几何类误差, 误差来源主要取决于测试质量的横向或转向跳动、干涉光束的波前质量以及探测器响应面特性(图 31)。不同于折射式成像系统, Brzozowski等^[47]提出了一种反射式成像系统进行

TTL 噪声抑制, 相比于前者无需透镜调节机构, 更方便集成, 且同样满足 LISA 对 TTL 噪声耦合系数的指标要求。

图 31 TTL 噪声示意图^[108]Fig. 31 Schematic diagram of TTL noise^[108]

国内方面, 2019年, 颜浩^[57-58]研究了测试质量多自由度运动耦合理论模型, 并基于六自由度激光外差干涉测量系统测试了平动转动耦合噪声, 在 1 mrad 转动范围内转动-平动误差处于 $1 \mu\text{m}$ 量级, 转动-转动误差处于 $10 \mu\text{rad}$ 量级。2019年, Zhao等^[110-111]研究了平顶光束和高斯光束干涉中的 TTL 噪声, 考虑波前倾斜、波前像差和探测器中心偏移等因素构建了 TTL 噪声数学模型。

本节基于以往干涉测量噪声的研究经验, 结合现有研究进展, 介绍了面向空间引力波探测的激光外差干涉仪的部分噪声来源和作用机制。但是, 在百万千米干涉臂长的应用场景下, 部分噪声源(如激光频率噪声、平动转动耦合噪声)的作用机制以及优化措施仍未完全明确。除此之外, 还有许多其他噪声源, 如探测器噪声、电子学噪声、辐射压力噪声、偏振噪声, 也需要在未来阶段展开更进一步的溯源分析, 并从实验上验证各噪声源对空间引力波探测用激光外差干涉输出的影响。

5 结束语

目前, 激光外差干涉多自由度测量技术基本上能够实现亚纳米平动以及亚微弧度转动测量, 也有许多面向引力波探测应用的地面模拟研究实现了接近 $10 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 以及 $10 \text{ nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ 探测水平。现有的 GRACE follow-on、太极以及天琴计划都实现了亚纳米甚至皮米量级的测试质量平动测量。LISA 团队的 Pathfinder 计划在太空中实现了两测试质量间的亚皮米精度测量, 走在了空间引力波探测领域激光外差干涉测量技术发展的最前列。但是, 正如图 18 最后一步所示, 百万千米干涉臂长的皮米/纳弧度级激光外差干涉测量研究目前仍处于论证阶段, 如此长的臂长会引入很多不同于以往干涉测量系统中噪声作用机制的误差源, 如激光频率波动、平动转动耦合、望远镜抖动等, 只有将这些噪声压制足够低, 或者通过后续数据处理

分离并消除这些噪声源,才能将对测试质量的多自由度测量灵敏度曲线在目标频段提升到 $1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 或 $1 \text{ nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ 以下,从而有可能探测到引力波信号。

“此曲只应天上有,人间难得几回闻”,激光外差干涉超精密测试技术就是用来“听曲”的最精密的传声筒。在空间引力波探测领域,我国的激光外差干涉多自由度超精密测量技术相比于欧美 LISA 团队仍处于跟跑阶段,但未来有希望实现并跑甚至领跑。而且,空间引力波探测中涉及的外差干涉技术,可以对长度量进行高精度、大量程的超精密测量,可扩展应用于下一代高速、超精密二维或三维运动台的精确定位与运动控制,进而支撑我国超精密加工制造、IC 装备及尖端航空航天科技的发展,对于国民经济和工业建设有着重要的应用前景。

因此,本文结合空间引力波探测应用背景,希望通过介绍面向测试质量多自由度超精密测量的激光外差干涉技术基本原理,全面回顾 LISA、太极、天琴等国内外团队的干涉仪研究进展,并分析空间引力波探测中激光外差干涉仪的噪声源作用机制,从而为我国激光外差干涉多自由度超精密测量技术的发展提供参考。

参 考 文 献

- [1] Saulson P R. Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors[M]. Singapore: World Scientific, 1994.
- [2] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 061102.
- [3] Amaro-Seoane P, Audley H, Babak S, et al. Laser interferometer space antenna[EB/OL]. (2017-02-02) [2022-05-08]. <https://arxiv.org/abs/1702.00786>.
- [4] Luo Z R, Wang Y, Wu Y L, et al. The Taiji program: a concise overview[J]. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2020, 2021(5): 05A108.
- [5] Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(3): 035010.
- [6] Kawamura S, Ando M, Seto N, et al. Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO[J]. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2021, 2021(5): 05A105.
- [7] Folkner W M, et al. The LISA mission design [C]. AIP Conference Proceedings, 456(1): 11-16.
- [8] Schott W. Developments in homodyne interferometry[J]. Key Engineering Materials, 2010, 437: 84-88.
- [9] Zhao S J, Wei H Y, Li Y. Laser heterodyne interferometer for the simultaneous measurement of displacement and angle using a single reference retroreflector[J]. Optical Engineering, 2015, 54(8): 084112.
- [10] Wang X F, Su J J, Yang J H, et al. Investigation of heterodyne interferometer technique for dynamic angle measurement: error analysis and performance evaluation [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(10): 105016.
- [11] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1504001.
- [12] Tan Y D, Xu X, Zhang S L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1504001.
- [13] Barke S. Inter-spacecraft frequency distribution for future gravitational wave observatories[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2015.
- [14] Zumbrägel M A. Frequency stability of a Zeeman-stabilized laser[J]. Applied Optics, 1985, 24(13): 1902-1904.
- [15] Jin Y Y, Zhang S L, Li Y, et al. Zeeman-Birefringence He-Ne Dual Frequency Lasers[J]. Chinese Physics Letters, 2001, 18(4): 533-536.
- [16] Yang Y, Deng Y, Tan Y D, et al. Nonlinear error analysis and experimental measurement of Birefringence-Zeeman dual-frequency laser interferometer[J]. Optics Communications, 2019, 436: 264-268.
- [17] Zhao Y, Zhou T R, Li D C. Heterodyne absolute distance interferometer with a dual-mode HeNe laser[J]. Optical Engineering, 1999, 38(2): 246-249.
- [18] 付海金. 大频差双频激光偏振态测量与光束合成方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 54-88.
- [19] Fu H J. Study on laser polarization state measurement and beam combination method in two-frequency laser with large frequency difference[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 54-88.
- [20] 黄凯琦. 双光源锁定式双频激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 28-30.
- [21] Huang K Q. Research on dual-source locked dual-frequency laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 28-30.
- [22] 王煜, 陈洪芳. 基于连续小波变换的激光外差干涉非线性误差补偿[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2104006.
- [23] Wang Y, Chen H F. Nonlinear error compensation method for laser heterodyne interferometry based on continuous wavelet transform[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2104006.
- [24] Hechler F, Folkner W M. Mission Analysis for Laser Interferometer Space Antenna (LISA) [J]. JPL TRS1992+, 1992:1-4.
- [25] Shaddock D A. Space-based gravitational wave detection with LISA[J]. Classical and Quantum Gravity, 2008, 25(11): 114012.
- [26] Zhang J F, Yang Z, Ma X S, et al. Inter-spacecraft offset frequency setting strategy in the Taiji program[J]. Applied Optics, 2022, 61(3): 837-843.
- [27] Li Z, Duan H Z, Huang X Q, et al. Design and performance test of the spaceborne laser in the TianQin-1 mission[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107155.
- [28] Peng J K, Li L F, Chen L S, et al. A spaceborne neodymium-doped yttrium aluminum garnet laser with nonplanar-ring-oscillator configuration[J]. International Journal of Modern Physics A, 2021, 36(11n12): 2140007.

- [25] Lieser M D. LISA optical bench development: experimental investigation of tilt-to-length coupling for a spaceborne gravitational wave detector[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2017.
- [26] Meshksar N, Mehmet M, Isleif K S, et al. Applying differential wave-front sensing and differential power sensing for simultaneous precise and wide-range test-mass rotation measurements[J]. Sensors, 2020, 21(1): 164.
- [27] Moku: Pro. Liquid Instruments[EB/OL]. [2022-08-06]. <https://www.liquidinstruments.com/products/hardware-platforms/mokupro/>.
- [28] AmplifierLock-in. Zurich instruments[EB/OL]. [2022-08-06]. <https://www.zhinst.cn/china/en/lock-in-amplifiers>.
- [29] 刘河山. 面向空间引力波探测的激光差分干涉相位计研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
Liu H S. Research on laser differential interferometer for gravitational wave detection in space[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [30] 梁浴榕. 外差激光干涉仪中的高精度相位测量研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Liang Y R. High precision phase measurement for heterodyne laser interferometer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [31] Schwarze T S. Phase extraction for laser interferometry in space: phase readout schemes and optical testing[D]. Hannover: Institutionelles Repozitorium der Leibniz Universität Hannover, 2018.
- [32] Xu X, Tan Y D. Laboratory development of a heterodyne interferometric system for translation and tilt measurement of the proof mass in the space gravitational wave detection[EB/OL]. (2022-06-13) [2022-08-06]. <https://arxiv.org/abs/2207.06420v1>.
- [33] Hewitson M, Armano M, Benedetti M, et al. Data analysis for the LISA technology package[J]. Classical and Quantum Gravity, 2009, 26(9): 094003.
- [34] Pre-Phase A Report. Laser interferometer space antenna [EB/OL]. (1998-07)[2022-08-06]. <https://lisa.nasa.gov/archive2011/Documentation/ppa2.08.pdf>.
- [35] Faulks H, Gebauer K, Hammesfahr A, et al. Study of the laser interferometer space antenna[R]. Keplerlaan: European Space Research and Technology Center, 2000.
- [36] Heinzel G, Braxmaier C, Schilling R, et al. Interferometry for the LISA technology package (LTP) aboard SMART-2[J]. Classical and Quantum Gravity, 2003, 20(10): S153-S161.
- [37] Heinzel G, Braxmaier C, Caldwell M, et al. Successful testing of the LISA Technology Package (LTP) interferometer engineering model[J]. Classical and Quantum Gravity, 2005, 22(10): S149-S154.
- [38] Wand V. Interferometry at low frequencies: optical phase measurement for LISA and LISA Pathfinder[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2007.
- [39] Laser interferometry space antenna (LISA) architecture description[R]. Paris: European Space Agency, 2006.
- [40] Sallusti M, Gath P, Weise D, et al. LISA system design highlights[J]. Classical and Quantum Gravity, 2009, 26(9): 094015.
- [41] D'Arcio L, Bogenstahl J, Diekmann C, et al. An elegant Breadboard of the optical bench for eLISA/NGO[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10564: 1056401.
- [42] Dehne M, Tröbs M, Heinzel G, et al. Verification of polarising optics for the LISA optical bench[J]. Optics Express, 2012, 20(25): 27273-27287.
- [43] Dehne M. Construction and noise behaviour of ultra-stable optical systems for space interferometers[D]. Hannover: Institutionelles Repozitorium der Leibniz Universität Hannover, 2012.
- [44] Robertson D I, Fitzsimons E D, Killow C J, et al. Construction and testing of the optical bench for LISA Pathfinder[J]. Classical and Quantum Gravity, 2013, 30(8): 085006.
- [45] Cervantes F G, Flatscher R, Gerardi D, et al. LISA technology package flight hardware test campaign[EB/OL]. [2022-08-06]. <https://apc.u-paris.fr/~beckmann/Proceedings/Guzman.pdf>.
- [46] Armano M, Audley H, Baird J, et al. Sensor noise in LISA pathfinder: In-flight performance of the optical test mass readout[J]. Physical Review Letters, 2021, 126(13): 131103.
- [47] Brzozowski W, Robertson D, Fitzsimons E, et al. The LISA optical bench: an overview and engineering challenges [J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12180: 121800O.
- [48] Li Y Q, Luo Z R, Liu H S, et al. Laser Interferometer Used for Satellite-Satellite Tracking: an On-Ground Methodological Demonstration[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(7): 079501.
- [49] Li Y Q, Luo Z R, Liu H S, et al. Path-length measurement performance evaluation of polarizing laser interferometer prototype[J]. Applied Physics B, 2015, 118(2): 309-317.
- [50] Li Y Q, Luo Z R, Liu H S, et al. Laser interferometer for space gravitational waves detection and earth gravity mapping[J]. Microgravity Science and Technology, 2018, 30(6): 817-829.
- [51] Luo Z R, Liu H S, Jin G. The recent development of interferometer prototype for Chinese gravitational wave detection pathfinder mission[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 105: 146-151.
- [52] Li Y P, Liu H S, Zhao Y, et al. Demonstration of an ultraprecise optical bench for the Taiji space gravitational wave detection pathfinder mission[J]. Applied Sciences, 2019, 9(10): 2087.
- [53] Li Y Q, Wang C Y, Wang L Y, et al. A laser interferometer prototype with pico-meter measurement precision for Taiji space gravitational wave detection mission in China[J]. Microgravity Science and Technology, 2020, 32(3): 331-338.
- [54] Li Y Q, Jin G. A brief overview of 8 m prototype facility of laser interferometer for Taiji pathfinder mission[J]. Applied Physics B, 2021, 127(6): 88.
- [55] Yan H, Duan H Z, Li L T, et al. A dual-heterodyne laser interferometer for simultaneous measurement of

- linear and angular displacements[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(12): 123102.
- [56] Yan H, Mao Q L, Xie S Y, et al. Highly linear sub-nanoradian tilt measurement based on dual-beam interferometry[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2792-2795.
- [57] 颜浩. 基于激光干涉的高精度多自由度光学传感研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
Yan H. Study on ultra-precision multi-degree-of-freedom optical measurement base on laser interferometry[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [58] Yan H, Yeh H C, Mao Q L. High precision six-degree-of-freedom interferometer for test mass readout[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2022, 39(7): 075024.
- [59] Liu H S, Luo Z R, Sha W. In-orbit performance of the laser interferometer of Taiji-1 experimental satellite[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, 36(11n12): 2140004.
- [60] Sha W, Fang C, Niu Y, et al. Successful application of optical bench in Taiji-1 laser interferometer[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, 36(11n12): 2140001.
- [61] Luo J, Bai Y Z, Cai L, et al. The first round result from the TianQin-1 satellite[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(18): 185013.
- [62] Mei J W, Bai Y Z, Bao J H, et al. The TianQin project: current progress on science and technology[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2020, 2021(5): 05A107.
- [63] Gong Y G, Luo J, Wang B. Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(9): 881-889.
- [64] Schuldt T, Gohlke M, Weise D, et al. Compact laser interferometer for translation and tilt measurement as optical readout for the LISA inertial sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6716: 67160F.
- [65] Gohlke M, Schuldt T, Weise D, et al. A high sensitivity heterodyne interferometer as a possible optical readout for the LISA gravitational reference sensor and its application to technology verification[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10566: 1056612.
- [66] Guan J, Köchert P, Weichert C, et al. A differential interferometric heterodyne encoder with 30 picometer periodic nonlinearity and sub-nanometer stability[J]. *Precision Engineering*, 2017, 50: 114-118.
- [67] Fulda P, DeRosa R T, DeMarco E, et al. Multi-axis heterodyne interferometry at MHz frequencies: a short-arm measurement demonstration for LISA with off-the-shelf hardware[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(23): 6346-6356.
- [68] Zhang Y Q, Hines A S, Valdes G, et al. Investigation and mitigation of noise contributions in a compact heterodyne interferometer[J]. *Sensors*, 2021, 21(17): 5788.
- [69] Hu P C, Wang Y, Fu H J, et al. Nonlinearity error in homodyne interferometer caused by multi-order Doppler frequency shift ghost reflections[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3605-3612.
- [70] Fu H J, Wang Y, Hu P C, et al. Nonlinear errors resulting from ghost reflection and its coupling with optical mixing in heterodyne laser interferometers[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 758.
- [71] High-precision measurement instruments of laser interferometry[EB/OL]. (2020-01-15)[2020-01-15]. http://faculty.dpi.tsinghua.edu.cn/news_detail/3037.html.
- [72] Xu X, Dai Z R, Tan Y D. A dual-beam differential method based on feedback interferometry for noncontact measurement of linear and angular displacement[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022: 3192677.
- [73] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Applied Physics B*, 1983, 31(2): 97-105.
- [74] Tröbs M. Laser development and stabilization for the spaceborne interferometric gravitational wave detector LISA[D]. Hannover: Universität, 2005.
- [75] Thompson R, Folkner W M, de Vine G, et al. A flight-like optical reference cavity for GRACE follow-on laser frequency stabilization[C]//2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings, May 2-5, 2011, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011.
- [76] Klaus A, Alexander A, Bengie A, et al. In-orbit performance of the GRACE follow-on laser ranging interferometer[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 031101.
- [77] Shortt B, Mondin L, McNamara P, et al. LISA laser system and European development strategy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11180: 111800D.
- [78] Li L F, Wang J, Bi J, et al. Ultra-stable 1064-nm neodymium-doped yttrium aluminum garnet lasers with 2.5×10^{-16} frequency instability[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(4): 043001.
- [79] Luo Y X, Li H Y, Li Y Q, et al. Prototype of a monolithic cavity-based ultrastable optical reference for space applications[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(10): 2877-2885.
- [80] Kulkarni S, Umińska A, Gleason J, et al. Ultrastable optical components using adjustable commercial mirror mounts anchored in a ULE spacer[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(23): 6999-7003.
- [81] Kulkarni S, Umińska A A, Sanjuán J, et al. Characterization of dimensional stability for materials used in ultra-stable structures[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11820: 1182008.
- [82] Umińska A A, Kulkarni S, Sanjuan J, et al. Ground testing of the LISA telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11820: 118200I.
- [83] Döringshoff K, Reggentin M, Kovalchuk E V, et al. Iodine based optical frequency reference with 10^{-15} stability[C]//2012 European Frequency and Time Forum, April 23-27, 2012, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2012: 419-421.

- [84] Schuldt T, Oswald M, Gohlke M, et al. An absolute optical frequency reference for space[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11180: 111807X.
- [85] Döringshoff K, Gutsch F B, Schkolnik V, et al. Iodine frequency reference on a sounding rocket[J]. Physical Review Applied, 2019, 11(5): 054068.
- [86] Zang E J, Cao J P, Li Y, et al. Realization of four-pass I_2 absorption cell in 532-nm optical frequency standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(2): 673-676.
- [87] 杜娟, 孙延光, 陈迪俊, 等. 小型化碘稳频 1064 nm 半导体激光器研究[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0701006.
- Du J, Sun Y G, Chen D J, et al. Research of a compact iodine-stabilized diode laser at 1064 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0701006.
- [88] 程飞虎. 用于长度标准的 532 nm 碘分子频率标准的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- Cheng F H. Study of a 532-nm molecular-iodine frequency standard as a length standard[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [89] Otto M. Time-delay interferometry simulations for the laser interferometer space antenna[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2015.
- [90] Ghosh S, Sanjuan J, Mueller G. Arm locking performance with the new LISA design[J]. Classical and Quantum Gravity, 2022, 39(11): 115009.
- [91] Tinto M, Estabrook F B, Armstrong J W. Time-delay interferometry for LISA[J]. Physical Review D, 2002, 65 (8): 082003.
- [92] Li X K, Liu H S, Wu P Z, et al. Proof-of-principle experimental demonstration of time-delay-interferometry for Chinese space-borne gravitational wave detection missions[J]. Microgravity Science and Technology, 2022, 34(4): 64.
- [93] Wu H Z, Wang P P, Hao P, et al. Time delay interferometry using laser frequency comb as the direct signal source[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 151: 106938.
- [94] Audley Heather E. Preparing for LISA pathfinder operations: characterisation of the optical metrology system[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2014.
- [95] Wittchen A, Collaboration F T L. Coupling of relative intensity noise and pathlength noise to the length measurement in the optical metrology system of LISA Pathfinder[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 840(1): 012003.
- [96] Wissel L, Wittchen A, Schwarze T S, et al. Relative-intensity-noise coupling in heterodyne interferometers[J]. Physical Review Applied, 2022, 17(2): 024025.
- [97] García Marín A F. Minimisation of optical pathlength noise for the detection of gravitational waves with the spaceborne laser interferometer LISA and LISA Pathfinder[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2007.
- [98] Optical coatings[EB/OL]. (2020-11) [2022-08-06]. <https://www.edmundoptics.com/capabilities/optical-coatings/>.
- [99] de Groot P J. Interferometer with tilted waveplates for reducing ghost reflections: US6163379[P]. 2000-12-19.
- [100] Liepmann T W. Wedged plate beam splitter without ghost reflections[J]. Applied Optics, 1992, 31(28): 5905-5906.
- [101] Heinzel G, Wand V, Garcia A, et al. Investigation of noise sources in the LTP interferometer S2-AEI-TN-3028[EB/OL]. (2008-07-01) [2022-08-06]. https://pure.mpg.de/pubman/faces/ViewItemOverviewPage.jsp?itemId=item_149897.
- [102] Zhu Y, Wang L J, Zhang M, et al. Novel homodyne frequency-shifting interference pattern locking system[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(6): 061201.
- [103] Fu H J, Wu G L, Hu P C, et al. Thermal drift of optics in separated-beam heterodyne interferometers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(6): 1446-1450.
- [104] Beck M. Developing a toolset for adjustable picometer-stable interferometer[EB/OL]. [2022-08-06]. <https://www.youtube.com/watch?v=oZVoYCUXHuc&list=PLM05cB3oZeszWMRUuhuOz8GkBvQibPZlv&index=22>.
- [105] Schuster S, Tröbs M, Wanner G, et al. Experimental demonstration of reduced tilt-to-length coupling by a two-lens imaging system[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 10466-10475.
- [106] Tröbs M, Schuster S, Lieser M, et al. Reducing tilt-to-length coupling for the LISA test mass interferometer[J]. Classical and Quantum Gravity, 2018, 35(10): 105001.
- [107] Chwalla M, Danzmann K, Álvarez M D, et al. Optical suppression of tilt-to-length coupling in the LISA long-arm interferometer[J]. Physical Review Applied, 2020, 14(1): 014030.
- [108] Hartig M S, Schuster S, Wanner G. Geometric tilt-to-length coupling in precision interferometry: mechanisms and analytical descriptions[J]. Journal of Optics, 2022, 24 (6): 065601.
- [109] Hartig M S, Schuster S, Wanner G. Geometric tilt-to-length coupling in precision interferometry: mechanisms and analytical descriptions[J]. Journal of Optics, 2022, 24 (6): 065601.
- [110] Zhao Y, Wang Z, Li Y P, et al. Method to remove tilt-to-length coupling caused by interference of flat-top beam and Gaussian beam[J]. Applied Sciences, 2019, 9(19): 4112.
- [111] Zhao Y, Shen J, Fang C, et al. Tilt-to-length noise coupled by wavefront errors in the interfering beams for the space measurement of gravitational waves[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 25545-25561.