

综述

激光干涉引力波探测器的表征

秦戈宇^{1)2)3)†} 何吉波^{1)2)3)‡}

1) (中国科学院大学国际理论物理中心 (亚太地区), 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

3) (中国科学院大学引力波宇宙太极实验室 (北京/杭州), 北京 100190)

(2025 年 12 月 12 日收到; 2026 年 3 月 31 日收到修改稿)

引力波探测器的发展为天文学研究开辟了全新的观测手段, 而探测器表征与噪声抑制是引力波天文学得以实现的关键基础. 探测器表征指通过系统分析探测器自身状态及其所处环境的相关数据, 深入理解各类噪声的物理机制与来源. 地面引力波探测器 (LIGO, Virgo 与 KAGRA) 在长期运行中建立了系统化的探测器表征方法体系, 包括物理环境监测、辅助通道分析、噪声注入与数据质量分析等技术流程, 为引力波事件的可靠探测提供了关键保障, 也为未来空间引力波探测器的设计与运行奠定了基础. 本文综述了地面与空间引力波探测器表征方法与噪声抑制技术的共性与演进关系, 首先介绍地面引力波探测器中物理环境监测系统的构成及其在噪声识别、数据质量否决与事件验证中的应用, 包括常用的数据监测算法及其在毛刺 (glitch) 研究中的作用. 随后介绍目前的空间激光干涉引力波探测器计划, 并重点介绍作为技术验证任务的 LISA 探路者 (LISA Pathfinder) 任务的设计与关键子系统, 包括光学测量系统、惯性传感器与无拖曳控制系统, 并总结了其在轨噪声模型及低频噪声源的识别结果. 本文重点讨论了地面引力波探测器表征经验技术向 LISA 探路者任务的扩展应用, 重点关注低频噪声与毛刺的识别与建模方法. 最后结合地面引力波探测器的表征经验与空间引力波探测器验证卫星的实验结果, 给出了关于未来空间引力波探测器表征工作的若干建议.

关键词: 引力波探测, 探测器表征**DOI:** 10.7498/aps.75.20251708**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251708

1 引言

一百多年前爱因斯坦提出广义相对论^[1], 解释了诸如水星近日点进动、光线在引力场中的弯曲等问题, 并几乎同时基于广义相对论在理论上预言了引力波的存在. 然而对于当年的人们来说, 理论预言的引力波强度与当时的实验仪器精度之间存在着难以逾越的鸿沟. 经过一个世纪以来科学技术的不断发展, LIGO^[2], Virgo^[3], KAGRA^[4] 等激光干涉引力波探测器依次建成运行并不断地升级^[5], LIGO 与 Virgo 团队^[6] 在 2015 年首次探测到两个黑洞并

合所产生并传播到地球的引力波. 自这个振奋人心的里程碑事件以来, 上百个引力波事件被成功探测, 其中不仅有来自双黑洞并合的引力波事件, 而且包含双中子星以及黑洞-中子星的引力波事件^[7].

目前持续运行的引力波探测器均为地面激光干涉引力波探测器, 而新一代的空间引力波探测器如 LISA^[8]、天琴^[9]、太极^[10] 等项目都将突破地面探测器带来的空间与环境噪声等限制并将引力波探测的频段拓展到新的频段. 目前这三个空间引力波探测项目的目标敏感频段均为 0.1 mHz—1 Hz, 这一频段由于地面引力噪声的影响, 是地面探测器无法触及的^[11].

† 通信作者. E-mail: qingyu23@mails.ucas.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jibo.he@ucas.ac.cn

无论是理论预言还是已经探测到的引力波信号都提醒我们, 对引力波的探测意味着要检测 10^{-20} 数量级的长度应变, 这使得许多在其他领域可被忽略的噪声变得异常显著. 在空间激光干涉引力波探测器中, 两个核心噪声分别是光学测距噪声和加速度噪声^[12]. 自然环境或是仪器对自由落体观察者施加的外力都会引起这些自由落体观察者之间的相对加速度, 而这些加速度噪声就会叠加进干涉仪的读数中. 除了自然环境中各种随机的扰动, 为了更加精密而愈加复杂的探测器仪器也是引入加速度噪声的潜在噪声源^[13].

因此, 探测器表征成为了引力波探测领域一个重要议题. 探测器表征指的是通过对仪器与周边环境分析, 诊断并减轻探测器仪器中的问题, 这不仅是为了在数据分析过程中更加有效地处理噪声, 更是为了不断改进探测器、提升探测器的灵敏度. 在 LIGO 实验中有专门的探测器表征工作小组, 称为“DetChar”小组, 他们负责识别和减少耦合到探测器输出中的稳态、非稳态、瞬态和周期性噪声, 进行精确的时间测量以及仔细监测干涉仪状态.

地面引力波探测中积累的成熟探测器表征经验与方法, 将对未来空间引力波探测器的表征工作发挥重要的指导作用. 地面探测器表征工作中发展出多种数据分析与噪声排查工具和算法, 它们可直接迁移并应用于空间引力波探测器的表征体系中. 比如可以近实时处理数据, 并且对兴趣点创建触发器 (trigger) 的 Omicron 算法^[14]; 以及通过分层筛选各通道之间相关性, 从而根据相关性对各通道进行分类的 HVeto 算法^[15]等. 此外, 地面引力波探测器中完善的物理环境监测系统在探测器升级与噪声抑制中发挥了关键作用, 也为空间引力波探测器构建面向环境与仪器状态的监控体系提供了成功范例. 基于对地面探测器各类噪声源的系统认知, 空间引力波探测器的潜在噪声源可获得重要的先验认知; 鉴于两类探测器在基本测量原理上的相似性, 许多噪声机制在地面与空间任务中同时存在, 识别与抑制方法亦具有较强的通用性.

虽然目前还没有正在运行的空间引力波探测器, 但是一批技术验证卫星如 LISA 探路者^[16]、GRACE Follow-On^[17]、太极一号^[18]和天琴一号^[19]等已经成功升空并圆满完成任务. 这些技术验证卫星展示了真实的太空环境, 验证了空间引力波探测器的设计, 也揭示了新的噪声耦合路径与工程挑

战. 基于这些技术验证卫星传回的真实数据与地面引力波探测器表征经验, 空间引力波探测器的噪声研究与探测器表征工作得以进一步推进, 从而指导完善空间引力波探测器的设计制造工作.

本文将在第 2 节介绍地面引力波探测器的表征工作, 包括噪声监测与分析算法、数据质量否决和事件验证策略; 第 3 节综述地面引力波探测器的数据处理流程中针对环境噪声所使用的噪声抑制方法以及关于毛刺的分析与处理; 第 4 节介绍空间引力波探测任务并着重介绍 LISA 探路者任务的相关设计; 第 5 节重点讨论关于 LISA 探路者表征的相关工作, 包括其数据分析、噪声模型更新以及遇到的毛刺等挑战; 第 6 节展望未来空间探测器的表征发展, 并提出具体方向; 第 7 节给出全文总结.

2 地面引力波探测器的表征

引力波探测器的表征在引力波天文学中占据重要地位, 图 1 展示了引力波数据处理的简要流程图, 可以看到探测器表征处于引力波数据处理流程的核心位置, 服务于整个流程的多个步骤, 探测器表征与噪声抑制一同在提高探测器灵敏度方面发挥了重要的作用.

探测器表征包括对影响引力波数据质量的仪器与环境问题进行识别、诊断与缓解的一系列活动. 表征工作既可在探测器现场进行测试也可以使用记录的数据进行远程分析. 探测器表征的核心目标是识别探测器相关噪声源并进一步削减这些噪声以提升探测器的性能. 无论是为了消除数据中的噪声成分, 还是为了找出噪声源并抑制噪声, 都需要更加深入地进行探测器的表征.

噪声源总体可分为两大类: 一些已知的噪声源是基于干涉仪的设计和位置预测的, 这些噪声通常被称为“基本噪声”(fundamental noise), 例如量子噪声、地表震动噪声、引力梯度噪声、热噪声及残余气体噪声等. 基本噪声源可以从基本原理推导出来, 限定了任何探测器灵敏度的上限. 这类噪声可以通过改进探测器来削减, 例如延长法布里-珀罗腔臂长度以及增加测试质量的质量及其几何尺寸. 此外, 建设更长更大的悬挂系统可以增强地震隔离效能, 降低光学涂层的损耗可以减小热噪声, 设计高光学功率和高水平的量子压缩有助于减少量子噪声^[5,21–24].

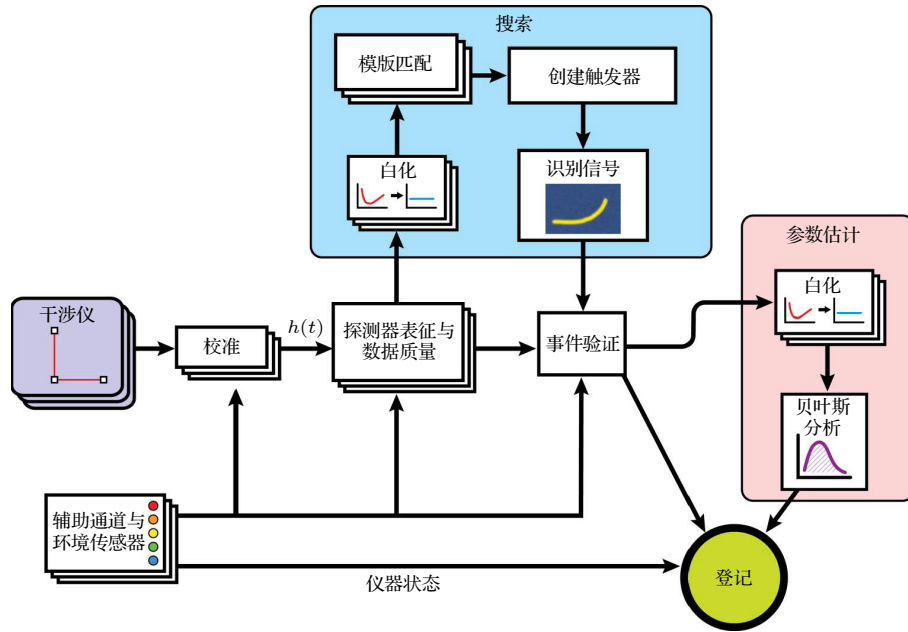


图 1 引力波数据处理的简要流程图, 绘制了从干涉仪数据到最终通告结果所需的主要步骤. 图片来自文献 [20]

Fig. 1. A brief flowchart of gravitational-wave data processing, illustrating the major steps required. Figure reproduced from Ref. [20].

除基本噪声之外, 其余噪声源通常被统称为“技术噪声”(technical noise). 此类噪声来源于各种已知或尚未完全明确的物理作用机制, 反映了实际系统中复杂的耦合过程与工程实现限制, 通常可以在探测器表征的过程中加以识别并逐步压低. 技术噪声的典型来源包括控制系统误差、电子设备噪声以及振动噪声的耦合等. 对技术噪声的研究通常依赖于对探测器运行状态的持续监控. 对于其中许多噪声源, 其噪声贡献的时间序列以及与主应变通道之间的耦合关系均可通过实验测量与统计分析加以精确刻画. 基于这些定量结果, 可在后期数据处理中通过建立耦合模型并实施扣除算法, 实现对相应噪声成分的有效抑制.

噪声可通过多种耦合路径进入探测器的读出信号, 包括改变光学腔的长度, 导致激光束抖动, 调制散射光的路径长度, 以及引入频率噪声等 [25]. 以往对引力波探测器表征方法及其环境噪声特性的认识, 主要来源于正在运行的地面激光干涉引力波探测器, 如 LIGO 等. 在 LIGO 的长期运行实践中, 已建立起一套较为完备的探测器表征与噪声抑制体系, 覆盖从仪器状态监测到数据处理的全过程, 为噪声识别、建模与控制提供了系统化框架 [25–27]. LIGO 的物理环境监测 (physical environmental monitor, PEM) 系统 [28–31] 是 LIGO 的探测器表征工作不可或缺的组成部分. 它被设计为一个独立的

探测器监测和校准系统, 监测数据与干涉仪信号一起存储, 并支持在线和离线的分析. 物理环境监测系统的系统前端由多种监控器硬件组成, 涵盖地震仪、加速度计、麦克风、磁力计、电压监测器、电台、粒子探测器以及风速、温度和湿度传感器等设备, 具体构成见图 2. 借助上述各类监测传感器, 物理环境监测系统能够对探测器真空系统中的关键物理量进行持续监控, 同时记录由建筑内部支撑设备运行、建筑结构本身振动以及气象条件变化等因素所引起的环境扰动. 这些监测数据为评估环境因素对探测器性能的影响、识别潜在耦合路径以及开展噪声抑制提供了重要依据.

在探测器测试与维护过程中, 通常采用环境噪声注入的方法来量化噪声与探测器响应之间的耦合关系. 通过注入已知幅度与频谱特性的环境信号, 并测量其对探测器输出的影响, 可实现对各个环境通道传递函数的标定. 传递函数定义为环境信号幅度与由其引起的差分臂长位移之比, 环境噪声对探测器的影响由传递函数与环境噪声功率谱的乘积给出. 便携式 PEM 小车是执行环境注入实验的重要工具, 也是物理环境监测系统中的关键组成部分. 该装置可在探测器不同位置开展可控环境扰动注入与同步监测, 主要用于初步调试、故障诊断以及耦合路径识别等阶段, 从而避免在每一个测试点部署永久性监测设备, 提高测试工作的灵活性与

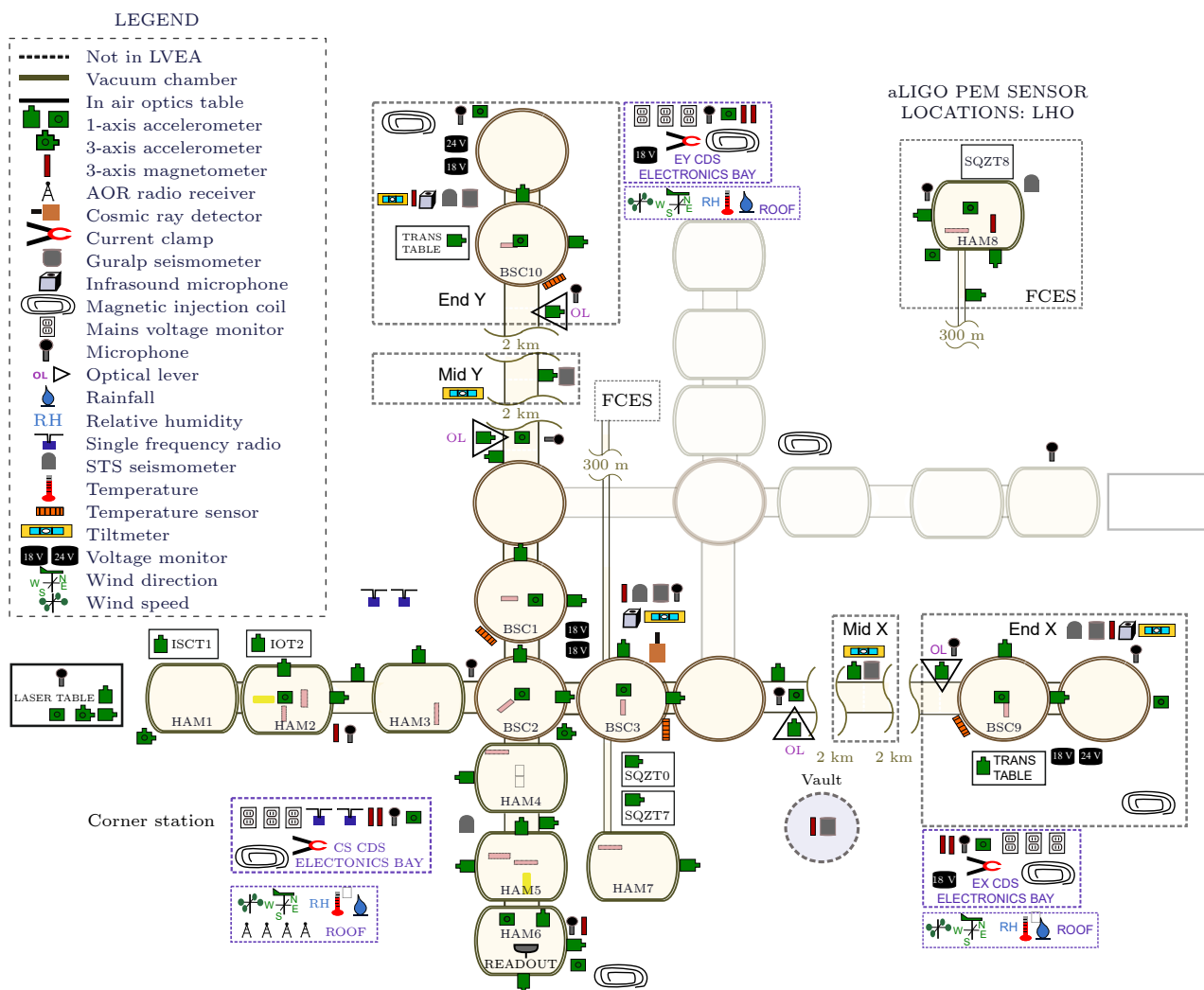


图 2 LIGO 在 Hanford 处的探测器物理环境监测系统总览. 图片来自 PEM 网页^[28]

Fig. 2. Overview of the LIGO Detector PEM System at Hanford. Figure from PEM web page^[28].

资源利用效率. 便携式 PEM 小车既可用于系统早期集成与功能验证阶段的测试, 也可在后期运行过程中开展专项测量与耦合标定工作, 在探测器表征流程中发挥前沿与先导作用, 为环境噪声建模与抑制策略的制定提供直接实验依据.

在探测器进入正式运行阶段后, 一系列数据处理与分析的工具或算法如 Omicron, Qscan, HVeto^[14,15] 等被投入运用, 它们能够更好地利用从物理环境监测系统获得的物理环境信息. 有多种近实时算法被用来分析 LIGO 数据, 其延迟时间从几分钟到一天不等, 其中一些算法运行于 LIGO 的数据监测工具环境中. 数据监测工具是一组用于监测 LIGO 数据质量各个方面的算法, 它能够显示状态信息并记录数据质量统计结果. 这些近实时算法的目标既包括搜索引力波信号, 也包括对探测器噪声的研究^[32]. 以下列举了部分近实时算法及其介绍.

Block-Normal 用于搜索短时无模型引力波爆发的算法. 识别无模型引力波爆发计算成本高昂, 该算法基于数据的时域分析, 并使用贝叶斯统计评分指标来筛选候选事件, 减少搜索所需时间^[33].

BurstMon 该监测工具提供三个关键性能指标: 衡量非平稳性的“像素比率”(pixel fraction), 探测器对引力波爆发的实时灵敏度以及不同频段的噪声变化情况. “像素”指的是单个时频单元, 而“像素比率”是可以聚集成两个或更多像素簇的像素占比, 反映了非高斯噪声影响时频空间的程度. 该算法量化探测器对突发信号的灵敏度, 并指出主导突发噪声源^[34].

Data Quality Vetoes 该算法根据仪器状况生成数据质量, 不预设引力波信号的存在, 所有数据都被平等对待. 需处理的数据将与事先探明的系统性的仪器造成的噪声匹配, 或是与仪器性能高度

不规则的时期匹配. 数据质量否决的应用显著提高了 PyCBC 搜索在探测器运行中的灵敏度^[35,36].

InspiralMon 由于极高的误触发率, 有必要筛选出由非高斯、非平稳噪声产生的触发. 该算法基于匹配滤波的方法, 使用二阶后牛顿静态相位模板搜索 1—3 倍太阳质量致密双星并合信号. 结果表明这种算法降低了误报率, 但仍需要根据探测器调整参数^[37].

KleineWelle 一种单个干涉仪事件触发的生成器. 对于引力波爆发的搜索通常是一种时频搜索, 但是不同窗函数的选择会导致时间-频率空间内不同的分辨率. 该算法基于时间序列的变分辨率小波变换, 通过小波系数提供信号能量的时频定位. KleineWelle 对 LIGO 探测器和 GEO 600 引力波探测器^[38]的引力波通道以及各种辅助通道进行了近实时 (和离线) 分析. 从这些触发器生成了各种诊断图, 还使用这些触发器进行了多维分类分析^[39].

QOnline 在线的多分辨率时频搜索, 用于统计显著的能量过剩信号. 类似于在白化信号空间中进行模板匹配滤波搜索, 其基函数是具有不同中心时间、中心频率和品质参数 Q 的正弦高斯函数. 在 LIGO 和 Virgo 的运行中, 该算法实时生成触发图, 并标注出每小时最响亮的事件^[40].

χ^2 时间-频率测试 匹配滤波是一种常见且有效的技术, 常被用于在数据流中搜索具有已知波形的信号^[41]. χ^2 测试将每个致密双星并合 (compact binary coalesces, CBC) 波形划分为具有相等功率的频率区间, 检查信噪比是否与实际致密双星并合信号预期一致. 每个从匹配滤波器搜索中得出的触发器都会根据 χ^2 测试的结果进行降权, 称为再加权信噪比 (re-weighted SNR). χ^2 时间-频率测试使用再加权信噪比, 将整个频率空间分成 p 个频段独立进行匹配滤波, 由于真实信号的功率分布与模板波形匹配, 因此不会被 χ^2 测试降权, 其信噪比和再加权信噪比保持一致^[36], 噪声产生的高信噪比事件会被抑制^[42]. 其中 p 的取值需要考量多方因素, 包括分析的最终目标、探测器噪声的统计特性、模板库的最大失配 (maximum mismatch) 以及计算或预测波形所需的精度. 测试输出结果若为较大 χ^2 值则表明信号可能与模板不匹配, 或者探测器产生了显著非高斯噪声. 该方法在宽频带探测器和信号的情况下效果良好, 可能具有更广泛的适

用性.

以下是两种事件可视化工具, 它们用于描述探测器在特定时间点的行为. 这类工具能够提供 LIGO 辅助通道以及引力波通道的快照, 类似于高能物理实验中常用的事件可视化工具.

Event-Display 一个基于网页的事件可视化工具, 同时显示某组通道的时间序列和频谱图, 以及在该时刻探测器状态的各种诊断信息, 并输出参数估计代码的结果.

QScan 该算法被用于研究多个探测器通道在感兴趣时刻的行为. 与 QOnline 类似, QScan 基于 Q 变换生成“ Q 谱图”显示. 对于较为重要的通道, QScan 会生成时间序列和“ Q 谱图”的缩略图, 并提供不同时间窗的结果. 该工具被广泛用于控制室, 以诊断锁定丢失, 也用于查看 VIRGO 探测器中的各种通道.

持续的恒定频率噪声, 通常被称为“线”(lines), 对连续引力波的搜索可能造成显著干扰. 因此, 在仪器表征过程中, 监测并追溯这些谱线的来源、将其归入已知噪声源库, 是一项重要工作. 用于识别此类谱线的典型算法包括以下 3 种.

NoEMi 该工具用于跟踪频率随时间变化的“漂移”线, 并指出与辅助通道事件的重合情况^[43].

FineTooth 该算法可被用于在应变通道及辅助通道中持续跟踪谱线. 特别地, 它能够识别并追踪由等频率间隔的谱线组成的“梳状线”, 这类特征常见于某些电子噪声源, 因此该算法在相关噪声识别中已被证实具有较高的实用价值^[44].

FScan 该算法首先利用快速傅里叶变换处理数据, 并通过运行中位数归一化方法获得功率谱图 (即“FScan 功率”). 随后, 程序剔除所有已知来源的谱线, 将引力波通道中超过设定阈值的剩余频率成分与各辅助通道逐一比对, 记录重合的频率信息至数据库, 并绘制成点图, 以直观展示引力波通道与辅助通道之间频率重合的情况^[45]. 程序会记录谱线在 7 天内的数据, 对于跟踪特定谱线的科研人员而言, 这些输出结果提供了重要的诊断信息.

噪声模式识别方法能够提供有价值的信息, 例如识别出在特定频段或特定时间段内出现的瞬态噪声 (毛刺). 将这些知识与对探测器的既有了解 (如子系统表征结果或前期仪器测量数据) 结合, 便可以为噪声源的定位与分类提供有针对性的判断依据. 举例而言, 若某类低频异常主要发生在工作

日白天,则可能源于人类活动增强所引起的地震背景噪声上升.这种结合时频分布与事件时间特征的交叉分析方法,有助于缩小潜在噪声源范围,并为后续的实验验证或噪声抑制措施的制定提供方向^[46].

LIGO 探测器在 30 Hz—2 kHz 频段内的环境噪声来源已得到广泛研究^[44,47,48],具体如下.

非相关噪声 指局部非相关噪声,通常为单探测器发生.

人类活动 来源为房间内人类活动,或是附近的地面运动.例如高速行驶的车辆频率为 2—15 Hz,远距离的活动频率为 1—3 Hz,同一频段还有其他噪声源,如水坝、森林砍伐、大规模施工.监测方式包括加速度计、地震仪、麦克风阵列.

地震 特征为 0.03—0.1 Hz 的地面运动,监测方式为地震仪.

风 频率为 0.5—15 Hz,可能使建筑倾斜而不是摇晃的形式出现的振动,具备更低的频率.

内部设备 例如电机 (>50 Hz)、空调系统 (<100 Hz)、冷水机组和泵 (<60 Hz).

射频调制 来源为电光调制驱动系统故障,监测方式为用于生成 45 MHz 光学边带的通道.

相关噪声 这种噪声会在 LIGO 汉福德 (LHO) 与利文斯顿 (LLO) 两台探测器中同时出现,且具有高度的时间关联性,因此易被误判为引力波候选事件,并且无法通过搜索背景估计的方法识别.

闪电 闪电每秒在全球发生数十次,可以激发舒曼共振,但是该效应强度极小,不会在时间序列中产生强信号.在探测器附近发生的闪电可能通过电磁作用产生音频频率的强磁场,但是该影响不会强烈到被距离较远的两个探测器同时检测到^[49].

太阳活动 例如太阳耀斑、太阳风等, LIGO 团队研究了最强的太阳或地磁事件,未观察到此类事件对两个探测器的时间序列产生影响^[47].

射频通信 LIGO 工作组在注入测试期间通过注入射频场测量射频耦合.得到的射频耦合表明,探测器的背景射频场与能够影响探测器信号所需的强度相比至少小两个数量级.最强的射频耦合出现在控制光学腔所使用的 9 MHz 与 45 MHz 调制频率处.在两个探测器处分别有数个比探测器灵敏两个数量级的射频无线电接收器对背景射频场进行监控.

宇宙线 大部分宇宙线的通量在距离最初碰撞粒子 10 km 处就将降为零.因此理论上宇宙线

同时影响两处探测器的概率极低^[49].与之相应地, LIGO 工作组预先在汉福德的探测器附近设置的宇宙线探测器未发现与主通道时间序列之间存在耦合^[47].

在识别出具体噪声源后,可通过对仪器硬件进行改进或对控制与数据处理软件进行优化来降低甚至消除相应噪声影响.对于无法在物理层面完全消除的噪声贡献,则可通过数据质量否决 (data quality vetoes, DQ vetoes) 策略进行处理,即在数据分析阶段剔除受污染的数据片段或标记可疑事件.此外,持续的环境噪声监测还可作为引力波候选事件验证的重要依据.将环境监测通道的信息纳入候选信号筛选流程,有助于识别并排除由环境扰动引起的伪信号,从而有效降低误报率,减少后续精细分析所需的计算资源消耗,提高整体数据处理效率与可靠性^[46].

通过对探测器各类仪器与子系统开展充分而系统的表征,研究人员能够有针对性地优化和升级关键部件,从而有效抑制或减少相应噪声源的引入.初代 LIGO 自 2002 年起投入运行,于 2010 年结束运行,期间经历了多个科学运行阶段 (S1—S6).在此过程中,探测灵敏度伴随一系列技术改进不断提升,从约 $3 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-0.5}$ 提升至 $3.5 \times 10^{-23} \text{ Hz}^{-0.5}$.在经历全面的设备升级之后,Advanced LIGO (aLIGO) 于 2015 年开始运行,进入科学运行阶段 O1,如今已完成 O4 阶段的运行.在 O1 开始时, aLIGO 的应变灵敏度就已经在 100 Hz 处达到 $8 \times 10^{-24} \text{ Hz}^{-0.5}$,之后经过多次升级,探测器的稳定性与探测性能均获得了显著提升^[5].

2.1 地面引力波探测器中的数据质量否决

如果能够将仪器的数据质量问题与天体物理信号分开,则可以在分析数据时将这些问题排除.这就是数据质量否决.

LIGO 面对的瞬态引力波源主要包括致密双星并合^[6]以及其他高能天体现象,例如超新星爆发^[50].而持续性引力波信号源则包括旋转中子星^[51]、由弱且未分辨的致密双星并合信号所构成的背景信号^[52,53].针对这些波源, LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 和其他团队开发了许多分析流程来将由于引力波信号引起的过量功率突发事件与仪器导致的假信号分开.这些搜索主要结合了关于数据质量的信息,使用数据质量否决来识别数据高

概率受到毛刺影响的时间段^[54-61].

进行数据质量否决的过程通常与仪器噪声调查的方式类似: 首先通过自动化流程识别出过量噪声, 然后追踪、寻找该噪声与辅助通道的相关性. 在初步识别问题后, 许多工具可以被用于清晰地描绘出该类型问题发生时的情况, 例如使用 Omicron 收集所有毛刺事件, 以及 HVeto 或 iDQ^[62] 寻找引力波数据与辅助通道的相关性.

数据质量否决通常在搜索流程的不同阶段以分层类别的方式应用. 目前主要划分为三类: “类别 1”、“类别 2”和“类别 3”. 其中, 类别 1 被认为是完全不可用或不可靠的数据段; 类别 2 指特定类型毛刺周围的短时窗口; 类别 3 则基于辅助通道与引力波数据之间的统计相关性进行划分.

在 LIGO 中, 有几种常用的数据质量否决策略. 其一为手动制定策略, 即根据已知的严重环境或仪器扰动, 确定需要剔除的具体时间段, 这些时间段通常取自在线探测器运行日志. 其二为基于辅助通道数据的策略, 即通过辅助通道的信息, 预估引力波数据中可能需要被剔除的部分. 典型流程如下: 在使用 HVeto 或类似算法发现相关性之后, 借助辅助通道的 Omicron 触发信息确定需要进行否决的时间窗口. 具体的否决参数经过细致调优, 以最大化否决效率 (即被剔除的毛刺事件占比) 与死时间 (即被剔除总时间的占比) 之间的比值. 这一调优策略旨在尽可能多地覆盖噪声事件, 同时最大限度降低天文信号被误剔除的风险. 用于生成否决的数据通道必须被事先确认为“安全”, 即其信号不会通过控制回路受到应变数据的影响, 仅反映环境信息. 此类通道的安全性通常通过噪声与信号注入实验进行验证^[15].

在 aLIGO 的不同观测运行和各类分析中, 总共被否决的时间占总观测时间的约 2% 或更低占比. 特别地, 对于持续引力波信号, 数据质量否决大多仅采用类别 1 否决, 而随机引力波 (stochastic gravitational waves) 搜索往往会剔除大量数据, 有时被剔除的数据占比会超过 20%^[52,53].

2.2 地面引力波探测器中的事件验证

在对特定信号进行分析处理之前, 需要首先确认该信号是否源于仪器或环境噪声, 而非天体物理过程. 此外, 当真实的天体物理信号伴随显著噪声时, 也可能对分析结果产生影响, 因此需要评估是

否对数据进行额外处理. 上述过程统称为事件验证. 事件验证对于一种新型天体物理源的首次探测尤其重要, 事件验证也是确认引力波源是来自非致密双星并合源的关键步骤.

在 LVK 的数据分析框架中, 事件验证在瞬态引力波信号的确认过程中发挥着关键作用^[27,47,63]. 用于验证瞬态引力波信号的主要证据可归纳为以下三类: 其一, 源自仪器自身状态及其监测通道的信息, 用于判断候选信号是否与已知的仪器噪声或子系统异常存在关联; 其二, 候选信号与瞬态噪声事件在时间或频率维度上存在重叠的证据, 用于识别由环境扰动或仪器毛刺引起的伪信号; 其三, 信号发生时探测器是否处于非标准运行状态 (如某台探测器正处于维护阶段) 的相关信息.

在 LVK 合作框架下, 获取源自仪器的证据主要通过分析辅助通道数据实现, 即搜索监控传感器与应变功率之间的相关性. 识别这些相关性所采用的方法涵盖上文所述的多类手段, 包括基于数据可视化的人工检查、基于大模型的机器学习方法、用于评估通道间统计相关性的专用工具, 以及各辅助通道预先标定的传递函数信息等^[25,26,64]. 为了确保探测器的正常运行, 不仅需要关注探测器通道短期的异常, 也需要调查探测器的长期性能变化以了解探测器状态的变化是否可能产生假事件. 这些测试包括数据的平稳性测试^[65] 和对探测器性能长期趋势的检查.

2.3 引力波探测器表征方法小结

地面引力波探测器的表征工作通常遵循由“数据驱动识别”到“物理机理验证”的递进式流程^[46].

首先, 从观测数据出发, 通过灵敏度曲线异常、毛刺率上升以及搜索结果中的异常值等现象进行初步识别, 并结合时频特征及周期性结构对噪声或异常进行模式归纳. 在此基础上, 引入辅助通道信息, 开展统计相关性与相干性分析, 并结合人工经验或机器学习方法对瞬态噪声进行分类, 从而在多通道信息中筛选潜在的耦合路径与候选噪声源. 该阶段的核心在于利用数据内部结构及跨通道关联, 建立“观测现象-信号特征-候选来源”之间的映射关系.

在完成初步定位后, 表征工作进一步转向基于物理机理的验证与处理. 进一步工作将结合已有噪声预算、已知环境扰动及设备行为模型等因素, 对

候选噪声源进行针对性分析, 并通过现场实验、注入测试或运行状态调整等手段加以验证. 最终, 依据确认的耦合机制, 采取数据质量检验、噪声扣除或仪器改进等措施, 实现对噪声的抑制与性能优化.

整体而言, 地面引力波探测器的表征方法体现为“问题识别-特征提取-机理建模与实验验证-反馈优化”的过程. 这一融合数据驱动与物理模型的表征框架, 对空间引力波探测器的在轨分析与噪声抑制具有直接的借鉴意义.

3 地面引力波探测的噪声抑制

目前已有多种噪声抑制的方法被开发应用^[66-68], 主要利用维纳滤波^[69]的方法计算来自各种噪声源的噪声贡献. 在 LIGO 的观测运行中, 有许多噪声处理程序被开发应用^[70,71], 去除了来自校准线、电源线噪声、对准和长度传感控制噪声、60 Hz 电源线的慢调制噪声等多种噪声的贡献. 这些程序提高了 LIGO 的双中子星探测范围, 并提高了引力波网络整体灵敏度^[72].

在数据分析层面, 噪声功率谱密度的估计至关重要. 尽管大多数方法假设噪声近似为平稳、高斯过程, 实际探测器噪声往往呈现非平稳特性, 并包含非高斯成分. 目前已有若干简便方法用于估计噪声的功率谱密度 (power spectral density, PSD), 例如, Welch 方法^[73]通过在多个短时间段内分别测量噪声谱并加以平均, 获得整体噪声谱的估计. 然而, 该方法容易受毛刺影响, 因此在实际分析中更常采用基于中值而非均值的估计方法^[74].

在 LVK 的分析流程中, 噪声功率谱密度的估计通常采用 BayesLine 算法^[75,76]. 该算法将探测器噪声建模为平稳高斯背景与可能存在的非高斯瞬态成分的组合, 并通过样条函数或洛伦兹曲线对噪声谱进行拟合. 研究者还提出了多种贝叶斯方法以进一步提升估计的适用性, 包括对功率谱密度不确定度进行边缘化处理^[77], 以及构建更适用于非平稳噪声环境的似然模型^[78,79].

在分析长时间跨度的数据时, 不能假定噪声在整个时间尺度上保持平稳. PyCBC 采用的一种解决策略是缩短噪声估计的时间窗口^[54]. 这种方法允许噪声特性在不同数据段之间发生变化, 各数据段的噪声谱仅用于对应时段的分析. 另一种方法则允许噪声特性随时间连续漂移^[80], 使用滚动的几

何平均噪声谱, 能够比固定短时间段分析更好地捕捉较短时间尺度上的噪声变化.

“毛刺”一词用于描述在特定时间或频率上出现的短时噪声爆发, 以及辅助通道中的瞬时变化. 由环境影响或仪器故障引发的毛刺可能构成瞬态引力波信号 (如无模型爆发信号或致密双星并合信号) 的背景噪声, 从而被误识别为候选事件. 在引力波参数估计中, 若模型中未考虑毛刺成分, 则可能引入显著误差, 影响源参数的推断精度. 此外, 毛刺的存在破坏了当前广泛采用的高斯稳态噪声假设, 使得原有的简化模型不再适用, 进而增加数据分析的复杂性. 强毛刺还可能直接导致仪器失锁, 减少有效观测时间.

为了削减毛刺的影响, “事件触发生成器 (event trigger generators)”常被用来在时间序列中搜索毛刺. 最常用的生成器之一是 Omicron^[81], 它每天自动运行, 分析应变通道及数千个辅助通道. Omicron 使用小波基对时间序列进行时频变换, 并记录发现的每个毛刺的各项指标, 包括峰值时间、频率和信噪比^[14,46]. 其他生成器还包括 DMT Omega 和 KleineWelle 等^[82].

除了毛刺的特征频率和信噪比, 了解毛刺在时频上的图形也很有用. “Qscan”方法基于与 Omicron 类似的算法^[39,40], 使用不同宽度的重叠时频块来创建高分辨率的频谱图, 显示毛刺的频率和幅度如何在短时间尺度内演变. 从这些图像可以看出, 不同类别的毛刺具有明显不同的形状. 具体可以在 aLIGO 网页^[83]查看 aLIGO 的数据, 在总结页中可以查看时间序列、频谱等信息.

在 LIGO 观测运行期间, 针对特定类型毛刺的详细调查仍是探测器表征的重要内容, 典型例子包括“哨音毛刺 (whistle glitches)”、“瞬响毛刺 (blip glitches)”和“散射光毛刺 (scattered light glitches)”等. 这些调查通常侧重于评估毛刺对搜索数据质量的实际影响, 而非仅仅依赖单一仪器的监测数据. 在噪声调查过程中, 毛刺通常可通过时频图进行初步视觉分类. 同时, 近年来已开发出多种自动化毛刺分类工具, 用于辅助大规模数据处理中的噪声事件识别与归类. 以下将详细介绍上述三类毛刺.

哨音毛刺 哨音毛刺 (whistle glitches) 源自射频信号的拍频现象, 因其在音频中呈现类似口哨的声音特征而得名. 其产生机制如下: 电路中的电

压振荡器生成射频信号,用于驱动声光调制器在激光上产生频率边带.当两个振荡器之间的频率差发生波动,或因器件老化导致频率差减小时,便会产生拍频信号.在时频图中,该类毛刺通常呈现为特征性的“W”形或“V”形图样^[84].

瞬响毛刺 瞬响毛刺 (blip glitches) 有较多可能来源,其物理机制至今尚未明确.该类毛刺与任何辅助通道均无显著相关性,且其时频形态与大质量致密双星并合产生的引力波信号相似,因此对引力波探测构成了显著干扰.瞬响毛刺的特征表现为持续时间短、频带较宽,在时频空间中呈现对称的泪滴状结构.观测表明,不同探测器之间未发现瞬响毛刺存在时间相关性,其与环境传感器数据亦无显著关联,未观测到与宇宙线异常活动相关的证据,且包含多个互不相关的子类.上述因素使得瞬响毛刺成为毛刺研究中的一个难点问题^[85].

散射光毛刺 散射光毛刺 (scattered light glitches) 的形成机制如下:当散射光从与镜面存在较大相对运动的表面(如真空腔壁)反射后,重新与主光束耦合,便会在引力波数据中引入噪声.在 Qscan 图中,该类毛刺呈现为特征性的弓形结构.其幅度取决于重新耦合至主光束的散射光比例,频率则取决于反射表面的相对运动速度^[86].

在对特定类型毛刺进行研究时,通常需要将其与各辅助通道的数据进行相关性分析,以识别可能的噪声来源或耦合路径.在进行通道之间的统计比较时,分层投票 (HVeto) 方法^[15]在 LIGO 的仪器噪声调查中尤其常用.该算法从主要引力波通道中的所有 Omicron 触发器开始,寻找它们与其他通道中的毛刺在时间上的显著相关性.该算法的分层特性意味着它会进行多轮分析,每轮分析后移除与最显著毛刺最相关的通道.由于不断剔除与毛刺相关的通道,后续的分析轮次通常能够识别出不同类型的毛刺,从而提高分类的准确性和精度.最终输出与最显著通道相关的通道列表,以及每轮中毛刺的 Qscan 图^[25,26,64,87].

为验证噪声耦合并量化传递函数, LIGO 等站点定期实施环境注入实验(磁场、声学、机械振动等),在非观测阶段施加已知扰动并测量其在应变通道上的响应.注入试验结合物理环境监测系统的测量将有助于估计每个环境源对应变信号的可能贡献,能够辅助判断局部环境中的任何噪声源是否足够强大以影响引力波应变数据,并为后续的噪声

抑制与仪器改进提供依据.如果特定噪声源与探测器应变之间的传递函数是线性的,那么所测得的耦合就足以估计每个源对探测器数据的噪声贡献.尽管某些噪声源(如散射光)不具有线性耦合,但大多数来自局部环境的噪声源确实与探测器应变呈线性关系^[25,26,45,64,87].

对每个探测器周围环境进行深入研究,有助于进一步揭示瞬态噪声的潜在来源,为噪声源的定位和抑制提供宝贵线索.例如在 aLIGO 调试过程中,从辅助通道中观察到了射频拍频信号,这种信号在 DARM 的频谱图中表现为具有特征的“W”形或“V”形的信号.经过排查后发现,当两个压控振荡器 (voltage controlled oscillators, VCOs) 绝对频率差降到 16 kHz 以下时,就会导致 VCOs 之间的拍频信号出现在存储的探测器输出中,这就是这种毛刺的成因.在将有问题的电压控制振荡器的输出频率彼此错开后,与这些噪声源相关的毛刺数量显著减少. LLO (LIGO livingston observatory) 的整体毛刺率降低至原来的 1/2,而信噪比大于 8 的毛刺率降低为原来的 1/50^[84].

在 O1 观测运行期间,引力波通道中曾出现大量频率为 50 Hz 的毛刺.经 HVeto 分析发现,用于控制 LIGO 汉福德探测器 (LHO) X 臂对准的光电二极管通道与这些毛刺表现出高度相关性,表明该 50 Hz 毛刺可能与 X 末端站的地面振动存在关联.经排查确认,毛刺源头为 X 端站空压机的隔振脚效果不佳.在更换隔振脚后,50 Hz 毛刺随之消失^[48].

在 2016 年 12 月 4 日约 17:45 UTC, LHO 的操作人员观测到一系列异常毛刺,离线数据质量分析也确认了该现象.通过生成相应时段的频谱图及音频文件,这些毛刺被识别为电话铃声与人声交谈所致.随后,在移除并确认关闭所有电话设备后,该问题得到解决^[48].

以上列举了若干针对毛刺问题的具体解决方案,但在许多实际应用场景中,直接移除受影响的数据片段往往更为高效.上一节所述的各类识别方法,可有效定位需剔除的数据段.在引力波数据分析中,两种最常用的数据移除技术分别为“门控”(gating)和“修补”(inpainting).门控指通过施加窗函数将待移除时段周围的信号压制至零.该方法可根据分析技术的具体需求,在数据白化处理之前或之后执行.修补则用于在保留数据统计特性的前提下对移除部分进行填补,该操作必须在数据白化之

前完成^[46].

门控在 LVK 中被广泛使用. 当前, 预白化门控被多个致密双星并合搜索算法 (如 PyCBC^[54], MBTA^[56], PyGRB^[88]) 以及一个用于搜索广义瞬时信号的算法 (X-pipeline^[89]) 所采用. 后白化门控被另外两个致密双星并合搜索算法 (Gstlal^[55] 和 SPIIR^[57]) 以及用于搜索广义瞬时引力波信号的算法 (cWB^[58]) 采用.

4 空间激光干涉引力波探测任务介绍

地面引力波探测器在 10 Hz—2 kHz 频段内取得了突破性观测成果, 但受限于地面噪声, 其灵敏度难以向低频端进一步延伸. 为探测更大质量天体并覆盖更宽频段, 国际上相继提出多项空间引力波探测计划. LISA 任务规划于地球轨道上超前或落后地球 20° 的位置, 发射两两间距为 250 万公里的三颗激光干涉卫星, 预计服役 6 年^[8,90]. 太极团队提出臂长 300 万公里, 使用类 LISA 轨道的空间引力波探测计划, 称为太极计划^[10,18,91,92]. 天琴团队提出了臂长 17 万公里, 使用地心轨道的天琴计划^[9], 它们均可参与组网观测^[12]. 这些空间引力波探测任务的探测目标为 0.1 mHz—1.0 Hz 频段内的引力波, 预期应变幅度谱密度可达 $10^{-21} \text{ Hz}^{-0.5}$. 它们在该频段内的高灵敏度观测能力, 使其能够系统研究致密双星的形成与演化过程及银河系结构, 追溯超大质量黑洞在宇宙不同时期的起源、增长与并合历史, 探测极端质量比旋近信号以精确刻画星系中心超大质量黑洞的性质, 并揭示恒星级黑洞的形成机制及其与周围环境的相互作用. 同时, 还可用于检验广义相对论、粒子物理标准模型及各类暗物质模型等基础物理理论, 构建基于引力波的“标准烛光”以测量宇宙膨胀历史, 研究随机引力波背景并探索其对早期宇宙及 TeV 尺度粒子物理的启示, 进而拓展对潜在未知引力波源的认知.

天竺 (astrodynamical space test of relativity using optical devices, ASTROD) 系列任务^[93,94] 基于太阳轨道上的无拖曳航天器与地球轨道卫星间的激光测距, 高精度探测太阳系内的引力场以提高相关参数的测量精度. 其中注重于低频引力波的 ASTROD-GW 任务^[95] 由位于日地拉格朗日点 L3, L4 和 L5 的三个航天器组成, 它们组成臂长 2.6 亿公里的近似等边三角形的阵列. ASTROD-

GW 在 0.1 nHz—1 mHz 的频段内具有最佳灵敏度, 有力填补了引力波天文学在该频段的空白, 在探索黑洞与星系的共同演化、检验相对论引力及探测暴胀物理等方面具有独特优势.

2001 年, 日本提出了分赫兹干涉仪引力波天文台 (DECI-Hz gravitational observatory, DECI-GO)^[96] 任务, 其计划臂长为 1000 km, 目标是探测 1 mHz—100 Hz 范围内的各类引力波, 从而为引力波天文学开启新的观测窗口. DECIGO 既可作为 LISA 的后续观测设备, 又能为地面探测器提供预测支持, DECIGO 尤其适合探测中等质量黑洞并合产生的引力波, 其预期的灵敏度有望探测到宇宙初始阶段的引力波, 也有望探测到全新的引力波.

由于空间环境的复杂性, 空间探测器表征工作比地面更具挑战: 其一, 多个航天器组成的星座需维持稳定的远程激光链路; 其二, 探测器核心读数依赖自由落体测试质量 (test mass, TM), 对各种噪声均高度敏感; 其三, 空间任务缺乏地面实验室中丰富的人工注入手段, 因此噪声模型需要在发射升空前通过地面联测, 发射升空后使用在轨数据逐步校准.

为了验证 LISA 任务的可行性并监测所用仪器硬件在轨道中的实际运行环境, LISA 探路者 (LISA pathfinder, LPF) 卫星于 2015 年发射并在轨道上运行了 18 个月后于 2017 年圆满完成任务. LPF 任务的主要目标是测量自由落体的测试质量之间的相对加速度, 并评估测试质量的相对加速度噪声水平. 于 2018 年发射的 GRACE Follow-On 任务是由美国与德国合作开展的地球重力场观测卫星项目. 该任务采用双星编队飞行模式, 通过高精度测量两星之间的距离变化来反演地球重力场参数. 为满足测量需求, 卫星搭载了两套测距系统: 基于 K 波段测距技术 (K-band ranging, KBR) 的传统微波测距仪, 以及激光测距仪 (laser ranging instrument, LRI). 其中, 激光测距仪也作为星间激光干涉链路的在轨技术验证平台^[97,98]. 2018 年太极团队发射了太极一号技术卫星^[18,91], 2019 年天琴团队发射了天琴一号技术卫星^[19], 它们均完成了第一阶段的技术发展与测试. LISA 探路者、GRACE Follow-On、太极一号和天琴一号这些技术验证卫星可以为空间引力波探测的数据情况和处理方法提供宝贵的数据支持.

鉴于国际上已围绕 LPF 任务开展了系统而深

入的探测器表征研究, 并形成了较为完备的实验与数据分析成果, 本文接下来将以 LPF 的表征工作为核心展开讨论. 通过梳理其在轨运行期间的噪声识别、建模与抑制实践, 可以为未来空间引力波探测器的表征策略提供重要参考. 在本节的后续内容中, 将对 LPF 的整体任务架构与探测器设计进行详细介绍, 包括关键子系统的结构与功能划分, 为后续噪声来源分析与表征方法讨论奠定基础.

LPF 围绕第一个拉格朗日点 L1 运行, 并保持卫星的旋转与地球同步, 其轨道相比 LISA 轨道更接近地球, 但引力环境是类似的. LPF 仅包含单颗卫星, 其内部两测试质量之间的间距约为 38 cm, 而非类似 LISA 的百万公里级干涉臂长. 由于缺乏类似 LISA 的长基线结构, LPF 对引力波信号不敏感, 其主要任务是对关键技术进行在轨验证. 在 LPF 上有两大科学实验模块, 其一为与 LISA 任务有着相同硬件设计的 LISA 技术包 (LISA technology package, LTP), 另一个是扰动削减系统 (disturbance reduction system, DRS)^[99]. 为了实现 LISA 的灵敏度目标, 干涉仪的测试质量应保持在纯自由落体状态, 沿干涉仪 x 轴的加速度需要在 0.1 mHz 处低于 $3 \text{ fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[100,101], 该指标于 2017 年更新为 $12 \text{ fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. LPF 最主要的目的是通过测量测试质量之间的相对加速度来评估它们自由落体运动的质量.

LTP 模块是 LPF 的核心, LTP 保证两个 TM 处于自由落体状态与航天器 (spacecraft, SC) 没有任何机械接触, 并测量其相对位移^[16,102,103]. LPF 使用的大部分硬件与 LISA 相同, 特别是测试质量、引力参考传感器、激光干涉仪测量系统以及控制航天器的微推力器, 因此 LPF 可以作为空间引力波探测器表征方法的绝佳测试平台. LPF 的核心组件如图 3 所示, 对 LPF 各子系统的详细介绍如下^[104].

光学测量系统 (optical metrology system, OMS) 光学测量系统的主要目的是以所需精度测量测试质量之间的距离. 为了达到所需精度, 系统采用了外差激光干涉仪结构. LPF 所使用的激光器为波长 1064 nm、输出功率数十毫瓦的掺钕钇铝石榴石 (neodymium-doped yttrium aluminium garnet, Nd: YAG) 激光器, 安装于参考激光单元中. 激光从该单元发出后进入激光调制单元, 在此被分为两束, 每束光的频率均被偏移, 这两束光随

后通过光纤传输至光学平台. 在光学平台上, 这两束光以四种不同的方式干涉, 于是该系统可以被视为四个独立的干涉仪^[16]:

X12 干涉仪 X12 干涉仪是主干涉仪, 用于测量两个测试质量之间的相对距离. 该干涉仪是 TM 相对运动的主要传感器, 是一个外差激光干涉系统^[104]. 在该干涉仪中, 激光光束通过镜面引导, 同时照射两个测试质量并分别在其表面反射. 当两个测试质量之间的相对距离发生变化时, 测量光束的相位会随之变化, 拍频信号也会反映这一变化. 在四个干涉仪中, 每个干涉仪的相同拍频信号都由两个光电二极管记录, 并将这些信号合并. 这种方案称为平衡检测 (balanced detection).

X1 干涉仪 该干涉仪用于测量 TM1 与卫星之间的相对距离. 与 X12 干涉仪不同的是, X1 干涉仪的测量光束仅照射 TM1.

参考干涉仪 (XR) 由于光纤中的光程可能由于温度变化发生波动, 这种噪声会以共模相位噪声的形式出现在所有四个干涉仪中. 在参考干涉仪中, 光路的设计使得光纤较短的光束在光学平台上的光程更长, 从而匹配总光程, 以最小化激光频率噪声的耦合. 因此, 参考干涉仪精确测量由共模光程噪声引起的相位噪声, 并在 LPF 上从其他三个干涉仪的测量中进行扣除. 此外, 设置有光路差控制回路, 该回路基于参考干涉仪的测量结果, 控制两个压电制动器 (piezo actuator) 调整激光调制单元中的光程^[105].

频率干涉仪 (XF) 该干涉仪在光学平台上的

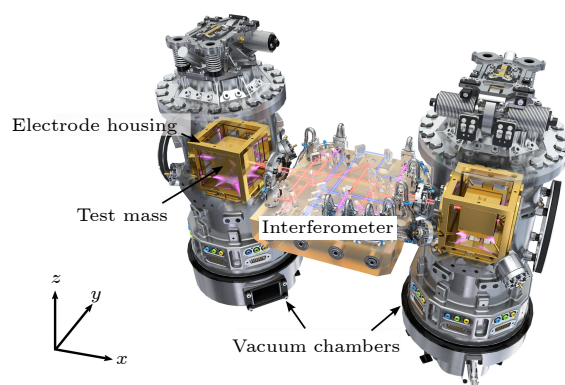


图 3 LPF 的核心组件与惯性传感器. 两个测试质量被电极笼包裹, 置于两个真空舱中, 中间由光学平台连接. 图片来自文献^[104]

Fig. 3. The LISA Technology Package core assembly and inertial sensors. Two test masses inside their electrode housings inside a vacuum tank. Two vacuum tank are connected by an optical platform. Figure reproduced from Ref. ^[104].

两束光的光程相等,但由于光纤长度不同产生了一个人为的光程差.这个人为的光程差会放大激光频率噪声 δf ,从而可估计激光频率噪声. XF 干涉仪对激光频率噪声的测量结果将被输入到控制器中,由控制器控制压电器件和加热器以稳定激光频率^[106].

干涉仪测量 TM 六个不同的自由度:

- 1) 两个测试质量沿 x 轴 (即敏感轴) 的相对位移 $\Delta x(t)$, 该轴连接了它们各自的质心;
- 2) 其中一个测试质量 (称为 TM1) 沿着 x 轴相对于干涉仪光学平台的相对位移 $x_1(t)$;
- 3) 两个测试质量绕 y 轴和 z 轴的旋转角度 $\theta(t)$ 和 $\phi(t)$.

此外还有 6 个自由度通过电容传感器进行测量^[107]. 相比于电容传感器, OMS 干涉读数的灵敏度要高三个数量级. 上述所有测量的采样率均为 10 Hz.

无拖曳姿态控制系统 (drag-free attitude control system, DFACS) DFACS 的主要目标是控制航天器运动,使残余加速度满足主要要求. LPF 的主要科学测量模式 (即用于测量残余加速度的模式) 工作情形如下: 沿着敏感轴方向,即连接两个测试质量的直线,其中一个测试质量 (通常被称为 TM1) 不受任何控制力作用,由 DFACS 控制卫星跟随 TM1 的运动.

LTP 在该模式下的控制回路包括无拖曳 (drag-free, DF) 控制回路以及静电悬浮 (electrostatic suspension, ES) 控制回路.

无拖曳控制回路 DFACS 系统通过干涉仪 X1 测得 TM1 相对于卫星的位置,系统将根据测量结果计算出需要由推进器施加的推力. 该推力通过一组微推力器作用在航天器上,使其保持与 TM1 的相对位置不变.

静电悬浮控制回路 该回路通过包围 TM2 的电极系统施加力,使其与 TM1 保持相对静止.

此外, LPF 还采用了一种专用的控制模式,采用间歇控制方案替代 TM2 沿 x 方向的连续控制. 这种模式被称为漂移模式 (drift mode) 或自由飞行实验 (free-flight experiment).

引力参考传感器 (gravitational reference sensor, GRS) 系统 测试质量是一个镀金的 Au/Pt 合金立方体,每边 46 mm,质量为 1.928 kg. 测试质量装在电极笼中,测试质量与电极笼之间的间隙为 4 mm,电极笼由钼制成,同时也镀有金. 每个测试质量都处于一个真空舱内,真空舱设有光学窗

口,使激光能够照射到测试质量上,以测量两者之间的相对位置.

外壳上有 12 个金镀层电极,用于通过电容传感差分感知立方体的位置和方向,并通过静电作用使其运动. 其中 6 个电极通过 100 kHz 交流偏置电压驱动,可以将电容测量的频率移至高频. 传感电极的读取和驱动电极的激励由前端电子设备完成.

惯性传感器前端电子系统 (inertial sensor front-end electronics, IS-FEE) 电子系统是 IS-FEE 子系统的一部分,用于沿所有轴测量测试质量的绝对位置,精度可达纳米级^[108]. 除了用于位移和姿态测量的电子设备 (即测试质量传感器), IS-FEE 还包括位移和姿态控制 (即测试质量驱动). 为了实现所需的性能,传感和驱动电子设备产生的杂散噪声不得超过所需测试质量加速度灵敏度水平的 1/10. 主要的 IS-FEE 功能可以分为以下几点.

1) 通过注入电极用交流电压 (100 kHz) 对测试质量进行偏置 (激励),用于 TM 位移和姿态传感.

2) 使用 6 对传感电极,在 6 个自由度上对 TM 的位移和姿态进行传感.

3) 通过驱动电极使用交流电压 (< 300 Hz) 对 TM 进行偏置,用于 TM 的位移和姿态控制.

4) 通过驱动电极使用直流电压和低频 (< 0.1 Hz) 电压对 TM 进行偏置,用于消除 TM 的杂散电压,并进行 TM 电荷测量和放电.

5) 获取传感电压,转换为数字数据,并通过串行接口与航天器计算机进行连接,为航天器控制 (DFACS) 提供输入.

6) 接受来自 DFACS 的数字输出,通过串行接口转换为模拟电压,并进行调制,以便用于驱动电极.

LPF 关于惯性传感器的机械设计可参见文献^[109, 110]. 传感器电子学的开发主要集中在变压器桥和前置放大器电路上,即电容检测电路,它们是 TM 位移检测的核心. 在 LISA 中,优先考虑的是减少作用于 TM 的所有寄生力,而不考虑位移灵敏度的损失. 所以 TM 激励电平基准被选择为相对较低的 0.6 V^[100],而对于非常敏感的加速度计而言,大信号电压 (如 5—10 V) 能改善信噪比,因此采用更高的激励电压.

在科学操作过程中,测试质量的电荷通过基于紫外光的电荷管理系统 (charge management sub-

system, CMS) 进行控制. 与其他通过导线实现放电的空间任务 (例如 MICROSCOPE 任务) 不同, LPF 上的测试质量不与任何物体接触, 因此无法使用放电导线. 作为替代, LPF 采用紫外灯进行电荷管理, 利用光电效应实现放电^[111].

数据和诊断子系统 (data and diagnostics subsystem, DDS) 为了更好地理解太空环境, 为未来的引力波探测器设计一个合适的环境监控系统, LPF 搭载了数据和诊断子系统, 其中包括温度测量子系统、磁诊断子系统以及辐射监测子系统. 数据和诊断子系统的的功能将与卫星上所有诊断数据一起, 通过专用遥测数据包下载.

温度诊断子系统 LTP 核心组件周围分布了 24 个温度传感器和 18 个加热器. 通过地面评估, 要求 LPF 在测量频带 ($1 \text{ mHz} \leq f \leq 30 \text{ mHz}$) 内的温度稳定性达到 $100 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$, 于是要求热敏感度在相同测量频带内达到 $10 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$.

加热器用于在敏感位置注入受控的温度扰动并研究其与仪器性能的耦合. LPF 使用了两种不同类型的加热器: Kapton 加热器 (45Ω 电阻), 最大功率为 2 W , 被安装在光学窗口 (OW) 的侧面和支撑结构上. 电极笼 (EH) 内部的加热器使用最大功率不超过 45 mW 的热敏电阻 ($2 \text{ k}\Omega$ 电阻)^[99].

磁诊断子系统 数据和诊断子系统既要负责监测磁场, 又要负责产生磁场. 磁诊断子系统在与连接两个测试质量的轴对齐的位置配置了一个铜合金线圈, 该线圈负责产生可控磁场. 由三轴磁力计 (TFM100 G4-VQS) 负责高精度测量磁场^[112].

辐射监测子系统 已有的仿真模拟研究指出, 能量大于约 100 MeV 的银河宇宙线 (galactic cosmic-ray, GCR) 是测试质量充电的主要贡献者. 而且由于宇宙射线通量的强度在太阳最小和最大周期 (11 年周期) 之间可能产生约 2 倍的变化, 宇宙射线的光谱形状也会随着太阳调制发生变化.

为了监控入射的宇宙线, LPF 上配备了专用的粒子探测器^[113]. 粒子探测器安装在太阳能板后方, 视轴沿日地方向. 由两个 $300 \mu\text{m}$ 厚的硅晶片构成, 面积 $1.40 \text{ cm} \times 1.05 \text{ cm}$, 相距 2 cm . 这个粒子探测器专门用来测量单粒子能量大于 70 MeV 的银河宇宙线和太阳粒子的通量, 因此外壳由铜屏蔽箱构成, 能够屏蔽 70 MeV 以下的粒子. 该粒子探测器基于硅光电倍增管 (SiPMs), 通过 BETA ASIC 进行低功耗的读数, 功率小于 2 W , 预期在

1 h 内测量宇宙射线通量的统计误差小于 1% . 该探测器在几百 MeV 的能量范围内具有适度的能量分辨率, 足以区分太阳高能粒子 (solar energetic particles, SEP) 和宇宙线的光谱形状. 其最大计数率为 6500 Hz , 采样时间为 15 s , 拥有以下两个计数模式^[114].

单计数模式 该模式下对穿过每个硅晶片的质子、氦核计数, 记录的数据以 15 s 为采样时间进行记录. 最大计数率为每秒 6500 次事件.

一致模式 该模式测量粒子的电离能量损失. 以直方图形式每 600 s 储存能量损失事件, 饱和极限为每秒 5000 次.

粒子探测器获取的监控数据将发送至星载计算机进行处理. 根据估计, LPF 在 L1 轨道期间, 出现单次事件总通量超过探测器饱和极限的太阳高能粒子事件的概率每年不足一次. 事实上, 在 LPF 任务的观测期间, 未发现任何银河宇宙线粒子通量饱和的太阳高能粒子事件, 尤其是单粒子能量高于几百 MeV 的事件.

LPF 于 2015 年 12 月 3 日 04:04 UTC, 由 Ariane-space 使用 ESA-VEGA 火箭从法属圭亚那库鲁发射. 经过六次升高远地点的轨道机动后, 进行最终点火将 LPF 从绕地椭圆轨道送出, 驶向拉格朗日点 L1. 该拉格朗日点位于地球与太阳之间, 距离地球约 1.5 Gm . 处于该点的物体与地球同时绕太阳运动, 因此局部重力场非常微弱. 这使其成为高精度低加速度测量的理想位置, 这正是 LPF 的测量所需要的.

LPF 的精确轨道为绕 L1 点的利萨如轨道 (Lissajous orbit). 卫星在前往 L1 的途中, 各个单元逐一启动并检查其主要功能, 这一过程称为在轨调试, 启动于 2016 年 1 月 11 日. 在 LPF 成功完成在轨调试后, LTP 任务操作阶段于 2016 年 3 月 1 日开始, 持续三个月直到 2016 年 6 月 26 日结束. LTP 任务操作阶段之后是 DRS 操作阶段, 随后是 LTP 任务延长阶段, 该阶段一直持续到 LPF 卫星于 2017 年 7 月 18 日最终关闭^[16].

LPF 的主要数据运行周期可分为两类, 一类为标准数据运行周期, 时长从数日到两星期不等, 使用为达到最低噪声水平而调整的物理条件, 或改变某几项物理条件, 用于估计准稳态噪声的功率谱密度. 在这些运行的大多数时间里, LTP 的温度保持在大约 22°C , 其中的两次运行中, 温度被降低到

大约 11℃, 目的是减少放气率, 从而降低气压和布朗噪声. 标准运行的总测量时间为 138.4 天. 另一类为冷运行, 在 2017 年 5 月, 为了进一步降低气压, LPF 的温度被降低到约 0℃, 超出了仪器的标定操作范围. 仪器进入不稳定状态, 大幅提升了毛刺率, 这些运行持续了总计 11.9 天^[104].

LPF 产生的数据以有限的速率传回地球, 因此 LPF 的许多科学数据通道采样率仅为 1 Hz 或 10 Hz. 数据被传输到服务器并使用 LTPDA 存储, 这是为 LPF 开发的专用 MATLAB 工具箱^[115]. 存储的数据被打包为 AO (analysis objects) 类, 在 AO 类中不仅存储纯数据, 也记录有名称、描述以及操作历史等信息.

5 LISA 探路者的表征

这一节将汇总 LPF 探测器表征的相关工作, 按照地面表征-在轨数据分析-毛刺专题分析的逻辑顺序展开. 5.1 节介绍发射前围绕探测器性能开展的系统性准备与验证工作; 5.2 节依据 LPF 在轨实验数据对空间激光干涉引力波探测器的低频噪声源进行汇总分析; 5.3 节聚焦于 LPF 任务中出现的毛刺现象, 并分析其成因与影响.

5.1 LISA 探路者任务的地面表征

空间引力波探测的敏感频段为毫赫兹附近, LISA 任务计划研究频率在 20 μHz—1 Hz 之间的引力波^[13]. 在 LISA 观测范围内的主要噪声将分为两类:

1) 在低频段 (约 3 mHz 以下) 由测试质量受到外部干扰而产生的加速度噪声主导.

2) 在高频段 (10 mHz 以上), LISA 的观测灵敏度主要受到激光噪声的限制.

由于 LPF 在测量期间的所有位移都被限制在小于 1 μm 的范围内, LPF 的动力学系统可以被近似建模为线性系统, 因而可以使用线性矩阵来描述 LPF 在轨时的动力学系统. 位移数据可以通过该近似线性动力学系统转换为相应的力, 并用于估计力噪声的功率谱密度, 该系统的动力学参数需要地面实验与在轨实验共同标定. 由于系统的线性性质, 总的力噪声 PSD 可以通过以下方式计算: 先给出每一个独立扰动源所引起的力噪声 PSD 的最优估计值, 然后将这些估计值相加即可得到总噪声估

计. 通过地面试验与理论预估得到 LPF 任务噪声预算的最优估计值及其主要组成项列在表 1 中^[116–118].

表 1 LPF 在 1 mHz 处的主要差分加速度扰动估计
Table 1. Estimated main differential acceleration disturbance of LPF at 1 mHz.

噪声源	PSD估计/ ($\text{fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$)	估计方法
驱动(x 轴)	7.5	飞行器模型电子设备稳定性
布朗	7.2	扭摆
磁	2.8	磁场稳定性
杂散电压	1.1	扭摆试验
激光辐射压	0.7	激光功率稳定性
其他动力学自由度	0.4	除 x 以外其它自由度的最坏估计值
温度梯度效应	0.4	扭摆试验
自引力	0.3	热弹性稳定性模拟
随机充电	0.1	充电模拟
航天器运动耦合	0.1	刚度估算和模拟航天器抖动
总和	10.9	平方和根

类似地, 可以通过地面实验估计光学测量系统中噪声源及其影响, 光学测量系统中主要噪声源贡献见表 2. 由于本文主要关注低频加速度噪声, 激光噪声相关略过不提.

表 2 LPF 在 30 mHz 处的主要光学测量系统扰动估计
Table 2. Estimated main optical metrology system disturbance of LPF at 30 mHz.

噪声源	PSD估计/ ($\text{pm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$)	估计方法
相位噪声	4	地面端到端测量
其他自由度运动拾取	1.6	基于光学平台的测量和缺陷模拟
总和	4.3	平方和根

加速度噪声会叠加到干涉仪读数噪声上, 通常表现为探测到的光束相位噪声. 相对加速度噪声 Δg 的贡献在频谱的低频部分变得尤为突出. 探测器在低频段的灵敏度受到单个 TM 加速度噪声的限制, LISA 对其幅度谱密度 (ASD) 的要求被设定为

$$S_{\text{acc}}^{1/2}(f) = 3 \sqrt{1 + \left(\frac{0.4 \text{ mHz}}{f} \right)^2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{f}{8 \text{ mHz}} \right)^4} \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}. \quad (1)$$

作为 LISA 可行性验证的 LPF 项目中, 科学

目标是使相对加速度噪声的幅度谱密度 $S_{\Delta g}^{1/2}$ 保持在 1—30 mHz 之间满足:

$$S_{\Delta g}^{1/2}(f) \leq 30 \sqrt{1 + \left(\frac{f}{3 \text{ mHz}}\right)^2} \text{ fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}. \quad (2)$$

在特征的 1 mHz 处, LPF 的科学目标为控制相对加速度噪声振幅谱密度在 $30 \text{ fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 以下. 相应地, LISA 要求加速度噪声振幅谱密度在观测频段下限 0.1 mHz 处小于 $12 \text{ fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ [11]. 在 LPF 发射前 LISA 团队对 LPF 中的噪声进行了最佳估计 [119], 在所有工作条件下预期的噪声将归因于三种主要效应, 详见表 3, 对这三种噪声行为的详细分析见 5.2 节.

5.2 基于 LISA 探路者数据的空间噪声源研究

通过分析 LPF 上各个模块传回的实验数据, 可以对通过理论预测以及仿真计算得到的模型进行实验验证, 从而找出以往理论与模型的不足之处并进行修正 [120].

对 LPF 数据中的噪声进行分离处理分析后, 可以发现所有纯噪声数据的频谱都呈现出一种共同的结构特征, 即高频上升、白噪声平台以及低频升高, 如图 4. 噪声频谱在高频部分的上升主要归因于干涉仪的激光噪声, 而频谱的低频部分表现出相当一致的行为: 在最低频率下呈现幂律关系, 随后在 1 mHz 以上的频率处合并为平坦的平台.

LPF 在较高频率 (1 mHz 以上) 的噪声表现与预期性能较为一致. 但是在更低频率处的噪声表现偏离了噪声建模. 分析 LPF 在 2016 年 4 月的运行测试期间发回的数据得到, LPF 测试质量的总相对加速度噪声在 0.1 mHz 处约为 $12 \text{ fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 在 1 mHz 处约为 $4 \text{ fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. LPF 在低频段实际噪声显著高于 LISA 要求 [100,101], 于是作为补充, LISA 团队重新估计了低频的主要噪声——驱动噪声, 并提出了新的低频噪声机制: 测试质量随机充电噪声、残余电场噪声与激光辐射压噪声.

此外, 与地面引力波探测器的情况类似, 在 LPF 观测数据中依旧有着许多毛刺的存在, 这些毛刺的成因依旧没有被完全理解, 并且可预见地成为一个艰巨且重要的任务.

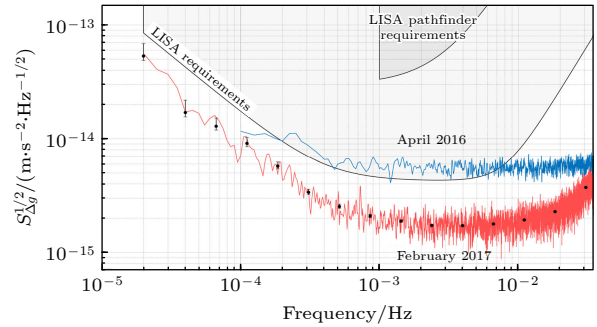


图 4 LPF 的测试质量差分加速度噪声幅度谱密度. 蓝色噪声曲线来自于 2016 年 4 月的观测数据, 红色噪声曲线来自 2017 年 2 月的观测数据. 两条黑线分别为 LISA 与 LISA 探路者的设计要求. 图片来自文献 [121]

Fig. 4. Noise spectrum for the delta g measurement of the LISA Pathfinder test masses. The blue noise line is estimated with the observation data from April 2016, and the red noise line is estimated with the data from February 2017. The two black lines represent the design requirements for LISA and LISA Pathfinder. Figure from Ref. [121].

前文所述低频噪声的主要噪声源来自于环境扰动, 因此 LPF 中数据和诊断子系统重点监控三类物理量: 温度、磁场与宇宙高能射线. 通过处理 LPF 的观测数据对 LPF 表征, 可以更新物理模型中各部分的噪声贡献, 并且重新估计之前遗漏的噪声源 [122], 对低频加速度噪声的分析如下 [123].

驱动噪声 (actuation noise) 为使测试质量在 GRS 内保持居中、沿敏感轴 (x 轴) 方向做测地线运动, 并确保两个测试质量在 x 轴上相互对齐, 电极笼上的电极必须持续施加驱动电压, 以对每个测试质量的平移和转动自由度施加控制力与控制力矩. 驱动电压的涨落将引入力噪声, 其幅值与所施加驱动力的幅度成正比. LPF 成功验证了 LISA 任务所需的关键静电驱动系统在 0.1 mHz 频率处实现 $10 \text{ fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 级别差分加速度测量的能力 [100].

表 3 LPF 发射前噪声的最佳估计

Table 3. The noise performance best estimate value before launching the LISA Pathfinder.

噪声源	主要影响频段	噪声最佳估计
静电驱动噪声	影响低频段	$S_{\text{act, BE}}^{1/2}(f) = 10.1 (1 \text{ mHz}/f) \text{ fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$
布朗白噪声	影响全频段	$S_{\text{B, BE}}^{1/2} = 7.2 \text{ fm} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$
干涉仪传感波动	影响高频段	$S_{\text{IFO, req}}^{1/2} = 4.3 (f/30 \text{ mHz}) \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$

通过在轨测量实验, LPF 成功探测到了由驱动增益波动引起的加速度噪声, 该结果表明其噪声大小与施加的驱动力成比例^[124]. 实验表明在 LPF 中, 主要的驱动噪声来源是来自不同电极驱动电路间的不相关波动所引起的力噪声, 而非由数模转换器 (DAC) 参考电压噪声所导致的“板级相关”驱动器增益噪声. 测得的增益噪声水平与地面测试中获得的有限测量结果一致, 并与 LPF 噪声预测的模型相符^[124].

驱动噪声是 LPF 中一个重要但并非占主导地位的噪声来源, 在 0.1 mHz 频率处, 这类噪声贡献为 $3.5\text{--}5 \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[125], 其 ASD 建模为^[13]

$$S_{\text{act}}^{1/2}(f) = (5.05 \pm 0.19) \left(\frac{0.1 \text{ mHz}}{f} \right) \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}. \quad (3)$$

布朗白噪声 (Brownian white noise) 真空腔内残余的气体会导致系统能量耗散, 在测试质量运动中引入额外的气体阻尼布朗噪声. 该噪声表现为白噪声形式, 在所有频率上均对探测器性能产生影响^[126]. 与黏性气体阻尼相关的布朗噪声可能主导了观测中近乎与频率无关的加速度噪声成分. 发射前通过对扭摆的实验和模拟对由气体阻尼引起的力噪声进行了估算, 这种布朗噪声的功率与残余气体的分子量 m_0 和压强 P 成正比^[126].

任务初期, 布朗白噪声的幅度谱密度为 $S_{\text{B}}^{1/2} = (5.57 \pm 0.04) \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 在所有频率高于 1 mHz 的噪声成分中均有贡献, 并在 146 天的在轨运行后下降至 $(5.2 \pm 0.1) \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. 2017 年, LPF 经历了一次整体降温过程, 设备温度从 22—23 °C 降至 11—12 °C, 此后测量得到了整个运行期间最低的布朗噪声水平, 约为 $S_{\text{B}}^{1/2} = (1.72 \pm 0.05) \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. LPF 运行过程中持续的降温与排气是导致前后测量结果中布朗噪声逐步降低的主要原因^[121]. 基于 LPF 第 66 次观测段数据的布朗噪声的 ASD 建模为^[13]

$$S_{\text{B},k=66}^{1/2}(f) = (1.78 \pm 0.15) \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}. \quad (4)$$

低频杂散电场噪声 (fluctuations due to stray electric fields) 除了提供所需的驱动力外, GRS 还是测试质量不必要的静电干扰源^[127,128]. 当测试质量居中时, 主要的静电力噪声来源是测试质量电荷 q 与杂散电场之间的相互作用. 宇宙中的高能粒子会为测试质量充电, 从而导致测试质量净带电量

与电极笼内杂散电场相互作用产生加速度噪声, 以及测试质量不规律充电与电极笼内电场相互作用产生加速度噪声, 后者将在下一项中讨论.

测试质量和电极笼表面会出现“斑点效应” (patch effects), 即表面导电区域内的电势存在空间变化^[129], 这通常由表面污染和不同晶体取向暴露区域造成^[130]. 与传感器电极相连的电子设备中可能出现电压偏移, 与斑点效应结合便形成杂散电场, 进而对带电的测试质量产生库仑力.

测试质量的电荷 q 可以通过测试质量与电极笼的电势差间接测量. 由于测试质量与电极笼间的电容 C_x 已知, 通过电极在 x 轴电极上施加幅度为 V_{mod} 、频率为 f_{mod} 的正弦波电压, 由此产生的作用力为 $F_x(f_{\text{mod}}) = -4 \frac{\partial C_x}{\partial x} V_{\text{mod}} V_{\text{TM}}$ ^[131,132]. 使用机载激光干涉仪以极高灵敏度测量 TM 在 x 轴或 ϕ 轴的差动运动, 通过对应自由度上的差动加速度可反推电驱动力, 从而在 f_{mod} 下解调出电荷量^[133]. 对电荷持续的测量提供了一个时间序列 $q(t)$, 可以用于研究电荷积累的低频行为.

更精确的电荷测量方法是利用光电效应, 通过电荷管理系统产生的紫外光直接改变测试质量电荷, 并测量 TM 所受直流力的相应变化. 定义量子产率 (apparent yield, AY) 为 TM 的电荷变化率与注入电极笼的紫外光 (UV) 功率之比. 在感兴趣的 TM 带电量范围内 ($|V_{\text{TM}}| < 100 \text{ mV}$), 量子产率可以被描述为 V_{TM} 的线性函数, 从而建立量子产率与 TM 电荷量之间的映射. 但这个方法耗时较长, 且受限于仪器低频性能以及紫外照射改变电荷所需的时间^[134].

为了测量相关的杂散电位差 Δx , LPF 在每个 x 电极上引入一个补偿电位 $\pm V_{\text{comp}}$. 可以通过测量光电效应下 TM 电荷变化的过程中 Δg 的变化来估算杂散电位^[135]. Δx 既来源于传感器内表面电位, 也来源于 GRS 电子设备. 实验室测量发现静态电位水平可高达 100 mV^[135–138]. 电子单元上的测试表明, 由电极电压波动引起的 Δx 的幅度谱密度 (ASD) 在 1 mHz 时为 $30 \mu\text{V}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[108].

LPF 发射前的数值模拟和地面实验测量提供了测试质量电荷和杂散电势的预期行为. 在任务发射前数年使用 Geant4 和 FLUKA 进行了 LPF 测试质量充电的蒙特卡罗模拟, 并且考虑了不同的太阳调制条件^[139–144]. 模拟预测在 11 年太阳活动周

期的最低点, 来自银河宇宙线的净正充电速率为 $40\text{--}70\text{ e}\cdot\text{s}^{-1}$, 当银河宇宙线通量受到抑制时, 最大值为 $20\text{--}40\text{ e}\cdot\text{s}^{-1}$. 测试质量电荷的幅度谱密度预计在 1 mHz 时达到 $0.6\text{--}0.7\text{ fC}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$.

宇宙中的天文事件, 如太阳系内的福布希下降 (Forbush decrease, FD) 现象也会影响 TM 充电. 福布希下降现象的成因是在日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME) 扩展和径向传播过程中, 银河宇宙线会比周围的太阳风更慢地扩散进入磁瓣. 因此, 当磁瓣经过观察者时, 磁瓣内的银河宇宙线空间密度相对减小^[145,146]. 对比福布希下降事件前后测试质量充电速率与粒子探测器计数的变化, 可发现 TM 充电速率与入射宇宙线通量呈强线性相关^[147]. 将 LPF 数据与国际空间站 AMS-02 磁谱仪实验及地球极地中子监测器的数据对比, 同样可得银河宇宙线与 LPF 数据之间存在相关关系^[148].

因此, 通过 LISA 任务中的两个测试质量以及三颗航天器上的辐射监测器来探测伽马射线暴 (Gamma ray burst, GRBs) 和银河系磁星爆发 (magnetar flares) 是可行的. 通过监测 TM 电荷从正到负的突变及 TM 电荷噪声的增加, 可探测来自千万秒差距外的长时标、高强度伽马射线暴以及银河系磁星爆发^[147].

LPF 运行过程中, TM1 和 TM2 的平均电荷增长率分别为 $+22.9\text{ e}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $+24.5\text{ e}\cdot\text{s}^{-1}$ (作为参考: $25\text{ e/s} \approx 10\text{ mV/day}$)^[147]. 在每个 10000 s 的时间段内, 电荷增长率的变化范围约为 $\pm 2\text{ e}\cdot\text{s}^{-1}$, 主要由低频噪声与漂移共同导致.

在任务的大部分运行阶段内, V_{TM} 通过紫外照射放电被控制在 $\pm 80\text{ mV}$ 以内. V_{TM} 的均方根 (RMS) 值通常小于 40 mV . 这种电势水平在 0.1 mHz 频率下对差分加速度噪声谱密度 $S_{\Delta g}^{1/2}$ 的贡献为 $1.6 \pm 0.2\text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^[149]. 低频杂散电场噪声的 ASD 建模为^[13]

$$S_{\text{stray}}^{1/2}(f) = (1.98 \pm 0.25) \left(\frac{0.1\text{ mHz}}{f} \right) \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}. \quad (5)$$

测试质量随机充电噪声 (TM random charging noise) TM 的随机电荷波动与任何非零电位差作用也会产生噪声. 平均杂散静电场与 TM 电荷之间的相互作用会产生由 TM 充电随机性引起的力噪声, 由宇宙射线引起的测试质量电荷波动会

与电极笼内的杂散静电场耦合产生力噪声^[135], 与施加在 TM 上的直流偏置成正比. 该噪声通过一个有效充电率 (effective charging rate) λ_{eff} 来表征, 其定义为

$$\lambda_{\text{eff}} = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} j^2 \lambda_j \text{ s}^{-1}, \quad (6)$$

其中 j 为单个事件中沉积的正负电荷的净数量, λ_j 是这些事件发生的速率. 在净充电计算中, 正负电荷相互抵消, 而正负电荷都贡献于有效充电. 充电噪声的谱密度可通过 λ_{eff} 表示^[150]:

$$S = \sqrt{2e^2 \lambda_{\text{eff}}} \text{ e}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}. \quad (7)$$

在 LPF 任务发射前, 以 2015 年底和 2016 年初预测的太阳活动估算输入的宇宙射线流量, 基于 FLUKA 与 GEANT4 进行了蒙特卡罗模拟, 得出了与 LPF 数据接近的结果. 模拟结果为: TM 净充电率约为 $32.5\text{ e}^+\cdot\text{s}^{-1}$, TM 有效充电率 λ_{eff} 约为 295.5 s^{-1} ^[151]. TM 的净充电和有效充电率在 2016 年 4 月 20 日至 23 日间进行了测量^[149], 有效充电率 λ_{eff} 在 $1000\text{--}1400\text{ s}^{-1}$ 之间, 大约是理论预期的 5 倍. 仿真模拟的净充电率与实际测量结果较为相符, 但是有效充电率相差一个数量级. 可能的原因是高能宇宙线进入电极笼后产生的二次电子仿真存在偏差^[147,152]. 因为测量的净充电值位于预测范围之中, 而有效充电值则比预期高出三到四倍. 导致这种不匹配的原因可能与带相同电荷的粒子进出 TM 相关, 即这些粒子贡献了噪声但没有贡献净充电. 且相较于高能宇宙线粒子, 低能电子 ($< 100\text{ eV}$) 受到 TM 与电极笼之间电势差的影响要大得多.

被称为低能电离 (low energy ionization, LEI) 的专门 Fortran 90 蒙特卡罗工具可以与 FLUKA 结合使用^[150]. LEI 中考虑了电离能量损失、动能发射和量子反向散射. 使用该方法模拟结果为 TM 净充电率约 $21.15\text{ e}^+\cdot\text{s}^{-1}$, TM 有效充电率约 888.5 s^{-1} . 利用 FLUKA/LEI 蒙特卡罗程序模拟研究 GRBs 和磁星爆发期间的 TM 充电行为及粒子探测器性能的研究^[153]表明, 准确追踪在电极笼与测试质量之间的间隙中运动的极低能电子路径对于正确评估其在 TM 充电中的作用至关重要.

若测试质量电压 $V_{\text{TM}} = 1\text{ V}$, 随机充电噪声对每个 TM 在 0.1 mHz 处贡献的加速度噪声约为 $3\text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 与之相对的测试质量在该频率下

的总加速度噪声预算为 $10 \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ [147]. 而预计在正常运行中测试质量随机充电噪声的 ASD 建模为 [13]

$$S_{\text{rand}}^{1/2}(f) = 0.03 \left(\frac{1 \text{ mHz}}{f} \right) \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}. \quad (8)$$

激光辐射压噪声 (laser radiation pressure fluctuations) 激光辐射压的波动会在两个测试质量上产生相应的力. LPF 测得激光强度波动约为 $0.4 \mu\text{W}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 对应的力噪声贡献约为 $2 \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ [123].

热梯度噪声 (thermal gradient effects) 温度波动可能对测量链的不同阶段或不同子系统产生影响 [99], 例如, 作用于引力参考传感器的热诱导力, 光学计量子系统中温度引起的光程变化以及测试质量相关的所有电子设备中的热效应. 因此, LTP 的核心组件周围分布了 24 个温度传感器用来监控温度变化以及 18 个加热器用于产生受控输入来校准实验响应.

热噪声的主要相互作用形式有以下几种 [154].

辐射压力效应 (thermal radiation pressure) 该效应主要来自于 GRS 内所有辐射表面发出的热光子的动量转移.

辐射计效应 (radiometer effect) 当系统存在温度梯度时, 热区与冷区之间达到平衡后, 系统会建立起稳定的压力差. 该效应可以通过自由分子状态下的蒸发理论来估算.

放气效应 (outgassing effect) GRS 内壁吸附的分子发生脱附会增加围绕 TM 的残余压力 [155].

热梯度效应会产生随时间变化的力, 根据测得的力与温度梯度变化率 $dF/d\Delta T \approx 20 \text{ pm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 和温度波动的热敏电阻估计值 [156] (在 1 mHz 时测得为 $10 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 0.1 mHz 时为 $50 \mu\text{K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$), 该效应产生的噪声在 0.1 mHz 处的上限为 $1 \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. 为了将热梯度引起的力噪声保持在大约整体力噪声预算的 10% 以内, GRS 的温差波动必须小于 $10^{-5} \text{ K}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ [154].

磁噪声 (magnetic force effects) 在估算磁噪声对整体噪声预算的贡献之前, 首先需要对 LPF 测试质量的磁性特征进行在轨表征. 该表征过程不仅有助于量化磁噪声的影响, 还可将该噪声成分从干涉仪读数中有效剔除 [157].

可以通过在测试质量位置注入受控磁场来估

计 M_x , M_y , M_z , χ_o 和 χ_e 等磁性参数. 该磁场由布置在每个测试质量两侧的星载感应线圈通入正弦电流产生, 线圈生成的磁场对测试质量施加磁力和磁力矩, 进而激发其动力学响应. 其中, 作用于测试质量的磁力包含两个频率成分, 而磁力矩则在单一频率上振荡. 通过对干涉仪输出的三个观测量进行适当处理, 可用于估计测试质量的磁性参数. 这三个观测量分别是两个测试质量之间的差分位移 δx_{12} , 以及 TM1 绕 y 轴和 z 轴的旋转 θ_{1y} 和 θ_{1z} . 测试质量所受的诱导力可通过其差分加速度进行评估, 在假设远端测试质量所受磁力可忽略的前提下, 可利用近端测试质量的受力情况估算其磁参数. 对不同频率下估算得到的磁化率进行分析表明, 该参数在低频段可视为常数 [158].

从磁噪声的估计值 [123] 可以推测, 其贡献与其他噪声, 如充电噪声或驱动噪声的贡献相当 [112]. 在 2017 年 2 月的噪声测试期间, 磁感应加速度噪声为: 在 1 mHz 时为 $0.25_{-0.08}^{+0.15} \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 在 0.1 mHz 时为 $1.01_{-0.24}^{+0.73} \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ [159]. 根据上述估计, 磁场对 Δg 的贡献在 0.1 mHz 处占噪声功率的 $1.46_{-0.77}^{+3.73}\%$ [159].

前端电子学噪声 (front-end electronics noise) 前端电子噪声的潜在来源较为多样, 其中主要包括电荷管理系统、温度波动、基准电压噪声以及来自其他子系统的串扰. 测试质量的运动通过激光干涉仪在选定的自由度上进行测量, 并通过 GRS 电容传感系统在所有自由度上进行感测. 电容传感系统作为光学控制自由度的备份, 可在光学测量系统发生故障时提供替代测量手段. 该技术通常与光学计量结合使用, 为航天器的无拖曳控制系统提供参考信号 [107]. 电荷管理系统引入的主要噪声如下 [100].

- 1) 电容测量的灵敏度受限于前级电路的性能.
- 2) 跨阻放大器 (trans-impedance amplifier, TIA) 的噪声主要来源于反馈环路中放大器电流噪声的贡献.
- 3) 变压器损耗所引入的热噪声是该电路中的主要噪声源 [108].
- 4) 温度波动可能导致窄带滤波器增益的不稳定性. 用于设定高通与低通滤波器截止频率的电容与跨阻放大器中的电容为同一类型, 因此温度变化引起的电容漂移可能改变中心频率 (100 kHz) 处的增益, 进而引入低频噪声成分.

5) 最终传感电路阶段的噪声, 由于强度与频率成反比也称“ $1/f$ ”噪声, 包括低通滤波器噪声和源自其内部前级电路的模数转换器噪声, 可以通过在整个传感电路中适当分配增益从而在 1 mHz 带宽内进行衰减. 这要求大部分增益设置在跨阻放大器 and 主放大器上. 如果没有实施高分辨率-宽范围增益切换, 16 位模数转换器的噪声将是噪声预算中的主要噪声源.

综上, 经过对 LPF 数据的统计处理, 已分析建模的低频相对加速度噪声谱如图 5 所示, 各相对加速度噪声源在 0.1 mHz 处的贡献列在表 4 中.

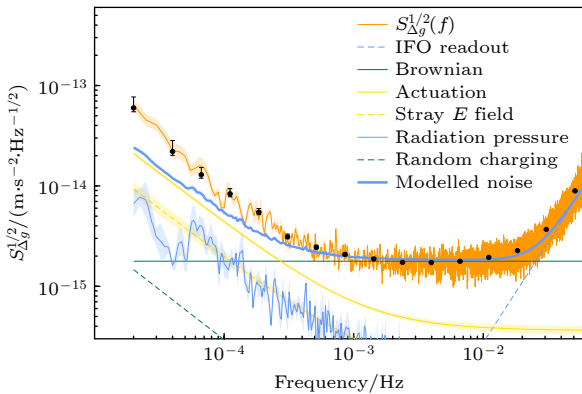


图 5 LPF 在 2017 年 2 月第 66 次运行期间测量的 ASD $S_{\Delta g}^{1/2}$ 以及已建模噪声的对比图. 图片来自文献 [13]

Fig. 5. The measured ASD $S_{\Delta g}^{1/2}$ of run #66 of February 2017, compared with the modeled noise for that measurement. Figure from Ref. [13].

表 4 LPF 在 0.1 mHz 处已建模的的主要差分加速度扰动统计

Table 4. Statistical summary of modeled main differential acceleration disturbance of LPF at 0.1 mHz.

噪声源	ASD估计值/ [(fm.s ⁻² .Hz ^{-1/2})]	在总噪声PSD 模型中占比
驱动噪声(x轴)	5.05 ± 0.19	65.9%
激光辐射压噪声	2	10.3%
杂散电压噪声	1.98 ± 0.25	10.1%
布朗噪声	1.78 ± 0.15	8.2%
磁噪声	1.01 ^{+0.73} _{-0.24}	2.6%
温度梯度噪声	1	2.6%
随机充电噪声	0.3	0.2%
已建模噪声总和	6.22	1

从图 5 可见, 目前的低频加速度噪声建模仍未能完全解释 LPF 的加速度噪声谱. 尽管 LPF 提供了宝贵的在轨数据补充, 但目前对空间引力波探测器低频噪声的建模与抑制仍面临诸多挑战. 在温度

扰动方面, 放气效应已被证实具有显著影响, 但目前尚缺乏有效的建模手段. 在磁场干扰方面, 现有的星内磁场建模仍较为粗糙. 航天器内部的磁场环境复杂, 不仅受到行星际磁场的影响, 还来源于星上各类电子设备 (如磁通门磁力仪、微推力器等) 产生的磁场. 已有研究通过在轨磁注入实验对仪器磁参数进行了高精度估计, 验证了在轨监测星内磁场变化的可行性 [158]. 相比之下, 行星际磁场的频率较低, 强度约低一个数量级, 且与星际等离子体变化表现出较强的相关性 [112], 具备与太阳系内其他监测卫星联合校准的潜力. 在测试质量电荷管理方面, 目前对测试质量净电荷充电速率的建模与实验数据符合较好, 但对充电速率波动的建模仿真与实测结果仍存在较大差距. 此外, 地面引力波探测器中存在的“毛刺”与数据“缺陷”等问题, 也需在空间引力波探测器的设计阶段予以重点分析与针对性解决.

总的来说, 当前空间引力波探测器的多项关键技术指标已得到在轨验证, 相关验证任务也充分证明了空间引力波探测的可行性. 然而, 在噪声管理方面, 尤其是在低频段的噪声控制与抑制, 当前技术水平与实际运行需求之间仍存在一定差距, 其中关键问题之一在于对环境噪声的有效识别与消除. 对环境噪声的识别与建模不仅有助于从科学数据中剔除噪声成分, 也为优化航天器设计以抑制环境影响提供了依据. 此外, 通过探索自然环境参数与引力波探测器信号之间的耦合机制, 还存在实现基于单一探测器的多信使天文观测的潜在可能.

5.3 LISA 探路者任务中的毛刺研究

毛刺这一术语源自地面引力波探测器的相关研究, 在 LPF 任务中大量存在. 在 LPF 的正常运行中, 毛刺的发生频率约为每天一次, 吸引了大量的关注 [121,123].

在 LPF 的运行过程中, 发现了两类不同的毛刺 [13]: 一类是有明显冲量的毛刺 (impulse-carrying glitches), 或称为单边毛刺, 该类型在 LPF 数据中较为常见. 另一类是频率较高几乎没有冲量的毛刺 (fast, low-impulse glitches), 可称为双边震荡毛刺, 其特征为持续时间短且总冲量极小, 该类型较为少见.

LPF 的数据运行阶段内共发现了 432 个单边毛刺信号 (其中 98 个来自标准运行, 334 个来自冷

运行), 而双边震荡毛刺包含 4 次标准运行毛刺和 152 次冷运行毛刺^[104].

此外, 在差分加速度数据 Δg 中发现了由航天器与微陨石碰撞引起的一些信号, 碰撞导致了航天器的明确加速度变化, LPF 的数据运行阶段内共检测出 72 次微陨石撞击事件, 对应于每年 120 次的微陨石撞击频率^[160]. 数据中还发现有特定设备运行时出现的毛刺信号, 这类毛刺可以通过关闭其源头设备来消除.

这两类毛刺的一些简单的统计特性如下: 这些毛刺不会导致 Δg 的永久性变化, 也没有在来自 TM 的差分扭矩、TM 和航天器的动力学自由度或任何环境和仪器监控系统的数据中发现与这些毛刺相应的事件. 这排除了多种可能机制, 例如 LPF 上的机械松弛、来自 GRS 电极的伪电压、微流星撞击、航天器或测试质量控制执行器的冲击、激光强度脉冲以及磁场或辐射异常等. 毛刺的发生率大致满足指数分布, 在正常运行中满足平均发生率为 $\lambda = 0.96 \pm_{0.09}^{0.11} / d$ 的指数分布, 在冷运行中满足 $\lambda = 32 \pm_2^2 / d$ 的指数分布^[104]. 并且温度会显著影响毛刺率, 当 LPF 载荷温度降至接近 0 °C 时, 毛刺率显著增加至约 30 次/天^[121]. 在低温下经过一周的观测后, 毛刺率开始缓慢下降. 当温度恢复到大约 10 °C 时, 毛刺率回降至约每天 1 次.

分别独立通过 GRS 电容传感以及 OMS 干涉测量两种方式测量 TM 的位移, 并将这两种方式测量得到的位移量相减, 可以得到 GRS 或 OMS 系统引入的毛刺. 通过比较后发现, 单边毛刺在两个通道内不存在显著差异. 因此可以判断这类单边毛刺是由作用在测试质量上的真实力引起的, 而不是由于读数系统产生的^[104].

与此同时, 冷运行中发现的双边震荡毛刺有 55 个与 OMS 中参考干涉仪的数据相关, 有 4 个与频率干涉仪的数据相关, 有 28 个与 X1 干涉仪的数据相关. 标准运行中发现的 4 个双边震荡毛刺有 2 个与 OMS 时间序列中的事件相关. 通过对比单边毛刺在标准运行与冷运行中的发生频率, 可以发现总冲量引起两个测试质量靠近, 并且持续时间较短的此类毛刺在冷运行中的发生频率大幅上升, 而不满足此条件的单边毛刺在冷运行中的频率无明显变化. 可以推测单边毛刺的发生与热效应强相关, 该类毛刺在标准运行中占比约为 50%. 此外, 未发现上述毛刺事件与磁力计与温度计通道的数

据有相关性^[104]. 因此推测双边震荡毛刺由干涉仪读数系统中的瞬变引起, 推测这些瞬变是由光学系统中的强应力导致的. 这种类型的毛刺在正常条件下非常罕见 (每月不到一次), 但是在冷运行期间, 由于光学硬件相对不稳定, 它们的发生频率有所增加. 类似的事件也出现在 GRACE Follow-on 任务中使用的类似干涉仪上^[98].

LPF 中毛刺的物理本质仍有待物理解释, 对于持续时间不到一分钟的毛刺有多种可能的物理解释, 包括放气现象、电子器件事件以及涡电流瞬变等^[104]:

电子器件事件 (electronics events) 这种猜测指出毛刺可能是由用来控制 TM 的电子设备中的电压瞬变引起的. 面向 TM x 轴方向的电极都是由独立的放大器驱动的, 若其中一个放大器发生电压瞬变便会对测试质量产生一个力, 从而导致毛刺的产生.

涡电流瞬变 (eddy current transients) 由于高频磁场可能会在测试质量内部诱发涡流从而对其施加洛伦兹力, 并且该效应是二次的, 会将高频磁谱线的低频幅度波动转化为相应的低频力^[124].

放气事件 (outgassing events) 一种可能的力源是测试质量与其周围气体分子之间的动量交换. 这种交换以布朗噪声的形式存在, 并在频率高于约 1 mHz 时主导了 LPF 的噪声预算^[123].

对于持续时间从几分钟到几小时的长时间毛刺, 目前唯一能够与大多数观测证据相符的可信解释是由放气所导致的. 不过与地面引力波仪器的情况不同, LISA 所探测的许多天体信号在探测频段中存在的时间远长于典型的毛刺, 这将有助于区分这两类信号. 此外, 由于 LISA 在航天器与载荷设计上的复杂性远高于 LPF, 可能还会出现新的意料之外的毛刺. 由于在完整的 LISA 系统中毛刺的发生情况及其形态仍不确定, 较为保守的做法是制定一套稳健的数据分析策略, 以在后续处理中减轻其影响.

对这些毛刺进行特征化并准确估计其波形是 LISA 整体数据分析计划的重要组成部分之一. 对于单个的空间引力波探测任务 (例如 LISA) 来说, 不存在多个独立干涉仪的数据互相参考, 也没有任何“无信号源”数据, 即没有引力波信号的“纯本底”数据来衡量仪器噪声. 对于 LISA 来说, 信号与噪声的测量必须同步进行^[161].

由于毛刺的重要影响, LISA 联盟明确将含有毛刺的参数估计纳入正式启动前核心准备工作的一部分. 为此, 一系列名为 LISA 数据挑战 (LISA data challenge, LDC) 的活动正在进行^[162], 该挑战旨在开发并展示数据分析的准备进度. LDC 中一个代号为“Spritz”的挑战专注于研究毛刺和缺陷对来自大质量双黑洞 (massive black hole binary, MBHB) 信号重建的影响. 该挑战使用的毛刺生成器源于 Baghi 等^[163]的研究, 他们通过纯唯象的角度, 使用 shapelets 基函数构建模板库, 并通过匹配滤波来对 LPF 任务中的毛刺进行表征, 同时以此构建相应的毛刺生成器.

过去, 在 LISA 项目和地基引力波探测器的背景下, 对存在毛刺的情况下搜索引力波爆发现象的方法进行了探索. 分析表明, 毛刺最关键的特性是其持续时间, 毛刺的持续时间不同时, 其对引力波信号探测的影响从完全丢失引力波信号到几乎无影响均有可能^[164,165]. LIGO 开发了许多用于毛刺的分析方法, 例如基于小波的贝叶斯算法^[75], 该算法在大多数 LIGO 观测到的并合事件中, 起到了模型无关波形重构的关键作用. 类似地, Robson 与 Cornish^[164]提出基于正弦-高斯小波模型的准贝叶斯方法, 使用小波在时间延迟干涉 (time-delay interferometry, TDI) 通道中对源自不同航天器的毛刺与引力波爆发进行清晰的区分. Spadaro 等^[166]的研究指出, 在频域中处理毛刺时将 LISA 的响应函数 (即 TDI 信号) 用加速度而非通常使用的位移来表示, 会带来显著优势. Sauter 等^[167]提出可以将某一特定毛刺模型作为另一种信号类型包含到现有的全局拟合 (global fit) 框架中, 其参数也可以被加入到整个参数集中.

随着人工智能的发展以及广泛运用, 使用人工智能辅助检测、表征并去除毛刺已经成为新兴的研究方向. Houba 等^[168]使用卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 在 TDI 数据中识别异常信号, 并使用混合神经网络 (hybrid neural network, HNN) 区分引力波信号与毛刺, 随后使用长短期记忆网络 (long short-term memory, LSTM) 来对毛刺建模并用于后续的扣除. Muratore 等^[169]提出了一个数据分析流水线用来在毛刺存在的情况下估计 MBHB 信号的参数, 其使用可逆跳跃马尔可夫链蒙特卡罗 (reversible jump Markov chain Monte Carlo) 与并行退火 (parallel tempering) 算

法来检测并表征毛刺信号.

6 未来空间引力波探测器表征展望

地面引力波探测器表征工作表明, 其研究范式可归纳为数据驱动与仪器驱动两条相互补充的发展路径. 其一是数据驱动路径, 即从观测数据出发识别异常特征 (如毛刺率或信噪比的显著变化), 进而提取其统计特性与基本模式, 并在此基础上发展数据质量标记及噪声抑制方法, 实现对噪声的识别与削弱. 另一方面是仪器驱动路径, 即结合对探测器输出及噪声特征的长期认知 (如已知环境扰源、周期性变化及特征频率等), 利用自动化监测工具与辅助通道信息开展针对性分析, 从而定位噪声来源并指导仪器优化或干预措施.

以数据特征来看, LPF 的辅助通道数据主要由两类构成: 一类为各子系统的物理测量通道, 另一类为仪器运行日志, 包括航天器操作记录及各子系统状态信息. 然而, 在对 LPF 数据进行深入分析的过程中发现, 尽管其已具备温度、磁场与辐射等环境监测数据, 以及 GRS 与 OMS 子系统的关键输出, 但整体表征工作仍然受到显著的数据缺口限制. 这一不足直接影响了部分噪声源的识别与建模能力, 表明辅助通道体系在设计阶段仍存在优化空间.

基于 LPF 在轨观测结果, 可以进一步归纳出若干关键的监控需求与工程改进方向. 首先, 在热相关效应方面, 冷运行阶段观测到的大量低冲量毛刺被认为与光学平台的热弹性形变密切相关^[104]. 同时, 光学平台的形变会直接导致激光链路失准. 因此, 有必要配置高精度温度监测与结构应力传感器, 并建立光路对准监测与自动重整机制. 其次, 在气体相关效应方面, 大量毛刺事件被认为源于测试质量表面附着气体的释放 (“放气”效应), 同时 GRS 内部残余气压还将影响布朗噪声等热噪声水平. 因此, 有必要在任务设计中加入有效的烘烤 (bakeout) 方案, 例如在转轨阶段利用太阳能帆板供电实施烘烤, 以去除表面吸附气体并提升真空度. 由于 LPF 只能通过热效应间接推算真空腔内的残余气压, 未来的探测任务应配备精度达到 μPa 量级的真空气压计, 以实时监控 GRS 内部气压的微小波动. 或是在设计时消除真空腔内部气体释放表面的非对称性, 以尽可能减少该类事件的影响.

此外, 磁场扰动及仪器操作同样是重要噪声来源, 应配备高带宽磁力计 (例如 kHz 量级)^[124], 并同步记录执行单元动作及电路状态信息, 以支持后续的数据溯源分析. 另一方面, LPF 数据分析还表明, 部分环境参数 (如磁场及测试质量充电) 与太阳活动具有相关性, 其变化趋势与其他空间探测任务 (如 ACE 与 WIND 卫星) 观测结果一致^[112,147]. 这一结果提示, 在未来空间引力波探测任务中, 可将外部天文卫星数据纳入辅助信息体系, 以提升对空间环境扰动的整体认知能力, 这也为多信使天文学展示了新的可能.

从探测器设计角度来看, 以 LISA 为代表的任务通常采用多星编队构型, 而非 LPF 所使用的单星系统. 多星结构引入了激光链路对准、星间距离测量、时钟同步及编队几何构型等额外自由度. 这些自由度均需通过专门的辅助通道进行记录与监测, 以保障最终探测性能^[170].

在测量体系方面, 以 LISA 为代表的空间引力波探测任务需在航天器之间建立三条双向激光链路, 通过干涉测量实现对测试质量间距皮米量级变化的高精度探测. 该体系对噪声极为敏感, 其中激光相位噪声会直接耦合至测量结果, 需通过锁定至稳定参考源并结合 TDI 算法在地面进行后处理以实现抑制. 同时, 激光振幅噪声不仅可通过非理想干涉过程转化为等效相位噪声, 还会通过辐射压作用影响测试质量的运动, 因此在测量频带内同样需要受到严格控制. 除干涉测量外, 星间激光链路还承担绝对测距与信息传输功能. 链路信号通常包含主载波、时钟边带拍频信号及导频分量, 并叠加承载伪随机噪声 (pseudo random noise, PRN) 测距与通信信息的频率边带^[90]. 测距信息通过延迟锁相环 (delay-locked loop, DLL) 从 PRN 边带中提取: 系统利用本地存储的 PRN 码副本, 与接收信号进行相关运算以估计传播时延. 典型 PRN 码率约为 1.25 MHz、长度为 1024 码元, 对应约百公里量级的无模糊测距范围; 结合轨道信息及测试质量自由落体条件进行后处理后, 测距精度可由米量级提升至厘米量级^[171,172]. 然而, PRN 测距与激光相位测量在频段覆盖与噪声特性上存在显著差异, 需要通过联合建模与数据融合加以协同利用. 同时, 测距过程对本地时钟的依赖, 使测距误差与时钟噪声及链路传播时延产生耦合. 此外, 空间等离子体等环境因素可能引入频率相关的传播延迟, 在不同

链路之间形成非平稳误差. 因此, 伪码测距误差、时钟误差及传播效应需统一纳入链路模型中进行系统性表征与校准. 在具体误差来源方面, 卫星姿态变化会引起光程长度变化, 这种效应被称为倾斜-长度 (tilt-to-length, TTL) 耦合. 此外, 航天器内部因素 (如光学平台光路未对准) 同样会引入 TTL 耦合, 使其成为空间激光干涉测量中的重要误差来源之一. 同时, 电磁波在非理想真空中的传播会受到太阳风、日冕物质抛射以及行星磁场等天文等离子体事件的影响, 从而引入附加的传播延迟与相位扰动. 这些效应均对测量精度构成潜在限制, 需要通过专门手段进行监测与建模.

针对上述挑战, 可通过一系列工程与观测手段加以缓解. 例如, 对于 TTL 耦合问题, 可采用差分波前传感 (differential wavefront sensing, DWS) 技术, 利用远场入射光束与本地激光构建参考干涉仪, 从两束激光束的拍频信号中跟踪纳米级平移和纳弧度级倾斜, 以实现 TTL 耦合的在轨标定与校准^[173,174]. GRACE Follow-On 的相关研究表明, 由卫星指向变化引起的 TTL 耦合系数可以通过质心标定 (center-of-mass calibration, CMC) 机动来主动测量^[175]. 此外, 在以时钟边带调制与伪随机码测距作为主要链路校准手段的基础上, 记录本地时钟数据以及独立测距系统的数据也同样重要. 例如通过第三方星体获取轨道位置信息, 从而获取各自的位置与时钟信息^[170]. 航天器上记录这些信息能够为处理时钟同步误差与星间测距误差提供额外的冗余与可靠参考.

因此, 在多星激光链路系统中, 各类噪声源不再以独立形式存在, 而是通过链路结构在多个 TDI 通道中混合呈现. 这一特征要求探测器表征方法从传统的“单通道分析”发展为“网络化联合分析”, 通过融合时延校准、时钟同步、链路建模及编队动力学信息, 构建统一的系统级表征框架. 在该框架下, 辅助通道的作用也由单一噪声监测工具, 转变为支撑多源信息融合的关键基础. LPF 的实际结果表明, 这种方法具有显著效果: 约一半的毛刺事件与温度变化具有显著相关性, 通过温度通道进行识别与剔除后, 可将有效连续观测时长提高约一倍. 进一步结合排气与降温操作以及数据后处理, 可获得最长达 18 天的连续高质量观测数据^[121]. 此外, 与地面探测器类似, LPF 中辅助通道与主通道之间在部分频段存在显著相关性, 表明基于相关

性的噪声扣除方法在空间任务中同样适用. 表 5 总结了空间引力波探测中的主要潜在噪声源及对应的监控需求. 特别地, 针对 LPF 表征工作中暴露出的数据缺漏, 本文在相应位置以“*”号标记了建议补充的关键监控通道, 从而为未来探测器设计提供参考依据.

表 5 空间引力波探测器潜在噪声源与监控通道需求 (未安装于 LPF 中的通道标记为*).

Table 5. Potential noise sources of space-based gravitational wave detectors and requirements for monitoring channels (channels not installed on LPF are marked with *).

主要噪声源	监控通道
激光噪声	通过激光干涉参考通道监控激光光束扰动
	光学平台结构热稳定性监控通道提供光学平台形变扰动信息*
	光束对准监控防止激光失准*
热噪声	安装在 TM 周边的温度计实时监控温度变化
	使用加热器进行热注入实验测量核心组件热参数
	安装真空压力计记录 GRS 内气压大小*
磁噪声	安装在 TM 周边的磁力计实时监控磁场变化
	通过磁注入实验测量核心组件磁参数
	使用粒子探测器测量银河宇宙线流量以推测 TM 充电速率
充电噪声	使用电极笼施加可控电场引起 TM 加速度变化计算 TM 带电量
	利用光电效应测量 TM 与电极笼间电势差得出 TM 带电量
	通过激光干涉高精度监控 TM 残余加速度
驱动噪声	使用 TM 与电极笼间电容感应低精度监控 TM 残余加速度
	激光链路对准 远场与本地光束干涉构成参考通道*
星间测距噪声	星间独立测距子系统作为参考通道*
时钟同步噪声	本地时钟状态监测数据作为参考通道*

从工程实施角度来看, 对探测器的表征应贯穿探测器的设计到运行的全阶段. 特别是空间任务在发射后难以进行硬件干预, 因此需在地面阶段开展充分的系统验证与环境测试. 总体策略应遵循“先硬件、后软件”的原则, 即优先通过硬件设计优化降低噪声源, 再在在轨阶段通过数据处理进一步提升性能. 为此, 应开展针对关键子系统 (如磁场环境、充电效应及放气过程) 的精细建模与实验研究, 并结合系统化的噪声注入实验, 以验证各类噪声源的实际贡献. 根据 LPF 数据的特征, 更应对表现出显著噪声贡献的子系统开展更具针对性的实验研究. 例如, 在 高能宇宙线充电效应的模拟中, 应纳入此前未被充分考虑的二次粒子贡献, 更加贴合实

际物理过程, 得到更准确的模拟结果. 为了更好地实现卫星磁参数的在轨精确标定, 并在数据处理中更可靠地估计磁噪声, 探测器有必要在地面测试中对测试质量周围的磁场环境进行更加系统和精细的测量与建模. 同时, 还应针对真空腔内相关器件的放气效应开展更高精度的实验研究, 以评估此类气体释放事件是否存在于构成 GRS 内部的各类表面与材料中, 以此验证 LPF 任务中观测到的大量毛刺的潜在物理来源. 地面实验也应开展更系统和广泛的噪声注入测试. 通过向仪器注入特定形式的噪声并分析其数据响应, 可更有效地验证或排除某些噪声源的贡献, 从而进一步压低相应噪声项的影响. 在轨注入实验可以为后续数据分析、噪声溯源与噪声抑制提供关键校准信息, 这都离不开地面噪声注入提供的信息.

最后, 从数据分析方法角度来看, 地面引力波探测器中发展出的多种成熟算法在方法论上具有良好的通用性. 表 6 按应用场景对其中具有代表性的算法与方法进行了分类总结. 总体而言, 部分方法主要面向数据本身开展分析, 其实现过程对具体物理模型依赖较弱, 因而具有较强的跨平台适用性, 可较为直接地应用于空间引力波探测器的表征体系. 例如, 基于辅助通道相关性的噪声抑制方法通过刻画主通道与辅助通道之间的统计关系, 对耦合噪声进行建模与扣除. 这类方法不依赖于噪声的具体物理来源, 因此在 LPF 及后续空间任务中同样适用, 并可扩展至多种线性与非线性噪声消除算法框架. 进一步地, 部分典型算法体现出更为显著的“模型无关”特征, 使其在不同探测平台之间具备更强的迁移能力. 例如, Omicron 算法基于时频分析对时间序列数据进行近实时处理并生成触发器, 无需预设噪声模型; HVeto 算法则通过分层筛选通道间的统计相关性, 实现辅助通道分类与噪声源定位. 因此, 此类方法在空间引力波探测任务中具有直接应用潜力, 可作为构建在轨数据质量评估与噪声诊断体系的重要基础. 需要指出的是, 尽管上述方法在理论上具有良好的可迁移性, 但空间探测任务在观测频段、采样特性、多星耦合结构以及辅助通道配置等方面均与地面探测器存在显著差异. 因此, 在实际应用过程中仍需针对具体任务特性对算法参数、统计假设及实现方式进行适应性调整, 以确保其有效性与鲁棒性.

表 6 LIGO 可迁移至空间引力波探测器的算法/方法列表

Table 6. List of LIGO algorithms/methods transferable to space-based gravitational-wave detectors.

应用场景	处理方法	可迁移性依据	差异与挑战
噪声源定位与通道筛选	基于统计相关性的层级筛选方法(HVeto)	依赖通道间的统计相关性进行显著性评估, 对探测器具体结构依赖较弱	多星编队结构在引入星间相关性的同时, 也导致通道耦合关系更加复杂, 增加了判别难度
耦合噪声建模与扣除	基于辅助通道相关性的噪声抑制算法(gwsubtract, GreedySub)	利用辅助通道与主通道之间的相关性信息进行建模, 无需显式构建噪声物理机制模型	空间任务中噪声耦合路径更加复杂, 且可用辅助通道数量及类型相对有限, 限制降噪能力
瞬态事件检测与触发生成	基于小波变换的事件触发生成器(Omicron, kleineWelle)	基于时频局域特征提取, 无需预设具体噪声模型, 具有良好的通用性	空间探测器的数据采样率及目标频段范围存在差异, 需要针对性调整算法参数
瞬态事件分析	基于多通道流的时频局域分析工具(OmegaC, WdqScan)	不依赖具体物理模型, 侧重于表征数据的局部时频结构特征	空间任务频段分布不同, 且辅助通道体系存在显著差异, 影响分析结果的可解释性
实时数据质量评估	基于机器学习的实时毛刺识别方法(iDQ)	支持多种分类模型, 对具体物理机制依赖较弱	依赖地面探测器成熟的环境监测体系, 迁移至空间任务需基于新数据重新训练与验证模型

7 总结与展望

在引力波探测与数据处理流程中, 探测器表征是核心组成部分. 本文总结了 LVK 合作组在地面引力波探测器表征方面发展出的主要方法及其成果, 详细介绍了 LIGO 表征工作常用的算法, 简要介绍了基于表征结果的数据质量否决、引力波事件验证以及噪声抑制技术.

在空间引力波探测任务方面, 本文首先概述了国际上主要的空间引力波探测计划, 并重点介绍了 LISA 探路者任务, 详细阐述了其各子系统及监测设备的设计方案, 在此基础上系统梳理了 LISA 探路者在低频段的主要噪声来源及其贡献. 结合各类噪声源的理论建模^[13], 可估算 LISA 探路者在 0.1 mHz 处的总加速度噪声幅度谱密度约为 $6.22 \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. 该结果满足 LISA 探路者的科学目标, 也低于 LISA 在观测频段下限 (0.1 mHz) 要求的 $12 \text{ fm}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. 此外, LPF 的在轨数据揭示了多类空间环境特有的毛刺. 本文介绍了目前已识别的两类主要毛刺类型, 并总结了相关的统计特征与可能的物理来源. 其中最显著的机制为放气效应, 因此对测试质量进行充分烘烤以及实施在轨排气均至关重要. 随后, 本文结合地面引力波探测器的表征经验与 LISA 探路者的数据分析结果, 给出了对未来空间引力波探测器表征工作的展望, 并为空间引力波探测器的辅助通道设计提出了若干建议.

总体而言, 地面引力波探测器已建立起成熟的表征体系, 其方法论、算法框架与工程经验为未来空间探测器的表征研究提供了坚实基础. LISA 探路者任务贡献了宝贵的在轨数据, 揭示多类关键噪

声问题, 为空间噪声建模与溯源研究积累了重要经验. 然而, 相较于已有的单星技术验证任务, 未来多星编队空间引力波探测器将引入姿态同步、长臂激光链路等新的扰动来源, 表征工作所面临的复杂性将显著提升, 也为未来的噪声识别、监控与抑制提出了更高要求.

感谢中国科学院大学太极实验室的沈庭扬博士研究生和孙慧博士研究生在相关问题讨论中提供的帮助.

参考文献

- [1] Einstein A 1916 *Relativitäts- theorie, Annale der Physic* **49** 769
- [2] Aasi J, Abbott B, Abbott R, et al. 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 074001
- [3] Acernese F, Agathos M, Agatsuma K, et al. 2014 *Class. Quantum Grav.* **32** 024001
- [4] Akutsu T, Ando M, Arai K, Arai Y, Araki S, Araya A, Aritomi N, Aso Y, Bae S, Bae Y, et al. 2021 *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2021** 05A101
- [5] Huang X M, Liu J, Guo Y F, Ma Y Q, Ma Y B, Wang H Y, Wang M Y, Wu B, Yang S, You Z Q, Zhang F, Zhang T, Zhao Y H, Zhu X J 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 200401 (in Chinese) [黄小曼, 刘见, 郭超凡, 马怡秋, 马宇波, 王浩宇, 王梦瑶, 吴斌, 杨圣, 尤志强, 张帆, 张腾, 肇宇航, 朱兴江 2025 物理学报 **74** 200401]
- [6] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 061102
- [7] Abbott R, Abbott T, Acernese F, et al. 2023 *Phys. Rev. X* **13** 041039
- [8] Danzmann K 2000 *Advances in Space Research* **25** 1129
- [9] Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. 2016 *Class. Quantum Grav.* **33** 035010
- [10] Hu W R, Wu Y L 2017 *Natl. Sci. Rev.* **4** 685
- [11] Amaro-Seoane P, Audley H, Babak S, et al. 2017 *arXiv: 1702.00786[astro-ph.IM]*
- [12] Ni W T 2024 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **54** 270402
- [13] Castelli E 2020 *Ph. D. Dissertation* (Trento : Università degli studi di Trento)
- [14] Robinet F, Arnaud N, Leroy N, Lundgren A, Macleod D,

- McIver J 2020 *SoftwareX* **12** 100620
- [15] Smith J R, Abbott T, Hirose E, Leroy N, Macleod D, McIver J, Saulson P, Shawhan P 2011 *Class. Quantum Grav.* **28** 235005
- [16] McNamara P W, LISA Pathfinder Team 2006 *AIP Conf. Proc.* **873** 49
- [17] Bachman B, De Vine G, Dickson J, et al. 2017 *J. Phys. Conf. Ser.* **840** 012011
- [18] The Taiji Scientific Collaboration 2021 *Commun. Phys.* **4** 34
- [19] Luo J, Bai Y Z, Cai L, et al. 2020 *Class. Quantum Grav.* **37** 185013
- [20] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. 2020 *Class. Quantum Grav.* **37** 055002
- [21] Saulson P R 1994 *Resonant Mass Gravitational Wave Detectors* (Singapore: World Scientific) pp215–236
- [22] Evans M, Adhikari R X, Afle C, et al. 2021 arXiv: 2109.09882[astro-ph.IM]
- [23] Punturo M, Abernathy M, Acernese F, et al. 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 194002
- [24] Ackley K, Adya V, Agrawal P, et al. 2020 *Publ. Astron. Soc. Aust.* **37** e047
- [25] Effler A, Schofield R, Frolov V, González G, Kawabe K, Smith J, Birch J, McCarthy R 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 035017
- [26] Nguyen P, Schofield R, Effler A, et al. 2021 *Class. Quantum Grav.* **38** 145001
- [27] Davis D, Areeda J S, Berger B K, et al. 2021 *Class. Quantum Grav.* **38** 135014
- [28] LIGO Scientific Collaboration <https://pem.ligo.org/> [2026-02-27]
- [29] David Shoemaker A M Rainer Weiss 1996 Physics environment monitoring design requirements document. *Tech. Rep. T960127*, LIGO Scientific Collaboration
- [30] Marin A, Shoemaker D 1996 Physical environmental monitor conceptual design. *Tech. Rep. T960145*, LIGO Scientific Collaboration
- [31] Tsai V 2001 Ligo physics environmental monitoring at the 40-meter prototype. *Tech. Rep. T010161*, LIGO Scientific Collaboration
- [32] Blackburn L, Cadonati L, Caride S, et al. 2008 *Class. Quantum Grav.* **25** 184004
- [33] McNabb J, Ashley M, Finn L, Rothhoff E, Stuver A, Summerscales T, Sutton P, Tibbits M, Thorne K, Zaleski K 2004 *Class. Quantum Grav.* **21** S1705
- [34] Klimentenko S 2005 Burstmon diagnostic of detector noise during s4 run. *Tech. Rep. G050192*, LIGO Scientific Collaboration
- [35] Robinet F, the LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, et al. 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 194012
- [36] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. 2018 *Class. Quantum Grav.* **35** 065010
- [37] LIGO Scientific Collaboration 2007 Tuning matched filter searches for compact binary coalescence. *Tech. Rep. T070109*, LIGO Scientific Collaboration
- [38] Grote H, for the LIGO Scientific Collaboration, et al. 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084003
- [39] Chatterji S, Blackburn L, Martin G, Katsavounidis E 2004 *Class. Quantum Grav.* **21** S1809
- [40] Chatterji S K 2005 *Ph. D. Dissertation* (Cambridge : Massachusetts Institute of Technology)
- [41] Helstrom C W 1960 *Statistical theory of signal detection* (Oxford: Pergamon Press) pp112–116
- [42] Allen B 2005 *Phys. Rev. D* **71** 062001
- [43] Accadia T, Acernese F, Agathos M, et al. 2012 *J. Phys.: Conf. Ser.* **363** 012037
- [44] Covas P, Effler A, Goetz E, et al. 2018 *Phys. Rev. D* **97** 082002
- [45] Coughlin M, the Ligo Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration 2010 *J. Phys.: Conf. Ser.* **243** 012010
- [46] Davis D, Walker M 2022 *Galaxies* **10** 12
- [47] Abbott B P, Abbott R, Abbott T, et al. 2016 *Class. Quantum Grav.* **33** 134001
- [48] Berger B K 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **957** 012004
- [49] Thrane E, Christensen N, Schofield R M 2013 *Phys. Rev. D* **87** 123009
- [50] Abbott B, Abbott R, Abbott T, et al. 2020 *Phys. Rev. D* **101** 084002
- [51] Abbott R, Abbott T, Abraham S, et al. 2021 *Phys. Rev. D* **104** 082004
- [52] Abbott R, Abbott T, Abraham S, et al. 2021 *Phys. Rev. D* **103** 122002
- [53] Abbott R, Abbott T, Abraham S, et al. 2021 *Phys. Rev. D* **104** 022004
- [54] Usman S A, Nitz A H, Harry I W, et al. 2016 *Class. Quantum Grav.* **33** 215004
- [55] Messick C, Blackburn K, Brady P, et al. 2017 *Phys. Rev. D* **95** 042001
- [56] Aubin F, Brighenti F, Chierici R, et al. 2021 *Class. Quantum Grav.* **38** 095004
- [57] Chu Q, Kovalam M, Wen L, et al. 2022 *Phys. Rev. D* **105** 024023
- [58] Klimentenko S, Yakushin I, Mercer A, Mitselmakher G 2008 *Class. Quantum Grav.* **25** 114029
- [59] Sutton P J, Jones G, Chatterji S, et al. 2010 *New J. Phys.* **12** 053034
- [60] Venumadhav T, Zackay B, Roulet J, Dai L, Zaldarriaga M 2019 *Phys. Rev. D* **100** 023011
- [61] Nitz A H, Capano C D, Kumar S, Wang Y F, Kastha S, Schäfer M, Dhurkunde R, Cabero M 2021 *Astrophys. J.* **922** 76
- [62] Essick R, Godwin P, Hanna C, Blackburn L, Katsavounidis E 2020 *Mach. Learn. Sci. Technol.* **2** 015004
- [63] Abbott R, Abbott T, Abraham S, et al. 2021 *Phys. Rev. X* **11** 021053
- [64] Fiori I, Paoletti F, Tringali M C, et al. 2020 *Galaxies* **8** 82
- [65] Mozzon S, Nuttall L, Lundgren A, Dent T, Kumar S, Nitz A 2020 *Class. Quantum Grav.* **37** 215014
- [66] Driggers J C, Evans M, Pepper K, Adhikari R 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 024501
- [67] Meadors G D, Kawabe K, Riles K 2014 *Class. Quantum Grav.* **31** 105014
- [68] Tiwari V, Drago M, Frolov V, et al. 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 165014
- [69] Wiener N 1949 *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series: With Engineering Applications* (Cambridge: The MIT Press) pp82–116
- [70] Allen B, Hua W, Ottewill A 1999 Automatic cross-talk removal from multi-channel data. *Tech. Rep. P990002*, LIGO Scientific Collaboration
- [71] Viets A, Wade M 2021 Subtracting narrow-band noise from ligo strain data in the third observing run. *Tech. Rep. T2100058*, LIGO Scientific Collaboration
- [72] Davis D, Massinger T, Lundgren A, Driggers J C, Urban A L, Nuttall L 2019 *Class. Quantum Grav.* **36** 055011
- [73] Welch P 2003 *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* **15** 70
- [74] Allen B, Anderson W G, Brady P R, Brown D A, Creighton

- J D 2012 *Phys. Rev. D* **85** 122006
- [75] Cornish N J, Littenberg T B 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 135012
- [76] Cornish N J, Littenberg T B, Bécsy B, Chatziioannou K, Clark J A, Ghonge S, Millhouse M 2021 *Phys. Rev. D* **103** 044006
- [77] Biscoveanu S, Haster C J, Vitale S, Davies J 2020 *Phys. Rev. D* **102** 023008
- [78] Talbot C, Thrane E 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 043298
- [79] Edy O, Lundgren A, Nuttall L K 2021 *Phys. Rev. D* **103** 124061
- [80] Sachdev S, Magee R, Hanna C, et al. 2020 *Astrophys. J. Lett.* **905** L25
- [81] Nuttall L 2018 *Philos. Trans. R. Soc. A* **376** 20170286
- [82] Blackburn L 2007 Kleinewelle technical document. *Tech. Rep. T060221*, LIGO Scientific Collaboration
- [83] LiGOORG <https://alog.ligo-wa.caltech.edu/aLOG/> [2026-04-03]
- [84] Nuttall L K, Massinger T, Areeda J, et al. 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 245005
- [85] Cabero M, Lundgren A, Nitz A H, et al. 2019 *Class. Quantum Grav.* **36** 155010
- [86] Soni S, Austin C, Effler A, et al. 2020 *Class. Quantum Grav.* **38** 025016
- [87] Washimi T, Yokozawa T, Tanaka T, Itoh Y, Kume J, Yokoyama J 2021 *Class. Quantum Grav.* **38** 125005
- [88] Harry I W, Fairhurst S 2011 *Phys. Rev. D* **83** 084002
- [89] Abbott R, Abbott T, Acernese F, et al. 2022 *Astrophys. J.* **928** 186
- [90] Colpi M, Danzmann K, Hewitson M, et al. 2024 arXiv: 2402.07571[astro-ph.CO]
- [91] Luo Z, Wang Y, Wu Y, Hu W, Jin G 2021 *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2021** 05A108
- [92] Taiji Scientific Collaboration, Wu Y L, Luo Z R, et al. 2021 *Int. J. Mod. Phys. A* **36** 2102002
- [93] Ni W T, Shy J T, Tseng S M, Xu X, Yeh H C, Hsu W Y, Liu W L, Tzeng S D, Fridelance P, Samain E, Lee D, Su Z Y, Wu A M 1997 *Small Spacecraft, Space Environments, and Instrumentation Technologies* **3116** pp105–116
- [94] Ni W T 2002 *Int. J. Mod. Phys. D* **11** 947
- [95] Ni W T 2013 *Int. J. Mod. Phys. D* **22** 1341004
- [96] Kawamura S, Nakamura T, Ando M, et al. 2006 *Class. Quantum Grav.* **23** S125
- [97] Sheard B, Heinzel G, Danzmann K, Shaddock D, Klipstein W, Folkner W 2012 *J. Geod.* **86** 1083
- [98] Abich K, Abramovici A, Amparan B, et al. 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 031101
- [99] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2019 *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **486** 3368
- [100] Dolesi R, Bortoluzzi D, Bosetti P, et al. 2003 *Class. Quantum Grav.* **20** S99
- [101] Bender P, Danzmann K, LISA Study Team, et al. 2000 *System and Technology Study Report ESA-SCI* **11** 2000
- [102] Anza S, Armano M, Balaguer E, et al. 2005 *Class. Quantum Grav.* **22** S125
- [103] Vitale S 2009 *Space Sci. Rev.* **148** 441
- [104] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2022 *Phys. Rev. D* **106** 062001
- [105] Born M, on behalf of the LPF collaboration 2017 *J. Phys.: Conf. Ser.* **840** 012036
- [106] Paczkowski S, on behalf of the LPF collaboration 2017 *J. Phys.: Conf. Ser.* **840** 012004
- [107] Armano M, Audley H, Auger G, et al. 2017 *Phys. Rev. D* **96** 062004
- [108] Mance D 2012 *Ph. D. Dissertation* (Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu)
- [109] Rodrigues M, Foulon B, Liorzou F, Touboul P 2003 *Class. Quantum Grav.* **20** S291
- [110] Hueller M 2003 *Ph. D. Dissertation* (Trento : Università degli Studi di Trento)
- [111] Olatunde T, Apple S, Inchauspe H, Parry S, Letson B, Wass P J, Mueller G, Conklin J W 2020 *Class. Quantum Grav.* **37** 195009
- [112] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2020 *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **494** 3014
- [113] Mazzanti D, Guberman D, Aran A, Garrido L, Gascon D, Izraelevitch F, Mauricio J, Roma D, Martín V, Nofrarias M 2023 *PoS ICRC* **2023** 1494
- [114] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2018 *Astrophys. J.* **854** 113
- [115] Hewitson M, Armano M, Benedetti M, et al. 2009 *Class. Quantum Grav.* **26** 094003
- [116] Armano M, Benedetti M, Bogenstahl J, et al. 2009 *Class. Quantum Grav.* **26** 094001
- [117] Antonucci F, Armano M, Audley H, et al. 2011 *Class. Quantum Grav.* **28** 094001
- [118] Brandt N, Fichter W, Kersten M, Lucarelli S, Montemurro F 2005 *Class. Quantum Grav.* **22** S493
- [119] Sylvestre J, Tinto M 2003 *Phys. Rev. D* **68** 102002
- [120] Canizares P, Conchillo A, Garcia-Berro E, et al. 2009 *Class. Quantum Grav.* **26** 094005
- [121] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 061101
- [122] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2024 *Phys. Rev. D* **110** 042004
- [123] Armano M, Audley H, Auger G, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 231101
- [124] Antonucci F, Armano M, Audley H, et al. 2011 *Class. Quantum Grav.* **28** 094002
- [125] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2024 *Phys. Rev. D* **109** 102009
- [126] Cavalleri A, Ciani G, Dolesi R, et al. 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 140601
- [127] Weber W J, Bortoluzzi D, Cavalleri A, Carbone L, Lio M D, Dolesi R, Fontana G, Hoyle C D, Hueller M, Vitale S 2003 *Gravitational-Wave Detection* **4856** 31
- [128] Araujo H M, Howard A, Davidge D, Sumner T J 2003 *Gravitational-Wave Detection* **4856** 55
- [129] Speake C, Trenkel C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 160403
- [130] Camp J, Darling T, Brown R E 1992 *J. Appl. Phys.* **71** 783
- [131] Wass P J, Carbone L, Cavalleri A, Ciani G, Dolesi R, Hueller M, Rochester G, Schulte M, Sumner T, Tombolato D, Trenkel C, Vitale S, Weber W 2006 *AIP Conf. Proc.* **873** 220
- [132] Pollack S, Turner M, Schlamming S, Hagedorn C, Gundlach J 2010 *Phys. Rev. D* **81** 021101
- [133] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 131103
- [134] Apple S, Kenyon S P, Barke S, et al. 2022 *Phys. Rev. D* **106** L101101
- [135] Antonucci F, Cavalleri A, Dolesi R, Hueller M, Nicolodi D, Tu H, Vitale S, Weber W J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 181101
- [136] Carbone L, Cavalleri A, Dolesi R, Hoyle C, Hueller M, Vitale S, Weber W J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 151101
- [137] Weber W J, Carbone L, Cavalleri A, Dolesi R, Hoyle C,

- Hueller M, Vitale S 2007 *Adv. Space Res.* **39** 213
- [138] Pollack S E, Schlamminger S, Gundlach J H 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 071101
- [139] Grimani C, Vocca H, Barone M, et al. 2004 *Class. Quantum Grav.* **21** S629
- [140] Grimani C, Vocca H, Bagni G, Marconi L, Stanga R, Vetrano F, Vicere A, Amico P, Gammaitoni L, Marchesoni F 2005 *Class. Quantum Grav.* **22** S327
- [141] Vocca H, Grimani C, Amico P, et al. 2004 *Class. Quantum Grav.* **21** S665
- [142] Vocca H, Grimani C, Amico P, Gammaitoni L, Marchesoni F, Bagni G, Marconi L, Stanga R, Vetrano F, Vicere A 2005 *Class. Quantum Grav.* **22** S319
- [143] Araújo H M, Wass P, Shaul D, Rochester G, Sumner T 2005 *Astropart. Phys.* **22** 451
- [144] Wass P, Araújo H, Shaul D, Sumner T 2005 *Class. Quantum Grav.* **22** S311
- [145] Forbush S E 1937 *Phys. Rev.* **51** 1108
- [146] von Forstner J L F, Dumbović M, Möstl C, et al. 2021 *Astron. Astrophys.* **656** A1
- [147] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2023 *Phys. Rev. D* **107** 062007
- [148] Grimani C, Cesarini A, Fabi M, Sabbatini F, Telloni D, Villani M 2020 *Astrophys. J.* **904** 64
- [149] Armano M, Audley H, Auger G, et al. 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 171101
- [150] Grimani C, Villani M, Fabi M, Cesarini A, Sabbatini F 2022 *Astron. Astrophys.* **666** A38
- [151] Grimani C, Fabi M, Lobo A, Mateos I, Telloni D 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 035001
- [152] Seiler H 1983 *J. Appl. Phys.* **54** R1
- [153] Grimani C, Villani M, Fabi M, Sabbatini F 2024 *J. High Energy Astrophys.* **42** 38
- [154] Carbone L, Cavalleri A, Ciani G, Dolesi R, Hueller M, Tombolato D, Vitale S, Weber W J 2007 *Phys. Rev. D* **76** 102003
- [155] Zhang W, Wang Z, Min J, Wang Y, Lei J, Li Y, Xi D 2025 *Sci. Rep.* **15** 3341
- [156] Sanjuán J, Lobo A, Nofrarias M, Ramos-Castro J, Riu P J 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 104904
- [157] Diaz-Aguiló M, García-Berro E, Lobo A 2012 *Phys. Rev. D* **85** 042004
- [158] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2025 *Phys. Rev. D* **111** 042007
- [159] Armano M, Audley H, Baird J, et al. 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 071401
- [160] Thorpe J I, Slutsky J, Baker J G, et al. 2019 *Astrophys. J.* **883** 53
- [161] Robson T, Cornish N 2017 *Class. Quantum Grav.* **34** 244002
- [162] Baghi Q 2022 *arXiv: 2204.12142[gr-qc]*
- [163] Baghi Q, Korsakova N, Slutsky J, Castelli E, Karnesis N, Bayle J B 2022 *Phys. Rev. D* **105** 042002
- [164] Robson T, Cornish N J 2019 *Phys. Rev. D* **99** 024019
- [165] Chatzioannou K, Cornish N, Wijngaarden M, Littenberg T B 2021 *Phys. Rev. D* **103** 044013
- [166] Spadaro A, Buscicchio R, Vetrugno D, Klein A, Gerosa D, Vitale S, Dolesi R, Weber W J, Colpi M 2023 *Phys. Rev. D* **108** 123029
- [167] Sauter O, Wass P, Sanchez W, Inchauspé H 2025 *arXiv: 2501.06315[gr-qc]*
- [168] Houba N, Ferraioli L, Giardini D 2024 *Phys. Rev. D* **109** 083027
- [169] Muratore M, Gair J, Hartwig O, Katz M L, Toubiana A 2025 *Phys. Rev. D* **112** 063041
- [170] Müller V, Hauk M, Misfeldt M, Müller L, Wegener H, Yan Y, Heinzl G 2022 *Remote Sens.* **14** 4335
- [171] Wang Y, Heinzl G, Danzmann K 2014 *Phys. Rev. D* **90** 064016
- [172] Wang Y, Heinzl G, Danzmann K 2015 *Phys. Rev. D* **92** 044037
- [173] Wei D, Bode C, Yamamoto K, Lee Y, Barranco G F, Müller V, Álvarez M D, Delgado J J E, Heinzl G 2026 *Phys. Rev. Appl.* **25** 044039
- [174] Wang X, Wang G 2026 *arXiv: 2602.06731 [gr-qc]*
- [175] Wegener H, Müller V, Heinzl G, Misfeldt M 2020 *J. Spacecr. Rockets* **57** 1362

REVIEW

Detector characterization of laser interferometer gravitational-wave detectors

QIN Geyu^{1)2)3)†} HE Jibo^{1)2)3)‡}

1) (*International Centre for Theoretical Physics Asia-Pacific, University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Beijing 100049, China*)

3) (*Taiji Laboratory for Gravitational Wave Universe (Beijing/Hangzhou), University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Beijing 100190, China*)

(Received 12 December 2025; revised manuscript received 31 March 2026)

Abstract

The characterization and noise mitigation of laser interferometer gravitational-wave detectors are essential for gravitational-wave astronomy. Ground-based detectors such as LIGO, Virgo, and KAGRA have established detector characterization frameworks that integrate physical environmental monitoring, data-quality vetoes, and event validation, enabling reliable detection of hundreds of gravitational-wave events. This review summarizes the principles, methodologies, and techniques of detector characterization, focusing on their application to ground-based and space-based detectors. For ground-based interferometers, we describe the architecture and functionality of the Physical Environmental Monitor (PEM) system for identifying coupling pathways between environmental disturbances and the strain channel. By combining multi-channel sensor data with statistical correlation analyses, the PEM system enables quantitative assessment of noise sources and supports targeted mitigation strategies. We review online and offline algorithms, including time-frequency analysis tools and hierarchical veto methods, highlighting their roles in glitch identification, classification, and spectral characterization. In addition, key noise suppression techniques are summarized, including Wiener filtering for linearly coupled noise subtraction and gating and inpainting methods for transient noise mitigation. For space-based missions, particular emphasis is placed on the LISA Pathfinder mission, a technological demonstrator for the Laser Interferometer Space Antenna (LISA). Experimental results show that LISA Pathfinder exceeded its design requirements, achieving residual acceleration noise compatible with LISA sensitivity goals. Detailed in-orbit analyses identified dominant noise contributions, including actuation noise, Brownian noise, and stray electrostatic effects, as well as transient disturbances (glitches) whose physical origins remain partially unresolved. These findings provide insights into the low-frequency noise environment and the challenges of operating precision interferometry in space. Based on LISA Pathfinder observations and the extensive experience accumulated in ground-based detector characterization, this review presents recommendations for space-based gravitational-wave detectors in data analysis, detector design, engineering implementation, and end-to-end data processing. These include comprehensive multi-channel monitoring systems, the integration of data-driven and physics-based modeling approaches, and the refinement of methods for non-stationary and non-Gaussian noise. Particular attention is given to challenges introduced by multi-spacecraft configurations, including inter-satellite laser link alignment, pointing stability, clock synchronization, associated noise coupling mechanisms, and the limited transferability of existing characterization algorithms caused by distributed sensing, time-delay interferometry, and the increased dimensionality of auxiliary channels. Overall, these advances validate the feasibility of gravitational-wave detection in the sub-millihertz regime and provide essential guidance for upcoming missions such as LISA, Taiji, and TianQin.

Keywords: gravitational waves, detector characterization

DOI: [10.7498/aps.75.20251708](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251708)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251708](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251708)

† Corresponding author. E-mail: qingeyu23@mails.ucas.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jibo.he@ucas.ac.cn

激光干涉引力波探测器的表征

秦戈宇 何吉波

Detector characterization of laser interferometer gravitational-wave detectors

QIN Geyu HE Jibo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 131101 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251708

CSTR: 32037.14.aps.75.20251708

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251708>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地基激光干涉引力波探测器的升级与改造

Upgrades and improvements of ground-based laser interferometric gravitational wave detectors

物理学报. 2025, 74(20): 200401 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250852>

地基引力波探测激光干涉仪的真空残余气体噪声分析

Residual gas noises in vacuum of optical interferometer for ground-based gravitational wave detection

物理学报. 2024, 73(5): 050401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231462>

面向第三代地基引力波探测的激光源需求分析

Laser parameters requirement for third-generation ground-based gravitational wave detection

物理学报. 2022, 71(16): 164203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220552>

面向地基引力波探测频段的超低噪声激光强度噪声评估系统

Ultra-low-noise laser intensity noise evaluation system in Hz frequency band for ground-based gravitational wave detection

物理学报. 2025, 74(3): 034202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241319>

面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统

Laser intensity noise evaluation system for space-based gravitational wave detection

物理学报. 2022, 71(20): 209501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220841>

面向空间引力波探测的毫赫兹频段低强度噪声单频激光器

Millihertz band low-intensity-noise single-frequency laser for space gravitational wave detection

物理学报. 2023, 72(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222127>