

面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统*

李 番¹⁾ 王嘉伟¹⁾ 高子超¹⁾ 李健博¹⁾ 安炳南¹⁾ 李瑞鑫¹⁾
白 禹²⁾ 尹王保^{2)3)†} 田 龙^{1)3)‡} 郑耀辉^{1)3)††}

1) (山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

2) (山西大学激光光谱研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

3) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2022 年 4 月 27 日收到; 2022 年 6 月 4 日收到修改稿)

空间引力波探测的波源特征面向更大特征质量和尺度的引力波源信息, 与地基引力波探测、原初引力波探测、脉冲星引力波探测等形成互补探测方案. 空间引力波探测基于长距离激光干涉装置, 主要探测 0.1 mHz—1 Hz 频段范围内的引力波信号, 由于空间引力波探测装置的灵敏度直接受到激光光源噪声的影响, 为满足空间引力波探测的要求, 就需要对极低频段激光强度噪声进行评估与表征. 本文基于低噪声光电探测、高精度数字万用表操控以及对数频率轴功率谱密度估计算法编程, 构建极低频段激光强度噪声测试评估系统. 实验结果表明, 在 0.1 mHz—1 Hz 频段高精度万用表的电子学噪声低于 5×10^{-5} V/Hz^{1/2}, 探测器电子学噪声低于 4×10^{-5} V/Hz^{1/2}, 高精度万用表及探测器的电子学噪声均低于我国空间引力波探测计划中对激光光源强度噪声的要求. 本文中构建的 0.1 mHz—1 Hz 频段激光强度噪声评估系统满足了对我国空间引力波探测计划对激光强度噪声评估的需求, 为空间引力波探测中激光光源噪声评估及噪声抑制奠定了重要基础.

关键词: 空间引力波探测, 激光强度噪声, 对数频率轴功率谱密度估计算法, 噪声评估系统

PACS: 95.55.Ym, 42.50.Lc, 42.60.-v, 42.55

DOI: 10.7498/aps.71.20220841

1 引 言

传统探测宇宙的方式主要通过不同类型的天文望远镜在射电、光学、射线等电磁波谱频段中进行探测, 引力波所在频段要比电磁波谱更低, 各种频率的引力波信号中所携带的天文事件信息与电磁波谱中的信息截然不同, 引力波携带的信息与电磁波谱信息之间具有很强的互补性, 直接探测引力波信号可以探索电磁手段无法探测的、更大时空尺度的天文事件. 因此引力波探测开启了研究宇宙的

崭新窗口, 对推动多信使天文学等学科的发展以及深入理解宇宙起源和演化具有重要的科学意义^[1].

地基引力波探测装置的探测范围在几赫兹到几千赫兹, 已经成功探测到双中子星和脉冲双星等天文事件的波源^[2]. 而空间引力波探测的频段在 0.1 mHz—1 Hz 范围, 其探测频率更低, 能够实现超大质量黑洞合并、超紧凑双星等波源的探测^[3]. 然而, 极低频率的引力波具有比地球自身尺寸更大的波长, 受地面震动、引力梯度噪声以及干涉仪臂长受限等因素影响, 即使目前最先进的地面探测装置也无法探测到这些极低频范围的引力波源^[4]. 因

* 国家重点研发计划 (批准号: 2020YFC2200402)、国家自然科学基金 (批准号: 62027821, 62225504, 62035015, 12174234, 11874250, 12274275)、山西省重点研发计划 (批准号: 202102150101003) 和山西省三晋学者特聘教授项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tianlong@sxu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: ywb65@sxu.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: yzhzheng@sxu.edu.cn

此需要在太空中部署更大的激光干涉装置来实现探测,这就要求星载激光光源在相应频段具有更低的噪声水平^[5,6].

在 20 世纪九十年代,由欧空局 (ESA) 和美国航空航天局联合推进的空间引力波探测项目 (laser interferometer space antenna, LISA), 计划发射搭载低噪声激光光源的三颗相同卫星, 并形成等边三角形结构, 以构建空间激光干涉引力波探测装置^[7]. 为了进行相关空间技术验证, ESA 于 2015 年成功发射了 LISA 探路者并完成了前期任务指标^[8,9]. 目前, 我国空间引力波探测计划“天琴计划”和“太极计划”都已经发射了相关科学卫星^[10,11], 并实现了相关的技术攻关^[12–14]. 上述空间引力波探测计划中均使用大型激光干涉仪作为引力波探测装置, 通过测量测试质量反射的一小部分光的相位变化来测量测试质量之间的距离变化, 测试质量反射的光会对其产生一个作用力, 激光功率的波动会导致作用力的变化, 从而影响探测灵敏度^[15], 因此需要解决卫星中所携带的激光光源强度噪声评估以及抑制等问题.

对激光强度噪声的评估及测量主要分为时域和频域两个方面, 时域测量主要通过光电转换将激光强度噪声转化为电压信号, 之后进行高精度数据采集, 以获得激光强度噪声的波动结果. 然而引力波信号在时域上会淹没在各种噪声中, 需要从频域上对引力波信号进行识别. 目前商用的低频段频谱仪 (SR785) 最小可分析频率为 375 mHz, 无法满足空间引力波探测中激光光源的全频段噪声评估及测量的需求. 对于噪声信号谱分析, 法国工程师 Fourier 在 1822 年提出了傅里叶级数展开及谐波分析理论, 开辟了从频谱角度进行数据分析的方法; 19 世纪末, Schuster 提出用傅里叶级数的幅度平方作为信号中功率的度量, 也就是“周期图法” (periodogram method)^[16]; 1965 年由库利和图基^[17]提出快速傅里叶变换法 (fast Fourier transform, FFT), 利用离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 实现高效快速的数据处理及分析过程; 之后在 1967 年, Welch^[18]在周期图法的基础上发展了一种窗口重叠分段平均法 (windowed overlapped segmented average, WOSA). FFT 法或者 WOSA 法, 都是对不同频段采用相同的频率分辨率进行数据处理, 这就使得在较大范围内进行信号噪声谱分析时, 数据处理结果在相对高频段都

会有不同程度的“拖尾”现象, 使得噪声谱分析出现偏差与失真; 在 2005 年, Tröbs 和 Heinzel^[19]发展了一种对数轴功率谱密度估计算法 (logarithmic frequency axis power spectral density, LPSD), 其对于不同傅里叶分析频率采用不同的频率分辨率以及将数据分段进行数据处理, 可以得到更加精确且平滑的噪声功率谱曲线. 然而, 对于极低频噪声评估表征需要长时间数据采集以及频域算法处理, 目前基于极低频段噪声的硬件探测采集系统性能只是在时域中给出电子学噪声峰峰值及波动范围等参数, 尚未见在极低频段对硬件探测采集系统进行频域噪声特性评估; 此外, 对于硬件采集系统的操控可以基于从硬件厂商购买操控软件等方式实现, 但仍然需要导出数据并进行后续频域算法表征等, 存在操作繁琐、数据导出失真风险、操控界面无法进行通用性修改等问题; 综上所述, 实用化通用型的基于硬件探测采集及软件操控表征的极低频段噪声评估系统还有待构建及完善.

本文基于低噪声光电探测, 结合高精度数字万用表以及上位机软件操控及算法编程, 构建了分析频段为 0.1 mHz—1 Hz 的极低频段噪声评估系统, 对极低频段的激光强度噪声、仪器电子学噪声以及光电探测器电子学噪声进行了噪声表征. 激光强度噪声可以通过光电二极管转化为电流信号, 通过跨阻电路将电流信号转化为电压信号并进行放大^[20], 之后通过高精度万用表对探测器输出电压信号进行高精度采集; 通过 LabVIEW 软件编程实现对数字万用表的操控, 并利用快速傅里叶变换及对数轴功率谱估计算法, 实现了采样数据在时域以及频域的实时分析及存储, 最终得到 0.1 mHz—1 Hz 频段的激光强度噪声表征. 通过自主构建的噪声评估系统对自由运转状态下光纤激光放大器的强度噪声进行测量, 该噪声评估系统具有通用性、高精度、操作简易、实时处理等优点, 可为空间引力波探测中激光强度噪声在时域及频域评估以及其噪声抑制^[21,22]提供关键的探测方法及测试系统.

2 极低频段激光强度噪声评估系统构架

极低频段激光强度噪声测试评估系统包括低噪声光电探测和高精度数字万用表两个主要硬件以及上位机软件操控及算法编程, 其主体架构如

图 1 所示. 首先, 激光噪声波动通过光电二极管将光场信号转换为光电流信号, 通过跨阻电路, 将光电二极管得到的光电流信号转换为电压信号并进行放大, 然而放大信号包含高频成分, 利用无源低通滤波滤除高频干扰成分, 保留极低频噪声成分作为最终电压信号. 光电探测器作为激光强度噪声转换的首要器件, 其电子学噪声及增益特性直接影响激光强度噪声的评估. 选用的光电二极管型号为 EXCELITAS C30642, 其暗电流噪声为 2 nA, 饱和光功率为 60 mW, 响应度为 0.9 A/W@1064 nm, 该光电二极管可以有效降低暗噪声引起的误差, 并可以进一步减少探测器的电子学噪声, 避免其成为低频激光强度噪声的限制因素.

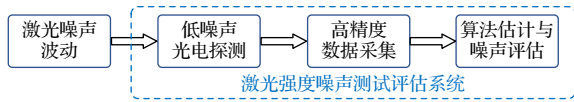


图 1 极低频段激光强度噪声评估系统架构

Fig. 1. Architecture of laser intensity noise measurement and evaluation system for space-based gravitational wave detection.

光电流信号 I 的散粒噪声极限可由其谱密度 I_{snl} 表征^[23]:

$$I_{\text{snl}} = \sqrt{2e/I}, \quad (1)$$

其中 e 为单电子电荷量. 由 (1) 式可知, 光电流散粒噪声与光电流大小成反关联关系, 因此选择了具有较高饱和光功率特性的光电探测电路, 避免所探测的激光相对强度噪声受散粒噪声的限制. 如果采用 5 mW 激光注入光电二极管中, 则转换的光电流为 4.5 mA, 对应谱密度 I_{snl} 等于 $8.4 \times 10^{-9} \text{ Hz}^{-1/2}$, 此噪声水平低于 LISA 对激光强度噪声要求 ($2 \times 10^{-4} \text{ Hz}^{-1/2}$) 5 个数量级^[24], 满足低噪声光电探测需求.

其次, 利用万用表或者 A/D 采集卡对光电探测器输出的电压信号进行高精度低噪声采集. 根据 Nyquist-Shannon 采样定理^[25,26], 时域信号转换到频域信号后, 频谱中最大分析频率 f_{max} 为数据采样率 f_s 的一半, 频谱最小分析频率 f_{min} 为数据采样率 f_s 除以总采样点数 N . 为采集并且表征 0.1 mHz—1 Hz 频段的激光强度噪声, 需要长时间采集大量的样本数据, 所以时域数据采样率至少为 2 S/s. 如果以 2 S/s 采样率进行 0.28 h 连续采样, 则频谱最小分析频率为 1 mHz; 若进行 2.8 h 连续采样,

则频谱最小分析频率为 0.1 mHz, 满足引力波探测全频段噪声谱分析需求. 为了实现 0.1 mHz—1 Hz 频段的噪声分析, 避免大量数据影响数据处理速度, 实验中采样率设置为 2 S/s, 采样时间设置为 5 h, 这对于数据采集硬件长时间的稳定性与精度提出了相当高的要求.

目前常用高精度万用表有单通道六位半数字万用表 (同惠 TH1963)、多通道七位半数字万用表 (吉时利 3700) 以及单通道八位半数字万用表 (KEYSIGHT 3458A) 等, 常用采集卡为 NI 公司的 DAQ 系列采集卡. 噪声信号采集硬件的选择必须综合考虑其分辨率、量程、电压噪声等相关参数.

KEYSIGHT 3458A 是一款快速、极低噪声、极高长时间稳定度与准确度的多用数字万用表, 其在 10 V 量程的 24 h 精度为 0.6×10^{-6} 、峰值电压噪声为 0.3×10^{-6} 以及 0.1×10^{-6} 的转换精度; 当采样电源的周期倍数 (NPLC) 为 10 时可实现 2 S/s 采样率以及 8 位半精度的数据采集, 相当于 28 bit 的采样精度^[27].

此外, 多通道七位半高精度数字万用表 (吉时利 3700 系列) 与 NI 公司的 DAQ 采集卡 (NI-9775) 可以同时采集多路信号, 在需要多路信号同时采集的实验场景下, 可作为参考选择. 针对我们实验的需求, 只需对各个部件进行单独数据采集, 并且需要保证低频测量的准确性, 因此选择 KEYSIGHT 3458A 单通道八位半数字万用表作为实验的采集硬件. 但是以上所述采集硬件都没有给出空间引力波探测全频段的噪声谱特性, 因此就需要对所使用的高精度万用表极低频段的电子学噪声进行测试与表征, 在第 4 节给出相应实验结果.

除硬件以外, 还需要软件编程进行硬件交互操控以及数据处理. 基于 LabVIEW 编程, 通过 GPIB 总线接口和 IEEE 488.2 标准与采集硬件进行通信与操控^[28], 如图 2 是基于 LabVIEW 编程的激光强度噪声评估系统整体程序流程图. 首先通过初始化设置 GPIB 地址等初始化命令, 每个 GPIB 设备都有个唯一的地址, 使用的单通道数字万用表的默认地址是 22. 在寻址成功基础上, 通过命令指令对设备进行采样率、总采样点数、量程、NPLC 等参数进行设置; 设备收到指令后对电压信号进行读取并传输到上位机程序内存中; 通过 LabVIEW 算法实现内存中数据组的分析, 包括实时滚动显示、极值分析、平均值及方差估算等; 与此同时将数据以

及采样时间进行文本保存, 做好数据备份操作; 如果采集数据点达到设置的数据总量 N , 则时域数据采集及分析结束, 否则继续采集数据; 在达到数据总量 N 基础上, 将全部数据传送到频域数据处理程序模块, 进行频域分析, 从而形成一套具有通用性、高精度、操作简易、实时处理等优势的光强噪声探测及评估系统。

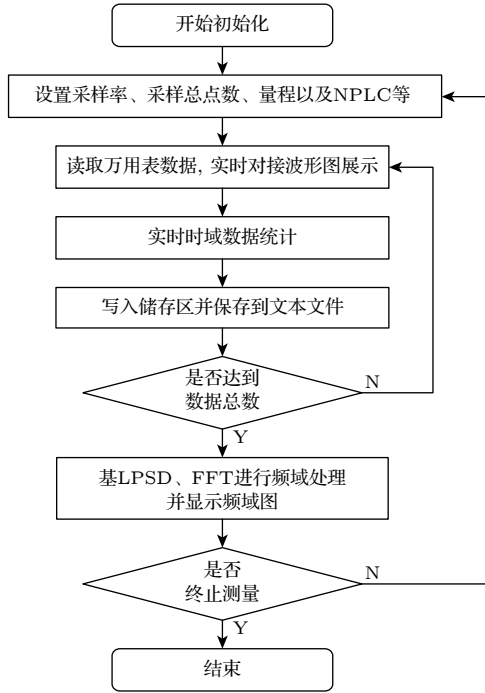


图2 激光强度噪声评估系统程序流程图

Fig. 2. Program flow chart of laser intensity noise evaluation system.

3 极低频段噪声评估频谱分析算法

时域信号分析可以获得峰峰值、均值、方差等信息, 间接呈现激光强度噪声波动; 然而引力波信号十分微弱, 在时域上导致其淹没在各种噪声中, 所以需要在频域上对引力波信号进行识别. 分析频率在 $0.1 \text{ mHz} - 1 \text{ Hz}$ 范围的强度噪声测量, 至少需要将近 3 h 连续数据采集以及两万个采样数据点. 对于传统 FFT 算法和 WOSA 算法, 由于数据量大且频段较宽, 这就导致频谱结果在低频端 (接近 0.1 mHz 端) 曲线较为平滑, 在高频端 (接近 1 Hz 端) 曲线变得密集不易分辨频谱细节, 也就是“拖尾”现象^[19]. 之后德国 Tröbs 和 Heinzl^[19] 发展了 LPSD 方法, 其对于不同傅里叶分析频率采用不同的频率分辨率进行数据处理, 很好地解决了

WOSA 方法在分段衔接处不平滑的不足, 但针对空间引力波探测的特殊要求仍需对分段重叠的影响进行评估, 并进行频谱估计校正优化。

LPSD 算法流程图如图 3 所示, 具体步骤包括对数频率的选取、数据分段处理和功率谱的归一化等操作^[19]. 首先是对数频率的选取, 设采样率为 f_s , 总数据点数为 N , 目标总分析频率点数 J_{des} , 则第 j 个点对应的频率 $f(j)$ 为

$$f(j) = f(1) \cdot 10^{\frac{j-1}{J_{\text{des}}-1}g}, \quad (2)$$

其中 $f(1) = f_s/N$, $g = \log(N/2)$.

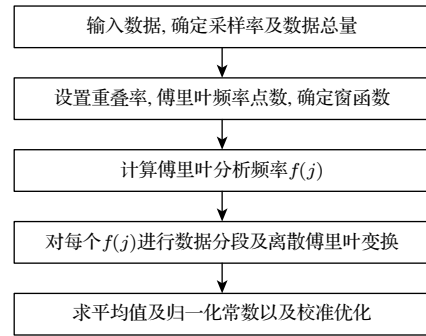


图3 LPSD 算法流程图

Fig. 3. Flow chart of LPSD algorithm.

对于频率分辨率 $r(j)$, 也就是离散傅里叶变换中两个频率点之间的间隔, 其在 LPSD 算法的对数轴频率中是均匀分布:

$$r(j) = f(j+1) - f(j) = f(j) \cdot (10^{\frac{g}{J_{\text{des}}-1}} - 1). \quad (3)$$

对于分析频段的相对中高频段, 这样的频率分辨率可以满足频谱分析的需要. 而为了实现低频段的精细谱分析, 需要优化频率分辨率, 权衡对数轴上傅里叶频率的均匀性和总数据分段次数, 对于每一个傅里叶分析频率, 需要对频率分辨率进行优化调整:

$$r''(j) = \begin{cases} r'(j), & r'(j) \geq r_{\text{avg}}; \\ \sqrt{r_{\text{avg}} \cdot r'(j)}, & r'(j) < r_{\text{avg}}, \\ r_{\text{min}}, & \sqrt{r_{\text{avg}} \cdot r'(j)} > r_{\text{min}}; \\ r_{\text{min}}, & \text{else,} \end{cases} \quad (4)$$

其中 r_{avg} 为 $f(1) \cdot [(K_{\text{des}} - 1)(1 - \xi) + 1]$; K_{des} 满足 $(K_{\text{des}} - 1)(1 - \xi)L_{\text{avg}} + L_{\text{avg}} = N$; ξ 为分段数据重叠率, L_{avg} 为分段数据平均长度. 进一步, 对于每一个 $r'(j)$, 需要调整数据分割长度 $L(j)$ 为整数, 还需进行优化操作:

$$L(j) = \left\lfloor \frac{f_s}{r'(j)} \right\rfloor, \quad (5)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整数;从而根据实际分割长度 $L(j)$ 得到最终优化后的频率分辨率 $r''(j)$ 以及傅里叶分析频率 $f(j+1)$:

$$r''(j) = \frac{f_s}{L(j)}, \quad (6a)$$

$$f(j+1) = f(j) + r''(j). \quad (6b)$$

综上所述,对数频率的选取算法需要以 $f(1) = r_{\min}$ 为起点,根据频率范围和 J_{des} 求解分辨率 $r_0(j)$,并根据要求对分辨率进行调整,得到最终优化的分辨率 $r''(j)$,之后利用(6)式进行迭代.当计算的频率达到 Nyquist-Shannon 采样定理要求的频率即可停止迭代.由于对频率分辨率进行了修正,获得的频率点并不是严格的对数分布,同时也会导致实际获得的频率点 J 与期望的点数 J_{des} 并不完全相等.其次,对于第 j 个频率点的频率分辨率为 $r''(j)$,分段后的每段数据长度为 $L(j)$,每段数据中未重叠部分长度为 $D(j)$ 以及分段次数为 $K(j)$,之后可得第 j 个频率点的第 k 段数据平均值为

$$a(j, k) = \frac{1}{L(j)} \sum_{l=1}^{L(j)} x(D(j) \cdot (k-1) + l). \quad (7)$$

将该段数据减去平均值后,以相同长度的窗函数 $w(j, k)$ 对数据段进行加窗处理,得到预处理的数据段并进行离散傅里叶变换,得到变换后第 $m(j)$ 个点的值:

$$A(j, k) = \sum_{l=1}^{L(j)} G(j, k, l) \cdot e^{-2\pi i \frac{m(j)}{L(j)} l}, \quad (8)$$

其中 $G(j, k, l)$ 中 j 表示频率点、 k 表示分段、 l 代表数据在分段内的位置,因此 l 对应于傅里叶变换的时间变量.(8)式是离散傅里叶变换第 $m(j)$ 个点的值.其中 $m(j) = f(j)/r''(j)$.

上述计算得到了第 j 个频率点对应的 $K(j)$ 段数据 DFT 的 $K(j)$ 个单点值,需要对这些值进行平均,并根据 Parseval 等式可得谱密度为

$$P(j) = \frac{C}{K(j)} \sum_{k=1}^{K(j)} |A(j, k)|^2, \quad (9)$$

其中 C 为归一化常数,定义为

$$C_{\text{PS}}(j) = \frac{2}{S_1^2(j)}, \quad (10a)$$

$$C_{\text{PSD}}(j) = \frac{2}{f_s \cdot S_2(j)}. \quad (10b)$$

其中两个 S 参数分别为

$$S_1(j) = \sum_{l=1}^{L(j)} w(j, l), \quad (11a)$$

$$S_2(j) = \sum_{l=1}^{L(j)} w^2(j, l). \quad (11b)$$

上述 C_{PS} 是功率谱的归一化系数,常用于单频信号的处理.对于功率谱密度则对应于 C_{PSD} .以电压为例,功率谱的单位是 V^2 ,而功率谱密度的单位是 V^2/Hz .在习惯上,我们所说的功率谱指的都是功率谱密度,且取其开方值,单位为 $\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$,如果取相对功率谱密度则其单位为 $1/\text{Hz}^{1/2}$.

4 实验装置、结果与分析

利用构建的激光强度噪声测试评估系统对光纤放大器输出激光进行噪声测试与评估.实验装置图如图4所示,首先,自研全固态单频激光器输出自由空间传输的1064 nm 激光,通过调节1/2波片使得偏振分束棱镜(PBS)的透射光功率为60 mW并作为种子激光,利用合适匹配透镜、两个高反镜以及光纤耦合器(THORLABS PAF2-7C)将种子激光耦合到单模光纤中,之后经过光纤隔离器(ISO,福晶 ILBZ10753)后与半导体泵浦模块(BWT-K976AB2RN)提供的976 nm 多模泵浦光共同注入到长度为2 m的增益光纤中,实现光纤激光功率放大;泵浦电流驱动源(THORLABS ITC4020)驱动半导体泵浦模块产生8 W的976 nm 泵浦光,最终放大器实现2 W的1064 nm 主光束输出;主光束经光隔离器、光纤准直器(THORLABS F220 APC-1064)后输出匀直的自由空间光束,进一步通过楔形镜提取部分激光,后经过可调衰减片进行功率微调,最终5 mW 激光由透镜聚焦到光电探测器的光电二极管光敏面上,并进行光电转换.光电二极管光敏面与激光入射方向呈约60°夹角,并用吸收片吸收光敏面的微弱反射光^[29],防止激光散射影响探测准确性.

光电探测器输出电压信号经屏蔽线缆输入高精度万用表,通过LabVIEW编写的操控及算法评估程序对高精度万用表进行直流电压信号采集以及LPSD算法.需要指出的是所有系统需要大约

1—2 h 预热稳定才能进行数据采集分析, 并最终得到了极低频段激光强度噪声的时域与频域数据. 为了保证极低频段激光强度噪声的准确性, 必须对仪器部件等可能的噪声源进行极低频段评估表征, 这就要考虑光电探测器的电子学噪声、高精度数字万用表仪器本底噪声是否满足实验需求.

首先, 对单通道八位半数字万用表的正接线柱与地短接, 进行万用表本底噪声测试表征, 并得到时域数据; 之后利用 LPSD 及 FFT 两种算法对时域数据进行处理, 通过对比分析两种算法得到的频域结果, 便可以验证经 LPSD 算法处理后数据的准确性, 也可以直观的对比得到 LPSD 算法相较于 FFT 算法的优势, 在整个低频段有着合适的频

率分辨率, 所求得的电压谱密度没有“拖尾”现象. 实验结果如图 5 所示, 其中图 5(a) 为时域数据, 根据数据统计可知, 在 5 h 内, 万用表电子学噪声波动峰峰值为 7.96×10^{-6} V, 均值为 -1.43×10^{-6} V; 图 5(b) 中红色实线为 LPSD 算法处理结果, 图 5(b) 中黑色实线为 FFT 算法处理结果, 由图中数据可知 FFT 算法处理结果在高频处出现明显拖尾现象, 由 LPSD 处理结果可知万用表电子学噪声在 0.1 mHz—1 Hz 范围内低于 5×10^{-5} V/Hz^{1/2}, 在 1 mHz—1 Hz 范围低于 3×10^{-7} V/Hz^{1/2}, 此噪声水平低于 LISA 对星载激光强度噪声要求 (2×10^{-4} Hz^{-1/2}@0.1 mHz—1 Hz) 两个数量级; 进一步, 在关闭种子源激光和半导体驱动模块后, 测量光电

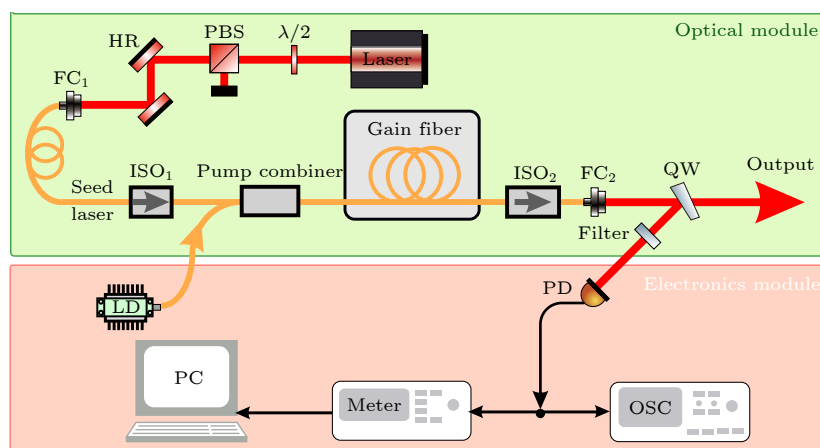


图 4 极低频段激光强度噪声评估系统 (laser, 全固态激光器; pump combiner, 泵浦合束器; gain fiber, 增益光纤; LD, 半导体泵浦模块; $\lambda/2$, 半波片; PBS, 偏振分束器; ISO, 光隔离器; HR, 高反镜; FC₁, 光纤耦合器; FC₂, 光纤准直器; QW, 楔形分光镜; Filter, 衰减片; OSC, 示波器; PD, 光电探测器; meter, 高精度数字万用表)

Fig. 4. Evaluation system for laser intensity noise at ultra low frequency band. Laser, solid state laser; pump combiner, pump combiner; gain fiber, gain fiber; LD, semiconductor pump module; $\lambda/2$, half-wave-plate; PBS, polarization beam splitter; ISO, optical isolator; HR, high reflection mirror; FC, fiber coupler; QW, wedge beamsplitter; Filter, optical attenuator; OSC, oscilloscope; PD, photodetector; Meter, high-precision digital multimeter.

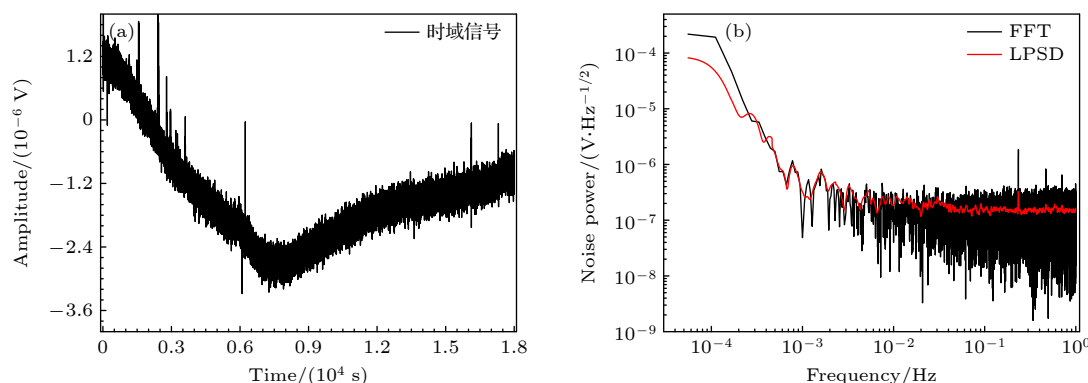


图 5 高精度万用表电子学噪声测试表征 (a) 时域数据结果; (b) 利用 LPSD 及 FFT 算法得到的噪声功率谱结果

Fig. 5. Electronic noise of the high-precision multimeter in the time domain (a) and spectral domain (b). The red and black lines in Figure (b) are spectrum estimations obtained by LPSD and FFT, respectively.

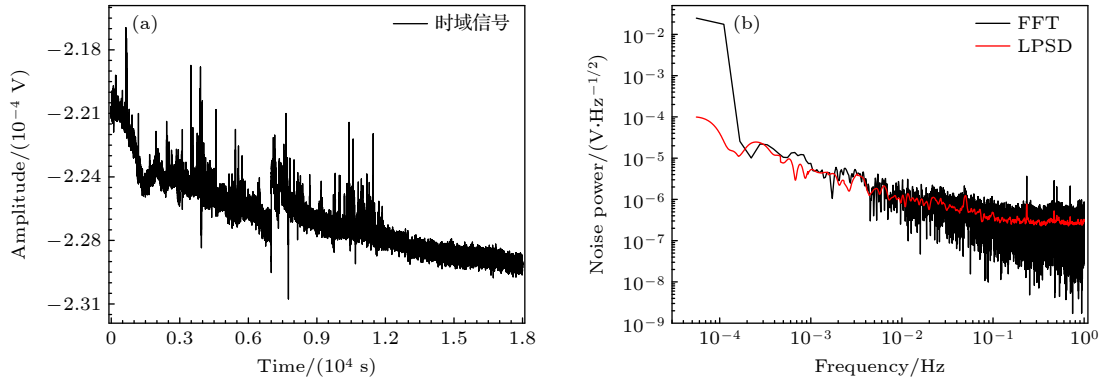


图 6 探测器电子学噪声测试表征 (a) 时域数据结果; (b) 利用 LPSD 及 FFT 算法得到的噪声功率谱结果

Fig. 6. Electronic noise of the photodetector in the time domain (a) and spectral domain (b). The red and black lines in Figure (b) are spectrum estimations obtained by LPSD and FFT, respectively.

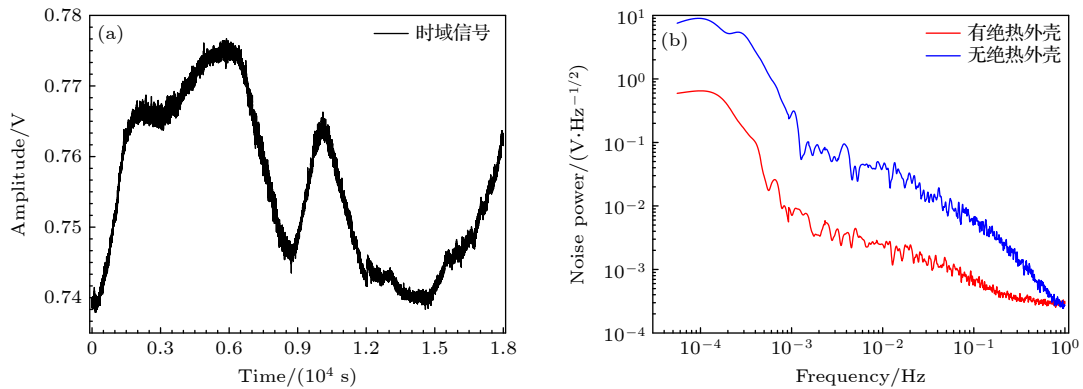


图 7 激光放大器自由运转时激光强度噪声测试表征 (a) 时域数据结果; (b) 有无绝热罩子情况下激光放大器输出激光的强度噪声功率谱结果

Fig. 7. Intensity noise of laser amplifier in the time domain (a) and spectral domain (b). The blue and red lines in Figure (b) are spectrum estimations with and without using adiabatic tank, respectively.

探测器的电子学噪声, 实验结果如图 6 所示, 其中图 6(a) 为时域数据, 可知光电探测器电子学噪声在 5 h 内波动峰峰值为 1.41×10^{-5} V, 均值为 -2.26×10^{-4} V; 图 6(b) 中红色实线为 LPSD 算法处理结果, 图 6(b) 中黑色实线为 FFT 算法处理结果, 从图中数据可知光电探测器电子学噪声在 0.1 mHz—1 Hz 范围内低于 4×10^{-5} V/Hz^{1/2}, 该电子学噪声满足星载激光强度噪声要求.

最后, 通过构建噪声评估系统对自由运转状态下光纤放大器输出激光的强度噪声进行测量. 由于极低频段的激光强度噪声在测量过程中对实验环境有着严格的要求, 需将该评估系统的主光路探测部分置于一个绝热罩子内, 以减少空气扰动、对流引起的实验偏差. 实验结果如图 7 所示, 其中图 7(a) 为时域数据, 在 5 mW 激光入射光电探测器情况下, 激光输出功率在 5 h 内最大波动为 $\pm 2.5\%$, 时域图中所显示的具有随时间周期式的幅值变化

是由于实验室温度环境的波动以及光电探测器的温度波动造成的; 图 7(b) 中红色实线为有绝热外壳时, 光纤放大器输出激光的强度噪声谱分析图, 从图中数据可知激光强度噪声谱密度在 1 Hz 处为 2×10^{-4} V/Hz^{1/2}; 在 1 mHz 处为 7×10^{-3} V/Hz^{1/2}, 在 0.1 mHz 处为 5×10^{-1} V/Hz^{1/2}. 作为对比, 图 7(b) 中蓝色实线为无绝热外壳时, 光纤放大器输出激光的强度噪声谱分析图; 实验结果表明, 利用绝热外壳将探测部分主光路进行一定的绝热处理有助于对激光强度噪声的测量.

5 结 论

本文基于低噪声光电探测、结合高精度数字万用表以及上位机软件操控及算法编程, 构建了面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统. 对 LPSD 算法进行了详细的理论分析, 相较其他谱估

计算法, LPSD 算法在低频有更高的频率分辨率, 在高频对谱密度的估计更加准确并且没有拖尾现象, 兼顾了其他算法的优点.

在实验上, 利用极低频段激光强度噪声评估系统对高精度数字万用表的电子学噪声、低噪声光电探测器的电子学噪声以及激光放大器的自由运转强度噪声进行了测试, 通过 LabVIEW 软件编程实现对高精度数字万用表的操控, 采集的电压信号经快速傅里叶变换以及对数频率轴功率谱密度估计算法在频域进行噪声测试评估, 最终得到 0.1 mHz—1 Hz 频段电子学噪声以及激光强度噪声的评估. 实验结果表明, 高精度万用表及探测器的电子学噪声都满足空间引力波探测要求. 并且, 该激光强度噪声评估系统具有通用性、高精度、操作简易、实时处理等优点, 可为空间引力波探测中激光强度噪声在时域及频域评估以及其噪声抑制提供重要评估方法, 为我国空间引力波探测提供参考与支撑.

参考文献

- [1] Sathyaprakash B S, Schutz B F 2009 *Living Rev. Relativ.* **12** 2
- [2] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 061102
- [3] ESA-SCI 2000 *LISA: System and Technology Study Report. ESA-SCI* **11** 2
- [4] Black E D, Gutenkunst R N 2003 *Am. J. Phys.* **71** 365
- [5] ESA-SCI 2000 *LISA: System and Technology Study Report. ESA-SCI* **11** 76
- [6] Jennrich O 2009 *Classical Quantum Gravity* **26** 153001
- [7] Bender P, Brillet A, Ciufolini I, Cruise A M, Cutler C, Danzmann K, Fidecaro F, Folkner W M, Hough J, McNamara P, Peterseim M, Robertson D, Rodrigues M, Rüdiger A, Sandford M, Schäfer G, Schilling R, Schutz B, Speake C, Stebbins R T, Sumner T, Touboul P, Vinet J Y, Vitale S, Ward H, Winkler W 1998 *LISA pre-phase a report. Max Planck Institute for Quantum Optics*, Garching 1998 p1
- [8] Armano M, Audley H, Auger G, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 231101
- [9] Aratújo H, Boatella C, Chmeissani M, Conchillo A, García-Berro E, Grimaldi C, Hajdas W, Lobo A, Martínez Ll, Nofrarias M, Ortega J A, Puigdemonts C, Ramos-Castro J, Sanjuán J, Wass P, Xirgu X 2007 *J. Phys. Conf. Ser.* **66** 012003
- [10] Luo Z R, Bai S, Bian X, Chen G R, Dong P, Dong Y H, Gao W, Gong X F, He J W, Li H Y, Li X Q, Li Y Q, Liu H S, Shao M X, Song T X, Sun B S, Tang W L, Xu P, Xu S N, Yang R, Jin G 2013 *Adv. Mech.* **43** 415 (in Chinese) [罗子人, 白珊, 边星, 陈葛瑞, 董鹏, 董玉辉, 高伟, 龚雪飞, 贺建武, 李洪银, 李向前, 李玉琼, 刘河山, 邵明学, 宋同消, 孙保三, 唐文林, 徐鹏, 徐生年, 杨然, 靳刚 2013 *力学进展* **43** 415]
- [11] Luo Z R, Zhang M, Jin G, Wu Y L, Hu W R 2020 *J. Deep Space Explor.* **7** 3 (in Chinese) [罗子人, 张敏, 靳刚, 吴岳良, 胡文瑞 2020 *深空探测学报* **7** 3]
- [12] Wang L Y, Li Y Q, Cai R 2021 *Chin. Opt.* **14** 1426 (in Chinese) [王璐钰, 李玉琼, 蔡榕 2021 *中国光学* **14** 1426]
- [13] Wang Z, Sha W, Chen Z, Wang Y X, Kang Y S, Luo Z R, Li M, Li Y P 2018 *Chin. Opt.* **11** 131 (in Chinese) [王智, 沙巍, 陈哲, 王永宪, 康玉思, 罗子人, 黎明, 李钰鹏 2018 *中国光学* **11** 131]
- [14] Liu H S, Gao R H, Luo Z R, Jin G 2019 *Chin. Opt.* **12** 486 (in Chinese) [刘河山, 高瑞弘, 罗子人, 靳刚 2019 *中国光学* **12** 486]
- [15] Dahl K, Cebeci P, Fitzau O, Giesberts M, Greve C, Krutzik M, Peters A, Pyka S A, Sanjuan J, Schiemangk M, Schuldt T, Voss K, Wicht A 2018 *International Conference on Space Optics —ICSO 2018*, Chania Greece, October 9–12, 2018 111800C-2
- [16] Liu B Z 2022 *Electron. Meas. Technol.* **43** 76 (in Chinese) [刘宝洲 2022 *电子测量技术* **43** 76]
- [17] Cooley J W, Tukey J W 1965 *Math. Comput.* **19** 297
- [18] Welch P D 1967 *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* **15** 70
- [19] Tröbs M, Heinzel G 2006 *Measurement* **39** 120
- [20] Zhou H J, Wang W Z, Chen C Y, Zheng Y H 2015 *IEEE Sens. J.* **15** 2101
- [21] Liu K, Yang R G, Zhang H L 2009 *Chinese Journal of Lasers* **36** 1852 (in Chinese) [刘奎, 杨荣国, 张海龙, 白云飞, 张俊香, 郜江瑞 2009 *中国激光* **36** 1852]
- [22] Wang Y J, Gao L, Zhang X L 2020 *Infrared Laser Eng.* **49** 20201073 (in Chinese) [王雅君, 高丽, 张晓莉 2020 *红外与激光工程* **49** 20201073]
- [23] Goßler S, Bertolini A, Born M, Chen Y, Dahl K, Gering D, Gräf C, Heinzel G, Hild S, Kawazoe F, Kranz O, Kühn G, Lück H, Mossavi K, Schnabel R, Somiya K, Strain K A, Taylor J R, Wanner A, Westphal T, Willke B, Danzmann K 2010 *Classical Quantum Gravity* **27** 084023
- [24] Tröbs M 2005 *Ph. D. Dissertation* (Hannover: Leibniz University Hannover)
- [25] Jerri A J 1977 *Proc. IEEE* **65** 1565
- [26] Higgins J R 1985 *Bull. Amer. Math. Soc.* **12** 45
- [27] Cao M, Bi Z Z, Li B, Wang X, Shi S Y, Liang Z R, Liu C 2013 *Chin. Electron Devices* **36** 371 (in Chinese) [曹敏, 毕志周, 李波, 李毅, 王昕, 石少岩, 梁钻仁, 刘畅 2013 *电子器件* **36** 371]
- [28] Wang J P, Jin Z H 2008 *Meas. Tech.* **12** 24 (in Chinese) [王俊璞, 金志华 2008 *计量技术* **12** 24]
- [29] Junker J, Oppermann P, Willke B 2017 *Opt. Lett.* **42** 755

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

Li Fan¹⁾ Wang Jia-Wei¹⁾ Gao Zi-Chao¹⁾ Li Jian-Bo¹⁾
 An Bing-Nan¹⁾ Li Rui-Xin¹⁾ Bai Yu²⁾ Yin Wang-Bao^{2)3)†}
 Tian Long^{1)3)‡} Zheng Yao-Hui^{1)3)††}

1) (State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

2) (State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

3) (Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 27 April 2022; revised manuscript received 4 June 2022)

Abstract

The space-based gravitational wave detection can acquire the gravitational wave source information with larger characteristic mass and scale, forming a complementary detection scheme with ground-based gravitational wave detection, primordial gravitational wave detection, and pulsar gravitational wave detection. The space-based gravitational wave detection is based on a long-distance laser interference device, which mainly detects gravitational wave signals in a frequency range of 0.1 mHz–1 Hz. The noise evaluation and noise suppression of the laser light source system directly affect the detection sensitivity. In this work, based on low-noise photoelectric detection, a very low-frequency laser intensity noise test and evaluation system is constructed with high-precision digital multimeter, software control and algorithm programming of the host computer. The laser intensity noise can be converted into the fluctuation of the current signal by utilizing the photodiode, and the current signal is converted into the voltage signal and amplified by the transimpedance circuit. Thus the high-frequency interference components are filtered out by a passive low-pass filtering, and the extremely low-frequency noise components are retained. According to the definition of shot noise, it can be known that the photocurrent injected into the detector is inversely proportional to the shot noise, so at least 5 mW laser is chosen for photoelectric detection. After controlling the high-precision digital multimeter through LabVIEW software programming, the acquisition is detected. The output voltage signal by the laser is subjected to the fast Fourier transform and logarithmic frequency axis power spectral density estimation algorithm for noise evaluation in the frequency domain, forming a complete laser intensity noise evaluation and measurement system. The 0.1 mHz–1 Hz frequency band laser intensity noise evaluation is finally obtained. The experimental results show that the noise of the high-precision multimeter in a frequency band of 0.1 mHz–1 Hz is lower than 5×10^{-5} V/Hz^{1/2}; the noise of the detector electronics in a frequency band of 0.1 mHz–1 Hz is lower than 4×10^{-5} V/Hz^{1/2}. The electronic noise of the high-precision multimeters and the detectors meet the requirements for space gravitational wave detection. The experimental results show that the 0.1 mHz–1 Hz frequency band laser intensity noise evaluation system we built meets the needs of space-based gravitational wave detection program, and provides an important foundation for building a laser source that meets the needs of space-based gravitational wave detection.

Keywords: space-based gravitational wave detection, laser intensity noise, logarithmic frequency axis power spectral density, noise evaluation system

PACS: 95.55.Ym, 42.50.Lc, 42.60.-v, 42.55

DOI: 10.7498/aps.71.20220841

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2020YFC2200402), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62027821, 62225504, 62035015, 12174234, 11874250, 12274275), the Key R&D Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202102150101003), and the Program for Sanjin Scholar of Shanxi Province, China.

† Corresponding author. E-mail: tianlong@sxu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: ywb65@sxu.edu.cn

†† Corresponding author. E-mail: yhzheng@sxu.edu.cn

面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统

李番 王嘉伟 高子超 李健博 安炳南 李瑞鑫 白禹 尹王保 田龙 郑耀辉

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

Li Fan Wang Jia-Wei Gao Zi-Chao Li Jian-Bo An Bing-Nan Li Rui-Xin Bai Yu Yin Wang-Bao
Tian Long Zheng Yao-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 209501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220841

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220841>

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

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>

基于光学参量振荡器的可调谐红外激光的强度噪声特性

Intensity noise of tunable infrared laser based on singly resonant optical parametric oscillator

物理学报. 2020, 69(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191952>

基于高分辨率激光外差光谱反演大气CO₂柱浓度及系统测量误差评估方法

Atmospheric CO₂ column concentration retrieval based on high resolution laser heterodyne spectra and evaluation method of system measuring error

物理学报. 2020, 69(14): 144201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200125>

基于1.06 μm波长的空间合作目标及碎片高精度激光测距试验

1.06 μm wavelength based high accuracy satellite laser ranging and space debris detection

物理学报. 2020, 69(1): 019502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191299>

激光强度依赖的阈下谐波产生机制

Mechanism of laser intensity-dependent below-threshold harmonic generation

物理学报. 2020, 69(7): 074203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191883>

贝叶斯频率估计中频率的先验分布对有色噪声作用的影响

Influence of parameter prior information on effect of colored noise in Bayesian frequency estimation

物理学报. 2018, 67(6): 060301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171911>