

# 星间激光干涉测量技术\*

段会宗, 骆颖欣, 张静怡, 明珉, 颜浩, 朱凡,  
肖青, 李萌, 曹斌, 李涛, 王智钊, 叶贤基

“天琴计划”教育部重点实验室, 中山大学天琴中心 & 物理与天文学院, 天琴前沿科学中心,  
国家航天局引力波研究中心, 广东 珠海 519082

**摘要:** 近年来迅速发展的空间引力波探测、卫星重力测量、深空探测等空间任务需求, 对超远距离、超高精度星间激光干涉测量技术提出了极具挑战性的技术要求。在典型的空问引力波探测中, 要求在百万千米 ( $10^9$  m) 距离上达到皮米 ( $10^{-12}$  m) 量级的激光干涉测量精度。本文根据空间任务中对星间激光干涉测量的需求, 介绍了星间激光干涉测量系统的总体构成, 并讨论了测量系统中的各项关键技术: 空间应用型激光器技术、超稳光学平台、稳频技术、精密相位测量与超低功率弱光锁相技术、星间激光快速捕获、跟踪与超精密光束指向测控技术等, 以及目前的技术发展现状。星间激光干涉测量技术能力的提高, 将能够满足更广泛的空问任务需求并大幅推进空问任务的进一步发展。

**关键词:** 激光干涉; 星间激光测距; 星载激光; 引力波探测; 空问任务

**中图分类号:** TH744 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 01-0162-16

## Inter-satellite laser interferometry

DUAN Huizong, LUO Yingxin, ZHANG Jingyi, MING Min, YAN Hao, ZHU Fan,  
XIAO Qing, LI Meng, CAO Bin, LI Tao, WANG Zhizhao, YEH Hsienchi

MOE Key Laboratory of TianQin Mission, TianQin Research Center for Gravitational Physics & School of Physics and Astronomy, Frontiers Science Center for TianQin, CNSA Research Center for Gravitational Waves, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China

**Abstract:** In recent years, a large number of space missions such as space gravitational wave detection, satellite gravity measurement, deep space exploration and other space missions have put forward extremely challenging technical requirements for ultra-long distance and ultra-high precision inter satellite laser interferometry technology. For example, in typical space gravitational wave detection, it is required to reach the accuracy of Pico-meter ( $10^{-12}$  m) at a distance of one million kilometers ( $10^9$  m). According to the typical requirements of intersatellite laser interferometry in space missions, this paper introduces the overall structure of intersatellite laser interferometry system, discusses and discusses the key technologies in the measurement system, such as space applied laser technology, frequency stabilization technology, precise phase measurement and ultra-low power weak light phase locking technology, fast acquisition, tracking and ultra-precision beam pointing of inter satellite laser Measurement and control technology, as well as the current technology development status. The improvement of intersatellite laser interfer-

\* 收稿日期: 2020-10-30

录用日期: 2020-11-11

网络首发日期: 2021-01-19

基金项目: 广东省基础与应用基础重大项目 (2019B030302001); 国家自然科学基金应急管理项目 (11655001、11654004)

作者简介: 段会宗 (1988年生), 男; 研究方向: 精密测量物理; E-mail: duanzh3@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 叶贤基 (1965年生), 男; 研究方向: 精密测量物理; E-mail: yexianji@mail.sysu.edu.cn

ometry technology will be able to meet the needs of a wider range of space missions and greatly promote the further development of space missions.

**Key words:** laser interferometry; intersatellite laser ranging; spaceborne laser; gravitational wave detection; space mission

## 1 引言

迈克尔逊光学干涉仪作为 19 世纪最重要的物理实验之一, 揭示了真空中光速恒定的事实, 自被发明以来已广泛应用于众多科学和工程领域。随后激光器于 20 世纪 60 年代被发明。由于激光具有方向性好、能量集中、相干性好等优点, 将激光作为光源应用于干涉仪, 可实现高精度距离与角度测量, 具有可测范围大、测量精度高、可直接溯源等优点, 在前沿科学研究与尖端航空航天技术等领域具有至关重要的作用, 一直是世界各国投入大量资源优先发展的关键技术。

激光干涉仪可以测量引起干涉仪臂长变化的特定物理相互作用。在激光干涉测量中, 现有的距离测量极限要求主要由引力波探测领域提出。迄今为止, 地基引力波探测器, 例如激光引力波观测天文台 (LIGO)<sup>[1]</sup>, 代表了激光干涉测量技术的最高水平。LIGO 中所使用的激光干涉仪两个测量臂相互垂直, 且测量臂长度达到 4000 m, 其可以探测到当引力波经过时激光干涉仪的两个测量臂之间光学路径长度  $10^{-18}$  m 的变化。这种地面引力波探测器为人类开启了一个观察宇宙的全新窗口。然而, LIGO 的探测频带由于地面震动噪声和重力梯度噪声等因素被限制在 10 Hz 以上。为了让探测频率范围能降低到  $10^{-4}$  Hz, 必须建立一个测量臂长度达  $10^8 \sim 10^9$  m 的激光干涉仪, 使激光干涉仪的特征长度 (即测量臂长度) 具有与所探测的引力波波长相同的尺度, 此时引力波探测器处于最灵敏状态, 该测量需求对于激光干涉仪的发展提出了新的挑战。

近年来得到快速发展的空间引力波探测、重力场测量、深空探测等空间任务, 也对星间激光干涉测量技术提出了数百万千米级超远距离、皮米量级超高精度的极端苛刻的要求。为克服地面引力波探测局限, 目前已推出并发展了一些空间引力波探测任务, 例如激光干涉空间天线 (LISA)<sup>[2]</sup>。LISA 被提出并发展了超过 20 年, 已入选欧洲航天局 (ESA) 的第三大型空间任务。LISA 计划于 2030 年代早期发射, 在太阳轨道上运行三

颗卫星, 构成边长为  $2.5 \times 10^9$  m 的等边三角形星座。激光干涉仪的组成需要星间建立至少两对激光链路。考虑计划探测到的引力波的最小强度, 星间激光干涉仪的噪声水平必须在  $10^{-4} \sim 0.1$  Hz 的频带范围内降低到  $10$  pm/Hz<sup>1/2</sup>。除了 LISA, 其它空间引力波探测计划如激光天文动力学引力波探测任务 (ASTROD-GW)<sup>[3]</sup>、天琴计划<sup>[4]</sup> 和太极计划<sup>[5]</sup>, 都基于相同的工作原理。

ASTROD-GW 是一个高挑战性任务, 其要求三个卫星分别位于日地拉格朗日 L3、L4、L5 点, 构成  $2.6 \times 10^{11}$  m 臂长的干涉仪, 敏感度达  $1$  nm/Hz<sup>1/2</sup>。天琴计划在高度  $10^8$  m 的地心轨道设置一个臂长达  $1.7 \times 10^8$  m 的激光干涉引力波探测天文台, 目标敏感度为  $1$  pm/Hz<sup>1/2</sup>。太极计划方案与 LISA 几乎相同, 臂长达  $3 \times 10^9$  m, 长于 LISA 方案。十分之一赫兹干涉仪引力波天文台 (DECIGO)<sup>[6]</sup> 计划填补了 LISA 和 LIGO 之间的观测频段间隙, 其工作原理基于腔长 (即星间距离) 为  $1 \times 10^6$  m 的法布里-珀罗 (FP) 谐振腔, 这一点与其它空间引力波探测项目有所不同。

需要注意的是, 空间引力波探测所用的激光干涉测量技术与地面工作原理并不一样。地面引力波探测器可示意性地看成一个基于 FP 腔的迈克尔逊干涉仪, 能通过多次反射增强引力波信号。空间引力波探测中, 由于激光的长距离传播以及不可避免的光束发散角, 卫星接收光强度会非常弱, 需要采用应答式激光干涉测量技术。也就是说, 地面引力波探测器基于迈克尔逊干涉仪, 需要处理强反射光的问题; 而空间引力波探测器至少包括两个应答式激光干涉仪, 需要处理弱接收光的问题。空间引力波探测所用的应答式激光干涉仪测量系统中, 需要解决空间应用型激光器技术、超稳光学平台技术、激光稳频技术<sup>[7]</sup>、精密相位测量技术<sup>[8]</sup>、超低功率弱光锁相技术、星间激光快速捕获技术、星间超精密激光指向测控技术等关键问题, 在本文中分别予以详细论述。

## 2 星间激光干涉测量系统

对于星间激光干涉测量, 由于星间光束传播

所经过的空间介质在波长为 1064 nm 的波段上对光有较低的吸收率, 所以星间激光干涉测量中激光波长多采用 1064 nm。出射光功率必须足够高, 使得远方的卫星能接收到足够强的光信号以降低干涉测量的散粒噪声。另外, 星间激光干涉测量中稳频激光系统的成熟度也必须考虑。

空间引力波探测中, 由于激光长距离传播以及不可避免的发散角, 导致卫星接收光强度非常弱, 需要采用应答式星间激光干涉仪, 如图 1 所示。掺钕钇铝石榴石 (Nd: YAG) 稳频稳功率激光器作为主激光器, 提供高相干度光源以满足本

地光和接收光的干涉需求。星间激光光束指向控制系统负责星间激光光束的捕获和精确指向。当激光从主卫星出射并经过星间距离到达从卫星后, 光学锁相系统按照接收到的弱光锁住从卫星激光器相位, 然后从卫星发出的激光束指向并传输回主卫星。由于主卫星接收到的弱光相位包含了整个往返过程的光学路径长度信息, 所以精密相位计可以通过测量主卫星本地激光和接收光的相位差来得到星间距信息。这就是应答式激光干涉测量的基本原理。

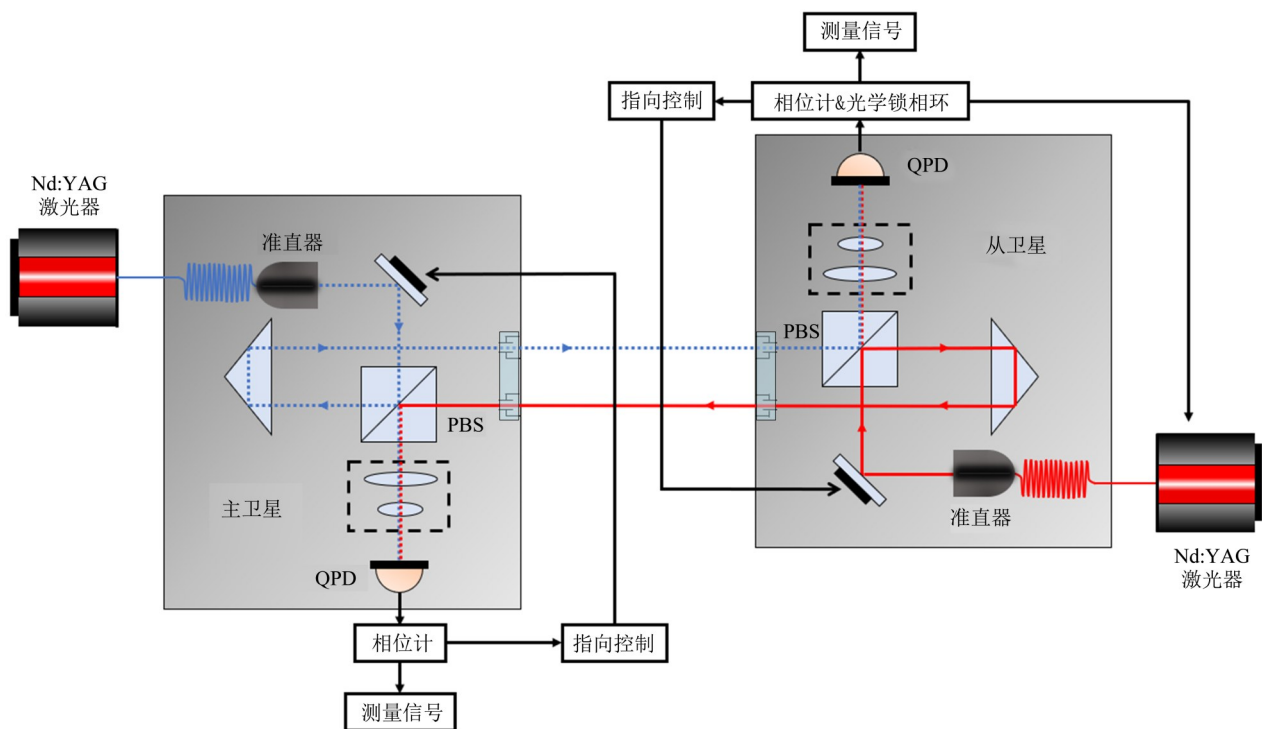


图1 应答式星间激光干涉仪原理图

Fig. 1 Scheme of responder inter-satellite laser ranging system

LISA 的干涉仪臂长为  $(2.5 \sim 3) \times 10^9 \text{ m}$ <sup>[9]</sup>, 使用 Pound-Drever-Hall (PDH) 稳频方法, 要求激光频率噪声在 0.01 ~ 1 Hz 频段上达到 30 Hz/Hz<sup>1/2</sup> 的预稳定状态<sup>[10]</sup>。之后使用锁臂技术 (Arm-locking Technique)<sup>[11]</sup> 和时间延迟干涉 (TDI)<sup>[12]</sup> 将激光频率噪声抑制到 10<sup>-6</sup> Hz/Hz<sup>1/2</sup> 水平, 这个水平由测量噪声要求的 10 pm/Hz<sup>1/2</sup> 和 1% 的相对臂长变化决定。LISA 激光的相对强度噪声 (RIN) 应在拍频和两倍拍频处优于 3×10<sup>-8</sup> /Hz<sup>1/2</sup>, 并且在 10<sup>-4</sup> ~ 1 Hz 频段小于 2×10<sup>-4</sup> /Hz<sup>1/2</sup><sup>[10]</sup>, 该要求是为了在光学信号读取过程中减小施加于检验质量块的光压波动。

在天琴计划空间引力波探测任务中, 三颗卫

星在地心轨道上组成边长约 1.7×10<sup>8</sup> m 的等边三角形星座, 激光频率噪声进行预稳定处理后要求在 0.01 Hz 处小于 10 Hz/Hz<sup>1/2</sup>, 然后通过 TDI 进一步抑制到 10<sup>-4</sup> Hz/Hz<sup>1/2</sup>, 以满足测量噪声 0.5 pm/Hz<sup>1/2</sup> 且相对臂长变化 1% (约 2×10<sup>6</sup> m) 的要求。

根据 LISA 与天琴计划任务中对激光干涉仪的需求, 空间引力波探测所用的应答式激光干涉仪测量系统需要解决的关键技术主要包括: 空间应用型激光器技术、超稳光学平台技术、激光稳频技术、精密相位测量技术、超低功率弱光锁相技术、星间激光快速捕获技术、星间超精密激光指向测控技术等。

### 3 星间激光干涉测量关键技术

#### 3.1 星载激光器技术

由于空间环境与地面环境的巨大差异, 地面实验中通常使用的激光器一般均难以满足空间任务需求。适用于空间任务的激光器必须满足以下要求:

- (1) 大小、重量和功耗必须被限制, 越小越好;
- (2) 激光系统必须能通过机械、热、电磁干扰和高能辐射兼容性测试;
- (3) 激光器所有操作必须实现星载自动运行;
- (4) 为空间任务服务, 激光器必须足够可靠, 在其设计寿命内不能出现工作失败或功能退化。

具有非平面环形振荡器 (NPRO) 结构<sup>[13]</sup> 的 1064 nm 波长的 Nd: YAG 固体激光器已经在固有

频率和强度稳定性、机械鲁棒性、功率效率和大可调频率范围方面进行了可靠性测试。适用于空间任务的 Nd: YAG NPRO 激光器发展了几十年并已达到商用水平, 这些激光器已经通过了所有质量鉴定测试, 并已成功运行在 TerraSAR<sup>[14-15]</sup> 的激光通信终端、LISA 探路者 (LPF)<sup>[16]</sup>, 以及重力恢复和气候实验 (GRACE-FO)<sup>[17]</sup> 任务的星间激光干涉仪中。

空间引力波探测任务如 LISA 和天琴计划, 需要应用高达数瓦的激光功率 (见表 1)。比较希望能产生高达 4 W 激光功率的解决方案包括具有特殊机械和泵浦设计的独立 NPRO 激光器, 和集成了低功率的稳频主激光振荡器作为种子激光, 以及高功率光纤放大器的“主振荡器光纤放大器” (MOFA) 结构<sup>[18]</sup>, 如图 2 所示。

表 1 空间任务中对激光器的技术要求<sup>1)</sup>

Table 1 Technical requirements of laser in space missions

	天琴计划	LISA	NGGM	GRACE-FO
波长/nm	1064	1064	1064	1064
功率	4 W	2 W	500 mW	25 mW
相对强度噪声/ (1/Hz <sup>1/2</sup> )	2×10 <sup>-4</sup> (1 mHz~1 Hz)	2×10 <sup>-4</sup> (0.1 mHz~1 Hz) 3×10 <sup>-8</sup> (at fb/2fb)	3×10 <sup>-8</sup> (at fb/2fb)	-
使用寿命/年	5	5	10	5
频率稳定度	10 Hz/Hz <sup>1/2</sup> (@10mHz)	30 Hz/Hz <sup>1/2</sup> (@10mHz)	20 Hz/Hz <sup>1/2</sup> (@0.1Hz)	30 Hz/Hz <sup>1/2</sup> (@0.1 Hz)

1) GRACE-FO 为重力场恢复与气候实验后续计划; NGGM 为下一代重力场测量任务。

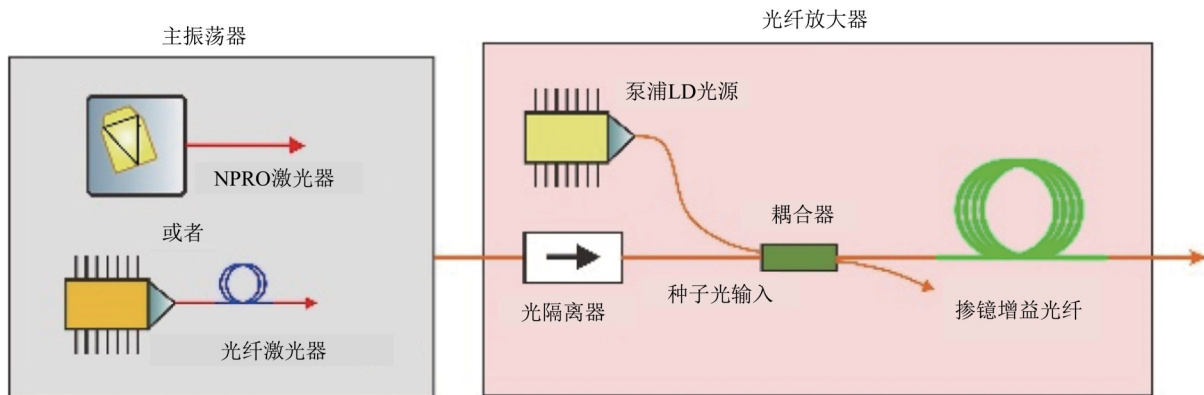


图 2 采用主振荡器光纤放大器配置的高功率激光器典型结构

Fig. 2 Typical structure of a high-power laser with a MOFA configuration

光纤激光器由于其鲁棒性和紧凑性, 也适用于空间应用。一种商用的掺镱分布反馈 (DFB) 光纤激光器及其可输出 1 W 功率的放大系统, 对于 LISA 任务的适用性已被提出并研究<sup>[19-20]</sup>。由此, 相对于 Nd: YAG NPRO 激光器, LISA 发展的环形

光纤激光器在低频段上具有类似的自由运行频率噪声和更小的相对强度噪声<sup>[21]</sup>。与商用 DFB 或分布式布拉格反射镜 (DBR) 激光器相比, 这种环形光纤激光器采用内腔相位调制器可以实现更快的频率调谐 (高达 10 MHz 的带宽)<sup>[22]</sup>。虽然这些掺

镜光纤激光器在低频段上与 Nd: YAG NPRO 激光器有类似的表现, 但由于其存在的典型弛豫振荡效应, 它们在 1 MHz 附近会出现一个放大的 RIN 峰, 从而影响到外差干涉测量。

近年来, 由于具有成本低、消耗小、更稳定的蝶形封装设计, 以及更好的激光稳定性, 平面波导外腔半导体激光器 (PW-ECL) 已成为适用于空间任务的主激光器的另一个有希望的选项。PW-ECL 包括一个半导体增益芯片和一个平面波导上的布拉格反射镜激光腔, 在电信 C 波段 (波长约 1550 nm) 得到商用, 其在空间精密测量任务的适用性已经被研究<sup>[23-24]</sup>。LISA 已成功做出了一个 1064 nm 版本的商用 PW-ECL 和一整个 MOFA 系统, 输出功率达 2.5 W, 测试结果显示了良好的稳定性和可靠性<sup>[25]</sup>。

使用寿命长也是空间任务激光器的一个关键要求, 取决于种子激光器和光纤放大器的泵浦二极管可靠性。一个高可靠性的激光二极管泵浦单元可视为平稳的输出功率, 良好的密封表现、并具有冗余度。此外, 空间任务中, 泵浦二极管还需具有小尺寸、坚固机械结构和灵活的电学与光学接口。过去的二十年, 已经有基于光纤耦合、大功率输出的多棒或阵列激光二极管的空间适用型泵浦模块的相关研究<sup>[26]</sup>, 也出现了十年寿命可靠性达 0.999 8 的 10 W 二极管泵浦模块的报道<sup>[27]</sup>。

### 3.2 星载激光稳频技术

使用激光测量系统对两个卫星的相对距离  $\Delta d$  进行精确测量时, 一般通过测量星间光束传播路径对应的相位改变值  $\Delta\varphi$  得到, 表达式为

$$\Delta d = \lambda \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{c}{\nu} \frac{\Delta\varphi}{2\pi}, \quad (1)$$

其中  $\lambda$  和  $\nu$  分别为激光的波长和频率,  $c$  是光速。由式 (1) 可知, 激光频率波动是测量噪声的一个直接来源。激光频率不稳定性可以用线宽、时域中的艾伦方差和频域中的功率谱密度 (或幅度谱密度) 来描述<sup>[7-8]</sup>。激光线宽是光谱学中对频率分辨率的衡量。在激光干涉仪中, 一个窄的线宽代表着良好的单色性和高度的时间相干性。艾伦方差, 描述了在一定时间间隔内的平均瞬时相对频率波动, 描述了激光频率的时间稳定性。激光频率噪声的功率谱密度 (PSD) 是激光频率噪声平方的傅里叶变换, 一个更常见的描述是其平方根, 即幅度谱密度 (ASD), ASD 描述了频率噪声的幅值分布, 单位为 Hz/Hz<sup>1/2</sup>。

对激光频率稳定性的表征, 谱密度更有优势,

能提供更多信息, 因为在实际任务中可以预计科学目标信号会落在某特定的频段内, 可以在该特定频段对激光频率噪声功率谱密度进行积分得到总体测量噪声。对于一个不等臂长为  $L$  的干涉仪, 其激光频率波动造成的相对位移测量误差可以表示为

$$\frac{\Delta d}{L} = \frac{\Delta\nu}{\nu}. \quad (2)$$

激光稳频系统包括一个可调频率激光器、一个超稳定参考频率、反馈控制电子系统, 以及激光器和参考频率之间必要的光电连接。1983 年出现了 PDH 技术<sup>[28]</sup>, 将激光频率锁定到超稳 FP 腔的共振频率, 已经成为激光稳频最普遍的方法。当往返距离是激光波长的整数倍时, FP 腔会出现共振, 且共振线宽由腔镜反射率决定的腔精细度来表示。

图 3 为 PDH 激光稳频系统原理示意图。在入射 FP 腔之前, 利用电光相位调制 (EOM) 在激光频率的两侧产生一对等振幅、相位相反的贝塞尔边带。当激光频率接近腔的共振频率, 混频器解调后, 腔体前镜反射的信号形成不对称的色散曲线, 作为激光频率反馈控制的误差信号。关于 PDH 方法的工作原理和理论分析, 在参考文献 [28-38] 中有详细论述。

空间应用的超稳参考腔通常具有高度对称的几何结构和刚性安装设计, 以达到对加速度和方向不敏感的目的。此外, 为了使激光器与 FP 腔的特定横模 (TEM) 之间保持稳定的模式匹配效率, 必须安装刚性光学器件, 如图 2 所示。

应用于 GRACE-FO 空间任务的 PDH 激光稳频系统由喷气推进实验室 (JPL) 研发, 具有高精度、锥形结构商用腔、模式匹配光学平台和基于光纤的相位调制光学设计, 在 0.01 Hz 达到了 30 Hz/Hz<sup>1/2</sup> 的频率稳定度。该系统已被发射并在 GRACE-FO 卫星上成功运行<sup>[30]</sup>。

英国国家物理实验室 (NPL) 为下一代重力场测量任务 (NGGM) 建立了高稳定性激光 (HSL) 系统, 在 0.01 Hz 以上频段实现了优于 20 Hz/Hz<sup>1/2</sup> 的激光频率稳定性, 如图 4 的蓝色实线所示。该系统是基于 PDH 方案, 并在小型真空室内对称安装了一个四面体结构的超稳定立方腔<sup>[31]</sup>。

为了满足天琴计划和中国下一代重力场测量任务的需要, 天琴中心空间光学组从 2013 年就开始研发一个面向空间任务的 PDH 激光稳频系统, 已建立了一个 PDH 激光稳频系统的样机<sup>[39]</sup>, 其中

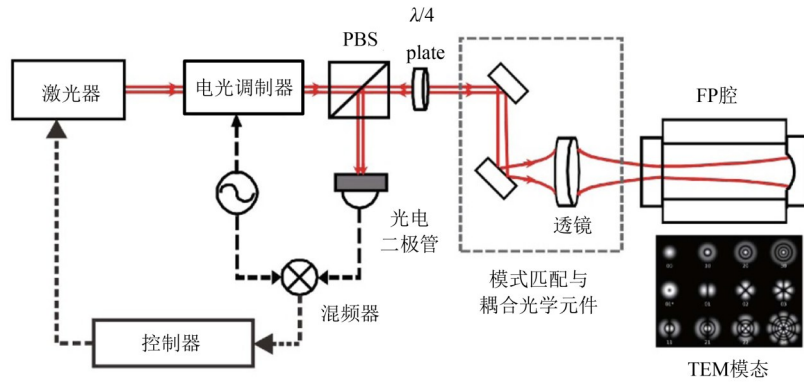


图 3 PDH 激光稳频系统原理图

Fig. 3 Scheme of PDH laser frequency stabilization system

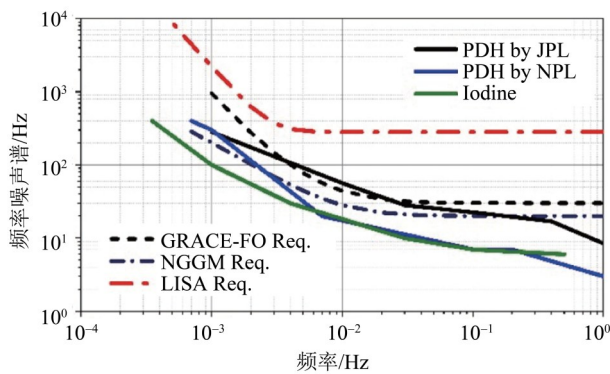


图 4 与空间任务需求相对照的不同实验系统获得的激光频率噪声谱<sup>[40]</sup>

Fig. 4 Laser frequency noise spectra achieved by different experimental systems in comparison with the space mission requirements<sup>[40]</sup>

FP腔及其模式匹配光学元件通过碱性催化键合技术牢固地集成在一个超稳定的单片光学平台上<sup>[41]</sup>。基于双环扫描和实时分析算法,开发了在现场可编程门阵列(FPGA)平台上实现的数字控制程序<sup>[42]</sup>,其功能包括初始激光频率校准和自动锁定和再锁定(locking and relocking)。初步实验表明,在0.7~10 Hz的频率范围内,激光频率稳定性优于30 Hz/Hz<sup>1/2</sup>。

除了PDH方法,碘分子的超精细跃迁是激光稳频的另一个众所周知的绝对参考<sup>[43-46]</sup>。这种方法是利用无多普勒光谱技术,将1064 nm激光倍频锁定在碘的吸收超精细跃迁上。原则上来说,碘分子激光锁频能提供一个无热漂移的绝对精确的参考频率,能够简化初始外差拍频获取过程,也因此其在空间激光干涉仪上的潜在应用备受关注。

通过一个四通激光和残余幅度调制的实时控制,在实验室级别上,基于碘跃迁的激光稳频装置能达到的最好频率稳定性为4×10<sup>-15</sup>。基于准一

体式<sup>127</sup>I<sub>2</sub>光学装置,采用调制光谱技术,天琴中心空间光学组研制了用于未来空间任务的首个绝对激光频率基准。在这个装置中,其光学布局通过适用于空间应用的粘合剂粘合技术连接集成到一个玻璃基板上;所实现的频率稳定性满足LISA和NGGM的要求,如图4中的绿色实线所示。基于此设计的改进装置已成功搭载于2018年的一个探空火箭上。

### 3.3 超稳光学平台

为了实现高精度测量需求,超稳光学平台被广泛的应用到空间测量技术当中,主要用来实现光束干涉产生的干涉信号,并通过光电探测器对干涉信号进行探测,是整个光学系统的关键组成部分。在星间激光干涉测量系统中使用超稳光学平台,不仅可以达到高精度的位移测量精度需求,同时可以使干涉仪在复杂的空间环境中正常运行,这已经在相关的空间技术中得到验证。

LISA Pathfinder (LPF) 是欧空局(European Space Agency)发起的用于验证LISA计划无拖曳检验质量技术的空间实验计划,其科学试验目标为实现光学平台和检验质量间相对位移噪声水平低于10 pm/Hz<sup>1/2</sup>@3×10<sup>-3</sup> Hz~3×10<sup>-2</sup> Hz,检验质量残余加速度噪声低于3×10<sup>-14</sup> ms<sup>-2</sup>/Hz<sup>1/2</sup>@3×10<sup>-3</sup> Hz~3×10<sup>-2</sup> Hz。在该项空间试验中,使用了一套基于碱性催化粘接技术集成的复杂超稳光学平台,用于实现检验质量与光学平台以及两个检验质量之间的相对位移和相对角度变化的测量。LPF于2015年12月3日发射,2017年6月30日结束科学工作模式。LPF在轨测试结果已远超过其需求水平,且能够满足LISA计划对检验质量残余加速度噪声的要求。

超稳光学平台作为高精度星间激光干涉测量

技术中的关键组成部分,也将应用在天琴计划之中。天琴计划要求测量频段内的位移测量精度为  $1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ , 这对整个测量系统提出了非常高的要求,超稳光学平台作为位移测量系统的关键组成部分,也将面临很多的设计和研发难点。为了达到天琴计划对超稳光学平台的最终需求,天琴计划研究团队已经针对超稳光学平台进行了多年的研究,并且取得了非常可观的研究进展。

天琴计划研究团队针对星间激光测距项目对超稳激光的空间应用需求,研究了星载激光稳频系统的样机,采用一体化的超稳光学平台,把 F-P 腔镜及其对应的模式匹配光路集成在一个准单片的平台上,激光由一个光纤准直器从保偏光纤导入光学平台。所有透镜和镜片以及 F-P 腔镜通过氢氧根催化 (HC) 粘结技术根据精确计算的定位固定在平台上<sup>[47]</sup>,保证整个光路系统的机械稳定性和抗冲击性<sup>[48]</sup>;光学平台的底座及所有光学镜片都采用同一个生产批次的超低热膨胀 ULE 玻璃材料 (Corning Premium Grade) 制作,以保证 F-P 腔以及光路的温度稳定性。

为了验证超稳光学平台的各项性能指标,由天琴一号实验卫星搭载了一套基于碱性催化粘接技术集成的超稳光学平台,已于 2019 年 12 月 20 日发射升空并顺利完成了各项科学试验的在轨验证。平台 CAD 设计模型和光路设计如图 5 所示。该套超稳光学平台中集成了三个外差激光干涉仪,分别为参考干涉仪、测量干涉仪 1 (M1) 和测量干涉仪 2 (M2),三个干涉仪分别实现不同要求的试验测试。

通过在轨测试,天琴一号超稳光学平台可在复杂空间环境中正常工作,位移测量精度满足设计指标需求,干涉仪的噪声水平能够达到  $30 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}@0.1 \text{ Hz}$ ,并且实现了  $0.5 \text{ nm}$  的干涉仪位移测量分辨率,干涉仪位移测试分辨率和位移测量噪声的功率谱密度如图 6 所示。

从天琴一号的在轨试验测试结果可以看出,虽然其位移测量精度能够满足设计要求,但尚未达到天琴计划对干涉测量系统位移测量精度的需求。目前,团队正在针对限制超稳光学平台测量精度的各项噪声展开研究,并已经取得了积极的研究成效。根据地面实验研究的结论,在低频段限制光学平台的噪声主要是环境温度与测量光程的耦合效应。为了降低环境温度噪声的耦合,我们将采用超低温度膨胀系数的玻璃材料制作镜片

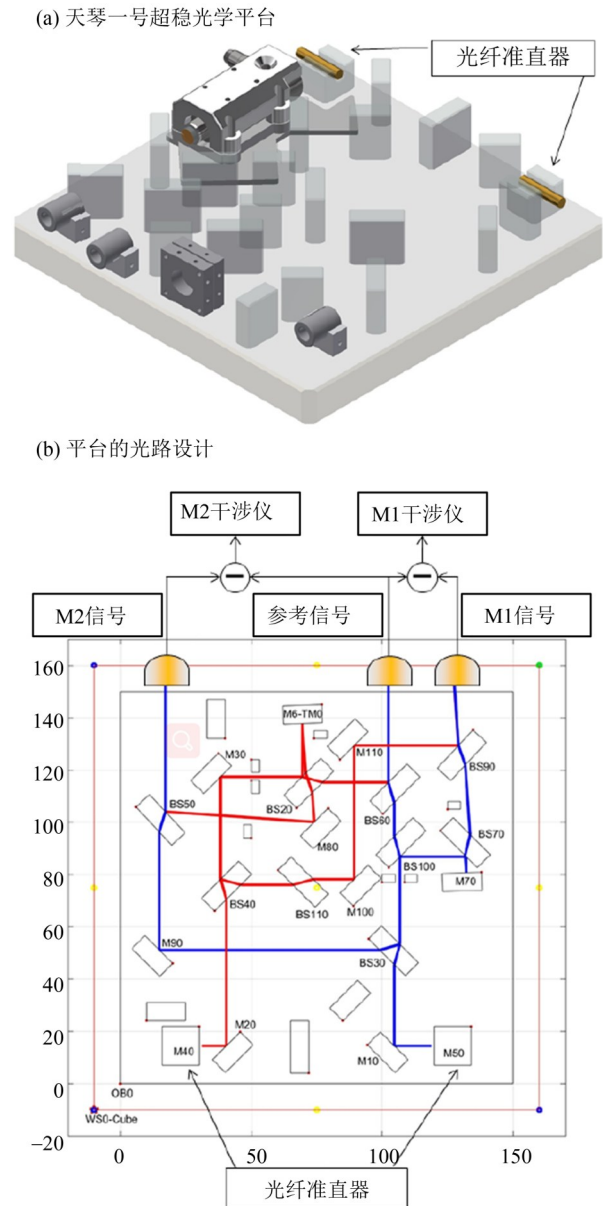


图 5 天琴一号超稳光学平台及光路设计<sup>[49]</sup>

Fig. 5 The optical bench and the layout of optical path<sup>[49]</sup>

的基片以及采用碱性催化粘接技术将光路集成在一整块玻璃平板结构上,从而将温度与光程的耦合效应压制到最小。目前,在  $1 \text{ mHz}$  的低频频段光学平台的位移测量噪声本底已经达到了  $50 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

### 3.4 精密相位测量技术

根据空间引力波探测任务的要求,相位测量的噪声水平为  $1 \sim 10 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ ,对应于  $1064 \text{ nm}$  激光波长下的  $0.1 \sim 1 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。对于 GRACE-FO 和 NGGM 来说,约  $1 \text{ mrad}/\text{Hz}^{1/2}$  的测量噪声足以满足要求。

外差激光干涉仪中光电探测器的输出是拍频信号,拍频信号的频率由两个航天器之间的相对

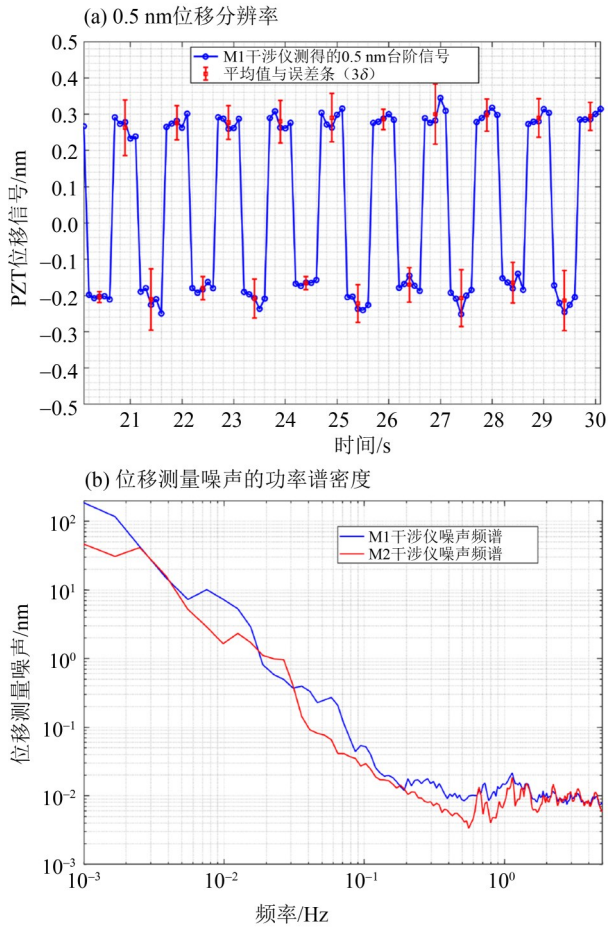


图 6 天琴一号光学平台在轨测试结果<sup>[49]</sup>  
 (a. 0.5 nm 位移分辨率; b. 位移测量噪声的功率谱密度)  
 Fig. 6 In orbit test of optical bench in Tianqin 1<sup>[49]</sup>  
 (a. displacement resolution of 0.5 nm steps; b. noise spectrums of interferometers)

运动引起的多普勒效应决定。引力波或地球重力场的信息包含在这个拍频的相位中。相位计用于测量拍频与机载超稳振荡器 (USO) 提供的参考信号之间的相位差。

对于空间引力波探测任务, 相位计的一般要求为: (1) 从 0.01 Hz 到 1 Hz, 相位计的分辨率必须达到  $10 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ 。(2) 由于星间相对运动引起的  $\sim 10 \text{ MHz}$  的多普勒频移, 相位计必须具有较大的测量范围。(3) 由于拍频的振幅和频率最初是未知的, 因此需要自动 (激光) 频率采集和增益可调的功能。此外, 相位计必须为弱光锁相提供高数据采样率。

相位测量方法有很多种。其中过零法详见于参考文献 [50-52], 测量信号的频率可高达 20 MHz, 分辨率为  $0.01^\circ$ 。主要噪声来源于过零点时参考电压的浮动。

基于锁相环的相位测量是一个闭环控制。它兼具高分辨率与大动态范围。通过记录拍频由多普勒效应引起的频移和由光路长度变化引起的相位变化, 可以同时获得位移和星间相对速度。因此, 锁相环型相位计是适用于星间激光干涉测量的最佳方法。

天体物理联合研究所 (JILA)<sup>[50-52]</sup>、喷气推进实验室 (JPL)<sup>[53-55]</sup>、德国阿尔伯特爱因斯坦研究所 (AEI)<sup>[56-61]</sup>、吕勒奥理工大学 (LUT)<sup>[62]</sup>、中山大学天琴中心和华中科技大学引力中心<sup>[63-65]</sup>、国家微重力实验室, 以及中国科学院 (NML-CAS)<sup>[66-67]</sup> 的研究小组, 自 2000 年以来对相位计开展研究。用数字锁相环法取代了过零点法 (JILA 2001, 2003, 2006, 弱光干涉仪信号混合到约 10 kHz)。在  $1 \times 10^{-3} \text{ Hz} \sim 1 \text{ Hz}$  的信号频率范围内, 相位计的噪声水平已经达到  $1 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$  以下, 满足星载引力波探测任务的要求。Schwarze 等开发了皮米级、稳定的六边形光学工作台以验证 LISA 相位计<sup>[61]</sup>。然而, 低频段 ( $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ Hz}$ ) 相位测量的噪声需要进一步研究, 特别是在接收弱光 (100

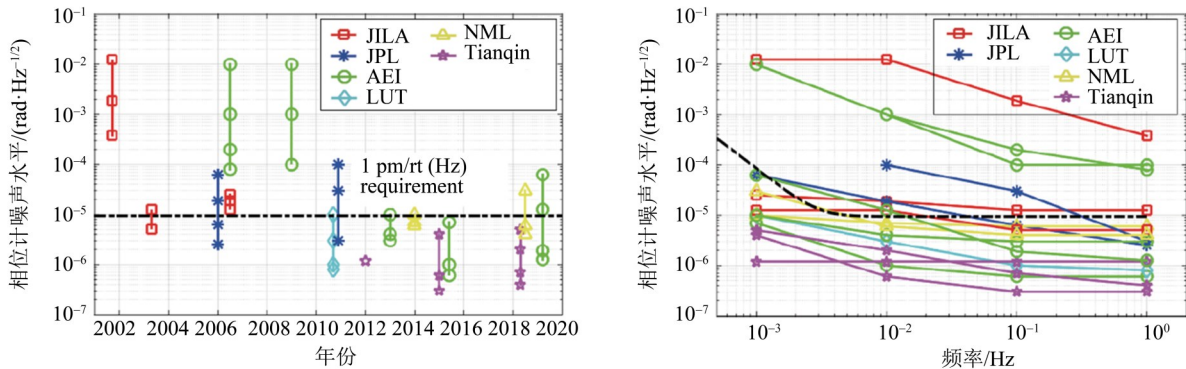


图 7 用于空间引力波探测的相位计的发展与性能<sup>[49]</sup>  
 Fig. 7 Development and performance of phasometers for space gravitational-wave detection<sup>[49]</sup>

pW) 和大外差频移 ( $20 \text{ Hz}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 的情况下。图 7 总结了迄今为止已报导的精密相位计的发展和性能数据。

基于数字锁相环 (DPLL) 算法的典型相位计的原理图如图 8 所示。模拟输入信号 (即外差激光干涉仪的拍频) 由信号调理电路 (即抗混叠滤波器或放大器) 和模数转换器 (ADC) 组成的采样电路数字化。然后将数字化信号乘以数控振荡器 (NCO) 产生的正弦信号, 得到相位误差。相位误

差信号被送到比例积分 (PI) 反馈控制器, 控制信号用于保持 NCO 和输入拍频之间的相位同步。为了锁定未知频率信号的相位, 利用频率探测器 (计数器) 在一定的跟踪范围内进行自动捕获。一旦 NCO 与输入信号锁相, 就可以记录 NCO 的频率和相位变化, 它们分别对应于被测目标的速度和位移。以上所有过程都可以通过数字硬件 (如 FPGA) 或模拟电子技术来实现。

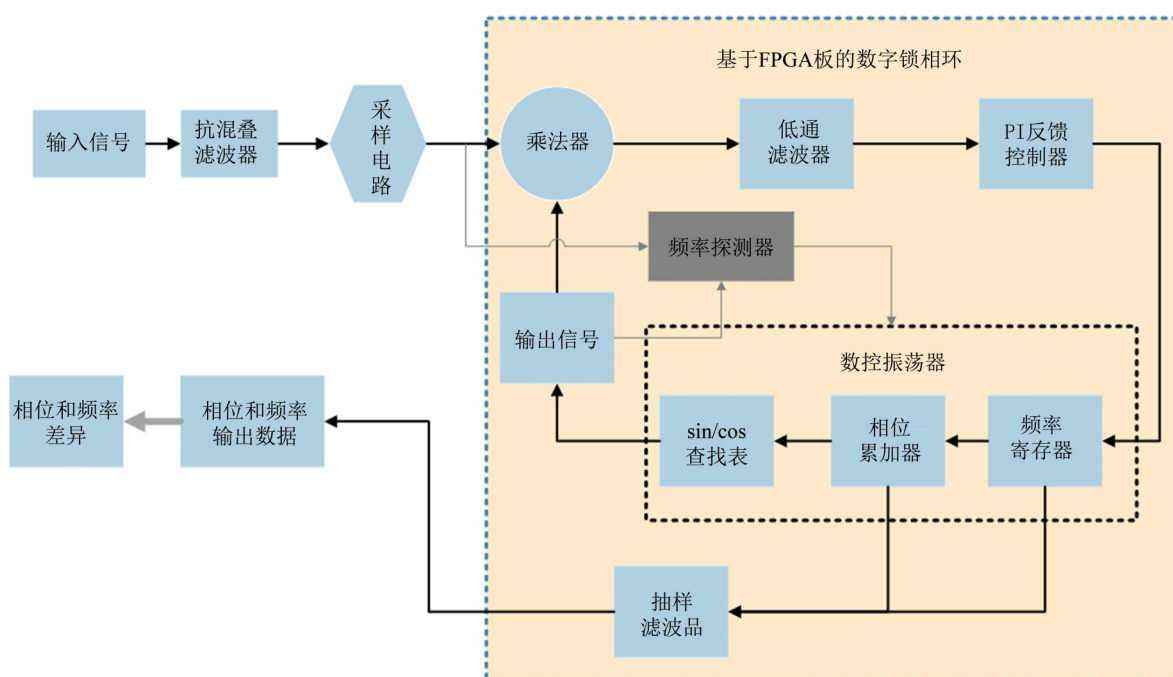


图 8 基于数字锁相环的频率/相位测量系统原理图

Fig. 8 Schematic diagram of frequency/phase measurement system based on DPLL

### 3.5 超低功率弱光锁相技术

弱光锁相是应答式星间激光干涉仪的核心技术之一, 锁相环的剩余相位噪声取决于相位计的精度和反馈控制回路的性能。虽然在星间激光干涉测量中使用了准直激光光束, 但发射的激光在长距离星间传输时的光束尺寸远大于卫星尺寸。这是由衍射极限决定的激光束发散角和大约  $10^8 \sim 10^9 \text{ m}$  的超长传播距离所致<sup>[68]</sup>。结果表明, 目标卫星接收到的光功率很小, 星间激光束的功率衰减严重, 一般的单反射镜式迈克尔逊干涉仪方案不适用于星间激光干涉测量。为了解决这个问题, 可以采用光学锁相技术来代替简单的反射。光学锁相环能够将本地激光器 (即从激光器) 的相位锁定到接收光的相位。这样, 从激光器发出的光与接收到的光具有相同的相位, 同时具有更大的

光功率。

卫星间相对运动引起的多普勒效应是另一个需要考虑的问题。虽然通过对卫星的轨道分析和优化, 建立了一个稳定的三角形星座, 但两颗卫星之间的相对运动仍然周期性变化, 最大速度约为  $10 \text{ m/s}$ , 这将导致  $10 \text{ MHz}$  的多普勒频移<sup>[69-70]</sup>。因此, 必须使用偏移频率约为  $15 \sim 20 \text{ MHz}$  的外差锁相环。此外, 弱光锁相的长期稳定性和低频残余噪声对探测低频引力波信号也至关重要。

弱光锁相的挑战在于如何利用超小信噪比 (SNR) 的干涉信号实现超高精度的相位测量。假设发射激光功率为  $1 \text{ W}$ , 星间距离为  $10^9 \text{ m}$ , 望远镜直径为  $0.3 \text{ m}$ , 发射望远镜上的光束半径为  $\omega_0 = 0.45D$ , 根据高斯光的远场衍射  $\theta_0 = \lambda/\pi\omega_0$ , 光束质量  $M^2 = 1.2$ , 发散角可表示为  $\theta = M^2\lambda/\pi\omega_0$ <sup>[71]</sup>。

到达接收航天器的光束直径为  $2L\theta \approx 6000 \text{ m}$ ; 因此, 0.3 m 的望远镜只能接收到发射激光功率的 2.5 ppb。除了由长距离传播造成的功率衰减外, 还必须考虑沿干涉仪光路的传播时经过所有光学元件的功率损耗, 因此光电探测器检测到的有效光功率更小<sup>[72]</sup>。

关于弱光锁相的早期发展, Enloe 和 Rodda<sup>[73]</sup> 在 1965 年使用了零差相位锁定技术, 使两个单频氦氖 (He - Ne) 激光器以完全相同的频率振荡, 残余相位差小于三分之一度。20 世纪 90 年代以后, 光学锁相环被广泛应用于光通信、量子光学、冷原子物理和激光干涉仪等领域<sup>[74-78]</sup>。这些研究为光学锁相技术的建立奠定了基础。然而, 弱光锁相的研究面临着新的挑战, 包括量子散粒噪声和  $10^{-4} \sim 1 \text{ Hz}$  的低频相位噪声。

Liao 等<sup>[79]</sup> 论证了对 2 pW 入射弱光的零差相位锁定。采用中性密度滤光片对激光进行衰减, 采用平衡检测法消除激光强度噪声, 提高信噪比。实验结果表明, 在锁定时间为 1.5 min 的情况下, 相位误差为 290 mrad (rms)。

Ye 和 Hall<sup>[80]</sup> 验证了两个连续波 Nd: YAG 激光器之间的高性能光学锁相环。反馈系统采用激光器内部压电换能器 (PZT) 和外部声光调制器 (AOM)。PZT (带宽约 20 kHz) 校正了缓慢但潜在的较大的激光频率漂移, AOM (带宽约 200 kHz) 消除了快速的频率波动。实现了约 1  $\mu\text{rad}$  的残余相位噪声, 并且环路外相位噪声在 1 Hz 及以上时约为 0.6  $\mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

Mc Namara 等<sup>[81]</sup> 进行了一项对一种弱光锁相方案的实验, 其中两个独立的二极管泵浦 Nd: YAG NPRO 激光器被锁定在一起, 频率偏移为 15 MHz。使用 17 nW 的弱光, 在 10 ~ 800 Hz 的频率范围内获得最小的残余噪声。并基于这项工作于 2005 年改进了 LISA 的弱光锁相性能。实验结果表明, 当弱光功率衰减到 13 pW 时, 从激光器的残余相位噪声达到了 0.4 Hz 以上的散粒噪声限值 (0.13 mrad/Hz<sup>1/2</sup>)。

Diekmann 等<sup>[70]</sup> 实现了一个偏移频率为 20 MHz 的模拟光学锁相环, 其中两个激光器的检测光功率分别为 31 pW 和 200  $\mu\text{W}$ 。两个激光器之间的相位噪声是散粒噪声限值的两倍, 低至 0.06 Hz、0.06 Hz 以下的残余相位噪声主要来自于相位计的模拟电子器件。并从细节上介绍了一部分光电探测器产生的噪声, 如光电二极管的散粒噪声、约

约翰逊噪声和跨阻放大器的等效电流噪声。

Dick 等<sup>[82]</sup> 和 Francis 等<sup>[83]</sup> 验证了光功率分别降低到 40 fW 和 30 fW 的弱光锁相。为了锁定两个弱光功率的激光器, 必须对环路滤波器的参数进行优化, 以平衡激光相位噪声和散粒噪声, 从而使周跳率最小。

弱光锁相的噪声来源于典型锁相环的三个主要部件: 激光器、相位计和光电探测器。激光噪声的来源包括频率起伏和光子数涨落 (散粒噪声)。由于散粒噪声是一个量子噪声限值, 因此锁相环的优化设计必须保证散粒噪声占主导地位。在只存在散粒噪声的情况下, 通过减小环路带宽, 可以将锁相环中的周跳减小到任何期望的水平<sup>[84]</sup>。但是, 在激光频率 (相位) 噪声不可忽略的情况下, 应优化环路带宽。

相位计的测量噪声是由模数转换器 (ADC) 的采样时间抖动、ADC 的量化误差以及一些热敏电子元件的热漂移引起的。通过使用导频音校正技术, 可以减小由 ADC 的采样时间抖动引起的相位误差<sup>[64-65]</sup>。

原则上讲, 降低环内噪声需要较高的控制带宽。相比之下, 降低外环噪声需要较低的控制带宽。因此, 控制带宽 (或环路增益) 是弱光锁相中需要优化的关键参数。此外, 环路 (时间) 延迟是另一个需要仔细考虑的关键参数。根据目前已有的研究工作<sup>[74]</sup>, 控制带宽的确定应考虑环路延迟和激光频率噪声 (即激光线宽)。

### 3.6 星间激光信号快速捕获与超精密激光指向测控技术

星间激光干涉测量采用高斯光束, 经过星间长距离传输后, 激光束的大部分光功率集中在艾里斑内。如果激光束的轴线与两颗卫星的视线不完全对准, 即使偏差仅比艾里斑稍大一点, 接收到的光功率也会变得非常微弱。由于低信噪比, 无法获得干涉信号。影响星间激光束对准的因素很多, 包括卫星姿态抖动、有效载荷安装误差、激光束抖动和温度引起的结构变化。因此, 星间激光束指向控制系统需要完成星间激光束的捕获、跟踪和瞄准三个过程, 因此又称为捕获/跟踪/瞄准 (ATP) 系统。另外, 由于波前畸变与激光束的指向偏差耦合, 导致了位移测量误差, 这就要求引力波探测的星间指向控制精度达到 1~10 nrad/Hz<sup>1/2</sup>。

卫星间激光链路的 ATP 技术也适用于卫星间或地面卫星激光通信<sup>[85-86]</sup>。通常, 光束指向和视

轴之间的初始偏差约为  $10^{-3}$  rad, 主要由装配公差和发射期间的振动导致。常用的捕获策略是利用快速偏转反射镜来调整激光束的发射方向, 扫描目标卫星的空间不确定度锥。当接收终端 (卫星) 上的探测器检测到光信号时, 接收终端的激光束随后相应地被调整指回发射终端。目前, 大多数激光通信系统使用信标光和粗/精复合 ATP 控制系统来完成激光链路的捕获和指向。对于发射端, 由于信标光的高功率和大光束发散度, 大大减少了完全覆盖不确定度锥的扫描点数, 从而缩短了捕获时间。对于接收端, 电荷耦合器件 (CCD) 通常被用作接收光束位置的测量装置, 因为 CCD 的宽视场有助于缩短捕获时间。一旦建立了星间光束捕获, 就可以采用四象限光电二极管 (QPD) 进行跟踪和超高精度的指向控制。

有一些新提出的捕获和指向控制方案是为天基科学任务设计的, 如 LISA<sup>[9]</sup>、GRACE Follow-On<sup>[87]</sup>、Space Advanced Gravity Measurements (SAGM)<sup>[88]</sup> 等。差分波前传感 (DWS) 是一种常用的高精度角度测量技术<sup>[89]</sup>。工作原理的简化示意图如图 9 所示。当捕获过程结束且接收信号的信噪比满足干涉测量要求时, QPD 通过四个象限输出四个拍频干涉信号。每个信号表示由 QPD 的相应象限检测到的相位。因为长距离的传输, 接收端的波前可以被视为一个以出射点为中心以传播臂长为半径的球面波前, 且 QPD 检测到的光束在光束轴中心附近只有很小的一部分, 故 QPD 检测到的波前几乎是平行的。如果本地激光束与接收光完全对准, 则 QPD 检测到的干涉信号的四个相位基本相同。但是, 如果本地光束与接收光束不对准, 则 QPD 输出的相位不同; 并且相邻两象限之间的相位差与本地光束与接收光束之间的偏差角成正比。

根据以上讨论, 位移测量可以通过对 QPD 输出的四个相位进行平均来实现, 并且可以通过计算 QPD 相邻两个象限之间的相位差来获得偏差角。

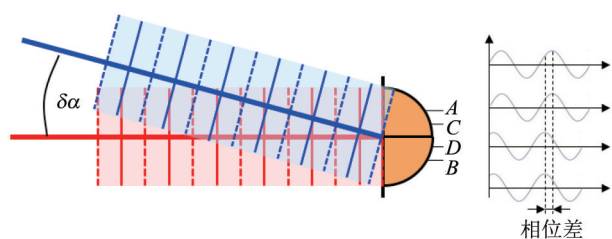


图 9 差分波前敏感技术 (DWS) 基本原理

Fig. 9 Basic scheme of DWS

偏差角可以通过乘以系数  $k$  从相位差转换, 其中系数为

$$k = \frac{16r}{3\lambda}, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  是波长,  $r$  是光束半径。转换系数的典型值约为  $10^3 \sim 10^4$  rad/rad。得益于较大的转换系数, 使用 DWS 技术可以实现超高精度角度测量。

对于捕获过程, 有五个自由度需要校准, 包括每颗卫星的两个指向角自由度和主从激光器之间的激光频差自由度。星间激光捕获方案必须经过专门设计, 以满足不同空间任务的独特要求。在 LISA 任务中, 捕获不确定度锥估计为  $15.2 \mu\text{rad}$ ; 波束发散角约为  $1.43 \mu\text{rad}$ <sup>[90]</sup>。很明显, 不确定度锥大于光束发散角。QPD 的视场为  $1 \mu\text{rad}$ , 也小于光束发散角, 因此必须采取一系列步骤来完成捕获。首先, 通过每颗卫星上的星敏感器通过观测恒星来测量星敏感器轴线与捕获 CCD 中心之间的偏移量; 然后, 两颗卫星调整它们的姿态以指向对方, 主卫星的发射光束开始扫描不确定度锥; 同时, 从卫星关闭本地激光, 通过捕获 CCD 搜索相应的信号, 直到 CCD 得到信号为止。从卫星调整其姿态, 直到接收到的光束位于 QPD 的中心。同样地, 从卫星重复相同的捕获过程, 以完成第一步的捕获。

除了空间扫描之外, 频率扫描必须通过对从激光器进行调频来实现, 直到拍频进入 QPD 的检测带宽, 以便干涉信号可以被 QPD 检测到。一旦从激光器被调到合适的频率, 即完成星间激光捕获。LISA 任务的操作程序制定、捕获控制系统的设计和端到端星间传播模拟器的开发都已被提出; 仿真结果表明, 总捕获时间约为 70 min。在 GRACE-FO 任务中, 干涉 QPD 直接用于完成星间激光链路捕获<sup>[91]</sup>。不确定度锥的半径约为 3 mrad, 主、从激光频率的初始偏移量估计为 1 GHz。最初的激光链路捕获是通过扫描完整五个自由度来实现的。主激光束以快速李萨如模式扫描, 而从激光束以较慢的六边形模式扫描。同时, 在空间扫描过程中, 从激光器频率被缓慢调谐。利用快速傅立叶变换 (FFT) 峰值检测算法得到的干涉信号幅值依次记录在每颗卫星上。将快速偏转反射镜的二维偏角信息和从激光器的温度信息通过下行链路传输到地面站, 分别获得指向角和激光频率; 这个过程通常需要几个小时。初始采集后, 空间不确定度锥和频差可分别降低到  $300 \mu\text{rad}$  和 20 MHz。最后, 通过快速、小范围的再捕获,

满足航天任务的捕获要求。GRACE-FO 的在轨结果表明, 该捕获方案运行良好, 初始捕获扫描时间约为 8.5 h, 再捕获所需时间小于 5 min<sup>[17]</sup>。

为了缩短捕获时间, 提出了一种基于激光功率检测的替代捕获方案<sup>[92]</sup>。主卫星发射的激光束经过强度调制, 扫描从卫星的不确定度锥。当主卫星扫描完成后, 从卫星开始扫描。一旦两颗卫星完成扫描, 扫描数据 (即接收到的带有坐标的光强度信息) 被发送到地面站进行进一步的数据处理。根据调制信号强度最大的坐标, 可以确定和调整激光束的指向角。然后, 进行频率扫描并利用 QPD 检测外差信号, 最后利用 DWS 可用于对激光束指向的微调。数值模拟结果表明, 该方法可以将捕获时间从几个小时缩短到 160 s。

针对中国提出的下一代引力测量任务<sup>[93]</sup>, 天琴中心空间光学组正在研究一种新的星间激光束捕获方案。上面讨论的捕获方案是对从卫星的不确定锥或主卫星的不确定锥进行单向扫描。如果两颗卫星可以同时扫描, 那么捕获时间可以更短。新方案的基本思路是: 对主卫星和从卫星发射的激光功率使用不同的调制频率进行调制, 使不同卫星的激光束能够独立解调和识别。这样, 两颗卫星的扫描就可以同时进行。另外, 由于倾斜的激光束将聚焦在 QPD 上的不同位置, 使得 QPD 的不同象限检测到的功率不同, 因此可以通过 QPD 的四个象限检测到的功率来确定激光束的偏差角。这种偏差角的检测方法称为差分功率传感 (DPS) 方法<sup>[94]</sup>。图 9 显示了 DPS 工作原理的简化示意图。通过聚焦透镜后, QPD 检测到的光斑位置取决于激光束的入射角。

当其中一颗卫星检测到功率高于设置阈值的

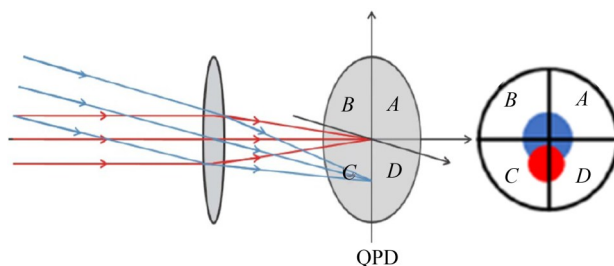


图 10 差分光强敏感技术 (DPS) 基本原理

Fig. 10 Basic scheme of DPS

信号时, 不必等待整个不确定度圆锥体的扫描完成, 而是立即调整本地激光束, 使其与接收到的激光束的光束轴对准。在经过星间距离的传播延时后, 另一颗卫星也能接收到足够的能量。然后两颗卫星可以利用基于 DPS 的激光指向控制进行微调。仿真实验表明, 对于 1 mrad 半径的扫描范围, 指向抖动的残余噪声小于 30  $\mu\text{rad}$ , 平均捕获时间小于 10 s, 成功率大于 99%。一旦空间捕获完成, 从激光器的频率将被调谐, 直至 QPD 上获得外差干涉信号。最后, 利用 DWS 技术进行超高精度指向控制, 其指向抖动可降至  $10^{-9}$  rad。

## 4 总 结

本文讨论空间引力波探测中的核心关键技术, 即星间激光干涉测量技术的基本原理和最新研究进展。为建立干涉测量臂长超过  $10^8$  m 的空间引力波激光干涉仪, 必须解决激光光束经过超长距离传播后所导致的一系列问题。这些高精尖的空间技术不但可以被直接应用于超高精度、极端测量条件的空间引力波探测科学任务, 同时也可以服务于国家重大战略需求。

## 参考文献:

- [1] LIGO 2020 [EB/OL]. www.ligo.caltech.edu/.
- [2] LISA 2020 [EB/OL]. www.lisamission.org/.
- [3] NI W T. ASTROD-GW: overview and progress [J]. International Journal of Modern Physics D, 2013, 22(1): 1341004.
- [4] LUN J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector [J]. Classical & Quantum Gravity, 2015, 33(3): 035010.
- [5] HU W R, WU Y L. The Taiji program in space for gravitational wave physics and the nature of gravity [J]. National Science Review, 2017, 4(5): 685 - 686.
- [6] KAWAMURA S, ANDO M, NAKAMURA T, et al. The Japanese space gravitational wave antenna-DECIGO [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 122: 012006.
- [7] ROBERTS M, TAYLOR P, GILL P. Laser linewidth at the sub-hertz level [R]. National Physics Laboratory, 1999.
- [8] SULLIVAN D B, ALLAN D W, HOWE D A, et al. Characterization of clocks and oscillators [M]. Technical Note: National Institute of Standards and Technology, 1990.

- [9] DANZMANN K, RUDIGER A. LISA technology - concept, status, prospects[J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2003, 20(10): S1-S9(9).
- [10] DANZMANN K, PRINCE T. LISA assessment study report (Yellow Book) ESA/SRE (2011) 3 [EB/OL]. URL: <http://sci.esa.int/sciencee/www/object/index.cfm?fobjectid=48364>.
- [11] SHEARD B S, GRAY M B, MCCLELLAND D E, et al. Laser frequency stabilization by locking to a LISA arm[J]. *Physics Letters A*, 2003, 320(1):9-21.
- [12] SHADDOCK D A, WARE B, SPERO R E, et al. Post-processed time-delay interferometry for LISA[J]. *Physical Review D: Particles and Fields*, 2004, 70(8): 357-363.
- [13] KANE T J, BYER R L. Monolithic, unidirectional single-mode Nd: YAG ring laser [J]. *Optics Letters*, 1985, 10(2):65-67.
- [14] HILDEBRAND U, LANGE R, SMUTNY B. 2006 Fiber-optic components for the laser communication terminal on TerraSAR-X [EB/OL]. <https://photonics.gsfc.nasa.gov/>.
- [15] MUEHLNIKEL G, KAMPFNER H, HEINE F, et al. The Alphasat GEO laser communication terminal flight acceptance tests[C]// Proc International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Ajaccio, Corsica, France, 2012.
- [16] ARMANO M, AUDLEY H, AUGER G, et al. Sub-femto-g free fall for space-based gravitational wave observatories: LISA pathfinder results[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(23): 231101(10).
- [17] ABICH K, BRAXMAIER C, GOHLKE M, et al. In-orbit performance of the GRACE follow-on laser ranging interferometer[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123:031101.
- [18] FREITAG I, TUNNERMANN A, WELLING H. Power scaling of diode-pumped monolithic Nd: YAG lasers to output powers of several watts[J]. *Optics Communications*, 1995, 115:511-515.
- [19] TROBS M. Laser development and stabilization for the spaceborne interferometric gravitational wave detector LISA[D]. Hannover: University at Hannover, 2005.
- [20] TROBS M, D'ARCIO L, HEINZEL G, et al. Frequency stabilization and actuator characterization of an ytterbium-doped distributed-feedback fiber laser for LISA [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(5):1137-1140.
- [21] NUMATA K, CHEN J R, CAMP J. Fiber laser development for LISA[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2010, 228(1):012043.
- [22] NUMATA K, CAMP J. Experimental performance of a single-mode ytterbium-doped fiber ring laser with intracavity modulator [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(8):575-580.
- [23] NUMATA K, CAMP J, KRAINAK M A, et al. Performance of planar-waveguide external cavity laser for precision measurements [J]. *Optics Express*, 2010, 18(22):22781-22788.
- [24] NUMATA K, CAMP J. Precision laser development for interferometric space missions NGO, SGO, and GRACE follow-on [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2012, 363(1):012054.
- [25] CAMP J, NUMATA K, KRAINA M. Progress and plans for a US laser system for LISA [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2017, 840(1): 012013.
- [26] SCHWANDER T, HEINE F, LANGE R, et al. New 808 nm high power laser diode pump module for space applications [C]// International Conference on Space Optics 2006, 2017.
- [27] TRAUB M, PLUM H D, HOFFMANN H D, et al. Spaceborne fiber coupled diode laser pump modules for intersatellite communications [J]. *Proc Spie*, 2007, 6736: 673618.
- [28] 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.
- [29] BLACK E D. An introduction to Pound - Drever - Hall laser frequency stabilization [J]. *American Journal of Physics*, 2000, 69(1): 79 - 87.
- [30] PIERCE R, KLIPSTEIN W M, SHADDOCK D, et al. Stabilized lasers for space applications: a high TRL optical cavity reference system [C]//Quantum Electronics and Laser Science Conference. Optical Society of America, 2012; JW3C. 3.
- [31] NICKLAUS K, HERDING M, WANG X, et al. High stability laser for next generation gravity missions [C]// International Conference on Space Optics 2014, 2017, 10563:105632T.
- [32] DORINGSHOFF K, SCHULDT T, KOVALCHUK E V, et al. A flight-like absolute optical frequency reference based on iodine for laser systems at 1064 nm [J]. *Applied Physics*, 2017, B123(6):183(8).
- [33] LEIBRANDT D R, BERGQUIST J C, ROSENBAUM T. Cavity-stabilized laser with acceleration sensitivity

- below  $10^{-12} \text{ g}^{-1}$  [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(2): 691-697.
- [34] LEIBRANDT D R, THORPE M J, NOTCUTT M, et al. Spherical reference cavities for frequency stabilization of lasers in non-laboratory environments [J]. *Optics Express*, 2011, 19(4):3471-3482.
- [35] DIDIER A, MILLO J, MARECHAL B, et al. Ultra-compact reference ultralow expansion glass cavity [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22):6470-6473.
- [36] SWIERAD D, HAFNER S, VOGT S, et al. Ultra-stable clock laser system development towards space applications [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:33973.
- [37] CHEN Q F, NEVSKY A, CARDACE M, et al. A compact, robust, and transportable ultra-stable laser with a fractional frequency instability of  $1 \times 10^{-15}$  [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11):113107.
- [38] WEBSTER S, GILL P. Force-insensitive optical cavity [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18):3572-3574.
- [39] LUO Y X, LIH Y, LIANG Y R, et al. A preliminary prototype of laser frequency stabilization for spaceborne interferometry missions [C]//2016 European Frequency and Time Forum (EFTF). *IEEE*, 2016: 1-4.
- [40] MING M, LUO Y X, LIANG Y R, et al. Ultraprecision intersatellite laser interferometry [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2020, 2 (2) : 022003.
- [41] ELLIFFE E J, BOGENSTAHL J, DESHPANDE A, et al. Hydroxide-catalysis bonding for stable optical systems for space [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, 22(10):S257-S267.
- [42] LUO Y X, LI H Y, YEH H C. Note: digital laser frequency auto-locking for inter-satellite laser ranging [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(5) : S1-2.
- [43] ARIE A, SCHILLER S, GUSTAFSON E K, et al. Absolute frequency stabilization of diode-laser-pumped Nd: YAG lasers to hyperfine transitions in molecular iodine [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(17):1204-1206.
- [44] SUEMASA A, SHIMO-OKU A, NAKAGAWA K, et al. Developments of highly frequency and intensity stabilized lasers for space gravitational wave detector decigo/pre-decigo [C]// 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 2017.
- [45] ACEF O, CLAIRON A, BURCK F D, et al. Nd: YAG laser frequency stabilized for space applications [C]// *International Conference on Space Optics 2010*, 2019.
- [46] ZANG E J, CAO J P, LI Y, et al. Realization of four-pass  $\text{I}_2$  absorption cell in 532-nm optical frequency standard [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2007, 56(2):673-676.
- [47] GOHLKE M, SCHULDT T, DORINGSHOFF K, et al. Adhesive bonding for optical metrology systems in space applications [J]. *Journal of Physics Conference*, 2015, 610:012039.
- [48] SCHKOLNIK V, DORINGSHOFF K, GUTSCH F, et al. JOKARUS-design of a compact optical iodine frequency reference for a sounding rocket mission [J]. *EPJ Quantum Technology*, 2017, 4(1):9.
- [49] LUN J, BAI Y Z, CAI L, et al. The first round result from the TianQin-1 satellite [J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2020, 37 (18):185013.
- [50] JENNRICH O, STEBBINS R T, BENDER P L, et al. Demonstration of the LISA phase measurement principle [J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2001, 18 (19) : 4159-4164.
- [51] POLLACK S E, JENNRICH O, STEBBINS R T, et al. Status of LISA phase measurement work in the US [J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2003, 20 (10) : S193-S199.
- [52] POLLACK S E, STEBBINS R T. Demonstration of the zero-crossing phasemeter with a LISA test-bed interferometer [J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2006, 23 (12):4189-4200.
- [53] WARE B, FOLKNER W M, SHADDOCK D, et al. Phase measurement system for inter-spacecraft laser metrology [C]//*Proceedings of the 2006 Earth Science Technology Conference*, 2006.
- [54] HSU M T L, LITTLER I C M, SHADDOCK D A, et al. Sub-picometer length measurement using heterodyne laser interferometry and all-digital rf phase meters [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4202-4204.
- [55] de VINE G, RABELING D S, SLAGMOLEN B J J, et al. Picometer level displacement metrology with digitally enhanced heterodyne interferometry [J]. *Optics Express*, 2009, 17(2):828-837.
- [56] WAND V, GUZMAN F, HEINZEL G, et al. LISA phasemeter development [C]//*AIP Conference Proceedings*. *American Institute of Physics*, 2006, 873: 689-696.
- [57] BYKOV I, DELGADO J J E, MARIN A F G, et al. LISA phasemeter development: Advanced prototyping

- [C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2009, 154(1): 012017.
- [58] GERBERDING O, SHEARD B, BYKOV I, et al. Phasemeter core for intersatellite laser heterodyne interferometry: modelling, simulations and experiments [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2013, 30(23): 235029.
- [59] SCHWARZE T S, GERBERDING O, CERVANTES F G, et al. Advanced phasemeter for deep phase modulation interferometry [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18214–18223.
- [60] 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 [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(7): 074501.
- [61] SCHWARZE T S, BARRANCO G F, PENKERT D, et al. Picometer-stable hexagonal optical bench to verify LISA phase extraction linearity and precision [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(8): 081104.
- [62] BURNETT C M. Development of an Ultra-precise digital phasemeter for the LISA gravitational wave detector [D]. Sweden: Lulea University of Technology, 2011.
- [63] LIANG Y R, DUAN H Z, YEH H C, et al. Fundamental limits on the digital phase measurement method based on cross-correlation analysis [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(9): 095110.
- [64] LIANG Y R, DUAN H Z, XIAO X L, et al. Note: Inter-satellite laser range-rate measurement by using digital phase locked loop [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(1): 016106.
- [65] LIANG Y R. Note: a new method for directly reducing the sampling jitter noise of the digital phasemeter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(3): 036106.
- [66] LIU H S, DONG Y H, LI Y Q, et al. The evaluation of phasemeter prototype performance for the space gravitational waves detection [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(2): 024503.
- [67] LIU H, LUO Z, IN G. The development of phasemeter for Taiji space gravitational wave detection [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2018, 30(6): 775–781.
- [68] McNAMARA P W. Weak-light phase locking for LISA [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, 22(10): S243.
- [69] DANZMANN K. LISA—Laser Interferometer space antenna: A proposal in response to the esa call for 13 mission concepts [R]. Hanover: Leibniz University, 2017.
- [70] DIEKMANN C, STEIER F, SHEARD B, et al. Analog phase lock between two lasers at LISA power levels [C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2009, 154(1): 012020.
- [71] Encyclopaedia Photonics 2020 [EB/OL]. [www.rp-photonics.com/beam\\_divergence.html](http://www.rp-photonics.com/beam_divergence.html).
- [72] BENDER P. LISA: a cornerstone mission for the observation of gravitational waves [J]. *System and Technology Study Report ESA-SCI*, 2000, 11: 2000.
- [73] ENLOE L H, RODDA J L. Laser phase-locked loop [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, 53(2): 165–166.
- [74] RAMOS R T, SEEDS A J. Delay, linewidth and bandwidth limitations in optical phase-locked loop design [J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(6): 389–391.
- [75] WIN M Z, CHEN C C, SCHOLTZ R A. Optical phase-locked loop for free-space laser communications with heterodyne detection [C]// *Optics, Electro-optics, & Laser Applications in Science & Engineering*. International Society for Optics and Photonics, 1991, 1417: 42–52.
- [76] SANTARELLI G, CLAIRON A, LEA S N, et al. Heterodyne optical phase-locking of extended-cavity semiconductor lasers at 9 GHz [J]. *Optics Communications*, 1994, 104(4/5/6): 339–344.
- [77] Le GOUET J, KIM J, BOURASSIN-BOUCHET C, et al. Wide bandwidth phase-locked diode laser with an intra-cavity electro-optic modulator [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(5): 977–980.
- [78] XU Z X, ZHANG X, HUANG K K, et al. Digital optical phase-locked loop for diode lasers based on field programmable gate array [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(9): 181.
- [79] LIAO A C, NI W T, SHY J T. Pico-watt and femto-watt weak-light phase locking [J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2002, 11(07): 1075–1085.
- [80] YE J, HALL J L. Optical phase locking in the microradian domain: potential applications to NASA spaceborne optical measurements [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(24): 1838–1840.
- [81] McNAMARA P W, WARD H, HOUGH J. Laser phase-locking techniques for LISA: experimental status [C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 1998, 456(1): 143–147.
- [82] DICK G J, TU M R, STREKALOV D, et al. Optimal

- phase lock at femtowatt power levels for coherent optical deep-space transponder[J]. IPN Progress Report, 2008, 42: 1-17.
- [83] FRANCIS S P, LAM T T Y, MCKENZIE K, et al. Weak-light phase tracking with a low cycle slip rate [J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5251-5254.
- [84] VITERBI A J. Phase-Locked-Loop behavior in the presence of noise[J]. Principles of Coherent Communication, 1966(1): 77-120.
- [85] NIELSEN T T, OPPENHAEUSER G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4. SILEX[J]. Proc SPIE, 2002, 4635: 1-15.
- [86] JONO K, TAKAYAMA Y, KURA N, et al. OICETS on-orbit laser communication experiments [C]// Free-Space Laser Communication Technologies XVIII. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6105: 610503.
- [87] SHEARD B S, HEINZEL G, DANZMANN K, et al. Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(12): 1083-1095.
- [88] YEH H C, YAN Q Z, LIANG Y R, et al. Intersatellite laser ranging with homodyne optical phase locking for space advanced gravity measurements mission[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(4): 1100.
- [89] HEINZEL G, WAND V, GARCIA A, et al. The LTP interferometer and phasemeter[J]. Classical & Quantum Gravity, 2004, 21(5): S581-S587.
- [90] CIRILLO F, GATH P F. Control system design for the constellation acquisition phase of the LISA mission [C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2009, 154(1): 012014.
- [91] WUCHENICH D M R, MAHRDT C, SHEARD B S, et al. Laser link acquisition demonstration for the GRACE Follow-On mission[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 11351-11366.
- [92] LUO Z R, WANG Q L, MAHRDT C, et al. Possible alternative acquisition scheme for the gravity recovery and climate experiment follow-on-type mission [J]. Applied Optics, 2017, 56(5): 1495-1500.
- [93] ZHANG J Y, MING M, JIANG Y Z, et al. Inter-satellite laser link acquisition with dual-way scanning for space advanced gravity measurements mission[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(6): 064501.
- [94] MANOJLOVIC L M. Quadrant photodetector sensitivity [J]. Applied Optics, 2011, 50(20): 3461-3469.

(责任编辑 王海蓉)