



面向空间引力波探测的激光干涉技术研究进展及展望

王娟¹, 齐克奇¹, 王少鑫¹, 高瑞弘¹, 李磐¹, 杨然¹, 刘河山¹, 罗子人^{1,2*}

1. 中国科学院力学研究所, 国家微重力实验室, 北京 100190;

2. 国科大杭州高等研究院基础物理与数学科学学院, 杭州 310024

*联系人, E-mail: luoziren@imech.ac.cn

收稿日期: 2024-03-12; 接受日期: 2024-04-28

国家重点研发计划(编号: 2020YFC2200104)资助项目

摘要 随着地面引力波的成功探测, 面向更低频段、更广目标波源、反映更多天体物理现象的空间引力波探测越来越受到各国研究团队的共同关注. 为了明确探测计划现阶段的发展水平以及限制因素, 为下一步干涉仪测量水平的提高做准备, 本文围绕激光干涉测量技术, 一方面对空间引力波探测的原理、国内外典型探测项目的在轨探测结果进行了回顾; 另一方面展示了干涉测量系统的整体布局, 介绍了主要噪声源的影响机制和抑制方法.

关键词 空间引力波探测, 激光干涉测量技术, 干涉仪噪声分析

PACS: 04.30.Nk, 04.20.Cv, 04.80.Nn, 95.55.Ym

1 引言

1916年, 爱因斯坦提出了广义相对论并首次预言了引力波的存在^[1]. 引力波的存在可以作为传统电磁波观测的补充, 用于探测宇宙中除普通物质以外的暗物质和暗能量. 因此, 自预言以来, 人们不断致力于引力波的探测. 不同的天体物理现象对应不同的频段, 引力波的频段范围十分广泛, 为了获取不同频段对应的波源信息, 全世界范围内的研究者开展了不同的引力波探测方案. 其中LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)是多种主流的地面引力波探测计划中的一种, 在历经几代人的不懈努力及引力波

探测器的不断迭代之后, 2016年2月11日, 其升级版Advanced LIGO宣布了于2015年9月14日首次探测到了引力波信号(GW150914)^[2]. 这一信号来源于太阳系以外的双黑洞合并. 一个36倍太阳质量的黑洞与一个29倍太阳质量的黑洞相互绕转并合并成一个62倍太阳质量的黑洞, 剩余3倍太阳质量的能量以引力波的形式向外辐射. 这一探测结果是对广义相对论的直接验证, 为人类认识宇宙提供了一个新的窗口, 该成果获得了2017年的诺贝尔物理学奖. 在这之后又有多次引力波事件, 更多的双黑洞合并GW151226, GW170104, GW170814, 以及一起双中子星合并事件GW170817^[3]. 这次双中子星合并信号后续被电磁波观测得以证实,

引用格式: 王娟, 齐克奇, 王少鑫, 等. 面向空间引力波探测的激光干涉技术研究进展及展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 270405
Wang J, Qi K Q, Wang S X, et al. Advance and prospect in the study of laser interferometry technology for space gravitational wave detection (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 270405, doi: [10.1360/SSPMA-2024-0111](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0111)

由此开创了多信使天文学时代^[4].

地球引力场变化和地表震动等因素带来的引力梯度噪声极大地限制了地面引力波探测器的探测频段(大约10 Hz以上). 为了满足更高范围的探测需求、识别更大特征质量和尺寸的波源, 需要对更低频段的引力波进行探测. 受到地面引力梯度噪声以及干涉臂长的限制, 地面引力波探测的频段无法覆盖低频段, 因此需要在空间实现激光干涉引力波探测.

空间引力波探测主要探测目标集中在百万太阳质量的双黑洞并合, 其影响频段约为0.01 mHz–1 Hz. 20世纪90年代, 欧洲航天局ESA (European Space Agency)和美国国家航空航天局NASA (National Aeronautics and Space Administration)共同开展了最早也是目前发展最为成熟的空间引力波探测项目LISA (Laser Interferometer Space Antenna)计划^[5]. 我国后续也跟进空间引力波探测的步伐, 提出了太极计划^[6]和天琴计划^[7]. 此外, 为了弥补空间引力波探测和地基引力波探测以外的空白频段, 尤其是0.1–5 Hz频段, 通过在月球表面搭建引力波探测器的月基引力波探测计划(Lunar-Based Gravitational-Wave Detection)被提出^[8]. 目前, 各项计划均处于技术论证阶段.

激光干涉技术被广泛应用于各类引力波探测中, 本文主要针对空间引力波探测. 第2节阐述了空间引力波探测的原理及方法, 并就国内外几项探测计划介绍了其任务概况、研究进展以及核心的干涉仪布局; 第3节聚焦于核心测量系统, 介绍了整个激光干涉系统的组成, 并进一步给出系统中存在的噪声来源及噪声抑制方法; 第4节进行了总结与展望.

2 空间引力波探测

2.1 探测原理及方法

空间引力波探测相比地面探测, 对干涉臂长及测量精度等提出了更高的要求. 空间引力波探测器同样采用Michelson干涉仪构型, 以引力波其中一个偏振方向上的位移波动为例进行说明, 基本构型如图1所示.

以图1(b)为例, 三个系统S0, S1, S2构成一组激光干涉仪, 其中系统S1和S2中各含有一个反射镜M1, M2. 系统S0中波长为 λ 的激光经BS (Beam Splitter)分光镜分束后一路经 L_1 打到反射镜M1上, 为参考光; 一路经过 L_2 到达远端系统S2, 打到反射镜M2上, 为测量

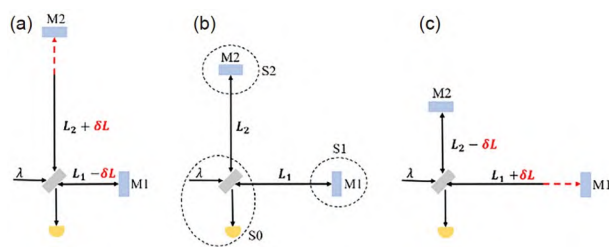


图1 (网络版彩图)激光干涉引力波探测器原理图

Figure 1 (Color online) The principle diagram of laser interferometer gravitational wave detector.

光. 参考光和测量光经反射镜反射, 回到BS合束后进入探测器. 为了减小激光频率噪声对干涉测量的影响, 两个臂长要尽可能相等, 即 $L_2=L_1=L$. 当引力波通过时, 两个系统S1和S2所处的时空会发生拉伸或压缩, 产生 δL 的距离波动. 考虑到引力波对时空的微扰是一个四极矩, 因此当干涉仪的两臂长之间的夹角呈 90° 时, 一个臂长的伸长量与另一个臂长的缩短量相等, 如图1(a)和(c)所示. 此时两干涉臂的臂长差与初始臂长差相比均发生了 $2\delta L$ 的变化. 臂长差的波动 δL 会引起干涉仪相位结果的变化, 因此可以通过对干涉结果的分析反映引力波信息.

引力波的强度可以用一个无量纲的振幅表示, 强度可以定义为两倍的臂长变化与初始臂长的比值:

$$h = \frac{2\delta L}{L}. \quad (1)$$

因此, 为了降低系统的位移测量灵敏度要求, 要求增大物体间的初始臂长差, 这对远距离高精度的测量提出了极大的挑战.

由于激光频率噪声与臂长差相关, 当两臂长差约为百万公里量级时, pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 量级的测距精度对应激光频率稳定性在 10^{-7} Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 量级(参考第3.2.2节). 如此高的精度目前还难以实现, 因此必须采用两个干涉仪联合的方式探测引力波, 原理如图2所示. 图2中卫星S0和S1、卫星S0和S2之间分别构成一组Michelson干涉仪, 星间距分别为 L_{12} 和 L'_{12} , 测试对象为自由悬浮的立方体TM (Test Mass): TM0, TM0', TM1和TM2, 为了减小激光频率噪声的影响, 两组干涉仪均采用相位锁定的两个激光光源(波长为 $\lambda = 1064$ nm). 通过对两组干涉测距结果的分析, 可以得到当引力波通过引起的星间距的变化, 进而反演引力波信号^[1].

以其中一条干涉臂为例, 说明空间激光干涉技术的原理, 如图3所示. 本地卫星上的激光经束镜分束, 一路光留在本地卫星S1, 一路光发射到远端卫星S2, 打到测试质量TM2表面. 由于经过几百万公里的光程, 激光功率将衰减约10个量级, 不足以支撑光束直接反射回本地进行干涉. 因此科学家提出了弱光锁相放大技术: 在远端卫星中将弱光与本地激光进行干涉, 对干涉相位信息进行跟踪并锁定到激光器2发出的激光, 这束光经过星间距离 L 后回到本地卫星, 打到测试质量TM1上后反射与本地激光干涉. 相比地面引力波探测中打到TM2表面再反射回来的光, 这种方案在保留有效相位信息的基础上, 大大提高了本地卫星接收到的光强, 进而增强了空间引力波探测方案的可实施性.

考虑到卫星轨道游离会使两颗卫星间产生相对运动, 进而导致星间传输的激光频率受到多普勒效应的影响, 因此采用差分干涉的方法探测引力波. 假设两卫星激光器发出的光功率相同, 初相位不同, 光场可

简化为

$$E_{10} = A \cdot \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), \quad (2)$$

$$E_{20} = A \cdot \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2), \quad (3)$$

其中, A 表示激光的幅值, $\varphi_1, \varphi_2, f_1$ 和 f_2 分别表示两个激光器的初相位和频率.

激光器1发出的光与激光器2发出的光在探测器D2处发生干涉, 到达探测器D2处的两束光可以表示为

$$E_1 = A \cos[2\pi(f_1 + f_D)t + \varphi_1 + k(L_{10} + L + 2L_2)], \quad (4)$$

$$E_2 = A \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2 + k \cdot L_{20}), \quad (5)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$, f_D 表示多普勒频移, 可由下式表示:

$$f_D = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{c} \cdot f_0, \quad (6)$$

其中, c 是光速, v 是相对运动速度, λ 为激光波长, f_0 是激光频率. 当两颗卫星靠近时, 速度为正, 反之为负. 多普勒频移取决于卫星间的相对运动速度, 而运动速度与轨道设计有关. 以LISA为例, 两个航天器间的相对速度最大约为 ± 10 m/s, 对应的多普勒频移约 ± 10 MHz.

激光的频率值约为280 THz, 如此高的频率无法被探测器识别. 由于探测器的探测频段为低频, 因此, 在忽略光电探测器转换效率的情况下, 干涉光强为

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{T} \int_0^T (E_1 + E_2)^2 dt \\ &= A^2 \cdot \left\{ 1 + \cos[2\pi(f_D + f_1 - f_2)t + \varphi_1 - \varphi_2 + k(L_{10} + L + 2L_2 - L_{20})] \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

提取干涉信号中的与星间激光传播链路相关的相位信息 $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + k(L_{10} + L + 2L_2 - L_{20}). \quad (8)$$

将其反馈到激光器2中, 使激光器2发出的光的相位与探测器D2测得干涉结果的相位锁定. 此时激光器2发出的光可以表示为

$$\begin{aligned} E'_{20} &= A \cdot \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2 + \Delta\varphi) \\ &= A \cdot \cos[2\pi f_2 t + \varphi_1 + k(L_{10} + L + 2L_2 - L_{20})]. \end{aligned} \quad (9)$$

光束经过星间链路传播到测试质量TM1后反射, 与卫星S1中的本地光在探测器D1汇合, 此时的两束光可以表述为

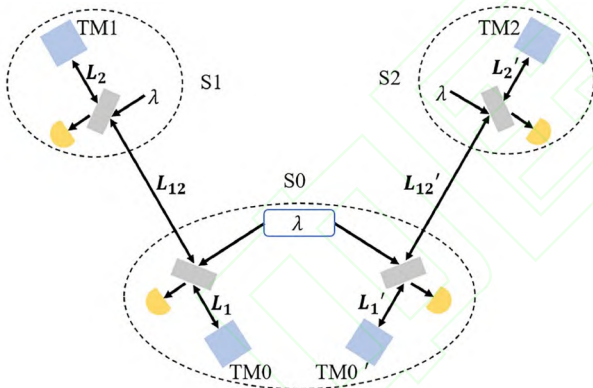


图2 (网络版彩图)空间引力波探测光路示意图

Figure 2 (Color online) The optical path schematic of space-based gravitational wave detection.

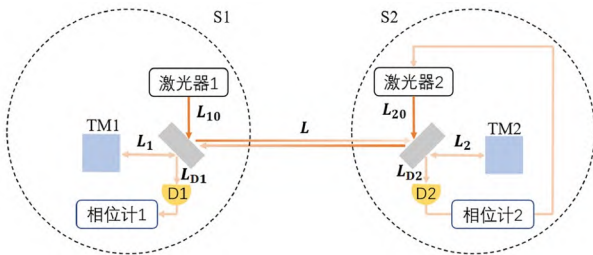


图3 (网络版彩图)空间激光干涉技术原理图

Figure 3 (Color online) The principle schematic of space-based laser interferometry technology.

$$E'_1 = A \cdot \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1 + kL_{10}), \quad (10)$$

$$E'_2 = A \cdot \cos[2\pi(f_2 + f_D)t + \varphi_1 + k(L_{10} + 2L + 2L_1 + 2L_2)]. \quad (11)$$

最终, 两束光干涉得到的探测器响应光强如下式:

$$\begin{aligned} I' &= \frac{1}{T} \int_0^T (E'_1 + E'_2)^2 dt \\ &= A^2 \cdot \left\{ 1 + \cos[2\pi(f_D + f_2 - f_1)t + k(2L + 2L_1 + 2L_2)] \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

可以看出, 当引力波通过时, 星间距 L 发生变化, 会反映到干涉信号的相位信息中. 此时相位信息中包含两部分: 一部分随时间变化, 来源于多普勒频移和激光频率差; 另一部分来源于星间距离波动, 与引力波信号相关. 为了探测到引力波, 首先要保证频率差 $f_D + f_2 - f_1$ 始终大于零, 可准确识别卫星间的相对距离变化. 一般而言, 通过锁相环对激光器进行相应的移频控制, 可控制拍频信号中的多普勒效应, 进而得到卫星间距变化引起的相位波动^[1,9]. 其次, 需要指出多普勒频移对测距的影响约为臂长差的百分之一(以年为周期), 而引力波信号的影响只占臂长的 10^{-21} , 引力波引起的相位波动远小于多普勒频移的影响. 为了避免多普勒频移对测量精度的干扰, 引力波探测必须在频域上进行分析, 才可在目标频段(10^{-4} –1 Hz)内忽略多普勒频移的影响.

2.2 探测计划及干涉仪发展现状

2.2.1 LISA计划

LISA计划的目标频段是0.1 mHz–1 Hz, 目标波源有大质量黑洞并合系统、恒星质量黑洞并合系统、致密双星系统以及一些无法预见的波源, 比如早期宇宙的遗迹辐射. LISA预计发射三颗卫星, 构成一个等边三角形. 早期LISA干涉臂长设定为500万公里, 后由于美国NASA的退出, 提出缩减版的eLISA计划, 臂长缩短为100万公里. 后续NASA再次加入LISA计划, 臂长确定为250万公里, 计划2033年发射升空^[10]. LISA卫星为日心类地轨道, 三颗卫星沿着各自的轨道绕日飞行, 其所在平面与黄道面成60°夹角, 且质心位于黄道面上落后地球质心20°. 原则上, 离地球越远卫星受地球引力干扰越小, 20°是综合考虑运载水平与测量需求的结

果. 为了实现引力波探测, 每个卫星内部有两个自由悬浮的测试质量和两个光学平台. 要求实现 $10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的应变灵敏度, 对应光程噪声1 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的高精度探测^[11]. 这对高精度激光干涉测量、惯性传感器、无拖曳控制系统以及超净超稳平台提出了极高的要求.

LISA Pathfinder是首颗对皮米级高精度干涉测距系统进行验证的卫星^[12,13], 主要目标是验证惯性传感器(残余加速度噪声水平低于 $3 \times 10^{-14} \text{ m s}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$)的性能是否能够达到预计目标, 并测量测试质量块的位移和角度波动. 作为LISA技术验证卫星, 包括LTP (LISA Technology Package)和DRS (Disturbance Reduction System)两个技术模块, 用于对单星内干涉仪测量系统、惯性传感器、微推进器等技术的验证. 为提高测量环境的稳定性, 特别是温度环境, LISA Pathfinder轨道位于日地L1点, 于2015年12月3日发射, 经过一系列科学目标的探测后卫星于2017年7月18日完成探测任务.

LISA Pathfinder核心干涉系统可参考相关文献^[14,15], 其中两个宽(46.000 ± 0.005) mm, 重(1.928 ± 0.001) kg的铂金合金测试质量块分别位于干涉仪平台的两侧, 二者相距(376.00 ± 0.05) mm, 并分别由一个惯性传感器控制保持自由悬浮^[13,16]. 两个差频为1 kHz的参考光和测量光经光学系统后共构成四路干涉光路, 每一路干涉信号都分别进入两个探测器A和B. 四路干涉光路分别是: 参考干涉仪Ref(A)/Ref(B), 用于监测光学平台本身的稳定性, 作为其他路干涉仪的参考用于消除共模噪声; 频率干涉仪Freq(A)/Freq(B), 用来监测激光频率稳定性; 测量干涉仪X1(A)/X1(B), 用于监测TM1和光学平台(卫星)之间的稳定性; 测量干涉仪X12(A)/X12(B), 用来测量两个测试质量之间的稳定性, 包括一个位移和两个角度. 此外, 还额外布置了单象限探测器用于监测测量光路和参考光路光功率的稳定性. 最终, 经光电探测器转化后的电信号都会进入相位计进行相位解析, 通过后数据处理进行相关的信号提取与反馈. 在轨结果表明, 加速度噪声水平和测距噪声水平均能满足要求^[14–17]: 最高加速度噪声 $0.54 \times 10^{-15} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$, 测距噪声在1–1000 mHz频段优于 $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$, 即 $9 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{1 + (3 \text{ mHz}/f)^4}$, f 代表频率信息, 特别是在200 mHz以上频段系统的稳定性可以达到 $32.0^{+2.4}_{-1.7} \text{ fm}/\sqrt{\text{Hz}}$.

GRACE Follow-On是GRACE (The Gravity Recovery and Climate Experiment)任务的后续. GRACE任务由美德两国联合发起, 发射两颗相距200 km的卫星到距离地球450 km的极地轨道, 通过微波建立两颗卫星之间的联系, 并将测距信息用于反演地球重力场的变化, 进而进行气候、冰川和地下水的变化检测以及地球物理等领域的研究, 在轨运行时间为2002–2017年^[18–20]. 为了保证数据的连续性, 2018年5月22日发射了GRACE Follow-On双星, 与GRACE任务不同之处在于引入了星间激光干涉测距系统(LRI), 不仅可以用于辅助微波测距(MWI), 还可以验证LISA对星间激光链路测距的技术要求.

两颗卫星相距220 km, 轨道高度490 km^[21]. 与LISA类似, 本地卫星上的激光器经光学系统后发射到远端卫星, 并与远端卫星上的本地光进行干涉, 干涉信号经过锁相放大后返回本地卫星, 与本地光干涉. 为了保证星间链路的有效建立, 光束指向精度要高于100 μrad . GRACE Follow-On对激光测距干涉仪提出的要求是测距噪声在2–100 mHz频段内不得超过80 nm/ $\sqrt{\text{Hz}}$. 在轨测试结果表明, 星间干涉测量精度可以达到10 nm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @40 mHz, 300 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz; 此外, 在轨基于快反镜的扫描捕获技术, 验证了未来LISA开展星间激光干涉测量技术的可行性^[18].

2.2.2 太极计划

太极计划采用三角形构型, 位于地球公转轨道上, 质心位于黄道面上超前地球质心约18°–20°. 太极计划主要针对大质量黑洞的相关问题, 比如早期宇宙中中等质量的种子黑洞的形成方式、黑洞是否可以由暗物质产生、超大黑洞的形成以及引力本质等. 目标频段同样是0.1 mHz–1 Hz, 臂长300万公里, 测量精度要求达到5–10 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ^[6].

太极计划遵循“三步走”路线图: 首先在2019年发射了“太极一号”单星, 对太极计划关键技术及技术路线的可行性进行验证; 其次预计在2025年前发射“太极二号”, 由两颗卫星组成, 用于验证星间激光链路等技术的可行性; 最终预计2030年左右发射“太极三号”, 实现空间引力波探测^[22,23].

“太极一号”卫星于2019年8月31日发射, 重180 kg. 其轨道是太阳同步轨道, 轨道高度600 km. 主要对激光

差分干涉测量系统、无拖曳控制系统、超净超稳卫星平台等技术进行验证, 目标频段是10 mHz–1 Hz^[24].

经声光调制器移频之后差频为1 kHz的两束光分别经过两个准直器进入光学平台, 经过不同的分光镜之后合束构成四路干涉信号, 分别进入两个光电探测器. 测试质量位于光学平台外, 由惯性传感器控制. 进入探测器1/2的干涉信号与进入探测器3/4的干涉信号臂长相等, 均为参考干涉仪, 反映了光学平台稳定性; 进入探测器5/6的干涉信号和进入探测器7/8的干涉信号臂长不相等, 分别构成为测试质量干涉仪的参考干涉仪和测量干涉仪. 最后, 干涉信号经光电探测器转换为电信号后进入相位计, 进行相位提取与分析.

在轨实验结果表明, 目标频段内加速度残余噪声达到 $10^{-10} \text{ m s}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$, 微推进器推力噪声为0.1 $\mu\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级, 光学平台稳定性在低于1 Hz频段内为700 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 1–10 Hz频段内可以达到30 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 即激光干涉仪位移测量精度最高可达30 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ^[24,25].

2.2.3 天琴计划

天琴计划于2014年提出, 面向0.1 mHz–1 Hz频段的引力波, 拟于2035年发射三颗卫星到地心轨道构成一个等边三角形, 星间距约为 $\sqrt{3} \times 10^5 \text{ km}$ ^[7]. 与前述三种引力波探测计划针对未知的引力波源不同, 天琴计划不仅可以面向已知波源进行探测器的性能测试及优化, 还可以探测目标频段内的引力波信号. 基于高强度、短探测周期等需求, 选取双星白矮星RX J0806.3+1527作为引力波源进行探测, 探测精度要求为1 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @6 mHz, 可实现每年6个月的观察期^[26]. 由于采用地心轨道, 考虑到卫星的热稳定性、地球和月球引力的影响以及处于月地之间阴影时的能量供应问题, 天琴计划对轨道设计提出了更高的要求.

天琴计划于2015年提出0123计划: 首先在地面搭建激光测距系统, 获取卫星所需的高精度轨道信息; 其次发射单星“天琴一号”, 在轨验证惯性传感技术、微推进技术、无拖曳控制技术、激光干涉技术以及温控是否能达到要求; 然后预计于2025年发射双星“天琴二号”, 测试验证星间激光干涉技术; 最终预计2035年发射三颗卫星实现空间引力波探测.

2019年12月20日, “天琴一号”卫星发射, 系统主要载荷包括: 惯性传感器、微推进器、无拖曳控制系

统、光读出系统、温控系统等。其光读出系统是一个激光差分干涉系统, 由激光器、光学平台干涉仪和相位计组成^[27]。

激光器是分布式布拉格反射(Distributed-Bragg-Reflector)光纤激光器, 波长为1064 nm, 输出光功率为20 mW。经一组声光调制器后得到两个频率差为10 kHz的激光, 分别经过光纤准直器进入光学平台, 构成三路Mach-Zehnder干涉仪, 分别产生参考信号、测量1和测量2信号。参考信号和测量1信号构成测量干涉仪1, 参考信号和测量2信号构成测量干涉仪2。干涉仪1用于测量一个反射镜的运动, 该反射镜由压电陶瓷驱动, 可以做一个0.5 nm的往复运动。干涉仪2用于测量一个柔性铰链的运动, 这个铰链的本征频率为322 Hz。

“天琴一号”实现了残余加速度噪声 $3 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$ @0.1 Hz, 微推力分辨率 $0.3 \text{ } \mu\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$ @0.1 Hz的在轨实验结果, 干涉仪噪声水平约为 $30 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ @0.1 Hz, 轨道的温控水平可以达到 $\pm 3 \text{ mK}$ ^[26]。

2.2.4 其他计划

除LISA、太极和天琴计划外, 在空间引力波探测发展过程中, 为覆盖不同频段, 科学家们提出了不同轨道、不同臂长、不同原理的探测计划。如覆盖空间引力波与地面引力波探测间频段空白(0.1–10 Hz)的DECIGO (DECi-Hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory)^[4], 臂长更长频段更低的ASTROD-GW (Astrodynamical Space Test of Relativity Using Optical Devices, Gravitational Wave), 臂长短探测精度更高的中频引力波探测BBO (Big Bang Observer), 更为宏伟的木星轨道任务Super-ASTROD以及地球轨道的ASTROD-EM/LAGRANGE, OMEGA等^[28]。

空间引力波探测计划主要分为两种轨道结构, 即日心轨道和地心轨道^[26]。两种轨道优缺点如下: 日心轨道的主要优点是环境稳定性好、三星编队的呼吸角小, 主要缺点是离地球比较远, 最近约为 $5 \times 10^7 \text{ km}$, 对深空测控和数据传输等提出了技术挑战; 地心轨道的优点则是降低了对深空测控和数据传输的挑战, 且大大缩短了卫星的入轨时间, 缺点是受到月球引力的影响, 三星编队的轨道稳定性差, 此外, 卫星所处的热环境稳定性差, 对整星热控的要求远大于日心轨道。

3 激光干涉测量系统

结合以上几个探测项目的介绍, 可以看出利用激光干涉技术进行空间引力波探测的基本思路是: 首先选取两个远距离的测试质量块使其处于自由悬浮状态, 当引力波通过时测试质量块之间的相对距离会发生变化; 再利用两个频率不同的激光经过光学元件传播后生成干涉信号, 通过对干涉信号相位信息的读取反应测试质量块的运动, 进而反演引力波信号。尽管各项计划的探路者号采用的干涉光路不尽相同, 但是其目的均是衡量整个系统的相关参数能否满足要求, 如测试质量的加速度噪声水平、无拖曳控制水平、温控水平、光学平台的稳定性以及双星系统中的指向精度等。考虑到整个系统的噪声水平均由干涉信号反映, 因此接下来首先介绍整个干涉系统的组成, 再给出系统中存在的噪声来源与抑制方法。

3.1 系统组成

激光干涉引力波探测项目由三颗卫星构成, 每颗卫星中包含两组光学平台, 在各自与远端卫星建立星间干涉链路的同时, 星内的两组光学平台间通过光纤进行光学信息的相互传递, 进而构建本地参考干涉光路。参考干涉仪结合测试质量干涉仪和星间干涉仪共同实现系统全链路干涉信号的获取。干涉链路不仅用于基础的干涉测距, 还承担了其他功能, 如绝对距离测量、数据通信以及时钟噪声传递^[29]。本节只对干涉仪系统进行介绍, 主要包括激光器、光学平台、相位计和望远镜^[30], 各部件之间的联系如图4所示。

3.1.1 激光器

激光器为整个干涉系统提供超稳激光光源, 主要由种子光源、光纤放大器、稳频系统及反馈控制系统组成^[31]。激光的三个主要技术参数分别是波长、模态和功率。波长定义了空间电磁场的振荡周期, 空间引力波探测中激光波长的选择是综合考虑光源性能、镜面材料的吸收率、光电探测器的量子效率以及杂散光影响的结果。目前地面引力波探测和空间引力波探测项目, 如Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRA, LISA, Taiji等, 均采用1064 nm的光源, 对于更新一代的地面引力波探测器, 波长为1550 nm的激光器、大功率预稳激光器以及用于克服量子噪声极限的压缩态光源

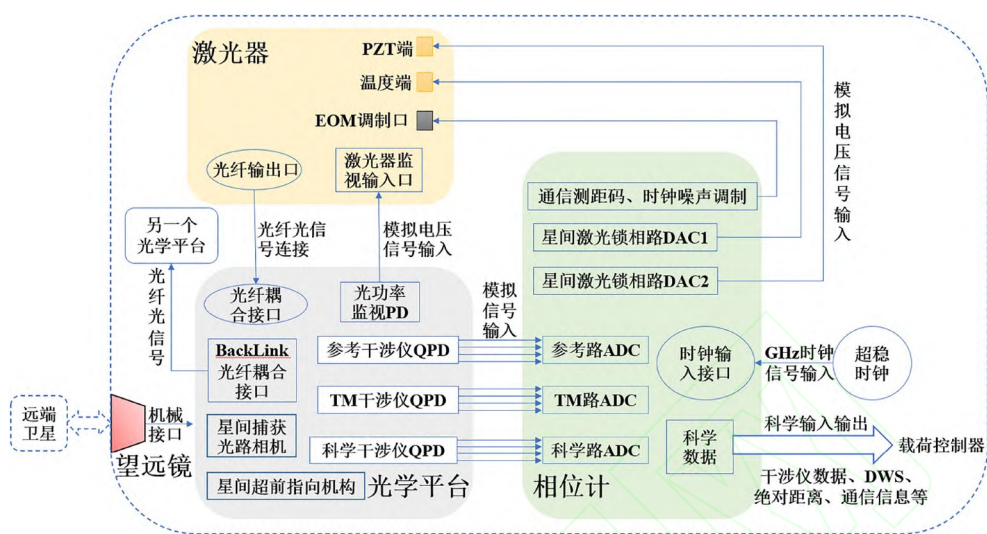


图 4 (网络版彩图)干涉仪系统组成及连接关系示意图

Figure 4 (Color online) The block diagram of component and connection of interferometry system.

等均在研究中。模态采用光学谐振腔的基模TEM₀₀。系统的光功率要求可根据系统量子噪声进行调节,例如LISA Pathfinder卫星中激光的输出功率约为32.5 mW±30%^[32,33],“太极一号”卫星中激光输出功率为40 mW^[34]。此外,激光频率的稳定性也是影响激光器性能的重要因素,例如LISA团队对0.1 mHz–1 Hz内的频率稳定性提出低于 10^{-6} Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的要求,这一要求是通过腔稳频、锁臂、时间延迟干涉实现的^[31]。激光功率噪声和频率噪声均可耦合进入干涉信号中,因此激光器系统应考虑二者的可调节性。以图5为例说明激光器系统中各单元间的顺序关系。

图5所示激光器系统主要包含激光发射模块、激光调制模块以及控制模块^[33]。发射模块中的种子光源主要是一个由二极管泵浦、Nd:YAG晶体构成的非平面环形谐振腔NPRO，输出1064 nm的基模线偏振光，输出光功率约为30 mW。激光调制模块中光分束成两部分，一部分经过EOM (Electro-Optic Modulator)，最终经光纤放大后进入光学平台；另一部分经过稳频系统提高频率稳定性。稳频方法一般有三种，分别是稳频腔(FP腔)稳频、碘稳频和光纤延迟干涉仪稳频。反馈控制模块主要包括一些电子学模块，用于对误差信号(频率波动误差、功率波动误差、电子学噪声等)进行响应，并对晶体进行反馈控制。通过压电驱动调节激光谐振腔的腔长，或者通过信号发生器调节Nd:YAG

晶体的温度, 可以对激光频率进行调制, 使出射激光的频率达到预设要求^[35,36]. 种子光源与光纤放大器间的EOM主要用于激光通信及时钟噪声传递, 可以调制通信测距和时钟波动信息.

为了降低激光器对干涉测量结果的影响,一般可以采用以下几种方法:选用功率稳定性和频率稳定性高的光源、采用共模噪声抑制的方法消除激光噪声的影响、引入反馈补偿链路使光源的相关参数稳定在目标水平^[32]。

3.1.2 光学平台

光学平台在整个系统中承担干涉仪构型搭建以及光路搭建的工作,是整个测试系统的核心.表面分布着各类光学元件(如光学镜片、光电探测器),经光学平台进行分束合束之后得到的干涉信号会进入探测器进行光电信号转换.例如LISA Pathfinder中激光经过光学平台后共构建了四路干涉仪,分别是频率干涉仪、参考干涉仪、TM干涉仪1和TM干涉仪12,干涉信号经10个探测器后转换为电信号进行后续数据的读取与分析^[33].探测器为InGaAs四象限探测器,其中8个用于4个干涉仪信号的读取,也就是每一路干涉信号都会进入两个光电探测器,即平衡探测,通过这一方法可以有效抑制光学平台的噪声^[37],另外两个探测器只用其中一个象限的数据,对进入光学平台的两个激光的功率

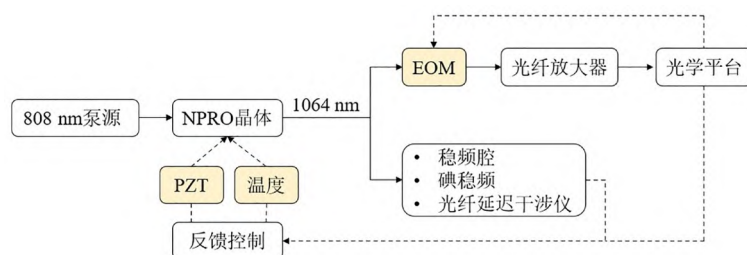


图 5 (网络版彩图)激光器系统组成框图

Figure 5 (Color online) Block diagram of laser system.

进行监测, 并用于后续光功率稳定环路的建立^[33,38]. “太极一号”卫星中同样建立了四路干涉仪, 其中两路等臂参考干涉仪用于反映光学平台稳定性, 一路TM参考干涉仪和一路TM测量干涉仪用于检测测试质量的波动, 干涉信号最终进入8个探测器^[24].

空间引力波探测要求百万公里距离的测量精度达到 $1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$, 对应的角度测量精度为 $1 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$. 考虑到位移平台上光学镜片在外界扰动下会产生变形, 影响干涉信号, 需要对干涉仪的稳定性进行严格把控. 温度波动以及震动都会引起光程波动, 因此, 从结构上提高干涉仪稳定性的手段包括增加温度稳定性以及降低平台与外界扰动的耦合.

温度波动引起的光程噪声可以表示为

$$\delta s = \alpha \cdot s \cdot \delta T, \quad (13)$$

其中 α 为热膨胀系数, s 为初始臂长差, δT 为温度波动. 可以看出光学平台所处环境的温度波动是干涉测量的一个重要影响因素. 空间引力波探测要求核心载荷所处的温度环境稳定, 因此诸如LISA计划和太极计划要求光学平台热稳定性优于 $10 \text{ } \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以保证 $1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测距精度^[39,40]. 此外, 通过选取热膨胀系数小的材料可以降低由光学平台产生的光程噪声. 文献^[11]表明, 当初始臂长差为 45 cm 、温度稳定性为 $10^{-5} \text{ K}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的情况下, 光学平台采用热膨胀系数为 $23 \times 10^{-6}/\text{K}$ 的铝板, 会得到 $10^{-10} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的精度; 当采用热膨胀系数为 $10^{-6}/\text{K}$ 的殷钢时干涉仪测量精度可以达到 $4.5 \times 10^{-12} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$. 面对空间引力波探测计划中 $1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测量需求, 为了尽可能减少热弹性变形, 更低热膨胀系数的材料被用于光学平台的制作, 如热膨胀系数为 $10^{-8}/\text{K}$ 的微晶玻璃, 典型代表有Schott AG公司生产的ZERODUR[®],

OHARA GmbH的Clearceram-HS[®]以及超低热膨胀材料ULE[®], 对应的干涉测量精度为 $4.5 \times 10^{-14} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[41-46].

除了能承受温度波动以外, 光学平台的选材设计还要能够承受加速度的波动. 振动等引起的光学平台的变形会传递到光学元件上, 为了降低外界振动以及内部应力释放等因素造成的光学元件的变形, 保证光学元件的稳定性, 要求光学元件与光学平台之间的连接方式要同时保证高强度和高稳定性, 有以下几种不同的选择. 一种是通过分子间作用力——范德瓦耳斯, 将二者接触面抛光到 $\lambda/10$ 的平滑度, 通过按压就可以将光学元件和平台粘在一起, 缺点是断裂强度低, 容易受到卫星发射过程中剧烈振动的影响^[47,48]. 另一种方法是氢氧催化光粘技术, 利用溶液刻蚀接触面形成化学键将其连接, 保持高强度和高稳定性, 从而适应发射需求以及热环境波动. 这一方法最早由斯坦福大学的Dz-Hung Gwo提出, 用于Gravity Probe B空间实验中的望远镜装配过程中, 可以通过优化接触面、控制粘接环境以及改变化学成分等手段对这一技术进行进一步改进^[46,49,50]. 光粘技术凭借其优异的力学性能被用于各项引力波探测项目中, 如GEO 600, LISA Pathfinder, LISA以及国内的太极、天琴计划等, 即光学平台采用ZERODUR[®]微晶玻璃, 光学镜片采用熔融石英, 二者之间通过光粘技术进行固定^[13,39,51].

3.1.3 相位计

相位计的主要功能首先是测相, 即对被测信号的相位信息进行高精度测量. 在目标频段 0.1 mHz – 1 Hz 内, 光学测量系统 $\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级的测距精度对相位计提出了 $2\pi \text{ } \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级的精度要求^[52]. 相位计的动态测量范围与卫星所处的轨道动力学和激光光源本身的频率波动相关. 考虑到多普勒效应的影响, 卫星间相

对运动会引起被测差频信号的频率波动, 为此LISA计划要求相位计的信号测量范围约为2–25 MHz^[53], 太极计划目前优化的轨道对应的频率范围约为5–25 MHz^[9], 该范围决定了相位计的测量带宽^[54]. 关于激光频率噪声, 其噪声大小决定了相位计的探测范围, 例如当激光频率噪声要求低于 $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 时, 为了满足 $\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测距精度, 要求相位计拥有 10^8 量级的动态测量范围^[55].

为了实现测相功能,需要对不同种类的相位测量方法进行性能评估与选择,如过零鉴相法、I/Q解调测量相位、数字相关法、FFT谱分析法和最小二乘法等^[56,57]。LISA Pathfinder中被测信号的频率是一个在kHz频段的定值,其相位测量系统采用I/Q解调技术,也称单边离散傅里叶变换法^[58]。主要通过控制本地振荡器产生两个相位差为 90° 的信号,但二者的频率均与被测信号频率相同,将两个信号与被测信号相乘,分别得到I信号和Q信号,通过I/Q的反正切运算求取相位信息。对于LISA计划和太极计划这些星间激光干涉测距系统而言,卫星间的相对运动会引起多普勒频移,使被测信号的频率在一定范围内波动。前述方法中本地振荡器固定频率的输出只适用于单一频率信号的测量,不能满足需求,因此相位测量系统引入数字锁相环(DPLL)方法^[57,58]。该方法通过反馈控制本地振荡器的输出频率,使其与被测信号的频率保持一致,最终实现被测信号相位信息的读取,原理如图6所示。

干涉信号进入探测器时是电流信号, 先后经过跨阻放大器(TIA)和低通滤波器实现电压转换及抗混叠的功能, 继而通过模数转换器(ADC)转换成数字信号,

进入相位计。干涉信号与数控振荡器(NCO)的输出信号(sin和cos)相乘并低通滤波, 得到相位差 90° 的相位误差信号(Q和I)。相位误差信号不仅可以用于相位锁定, 即利用信号Q通过比例积分控制器(PI控制器)反馈控制NCO, 使其与输入信号的相位锁定, 体现为相位误差信号为零; 还可以用于被测信号幅值的计算^[53]。最终通过提取NCO中的相位和频率输出, 可以得到待测的相位信息^[53,59]。

为了实现距离和角度信息的同时测量，并进行平衡探测，每个干涉信号会进入两个四象限探测器。其每个象限都相互独立，分别对应相位计的不同通道。因此，空间引力波探测需要完成多个外差信号 $\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的高精度测量。例如“太极一号”相位计基于数字锁相环搭建，采用VHDL编码^[60]。干涉仪平台包含四路干涉信号，共生成16个模拟信号，经4个ADC转换成16个数字信号并进入现场可编程逻辑门阵列(FPGA)中，通过16通道的数字锁相环进行相位读取。太极计划由于轨道的游离，需要更大的带宽，基于已有DPLL模型，目前在5–25 MHz带宽之间的任意干涉信号，相位计均能在目标频道满足探测需求。此外，在0.1 mHz–1 Hz频段内，测量精度优于 $2\pi \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[60,61]。

此外相位计的功能还包括星间激光通信测距的调制与解调、时钟噪声传递的解调及弱光锁相.

3.1.4 望远镜

在星间激光干涉链路的搭建过程中,两个测试质量间的距离变化由三部分组成:本地测试质量与本地光学平台、本地光学平台与远端光学平台、远端光学

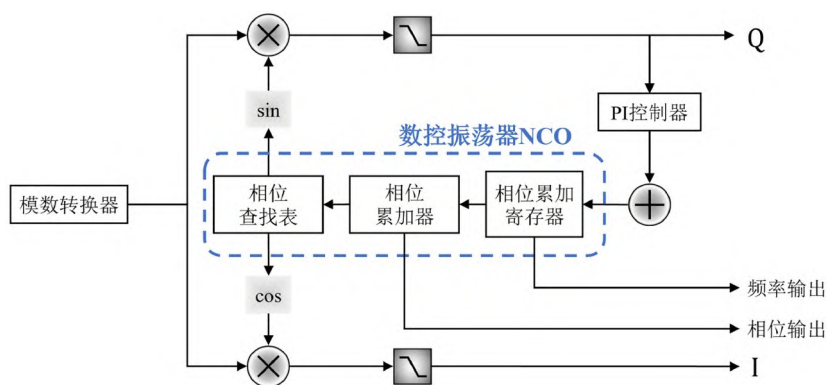


图 6 (网络版彩图)数字锁相环原理图

Figure 6 (Color online) Block diagram of the principle of DPLL.

平台与远端测试质量. 其中本地与远端光学平台间的通信由一对望远镜实现, 对于三星引力波探测项目, 每颗卫星上设置两个望远镜, 共6个望远镜. 望远镜主要用于星间激光的光束收发, 将光学平台中的光束扩束, 得到接近衍射极限的准直光束, 在向远端卫星发射光束的同时接受来自远端卫星的入射光束, 最终搭建三条星间激光干涉链路. 此外还要保证干涉仪的测距精度要求, 即尽可能降低卫星角度抖动引起的干涉测量噪声.

为了达到要求的测距精度, 要求望远镜保持高结构稳定性、高光通量、低角度抖动噪声(TTL噪声), 并减少发射/接收光过程中后向散射光的影响^[62]. 因此望远镜的设计需着重考虑以下三点.

(1) 望远镜结构的选择, 为了在相同口径下获得更强的光能利用率, 并降低望远镜反射镜片产生的后向散射光对干涉信号的影响, 望远镜普遍采用离轴四反设计^[63-67]. 四反(四个反射镜: 主镜M1、次镜M2、三镜M3、四镜M4)的面型分别为抛物面、双曲面、球面、球面, 其中M3和M4可用作补偿镜, 补偿在轨环境下应力和温度波动导致的系统波前质量下降^[68]. 基于离轴四反设计, 本地高斯光束经望远镜打到远端卫星被接收, 同时远端卫星来的光到达本地望远镜后, 远场波前被截取并缩束为平顶光束, 然后与本地高斯光束一起打到探测器上进行干涉. 为适应不同的光路设计和结构关系, 离轴四反的设计形式略有不同, 可在末端增加平板反射镜折返光路. 除系统的结构选择外, 应尽可能保持望远镜系统的结构稳定性, 从而提高散射光的稳定性^[67].

(2) 望远镜材料的选择, 考虑到卫星在轨过程中会受到太阳光以及星上电子设备热耗散的影响, 材料应选用热膨胀系数较低的材料, 比如LISA望远镜的光学镜片选用Zerodur微晶玻璃^[64], 热膨胀系数低于 $10^{-7}/\text{K}$.

(3) 系统参数的设计, 比如光功率的选择, 由于百万公里量级的距离会引起激光功率10个量级的衰减, 约从2 W衰减到500 pW^[69], 因此出射光功率必须足够高, 保证激光能够有效地被远端卫星接收. 但是经过各个反射镜片时后向散射光产生的干涉噪声与光功率成正比, 因此光功率需要在合适范围内进行选择.

目前LISA望远镜设计中, 放大倍率为134, 主镜的通光口径为30 cm, 出射波前平整度为 $\lambda/30@1064 \text{ nm}$. 此外, 望远镜内外两侧温差高达200 K^[70], 因此要保证

高的结构稳定性, 目前稳定性限制为 $1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{1 + (2 \text{ mHz}/f)^4}$ ^[62], 经隔热系统后本地温度波动在0.1 mHz附近降到 $10 \text{ } \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平^[64], 各项参数仍在不断优化. 考虑到太极计划星间距及测距精度等参数与LISA计划不同, 其望远镜相关参数也存在差异并在优化过程中, 例如望远镜口径设计为40 cm, 杂散光要求低于 10^{-10} W , 望远镜与光学平台间连接件的连接稳定性优于 $1 \text{ nm}/\sqrt{\text{Hz}}$.

3.2 噪声分析与抑制技术

空间引力波探测采用激光差分干涉的方法测量两个自由悬浮的测试质量之间的位置波动, 探测精度取决于: (1) 测试质量的位置波动水平, 即卫星的无拖曳控制系统、微推进器和测试质量周围电容传感的噪声水平; (2) 探测过程中干涉信号的读取精度, 即光学测量相关噪声, 如激光强度噪声、激光频率噪声、杂散光、热噪声、角度抖动噪声、光程差噪声以及散粒噪声等.

噪声的消减依赖于模型的准确建立, 模型建立后, 根据抑制方法可将噪声消减技术分为三种: 主动抑制、共模噪声消减和数据后处理.

主动抑制的思路相对较为直接, 例如可以提升系统的环境稳定性, 建立隔振隔热系统^[43,71,72], 可以对仪器的相关参数进行约束, 通过提高对仪器性能的指标需求达到噪声消减的目的; 或者通过主动控制的方法, 对相关参数进行压制, 降低由此引起的噪声. 主动抑制的方法, 对噪声的抑制较为直接和明显. LISA Pathfinder采用主动抑制的方法对不同噪声进行压制, 如激光频率抖动噪声、激光功率漂移^[73]、光程差异噪声^[74](OPD噪声, Optical Path-length Difference)、干涉仪温度漂移噪声等, 将在下文展开介绍.

共模噪声消减的主要思路为, 当绝对仪器噪声无法抑制至参数要求, 通过引入相同环境下的参考点, 提取测量点与参考点的差异, 达到抑制相关共模噪声的目的. 在空间引力波探测中, 共模噪声消减广泛用于星间各类噪声的消减中, 如频率抖动噪声、时钟噪声^[75]、温度漂移噪声等. 常见的手段是引入参考干涉仪, 采用共模抑制参考光路以及平衡探测的方法实现共模噪声消减. 从测量角度, 原理上TM干涉仪和科学干涉仪即可测量出两卫星间的测试质量位移波动. 参

考干涉仪光路只涉及光学系统中的固定光学元件, 其测量的噪声同样存在于星间干涉仪和TM干涉仪中, 可用于共模消除光学平台的噪声, 如时钟噪声、探测器及相位计间的模拟电子学噪声等. 因此, 一般TM和科学干涉仪的测量结果展示均是通过参考干涉仪共模消除之后的体现. LISA Pathfinder、“太极一号”和“天琴一号”均设计了相同功能的参考干涉仪. 除光路设计引入参考干涉仪外, 干涉仪臂长对称设计、相位计导频信号、DWS (Differential Wavefront Sensing)等均是参考共模噪声抑制的例子. 因此, 在未来的干涉仪高精度测量中, 当仪器测量绝对精度达不到要求时, 可通过引入共模噪声消减的方法进一步提高测量精度.

若采用前两者方法均无法满足要求时, 数据后处理的方法可用于噪声最后的消减. 在空间引力波探测中, 采用TDI (Time Delay Interferometry)技术^[76-80], 对于频率抖动噪声和星间时钟噪声的消除是最典型的数据后处理应用. 由于轨道的相对运动, 无法保持三星间等臂长干涉仪的构建, 无法共模消除星间噪声. 因此, 需要进行数据后处理构建虚拟等臂干涉仪以消除频率抖动噪声和时钟噪声的影响. 除TDI消除星间噪声外, 采用“扰动量测量-相关性分析-数据后抑制”的方法进行噪声消除广泛地应用于在轨数据处理、地面关键技术验证和噪声建模中. 为消除测量中各类噪声的影响, LISA Pathfinder进行了大量的噪声建模和数据后处理消除工作^[14], 对干涉系统中各类噪声, 如TTL噪声^[16]、频率噪声^[81]、相位计噪声^[53]、温度噪声、RIN噪声^[73]等进行了全面的解读.

3.2.1 激光强度噪声

相对强度涨落噪声(RIN)是干涉仪中光功率波动带来的噪声, 也叫光功率噪声^[73]. RIN对干涉测量的影响机制分为以下两个方面.

一方面是功率波动与外差信号的耦合相位噪声, 这一效应的作用频段主要是在外差频率附近. 干涉测距是通过读取外差信号的相位波动获取的, 外差信号的幅值波动与相位波动的混频会引入相位噪声, 记为

$$r(t) = \frac{\delta P}{\bar{P}}, \quad (14)$$

其中, \bar{P} 和 δP 分别代表光束的平均功率及波动, RIN谱密度的单位是 $1/\sqrt{\text{Hz}}$. 由于相位计只在外差频率附近

的窄带起作用, 可以理解为外差频率附近的窄带滤波器, 因此当RIN频率等于一倍或二倍的外差信号频率时, 二者耦合就会导致相位噪声^[73]. 通过建立测距信号与功率间传递函数的方法, 可以评估强度噪声的大小^[33].

另一方面是测试质量的辐射压噪声, 这一效应主要作用在低频段. 打到测试质量上的光功率发生波动时, 会引起辐射压噪声, 体现为测试质量受到力噪声的干扰, 进而产生位移的波动. 测试质量受到的力 F 与入射光功率 P 之间的关系为

$$F = \frac{P}{c}(1 + \rho), \quad (15)$$

其中, c 是光速, ρ 是反射率. 降低辐射压力的方法是降低光功率及提高光功率稳定性.

建立光功率反馈环路可以有效降低RIN: 分别用单象限探测器对进入光学平台的两束光进行功率探测, 将其作为输入信号建立快速反馈环或慢速反馈环. 快反馈环有两个, 分别对应进入光学平台的两束光, 将其作为输入信号, 分别反馈到一个声光调制器(AOM)驱动器中, 通过调节AOM晶体的射频驱动电压调节晶体的衍射状态, 使系统的出射光功率保持稳定; 慢反馈环则是将上述两个输入信号进行处理后反馈到激光器中, 控制激光的输出功率. 二者相比, 慢反馈环受激光温度波动影响大, 导致环路稳定效果差, 这一点被LISA Pathfinder团队在地面测试中得到证实, 因此常采用建立快反馈环路减低RIN^[36].

3.2.2 激光频率噪声

激光频率噪声反映了干涉测量过程中激光的频率波动对相位测量结果的影响, 激光器内部的温度波动和泵浦光源的强度波动都会引起激光频率噪声. 在精密激光干涉测距领域, 激光频率的波动必须抑制在一个很小的范围, 因为频率的波动会产生测距噪声.

相位噪声 $\delta\phi$ 与激光频率噪声 $\delta\nu$ 之间的关系为

$$\delta\phi = 2\pi \cdot \delta\nu \cdot \Delta t. \quad (16)$$

当干涉仪的两臂长相等时, 不存在时间延迟($\Delta t = 0$), 此时的相位噪声对激光频率噪声不敏感. 但是当两臂长不相等时, 时间延迟与臂长差相关:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c}, \quad (17)$$

其中, Δs 为光程差. 对于真空中的空间光而言,

$$\Delta s = \Delta L, \quad (18)$$

其中, ΔL 是干涉仪的臂长差. 引起臂长差的因素有很多, 比如光学平台的结构误差、光学平台与惯性传感器的安装导致的误差、惯性传感器内部的结构误差等. 此时的相位噪声与激光频率噪声之间的关系为

$$\delta\varphi = \frac{2\pi\Delta L}{c}\delta\nu. \quad (19)$$

对光束正入射到测试质量而言, 且测试质量的相对位置没有改变时, 相位噪声对应的测距噪声为

$$\Delta x = \Delta s = \frac{\lambda\delta\varphi}{2\pi} = \frac{\lambda\Delta L}{c}\delta\nu. \quad (20)$$

可以看出, 由频率不稳定性引起的测距误差与臂长差成正比. 太极计划中, 由于轨道游离造成的臂长差约为臂长的 1%–5%, 即最大 15 万公里. 为了满足 $\text{pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测距精度要求, 该臂长差要求激光频率稳定性在 $10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级.

现阶段采用的激光器是 Nd:YAG 固体激光器, 预稳频后的频率稳定性可以达到 $\text{MHz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级, 此时由频率稳定性造成的测距误差成为最大噪声来源. 要使激光频率噪声满足空间引力波探测需求, 一般分三步. 首先是 PDH 锁腔, 即将激光锁定在一个更加稳定的参考腔上, 可以将频率稳定性提升到 $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[29]. 其次是激光锁臂技术, 由于臂长的波动会在干涉信号中产生相位噪声, 当激光频率锁定到星间干涉臂上, 臂长稳定性就可以反映频率稳定性^[82]. 尽管会存在 15 万公里级的干涉臂长差, 但是该值的波动周期是一年, 即敏感频段集中在低频段 (10^{-8} Hz), 空间引力波探测要求星间臂长在 1000 s 时域范围内保持高的稳定性, 这一要求为锁臂提供了良好的参考^[83]. 通过锁臂技术理论上可以将频率稳定性提高至 $10^{-4} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[29]. 锁腔和锁臂技术对激光频率锁定的可行性已经在 GRACE Follow-On 卫星任务中得以有效验证^[84]. 二者均通过调节激光晶体温度和腔长实现, 其中腔长的调整利用了粘贴在激光晶体上的压电驱动器 (PZT), 即将频率干涉仪和参考干涉仪相减的结果作为误差信号, 反馈控制 PZT 和晶体温度, 就可以控制出射激光的频率^[33,36]. 第三步是利用时间延迟干涉技术 (Time-Delay Interferometry, TDI) 进行噪声抑制^[76,77,85,86]. TDI 技术是将测量数据进行时间移位, 进而构建虚拟的等臂干涉仪, 因此

构建 TDI 后的测量误差与时间移位精度相关^[80]. LISA 对一代 TDI 和二代 TDI 分别提出了 1 和 $282 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的要求^[84]. 太极计划基于第一代和第二代 TDI 的数值结果显示, 激光频率噪声要低于 $30 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[30], 即对应 10 m 量级的臂长差精度.

3.2.3 杂散光

光学平台上或从远端卫星传来的光中都会存在由于光的散射带来的杂散光, 特别是在光学元件两种介质传播的界面处. 比如平行平板分束器 (BS) 是杂散光产生的主要来源, 在其二次表面约有 0.2% 的光束反射; 偏振元件, 如波片表面反射形成的鬼光束也会形成杂散光; 双平台干涉仪之间的反向连接 (Backlink) 光纤实验中, 光由一个平台传输到另一个平台时, 经过光纤端口的光会有百分之一被反射形成杂散光^[48]. 考虑到杂散光与测量光和参考光的频率相同, 因此当杂散光的幅值或相位发生波动时, 干涉结果会影响主干涉信号的相位提取. 此外, 杂散光的干涉往往会破坏干涉光路的对称性, 相位变化相较于参考光较大, 因此杂散光的抑制是干涉仪噪声的主要问题之一.

杂散光的抑制思路主要有两种. 一种思路是利用平衡探测方法抑制杂散光, 这一方法适用于已经完成干涉的杂散光存在于测量光所在光路的情况, 当二者与参考光束经 BS 合束时, 由于 BS 的一端镀有半反半透膜, 导致合束后的两个输出端口不仅分别包含相位差为 π 的干涉信号, 还包含相位差为 0 的杂散光信号. 因此, 当 BS 为二分之一分光时, 通过平衡探测 (两个探测器结果相减), 可完全消除杂散光的影响, 但这一方法仅适用于无 π 翻转的杂散光干涉^[87]. 另一种思路是使杂散光偏离主光路, 采用非平行平板的镜片, 将杂散光偏离主光路, 避免杂散光进入探测器参与信号解析^[48]. 例如采用斜角分束镜可有效地降低杂散光进入主光路, 但斜角光学元器件加工镀膜的难度较大, 会增加工艺难度和经济预算, 且斜角光学元器件在光束抖动的情况下会引入额外的光程噪声. 综上考虑, 直接的方法还是减少二次镜面的反射率, 降低杂散光的幅值, 同时增加光学平台的稳定性, 减少杂散光干涉信号的相位波动.

3.2.4 热噪声

热噪声, 即光学系统所处环境的温度波动引起的

干涉测量噪声, 是限制mHz低频段干涉测量精度的主要因素. 为了获得高的干涉测量灵敏度, 空间引力波探测对干涉仪平台所处的环境稳定性要求很高. 卫星在轨期间, 太阳常数或者载荷功率的波动都会使卫星温度发生改变, 进而导致干涉仪光学平台附近的温度场受到影响; 微推进器作用下卫星姿态的改变也会使星内温度的稳定性受到影响.

尽管卫星隔热设计可以阻挡99%的热波动, 温度场波动引起的测距噪声仍不可忽略, 主要通过两种途径, 分别是测试质量块的运动和光学系统的变形. 测试质量被引力参考传感器(GRS)包裹, GRS周围温度梯度的变化会使测试质量受到额外力扰动的影响, 产生辐射计效应、辐射压以及布朗气体运动, 影响打到测试质量上的光线稳定性. 光学系统中干涉仪基板及光学元件会在温度波动下产生热应力并引入光程噪声, 热噪声对光学系统的影响主要通过各个元件(例如光纤耦合器、光学平台、光电探测器和相位计^[88])响应最终体现在干涉结果中. 其中, 光学平台受热噪声的影响最为显著. 热噪声主要通过以下三种途径影响干涉测量结果, 分别是光学元件相对位置的波动、元件内部光程长度的变化以及折射率的变化^[33]. 前两个与热膨胀系数相关, 折射率的变化则与折射率温度系数相关. 折射率温度系数表示的是在不引起应力的情况下, 温度每升高1°C, 折射率的变化量. 其数值与温度和波长相关, 变化机理为: 温度升高时, 一方面材料的密度减小, 折射率下降; 另一方面分子极化率增大, 折射率增加^[89,90].

由于mHz频段包含了丰富的引力波源信息, 必须降低mHz频段的热噪声影响, 常采取主动降低以及被动消除两种手段. 主动降低是指隔离外界温度波动提高光学平台热稳定性, 如对核心部件进行热包覆, 通过主动隔热隔离外界温度对光学元件的影响, 或者通过采用低热膨胀系数的材料降低系统中热噪声的影响^[91]. 被动消除是通过建立干涉仪平台的热漂移噪声传递函数, 进而数据后处理消除热漂移噪声的影响^[88,92].

LISA Pathfinder卫星在轨运行过程中搭建了热诊断系统, 即在核心载荷(测试质量和光学平台)外部设置隔热罩, 并将18个加热片和24个温度传感器分别贴在载荷表面的特定位置, 监测不同工况下的温度波动情况. 通过可控的温度波动建立其与GRS读数或干涉

测量结果间的传递函数关系, 可进一步用于被动消除热噪声的影响. 在轨实测结果表明隔热罩内干涉仪系统的温度稳定性可以在1 mHz附近达到 $10 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[36,93-95].

“太极一号”通过构建三级温控系统保证干涉仪系统的温度稳定性, 在轨测试结果表明mHz频段的测温分辨率可以达到0.1 mK量级, 温度稳定性可以达到 $\pm 5 \text{ mK}$ ^[96]. 但太极计划对测温分辨率和温度稳定性提出了更高的要求, 分别为1和 $10 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[96]. 因此太极计划相较“太极一号”卫星, 在光学系统结构、热诊断系统的搭建以及热噪声的后处理消除等方面均有更高的要求^[87,97].

3.2.5 角度抖动噪声

光路中光学元件的抖动会引起光程的变化, 干涉信号中的光程差信息与角度相关, 即TTL噪声. TTL噪声主要包括几何效应和非几何效应.

几何效应是指光束本身由于角度抖动引起几何光程的增加, 从而引起测量误差. 如果以光线作参考, 可以看作是光学镜片的波动, 例如镜片的角度抖动或倾斜镜片的水平运动等都会引起TTL噪声. TTL噪声的几何效应包含两方面: 光学镜片绕光束反射点旋转引起的杠杆效应(Lever Arm Effect)和绕空间中任一点旋转引起的活塞效应(Piston Effect)^[98].

非几何效应是考虑角度波动下光束波前的变化情况. 由于光电探测器探测的是在敏感单元内波前相位差积分, 在两束光波前相同的情况下, 不论是否有入射夹角, 相位差积分均为0, 无额外误差. 但在两光束波前不相同的情况下, 当光束间无夹角时, 此时由于波前不重合, 相位差积分不为0, 会引入一个固定的相位差偏置, 但不会影响波动信息的测量; 当光束间有夹角时, 此时积分不为0, 且随着夹角的波动, 产生波动, 即所谓的非几何效应TTL^[99].

空间引力波探测中, 参考干涉仪由于无活动部件, 在光学平台结构稳定的前提下, TTL噪声较小, 一般可以忽略. TM干涉仪由于TM的运动, 会产生测量光束的角度抖动, 两束光波前相同, 但由于两束光光斑中心不重合, 光电探测器尺寸有限, 同时由于TM反射点的运动, 会产生较大的TTL噪声. 科学干涉仪测量光束由于远距离的传播, 波前趋于平顶光束, 与本地参考光高斯光束相差较大, 再叠加探测器的尺寸效应, 导致TTL噪声最为复杂.

为了一定程度上消除TTL噪声的几何效应和非几何效应,可引入透镜系统,将TM干涉仪中偏离的光束重新引入至光斑中心.根据费马原理,几何光程相对于光束倾斜前,并未增加,同时由于光斑中心仍然在光电探测器的中心,两束光波前相同时,并未引起额外的非几何效应^[100,101].但科学干涉仪由于两光束波前的差异,相较于TM干涉仪更为复杂.LISA要求通过透镜系统的引入,TTL系数在 $\pm 300 \mu\text{rad}$ 的范围内小于 $\pm 25 \mu\text{m/rad}$ ^[100].同时,通过卫星无拖曳及指向控制,望远镜前的角度抖动优于 $10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$,TM的角度转动小于 $100 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$,且需要控制静态角度偏差^[102].在不同的角度偏差条件下,TTL系数差异较大.科学干涉仪的静态偏差,是由入射光束和望远镜光轴之间的夹角引起的,可以通过地面装调进行控制.TM干涉仪的静态偏差,是在轨通过静电力锁定后的偏差.

3.2.6 OPD噪声

OPD噪声是指在环境扰动等因素作用下,参考光束和测量光束间光程差波动导致的测距噪声.空间引力波探测中激光器与光学平台之间存在一个调制平台,平台上的光路通过光纤连接,主要承担激光强度噪声、频率噪声等补偿光路搭建的功能.调制平台上的光纤光与光学平台上的空间光路均对外界扰动和激光性能波动敏感,因此二者带来的OPD噪声在最终干涉信号中均需要考虑.这类噪声通常采用共模噪声消减的方法消除,即这类噪声普遍存在于干涉信号结果中,而参考干涉仪只涉及平台本身的噪声响应,因此将测量干涉信号(如测试质量干涉仪和星间干涉仪)与参考干涉信号相减便可以减去OPD噪声.

尽管最终的引力波探测是通过两个激光光源锁定获取特定差频,但是在前期激光双光源锁定未能达到要求时通常采用AOM获取外差频率,再将分束后的激光分别连接到光学平台上的光纤准直器进入光学平台.AOM射频驱动信号会引入新的OPD噪声,并且无法通过共模噪声消减直接消除^[103],该噪声在2004年LISA Pathfinder干涉仪工程样机的噪声分析过程中被提出^[14,36].AOM主要包括声光调制晶体、换能器和驱动器,驱动器输出射频信号经换能器转换为机械应力波,使晶体的折射率发生改变形成光栅,光通过光栅后发生衍射,进而获得所需要的差频,差频大小与驱

动器的频率相关.驱动器的主要组成包括信号发生器、功率放大器及相关电子元器件.由于射频信号串扰,AOM驱动器产生的电子学信号中包含一个载波和多个边带,且频率间隔为一倍外差频率,如图7所示.由于电子学边带到光学边带的转换是线性的,通过AOM后的激光束会产生相同的频率分布^[103].当含有边带的激光束发生干涉后,主带与主带、主带与边带间均能产生外差频率的干涉信号.相同外差频率的边带拍频耦合进入测量信号,产生额外扰动.对于不同路径的边带拍频信号,初始相位可能并不相同,进而影响干涉仪间共模噪声抑制效果,产生非线性噪声OPD噪声^[14,103].

OPD噪声产生的根本原因是AOM驱动器的射频信号串扰,因此可以从以下两个方面降低OPD噪声:(1) 被动控制,减少AOM驱动射频信号的串扰,包括AOM换更高质量的连接线、功率放大器被金属壳罩起来再接地;(2) 主动补偿控制,对进入干涉仪平台前的调制光路的光程进行反馈控制,即引入OPD反馈环路进行噪声消减.利用PZT驱动,在调制平台上放置一块PZT驱动的反射镜,将参考干涉仪的光程波动结果作为输入信号,获取其波动速度并反馈到调制光路中的驱动器,AOM驱动器电压作为输出,以电信号与干涉信号的相位差作为误差信号,经放大滤波等操作后控制相应的补偿器件PZT调节光程,进而消除AOM引起的光程噪声^[14,33,38].此外,同样的思路还适用于温度驱动,在调制平台上增加一段温度驱动的光纤,也可以通过建立OPD反馈环路使光纤作为补偿器件消除OPD噪声^[36].

3.2.7 其他噪声

除上述几类噪声外,为了提高干涉测量系统的测

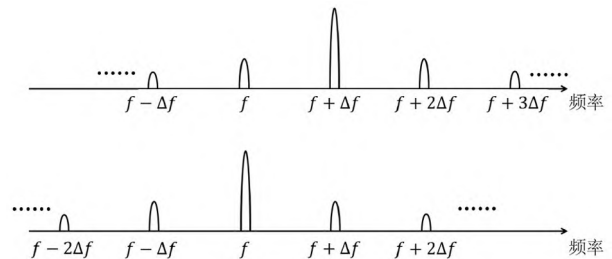


图7 电子学信号的载波与边带示意图

Figure 7 The schematic diagram of the carrier and sideband of the electrical signal.

量精度, 还应考虑其余噪声的影响. 比如光学平台上光学元件(如保偏光纤、光纤接头)偏振态波动会引起额外的干涉噪声^[104]; 光学元件和平台基底受温度波动影响产生的平台稳定性噪声; 望远镜整体结构(包括镜片和连接件)不仅对温度波动敏感^[70], 还将光束穿行过程中的激光指向抖动以及杂散光引入干涉信号. 此外, 还应该考虑相位读数过程中采样抖动引起的时钟噪声^[105]、探测器工作过程中的散粒噪声和电子学噪声以及TM相关的辐射压等效效应造成的加速度噪声^[70].

4 总结与展望

面向空间引力波探测的激光干涉技术结合引力参考传感器、无拖曳控制以及稳定的卫星平台, 要求达到皮米量级的干涉测量精度, 进而实现目标频段的空间引力波探测. 为了对空间引力波探测中的激光干涉技术有一个全面的认识, 本文主要包括两部分: 第一部分是空间引力波探测层面, 首先介绍了空间引力波

探测的原理及方法, 然后对国外的LISA计划、国内的太极计划和天琴计划展示了各自的探测目标、轨道设计、干涉测量系统的布局以及各自技术试验卫星的在轨实测结果; 第二部分则是基于完善噪声模型、提高干涉测量精度的需求, 展示了激光干涉测量系统的主要组成部件, 并对系统中的部分噪声源及其抑制方法进行说明. 除这些主动抑制方法外, 系统设计之初以及在轨数据分析中会结合共模噪声消减和数据后处理方法, 使干涉测量系统满足未来空间引力波在轨探测需求.

不论是国外的LISA计划还是国内的太极计划, 尽管其探路者号干涉仪均达到了在轨测量要求, 但是面向最终的探测需求, 需要建立对干涉测量系统理解更为全面的噪声分析模型. 噪声模型反映了对系统噪声的理解程度, 为消除不同频段噪声提供了研究思路, 是后续衡量干涉测量系统是否满足探测需求的重要依据. 因此对噪声模型的进一步完善和抑制是下一步的重点.

参考文献

- 1 Luo Z R, Bai S, Bian X, et al. Gravitational wave detection by space laser interferometry (in Chinese). *Adv Mech*, 2013, 43: 415–447 [罗子人, 白珊, 边星, 等. 空间激光干涉引力波探测. *力学进展*, 2013, 43: 415–447]
- 2 Aasi J, Abbott B, Abbott R, et al. Advanced LIGO. *Class Quantum Grav*, 2015, 32: 074001
- 3 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA. *Living Rev Relativ*, 2018, 21: 3, arXiv: 1304.0670
- 4 Kawamura S, Ando M, Seto N, et al. Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO. *Prog Theor Exp Phys*, 2021, 2021: 05A105, arXiv: 2006.13545
- 5 Danzmann K. LISA and its pathfinder. *Nat Phys*, 2015, 11: 613–615
- 6 Hu W R, Wu Y L. The Taiji program in space for gravitational wave physics and the nature of gravity. *Natl Sci Rev*, 2017, 4: 685–686
- 7 Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: A space-borne gravitational wave detector. *Class Quantum Grav*, 2016, 33: 035010, arXiv: 1512.02076
- 8 Wu K L, Lin X L, Zheng Y C, et al. Progress and prospect of the lunar-based gravitational-wave detection (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2023, 10: 247–256 [吴铠岚, 林栩凌, 郑永超, 等. 月基引力波探测进展与展望. *深空探测学报*, 2023, 10: 247–256]
- 9 Zhang J, Yang Z, Ma X, et al. Inter-spacecraft offset frequency setting strategy in the Taiji program. *Appl Opt*, 2022, 61: 837–843
- 10 Amaro-Seoane P, Audley H, Babak S, et al. Laser interferometer space antenna. arXiv: 170200786
- 11 Bischof L. The LISA Three-Backlink Experiment: Ultra-Stable Optical Bench Construction and Non-Reciprocity Investigation. Dissertation for Doctoral Degree. Hannover: Leibniz Universität, 2023
- 12 Wanner G. Space-based gravitational wave detection and how LISA Pathfinder successfully paved the way. *Nat Phys*, 2019, 15: 200–202
- 13 McNamara P, Vitale S, Danzmann K. LISA Pathfinder. *Class Quantum Grav*, 2008, 25: 114034
- 14 Armano M, Audley H, Baird J, et al. Sensor noise in LISA Pathfinder: An extensive in-flight review of the angular and longitudinal interferometric measurement system. *Phys Rev D*, 2022, 106: 082001
- 15 Armano M, Audley H, Baird J, et al. Sensor noise in LISA Pathfinder: In-flight performance of the optical test mass readout. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 131103

- 16 Armano M, Audley H, Auger G, et al. Sub-Femto-g free fall for space-based gravitational wave observatories: LISA Pathfinder results. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 231101
- 17 Armano M, Audley H, Baird J, et al. Beyond the required LISA free-fall performance: New LISA Pathfinder results down to 20 μHz . *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 061101
- 18 Abich K, Abramovici A, Ampan B, et al. In-orbit performance of the GRACE follow-on laser ranging interferometer. *Phys Rev Lett*, 2019, 123: 031101, arXiv: [1907.00104](#)
- 19 Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 2004, 305: 503–505
- 20 Tapley B, Ries J, Bettadpur S, et al. GGM02—An improved Earth gravity field model from GRACE. *J Geodesy*, 2005, 79: 467–478
- 21 Schütze D. Measuring Earth: Current status of the GRACE follow-on laser ranging interferometer. *J Phys-Conf Ser*, 2016, 716: 012005
- 22 Luo Z R, Zhang M, Jin G, et al. Introduction of Chinese space-borne gravitational wave detection program “Taiji” and “Taiji-1” satellite mission (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2020, 7: 3–10 [罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极1号”在轨测试. 深空探测学报, 2020, 7: 3–10]
- 23 Zhong X, Han W B, Luo Z, et al. Exploring the nature of black hole and gravity with an imminent merging binary of supermassive black holes. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 230411, arXiv: [2305.04478](#)
- 24 Liu H S, Luo Z R, Sha W. In-orbit performance of the laser interferometer of Taiji-1 experimental satellite. *Int J Mod Phys A*, 2021, 36: 2140004
- 25 Wu Y L, Luo Z R, Wang J Y, et al. China’s first step towards probing the expanding universe and the nature of gravity using a space borne gravitational wave antenna. *Commun Phys*, 2021, 4: 34
- 26 Gong Y, Luo J, Wang B. Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects. *Nat Astron*, 2021, 5: 881–889, arXiv: [2109.07442](#)
- 27 Luo J, Bai Y Z, Cai L, et al. The first round result from the TianQin-1 satellite. *Class Quantum Grav*, 2020, 37: 185013, arXiv: [2008.09534](#)
- 28 Ni W T. Gravitational wave detection in space. *Int J Mod Phys D*, 2016, 25: 1630001, arXiv: [1610.01148](#)
- 29 Liu H S, Gao R H, Luo Z R, et al. Laser ranging and data communication for space gravitational wave detection (in Chinese). *Chin Opt*, 2019, 12: 486–492 [刘河山, 高瑞弘, 罗子人, 等. 空间引力波探测中的绝对距离测量及通信技术. 中国光学, 2019, 12: 486–492]
- 30 Luo Z, Guo Z K, Jin G, et al. A brief analysis to Taiji: Science and technology. *Results Phys*, 2020, 16: 102918
- 31 Luo Y-X. Establishment of a Preliminary Prototype for the Spaceborne Laser-Frequency-Stabilization System (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 [骆颖欣. 星载激光稳频原理演示系统的研制. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2016]
- 32 Meylahn F. Classical and Non-Classical Laser Sources for Current and Future Gravitational Wave Detectors. Dissertation for Doctoral Degree. Hannover: Leibniz Universität, 2022
- 33 Audley H E. Preparing for LISA Pathfinder Operations: Characterisation of the Optical Metrology System. Dissertation for Doctoral Degree. Hannover: Leibniz Universität, 2014
- 34 Sun G W, Chen D J, Xin G F, et al. High stabtiliy laser source for Taiji-1 satellite. *Int J Mod Phys A*, 2021, 36: 2140006
- 35 Li L, Wang J, Bi J, et al. Ultra-stable 1064-nm neodymium-doped yttrium aluminum garnet lasers with 2.5×10^{-16} frequency instability. *Rev Sci Instrum*, 2021, 92: 043001
- 36 Robertson D, Killow C, Ward H, et al. LTP interferometer—Noise sources and performance. *Class Quantum Grav*, 2005, 22: S155–S163
- 37 Carleton H R, Maloney W T. A balanced optical heterodyne detector. *Appl Opt*, 1968, 7: 1241
- 38 Paczkowski S. Laser Frequency Stabilisation and Interferometer Path Length Differences during the LISA Pathfinder Satellite Mission. Dissertation for Doctoral Degree. Hannover: Leibniz Universität, 2021
- 39 Brzozowski W, Robertson D, Fitzsimons E, et al. The LISA optical bench: An overview and engineering challenges. In: Proceedings of the SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Montréal, 2022
- 40 Luo Z, Wang Y, Wu Y, et al. The Taiji program: A concise overview. *Prog Theor Exp Phys*, 2020, 2021: 05A108
- 41 Lieser M, Fitzsimons E, Isleif K S, et al. Construction of an optical test-bed for eLISA. *J Phys-Conf Ser*, 2016, 716: 012029
- 42 Robertson D I, Fitzsimons E D, Killow C J, et al. Construction and testing of the optical bench for LISA Pathfinder. *Class Quantum Grav*, 2013, 30: 085006
- 43 Tröbs M, D’arcio L, Barke S, et al. Testing the LISA optical bench. In: Proceedings of the International Conference on Space Optics. Ajaccio,

2012

- 44 D'arcio L, Bogenstahl J, Dehne M, et al. Optical bench development for LISA. In: Proceedings of the International Conference on Space Optics —ICSO 2010. Rhodes Island, 2010
- 45 Weise D, Braxmaier C, Gath P, et al. Optical metrology subsystem of the LISA gravitational wave detector. In: Proceedings of the International Conference on Space Optics. Noordwijk, 2006
- 46 Elliffe E J, Bogenstahl J, Deshpande A, et al. Hydroxide-catalysis bonding for stable optical systems for space. *Class Quantum Grav*, 2005, 22: S257–S267
- 47 Greco V, Marchesini F, Molesini G. Optical contact and van der Waals interactions: The role of the surface topography in determining the bonding strength of thick glass plates. *J Opt A-Pure Appl Opt*, 2001, 3: 85–88
- 48 Dehne M. Construction and Noise Behaviour of Ultra-stable Optical Systems for Space Interferometers. Dissertation for Doctoral Degree. Hannover: Leibniz Universität, 2012
- 49 Gwo D H. Hydroxide-catalyzed bonding. USA Patent, US 6548176 B1, 2003-04-15
- 50 Gwo D H. Ultra precision and reliable bonding method. USA Patent, US 6284085 B1, 2001-09-04
- 51 Fitzsimons E D. Techniques for Precision Interferometry in Space. Dissertation for Doctoral Degree. Glasgow: University of Glasgow, 2010
- 52 Schwarze T S, Fernández Barranco G, Penkert D, et al. Optical testbed for the LISA phasemeter. *J Phys-Conf Ser*, 2016, 716: 012004
- 53 Gerberding O, Sheard B, Bykov I, et al. Phasemeter core for intersatellite laser heterodyne interferometry: Modelling, simulations and experiments. *Class Quantum Grav*, 2013, 30: 235029, arXiv: 1310.2486
- 54 Gerberding O, Diekmann C, Kullmann J, et al. Readout for intersatellite laser interferometry: Measuring low frequency phase fluctuations of high-frequency signals with microradian precision. *Rev Sci Instr*, 2015, 86: 074501, arXiv: 1504.08266
- 55 Shaddock D, Ware B, Halverson P, et al. Overview of the LISA phasemeter. In: Proceedings of the 6th International LISA Symposium. Greenbelt, 2006
- 56 Liang Y R. High Precision Phase Measurement for Heterodyne Laser Interferometer (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013 [梁浴榕. 外差激光干涉仪中的高精度相位测量研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2013]
- 57 Liu H S. The Research on Phasemeter of Heterodyne Laser Interferometry for the Space Gravitational Wave Detection (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015 [刘河山. 面向空间引力波探测的激光差分干涉相位计研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2015]
- 58 Wand V, Guzman F, Heinzel G, et al. LISA phasemeter development. *AIP Conf Proc*, 2006, 873: 689–696
- 59 Barke S, Brause N, Bykov I, et al. LISA Metrology System Final Report. European Space Agency, 2014
- 60 Luo Z R, Yu T, Liu H S. The phasemeter of Taiji-1 experimental satellite. *Int J Mod Phys A*, 2021, 36: 2140005
- 61 Zhang Q T, Liu H S, Luo Z R. Multi-channel phase measurement system for the space laser interferometry (in Chinese). *Chin Opt*, 2023, 16: 1089–1099 [张强涛, 刘河山, 罗子人. 面向空间激光干涉的多通道相位测量系统. 中国光学, 2023, 16: 1089–1099]
- 62 Sankar S R, Livas J. Optical alignment and wavefront error demonstration of a prototype LISA telescope. *Class Quantum Grav*, 2020, 37: 065005
- 63 Wang Z, Ma J, Li J Q. Space-based gravitational wave detection mission: design highlights of LISA system (in Chinese). *Chin Opt*, 2015, 8: 980–987 [王智, 马军, 李静秋. 空间引力波探测计划-LISA系统设计要点. 中国光学, 2015, 8: 980–987]
- 64 Escudero Sanz I, Heske A, Livas J C. A telescope for LISA—The laser interferometer space antenna. *Adv Opt Technol*, 2018, 7: 395–400
- 65 Sasso C P, Mana G, Mottini S. Telescope jitters and phase noise in the LISA interferometer. *Opt Express*, 2019, 27: 16855–16870
- 66 Zhao Y. The Research on the Tilt to Length Coupling Noise in Inter-satellite Interference Link for the Space-Based Gravitational Wave Detection (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2021 [赵亚. 面向空间激光干涉引力波探测的星间干涉链路中抖动光程耦合噪声研究. 博士学位论文. 长春: 中国科学院大学, 2021]
- 67 Jersey K, Zhang Y, Harley-Trochimczyk I, et al. Design, fabrication, and testing of an optical truss interferometer for the LISA telescope. In: Proceedings of the SPIE. San Diego, 2021
- 68 Wang Z, Sha W, Chen Z, et al. Preliminary design and analysis of telescope for space gravitational wave detection (in Chinese). *Chin Opt*, 2018, 11: 131–151 [王智, 沙巍, 陈哲, 等. 空间引力波探测望远镜初步设计与分析. 中国光学, 2018, 11: 131–151]
- 69 Amaro-Seoane P, Auger G, Babak S, et al. The gravitational universe. arXiv: 1305.5720

- 70 Barke S. Inter-Spacecraft Frequency Distribution for Future Gravitational Wave Observatories. Dissertation for Doctoral Degree. Hannover: Leibniz Universität, 2015
- 71 Blom M R, Beker M G, Bertolini A, et al. Vertical and horizontal seismic isolation performance of the advanced virgo external injection bench seismic attenuation system. *Phys Procedia*, 2015, 61: 641–647
- 72 Akiyama Y, Akutsu T, Ando M, et al. Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA. *Class Quantum Grav*, 2019, 36: 095015, arXiv: [1901.03053](#)
- 73 Wissel L, Wittchen A, Schwarze T S, et al. Relative-intensity-noise coupling in heterodyne interferometers. *Phys Rev Appl*, 2022, 17: 024025
- 74 Wand V, Bogenstahl J, Braxmaier C, et al. Noise sources in the LTP heterodyne interferometer. *Class Quantum Grav*, 2006, 23: S159–S167
- 75 Sweeney D, Mueller G. Experimental verification of clock noise transfer and components for space based gravitational wave detectors. *Opt Express*, 2012, 20: 25603
- 76 Estabrook F B, Tinto M, Armstrong J W. Time-delay analysis of LISA gravitational wave data: Elimination of spacecraft motion effects. *Phys Rev D*, 2000, 62: 042002
- 77 Tinto M, Estabrook F B, Armstrong J W. Time-delay interferometry for LISA. *Phys Rev D*, 2002, 65: 082003
- 78 Otto M, Heinzel G, Danzmann K. TDI and clock noise removal for the split interferometry configuration of LISA. *Class Quantum Grav*, 2012, 29: 205003
- 79 Yamamoto K, Vorndamme C, Hartwig O, et al. Experimental verification of intersatellite clock synchronization at LISA performance levels. *Phys Rev D*, 2022, 105: 042009, arXiv: [2112.12586](#)
- 80 Tinto M, Dhurandhar S V. Time-delay interferometry. *Living Rev Relativ*, 2021, 24: 1, arXiv: [gr-qc/0409034](#)
- 81 Sheard B S, Gray M B, Shaddock D A, et al. Laser frequency noise suppression by arm-locking in LISA: Progress towards a bench-top demonstration. *Class Quantum Grav*, 2005, 22: S221–S226
- 82 McKenzie K, Spero R E, Shaddock D A. Performance of arm locking in LISA. *Phys Rev D*, 2009, 80: 102003, arXiv: [0908.0290](#)
- 83 Sheard B S, Gray M B, McClelland D E, et al. Laser frequency stabilization by locking to a LISA arm. *Phys Lett A*, 2003, 320: 9–21
- 84 Valliyakalayil J T, Sutton A J H, Spero R E, et al. Enhanced frequency noise suppression for LISA by combining cavity and arm locking control systems. *Phys Rev D*, 2022, 105: 062005, arXiv: [2110.10870](#)
- 85 Tinto M, Shaddock D A, Sylvestre J, et al. Implementation of time-delay interferometry for LISA. *Phys Rev D*, 2003, 67: 122003, arXiv: [gr-qc/0303013](#)
- 86 Shaddock D A, Ware B, Spero R E, et al. Postprocessed time-delay interferometry for LISA. *Phys Rev D*, 2004, 70: 081101, arXiv: [gr-qc/0406106](#)
- 87 Wang J. The Research on the Laser Interferometer Noise Suppression Technique for the Space-Based Gravitational Wave Detection (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023 [王娟. 面向空间激光干涉引力波探测的干涉仪噪声消减技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2023]
- 88 Nofrarias M, Gibert F, Karnesis N, et al. Subtraction of temperature induced phase noise in the LISA frequency band. *Phys Rev D*, 2013, 87: 102003, arXiv: [1302.5628](#)
- 89 Noda N, Hetnarski R B, Tanigawa Y. Thermal Stresses. 2nd ed. New York, London: Taylor & Francis, 2003
- 90 Hetnarski R B, Eslami M R. Thermal Stresses—Advanced Theory and Applications. 2nd ed. Cham: Springer Nature, 2019
- 91 Tröbs M, D’arcio L, Barke S, et al. Testing the LISA optical bench. In: Proceedings of the International Conference on Space Optics. Ajaccio, 2013
- 92 Gutiérrez F G. Thermal Diagnostics Experiments for LISA Pathfinder. Dissertation for Doctoral Degree. Barcelona: Universitat Politècnica De Catalunya, 2015
- 93 Armano M, Audley H, Auger G, et al. In-flight thermal experiments for LISA Pathfinder: Simulating temperature noise at the Inertial Sensors. In: Proceedings of the 10th International LISA Symposium. Gainesville, 2015
- 94 Armano M, Audley H, Baird J, et al. Temperature stability in the sub-milliHertz band with LISA Pathfinder. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 486: 3368–3379, arXiv: [1905.09060](#)
- 95 Anza S, Armano M, Balaguer E, et al. The LTP experiment on the LISA Pathfinder mission. *Class Quantum Grav*, 2005, 22: S125–S138
- 96 Chen K, Zhang X, Guo T, et al. Key technologies analysis and design of ultra-clean & ultra-stable spacecraft for gravitational wave detection. *Int J Mod Phys A*, 2021, 36: 2140021

- 97 Deng X, Yang R, Niu Y. Preliminary simulation analysis of the temperature fluctuation effect on Taiji-1 Laser interferometer. *Int J Mod Phys A*, 2021, 36: 2140003
- 98 Hartig M S, Schuster S, Wanner G. Geometric tilt-to-length coupling in precision interferometry: Mechanisms and analytical descriptions. *J Opt*, 2022, 24: 065601, arXiv: [2201.06943](https://arxiv.org/abs/2201.06943)
- 99 Schuster S, Tröbs M, Wanner G, et al. Experimental demonstration of reduced tilt-to-length coupling by a two-lens imaging system. *Opt Express*, 2016, 24: 10466–10475
- 100 Chwalla M, Danzmann K, Álvarez M D, et al. Optical suppression of tilt-to-length coupling in the LISA long-arm interferometer. *Phys Rev Appl*, 2020, 14: 014030, arXiv: [2002.05669](https://arxiv.org/abs/2002.05669)
- 101 Tröbs M, Chwalla M, Danzmann K, et al. Experimental demonstration of reduced tilt-to-length coupling by using imaging systems in precision interferometers. In: *Proceedings of the International Conference on Space Optics*. Biarritz, 2016
- 102 Gao R H, Liu H S, Luo Z R, et al. Introduction of laser pointing scheme in the Taiji program (in Chinese). *Chin Opt*, 2019, 12: 425–431 [高瑞弘, 刘河山, 罗子人, 等. 太极计划激光指向调控方案介绍. *中国光学*, 2019, 12: 425–431]
- 103 Heinzl G, Wand V, Garcia A, et al. Investigation of noise sources in the LTP interferometer S2-AEI-TN-3028. 2008
- 104 Kaune B. In-Orbit Stability Analysis of the LISA Pathfinder Optical Metrology: Photoreceivers and Polarisation. Dissertation for Doctoral Degree. Hannover: Leibniz Universität, 2021
- 105 Liang Y R. Note: A new method for directly reducing the sampling jitter noise of the digital phasemeter. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89: 036106

Advance and prospect in the study of laser interferometry technology for space gravitational wave detection

WANG Juan¹, QI KeQi¹, WANG ShaoXin¹, GAO RuiHong¹, LI Pan¹, YANG Ran¹,
LIU HeShan¹ & LUO ZiRen^{1,2*}

¹ National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, Chinese Academy of Sciences (UCAS), Hangzhou 310024, China

*Corresponding author (email: luoziren@imech.ac.cn)

With the successful detection of ground gravitational waves, space gravitational wave detection, targeting lower frequency bands and wider target wave sources and reflecting more astrophysical phenomena, has been receiving increasing attention from many research teams in various countries. To clarify the development level and limiting factors of the current gravitational wave detection program and prepare for the improvement of the interferometer measurement level in the next step, this article focuses on laser interferometry technology. On the one hand, it reviews the principle of space gravitational wave detection and the in-orbit detection results of typical detection projects at home and abroad. On the other hand, the overall layout of the interferometric measurement system is demonstrated, and the impact mechanisms and suppression methods for main noise sources are introduced.

space gravitational wave detection, laser interferometry technology, interferometer noise analysis

PACS: 04.30.Nk, 04.20.Cv, 04.80.Nn, 95.55.Ym

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0111](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0111)