

引用格式: ZHENG Liang, LI Fan, WANG Jiawei, et al. Low Noise Photoelectric Detection Technology for Laser Intensity Noise Suppression in mHz Band[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552220

郑立昂, 李番, 王嘉伟, 等. 面向毫赫兹频段激光强度噪声抑制的低噪声光电探测技术[J]. 光子学报, 2023, 52(5):0552220

面向毫赫兹频段激光强度噪声抑制的低噪声 光电探测技术

郑立昂¹, 李番¹, 王嘉伟¹, 李健博¹, 高丽¹, 贺子洋¹, 尚鑫¹, 尹王保^{2,3},
田龙^{1,3}, 杨文海⁴, 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)

(4 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘要:通过选定低噪声电压基准芯片作为光电二极管的稳定偏压, 采用低暗电流光电二极管, 设计外围跨阻放大电路, 利用低温漂系数元件, 温控及电磁屏蔽等, 研发低噪声光电探测器, 并通过低频段强度噪声评估系统对其噪声进行测试评估。实验结果表明: 所研发的低噪声探测器在空间引力波频段的电子学噪声谱密度在 $1.649 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 以下, 在 0.1 mHz 处为 $1.649 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$, 在 1 mHz 处为 $6.95 \times 10^{-6} \text{ V/Hz}^{1/2}$, 在 1 Hz 处为 $7.07 \times 10^{-8} \text{ V/Hz}^{1/2}$; 在 8 mW 激光入射光电二极管时, 探测器抬高为 40 dB。该探测器噪声性能均小于相应引力波探测中对激光强度噪声的要求, 可为引力波探测中激光强度噪声抑制等方面提供关键器件支撑。

关键词:激光放大器; 空间引力波探测; 光电探测; 电压噪声表征; 对数轴谱密度算法

中图分类号: TH744

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235205.0552220

0 引言

引力波探测是现代物理学重要的前沿领域之一^[1]。空间引力波探测主要面向 0.1 mHz~1.0 Hz 频段范围的引力波信号^[2-3], 这些信号主要是由双致密星系统以及极大质量比双黑洞天体并合等天文事件释放的, 与地基引力波^[4-5]、原初引力波^[6]等探测手段形成互补探测方案。在多个卫星中搭建高精度空间惯性基准载荷超稳平台以及高精度星间激光干涉测量为空间引力波探测的核心技术^[7-8], 包括无拖曳控制技术^[9-13]、超高精度星间激光干涉测量技术^[14]、超高灵敏度惯性传感技术^[15]、精密编队技术^[16-17]、微牛级电推技术^[18]等。其中星载激光系统的激光光源噪声则直接影响超高精度星间激光干涉测量技术的灵敏度^[19-20], 所以需要对激光强度噪声进行抑制, 然而现阶段激光强度噪声无法在空间引力波探测全频段低于满足引力波所需的 $1 \times 10^{-4} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 的要求, 所以需要对激光强度噪声进行抑制, 以减少激光光源噪声对引力波信号探测的影响。

抑制激光光源强度噪声的常用方法有被动模式清洁剂抑制噪声^[21-22]、激光注入锁定抑制噪声^[23-24], 基于半导体光放大增益饱和效应和主动光电负反馈法抑制噪声等^[21]。模式清洁剂的强度噪声抑制效果体现在高频, 对引力波探测所需要抑制的低噪声反而有放大效果, 无法满足实验要求; 在激光注入锁定抑制噪声技术中只有在种子激光器和从属激光器共振频率附近才会出现可观的噪声抑制效果, 低频部分抑噪效果有限, 同样无法满足引力波探测的要求; 而基于半导体光放大增益饱和效应来抑制噪声也无法排除因相应能

基金项目:国家重点研发计划(No. 2020YFC2200402), 国家自然科学基金(Nos. 62027821, 62225504, 62035015, U22A6003, 12174234, 12274275, 62001374), 山西省重点研发计划(No. 202102150101003), 山西省三晋学者特聘教授项目

第一作者:郑立昂, liangzheng0617@163.com

通讯作者:田龙, tianlong@sxu.edu.cn

收稿日期:2023-02-06; **录用日期:**2023-03-17

<http://www.photon.ac.cn>

级载流子浓度变化引入的低频噪声,所以也不适用于引力波信号探测。

相比于外部强度噪声抑噪方案,采用光电负反馈法进行低频段激光强度噪声抑制的有效技术手段。其原理是利用光电探测器探测待稳定激光,并将其转化成电信号,然后与稳定的基准电压源进行比较获取误差信号,之后经伺服系统输出反馈信号,并作用于泵浦源的驱动电路,通过改变泵浦电流实现对激光器增益的调节,从而抑制强度噪声^[25],这可以认为是从激光源内部实现噪声抑制^[27]。其中低噪声光电探测器作为首要光电信号转换器件,其噪声性能直接影响后续反馈回路的信噪比,所以为了提高反馈控制抑制噪声的精度及增益,首先需要降低光电探测器的电子学噪声,并拓展探测器动态范围。在地基引力波探测频段,PATRICK K等研发出多光电二极管阵列来探测激光噪声并进行反馈降噪^[28];中国科学院力学研究所研发了单光电二极管的弱光探测器^[29];本课题组在2022年研发了低噪声平衡零拍探测器,其噪声在1 mHz处为 $3.6 \times 10^{-2} \text{ V/Hz}^{1/2}$ ^[30]。

本文以低噪声电压基准作为光电二极管的稳定偏压,采用低暗电流光电二极管,并设计相关外围电路及电磁屏蔽,结合低温漂系数元件、低噪声供电系统以及隔热等技术手段实现了低噪声光电探测器的研制。由于mHz以及更低频段无法用现有频谱分析仪进行噪声分析,所以实验中利用高精度数字万用表进行探测器电子学噪声电压的测试与数据采集^[31],用快速傅里叶变换周期图法以及对数轴功率谱密度法将采集的数据进行计算处理,得到0.1 mHz~1 Hz频段的电压噪声谱密度。实验结果表明所研发探测器电子学噪声的电压噪声谱密度在0.1 mHz时达到 $1.649 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$,在0.1 mHz~1 Hz的频率范围内在 $1.649 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 以下。该低噪声探测器的研发可为引力波探测中激光强度噪声抑制提供关键器件支撑。

1 低噪声探测器设计及噪声分析

面向空间引力波探测的低噪声光电探测系统构架如图1。光电二极管作为光电探测中的关键器件,其噪声性能直接影响光电探测的整体噪声特性,故需要其暗电流噪声足够小。在光电转换过程中,光子流转化为电子流,光电流信号 I 的散粒噪声极限可由其谱密度 I_{snl} 表征^[32],表示为

$$I_{\text{snl}} = \sqrt{2eI} \quad (1)$$

式中, e 为单电子电荷量。所以,当光电二极管的暗电流远小于激光所转化的光电流时,才可满足空间引力波探测计划中的激光强度噪声要求($10^{-4}/\text{Hz}^{1/2}$)。

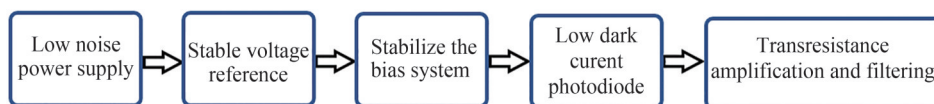


图1 空间引力波低噪声探测器的系统构架

Fig.1 System architecture of low noise space gravitational wave detector

此外,光电二极管需要加载合适的反向偏压进行光电转换,反向偏压的电压稳定性会直接影响光电二极管中光电转化的稳定性,从而对光电探测系统的电子学噪声产生影响。低噪声供电模块以及稳定的基准模块为整个光电探测系统提供电源供给,作为电压噪声的源头,其噪声特性将直接传递给后续器件,故需要低噪声供电以及高稳定性基准电压。光电二极管输出的电流信号经跨阻放大电路后转化为电压信号,经过低通滤波实现极低频信号的输出。

基于上述分析,对各部分关键电路进行设计,如图2。低噪声可调偏压电路主要由高稳定参考电压基准、高分辨率数模转换等部分组成。其中高稳定参考电压基准基于LTZ1000基准板为外部参考电压,以AD5791为主芯片,结合AD8675、AD8676及ADA4077等低噪声运算放大芯片设计外围电路,进而选择低温漂系数元件结合精密电路构建技术,研发低噪声偏压系统^[33]。

激光强度信号经过光电二极管转化为电流信号,经过 R_1 转化为微弱电压信号后直接输出到集成运放的输入端,并通过跨阻放大电路进行信号放大^[34]。在跨阻放大电路中,输入和输出关系为

$$V_{\text{out}} = I_{\text{in}} R_1 \quad (2)$$

故跨阻放大电路中电阻是影响信号大小的关键元件。跨阻芯片选取电压噪声为 $0.9 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ 的芯片

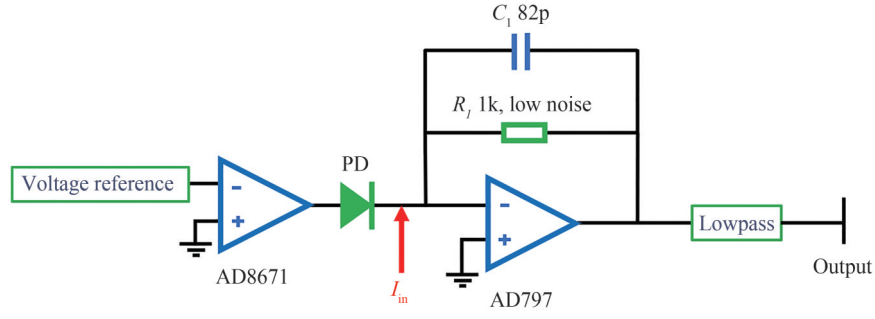


图2 低噪声光电探测原理

Fig. 2 Circuit diagram of the low noise photoelectric detection

AD797,跨阻电阻选用温漂系数低至 $\pm 0.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,容差为0.01%的金属箔电阻,跨阻电容 C_1 的作用则是提高放大器的信号质量,减少自激振荡。

在光电探测系统中,光电探测器电子学噪声主要由三种相互独立的噪声组成:光电二极管的噪声;跨阻放大电路中的热噪声;运算放大器的输入电流电压噪声。

1)采用C30642作为光电二极管,其暗噪声可表示为

$$\begin{aligned} \Delta i_{\text{PD, Dark}} &= \sqrt{2eI_{\text{dk}}\Delta f} \\ Z_s &= R_1 \parallel (1/2\pi f C_1) \\ e_{\text{TIA, Current}} &= I_{\text{noi}} \cdot |Z_s| \cdot \sqrt{\Delta f} \\ e_{\text{TIA, Voltage}} &= e_{\text{in}} \cdot |Z_n| \cdot \sqrt{\Delta f} \\ Z_d &= \frac{1}{2\pi f C_{\text{in}}} \parallel \left(R_1 \parallel \frac{1}{2\pi f C_{\text{d1}}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, \parallel 表示两个元件的并联关系, e 为电荷量, I_{dk} 为PD(C30642)的暗电流, Δf 为单位测量带宽。以本文探测器为例, I_{dk} 为2 nA, Δf 为1 Hz,得出其暗噪声大小为 $9.6 \times 10^{-18} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 。

PD产生的热噪声可以表示为

$$\Delta i_{\text{PD, Thermal}} = \sqrt{4KT\Delta f/R_{\text{PD1}}} \quad (4)$$

式中, $R_{\text{PD1}} = V_{\text{bias}}/I_{\text{dk}}$ 为PD的并联电阻, K 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度。PD在加载5 V偏压的情况下,得出PD产生的热噪声为 2.8×10^{-11} 。根据式(4)可知,加载到光电二极管的偏置电压直接影响光电二极管产生的热噪声,所以必须选用稳定且噪声较低的基准芯片。

2)跨阻电路的热噪声可以表示为

$$e_{R_f, \text{ Thermal}} = \sqrt{4KT\Delta f/R_f} \cdot |Z_s| \quad (5)$$

$$Z_s = R_1 \parallel (1/2\pi f C_1) \quad (6)$$

式中, C_1 为跨阻电路的反馈电容, R_1 为跨阻电阻。得出跨阻电路产生的热噪声为 $2.34 \times 10^{-10} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 。

3)运算放大器所引起的探测器的电子学噪声包括运算放大器输入电流和电压噪声^[35]。当运算放大器的输入电流噪声为 I_{noi} 时,则输入电流噪声经过运算放大器转化后的电压噪声和来自运算放大器输入电压噪声 e_{in} 可表示为

$$\begin{cases} e_{\text{TIA, Current}} = I_{\text{noi}} \cdot |Z_s| \cdot \sqrt{\Delta f} \\ e_{\text{TIA, Voltage}} = e_{\text{in}} \cdot |Z_n| \cdot \sqrt{\Delta f} \\ e_{\text{TIA, Voltage}} = e_{\text{in}} \cdot |Z_n| \cdot \sqrt{\Delta f} \end{cases} \quad (7)$$

式中, Z_n 为运算放大器的电压噪声增益。 Z_d 表示为跨阻放大电路的输入阻抗,可以表示为

$$Z_d = \frac{1}{2\pi f C_{\text{in}}} \parallel \left(R_1 \parallel \frac{1}{2\pi f C_{\text{d1}}} \right) \quad (8)$$

式中, C_{in} 和 C_{d1} 分别为放大电路的输入电容以及 PD 的结电容。最后可得 $e_{in} = 1.5 \times 10^{-11}$ 。

根据上述计算可知, 跨阻电路的热噪声量级较大, 其他两部分噪声也不可忽略。据此, 探测器整体的电子学噪声可表示为^[36]

$$P_{noise} = \sqrt{(4KT/R_1 \cdot |Z_s|^2 + e_{in}^2 \cdot |Z_n|^2) \cdot \Delta f} \quad (9)$$

将图 2 中的参数以及 AD797 的输出电压噪声代入式(9)进行计算, 得到对应的电子学噪声 PD_{noise} 为 $2.383 2 \times 10^{-9} \text{ V/Hz}^{1/2}$, 此噪声水平低于空间引力波探测对强度噪声要求 $(2 \times 10^{-4} \text{ V/Hz}^{1/2})$ ^[37], 满足低噪声光电探测需求, 故所设计光电探测方案理论上可应用于空间引力波探测频段的噪声评估。

2 实验装置、过程及结果分析

根据设计方案进行精密布板及探测器焊接研制, 并对其性能进行测试与实验验证。实验测试装置如图 3, 由自研全固态单频激光器输出自由空间传输的 1 064 nm 激光作为种子光, 使用光纤耦合器 (THORLABS PAF2-7C) 将种子光耦合到单模光纤中, 通过二分之一波片与偏振分束镜调节透射光功率为 60 mW, 后经过可调衰减片进行功率微调, 将 8 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约呈 60° 夹角, 并用吸收片吸收光敏面的微弱反射光^[38], 防止激光散射影响探测准确性。

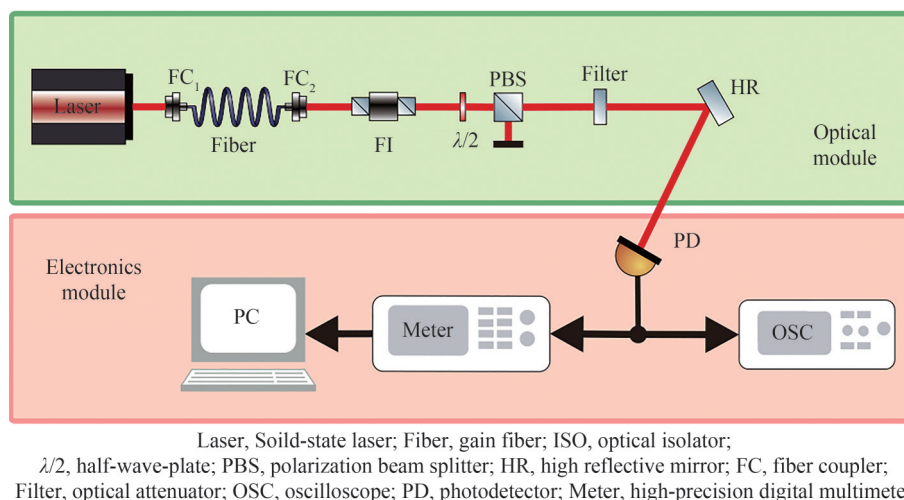


图 3 低噪声光电探测器测试示意
 Fig.3 Scheme for low noise photodetector at ultra-low frequency band

由于现有频谱分析仪等设备尚无法直接对空间引力波探测频段 0.1 mHz~1 Hz 频段噪声进行分析, 所以发展了一套极低频段激光强度噪声测试评估技术和系统^[39]。本文数据测试中采用的高精度数字万用表为吉利时 3706A 系列, 配套吉利时 3720-ST 采集卡采集电压信号。工频周期数 (Number of Power Line Cycles, NPLC) 是商用高精度万用表的重要参数之一, 其值影响着采集的精度和最高采样率。在数据采集过程中, 通过 LabVIEW 软件编程设置 3706A 的工作参数, 包括设置 NPLC 为 1 等, 此时其采集精度为七位半 (相当于 25 bit), 并设置采样率为每秒两个采样点进行数据采集, LabVIEW 软件可按照采样率将数据存储到硬盘保存并可做实时分析。

为保证极低频段激光强度噪声的准确性, 首先需要对信号采集部件进行测试, 判断其是否满足探测器的实验测试要求, 即对高精度数字万用表仪器本底噪声进行测量。将采集卡正负极进行短接, 使用高精度万用表电压采集功能进行数据采集, 得到的电压噪声为时域噪声信息, 之后通过对数频率轴功率谱密度 (Logarithmic Frequency Axis Power Spectral Density, LPSD) 算法进行谱密度分析, 得到时域波动和频域噪声信息, 从而实现对电压噪声的全面分析。

实验结果如图 4, 图 4(a) 为高精度数字万用表时域波动分析, 由图可知其电压漂移峰峰值为 $1 \times 10^{-6} \text{ V}$; 图 4(b) 为高精度万用表电子学噪声谱分析图, 由 LPSD 算法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 $4.16 \times 10^{-7} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 。此噪声水平远低于电路中各电子元件理论上的输出电压噪声,所以可选用此万用表作为噪声测量仪器。

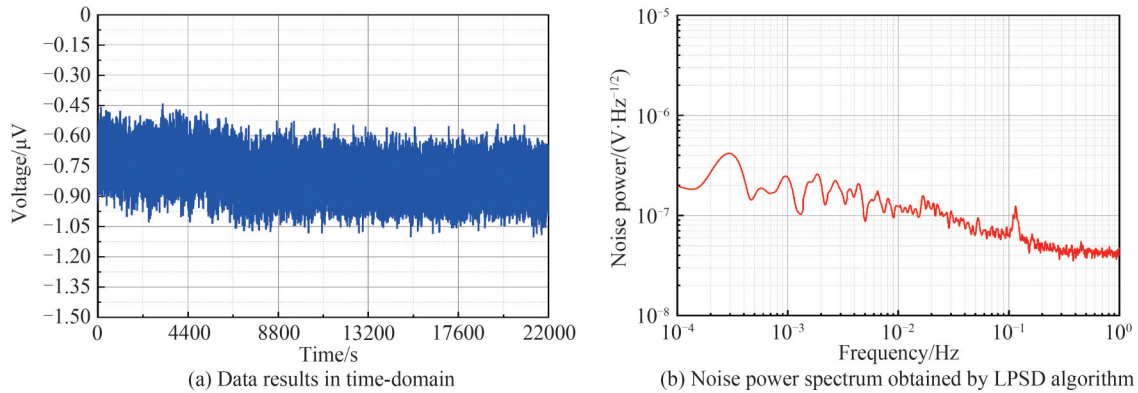


图4 高精度万用表强度噪声谱分析图

Fig.4 Intensity noise spectrum analysis diagram of high precision multimeter

根据第1节中探测器系统构架可知,光电二极管需要加载合适的反向偏压进行光电转换,反向偏压的电压稳定性会直接影响光电二极管中光电转化的稳定性,从而对光电探测系统的电子学噪声产生影响。图5为基于电压基准芯片LTZ1000和MAX6350直接输出5V时的反偏电压稳定性的时域及频域结果。该结果主要由电压芯片内部结构及材料决定,MAX6350作为通用稳定电压基准,其温度系数为 $0.001 \text{ V/}^\circ\text{C}$,噪声性能为 $1.5 \mu\text{V}_{\text{p-p}}^{[40]}$;LTZ1000是超稳定温度可控型基准,其温度系数为 $0.000\ 005 \text{ V/}^\circ\text{C}$,噪声性能为 $1.2 \mu\text{V}_{\text{p-p}}^{[41]}$ 。虽然LTZ1000全面性能优于MAX6350,但MAX6350直接输出5V基准电压,可方便地作为探测器反偏电压,且LTZ1000还需外围电路匹配才能稳定输出5V反偏电压,在电路集成设计上存在一定复杂性。

实验结果如图5,其中图5(a)为时域数据,测量时长在5h以上。图5(a)中橙色实线代表LTZ1000作为基准芯片时随时间变化的电压漂移量,可知外部电压基准电压漂移峰峰值为 $2 \times 10^{-5} \text{ V}$ 。图5(a)中蓝色实线为MAX6350随时间变化的电压漂移量,可知MAX6350电压量漂移为 $5 \times 10^{-5} \text{ V}$ 。基准源的电压漂移直接影响光电二极管反偏电压稳定性,故将LTZ1000作为主要基准芯片为电路提供基准电压及反偏电压的首选。

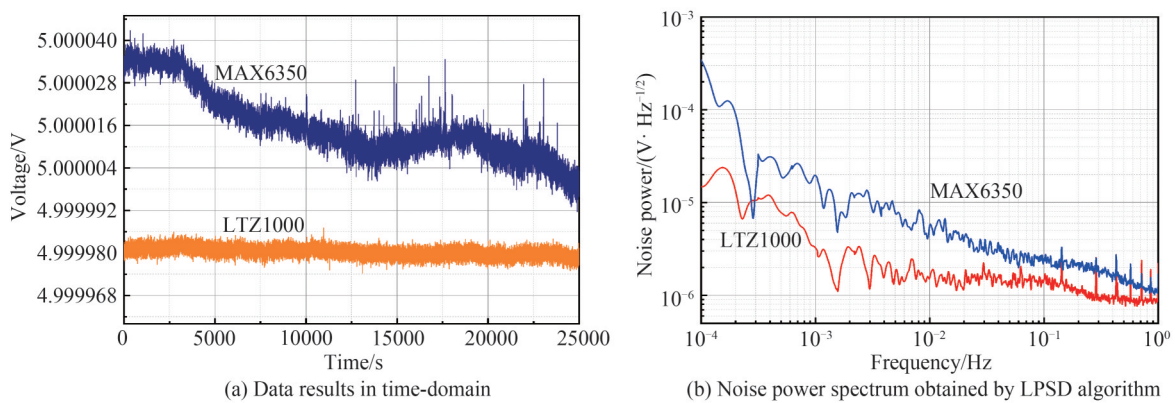


图5 不同基准芯片输出电压噪声表征

Fig.5 Noise characterization of output voltages with different reference chips

将不同基准源在频域进行对比。图5(b)为LTZ1000与MAX6350分别对同一探测器提供基准电压时对探测器电子学噪声的影响,图5(b)中红色实线为LTZ1000提供电压时探测器的电子学噪声,蓝色实线为MAX6350作为基准时探测器的电子学噪声。通过对比,在 $0.1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ 频段,LTZ1000提供电压时探测器电子学噪声低于MAX6350作为基准时的电子学噪声,并且噪声处于 $2.26 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$ 以下,满足空间引

力波探测频段的要求,故选用LTZ1000为探测器提供基准电压。

由于基准电压直接可供电流非常小,需要结合电流放大电路(AD8671)作为反偏电压,增加光电二极管电流动态范围。为了进一步验证两种基准作为反偏电压对光电探测噪声水平的影响,实验中测试了两种电压基准在电流放大电路(AD8671)后的电压稳定性。图6(a)中LTZ1000与MAX6350经过AD8671后输出电压稳定性基本一致;图6(b)所示电流放大电路中AD8671的电子噪声因素的影响大于其他噪声源。据此,仍需对电流放大电路进行优化设计,以便获得更低噪声更高稳定性的反偏电压,进一步降低整体电路的电子学噪声。

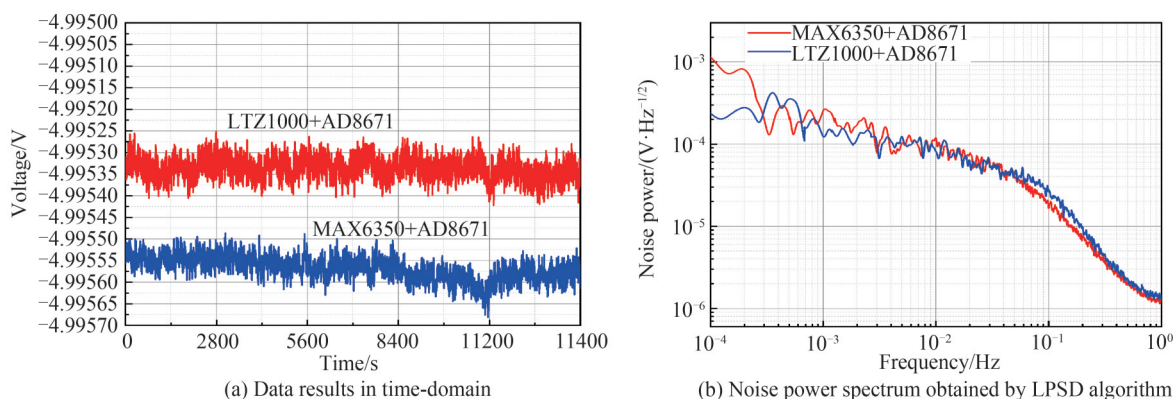


图6 不同基准芯片经过AD8671后输出电压噪声表征

Fig 6 Noise characterization of output voltages with different reference chips which pass AD8671

进一步,在关闭种子源激光后测量光电二极管和跨阻芯片对探测器电子学噪声的影响,实验结果如图7,其中图7(a)为钢镓砷二极管(C30642)与普通光电二极管(GPD-SN500T46-B30PC)的对比。由图可知,在相同测试环境下当C30642作为探测器光电二极管时,其暗电流噪声整体优于普通二极管。

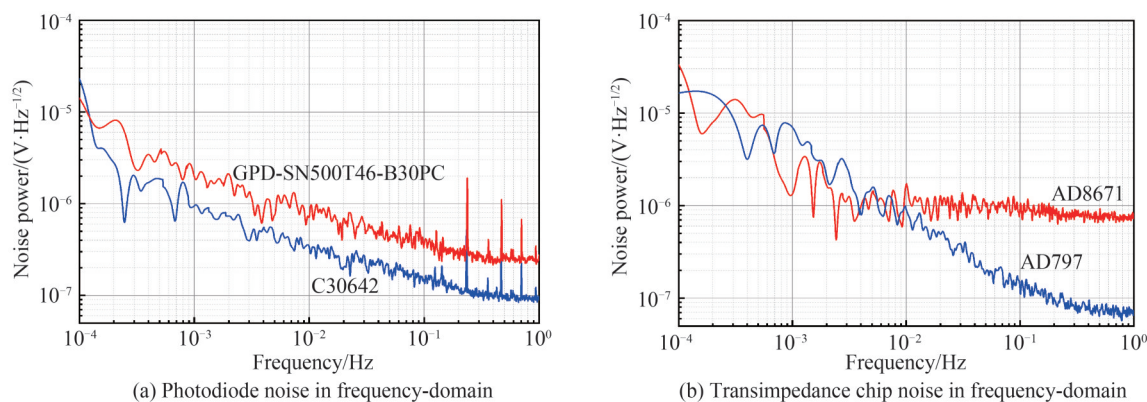


图7 光电二极管与跨阻芯片的噪声功率谱表征

Fig 7 Noise power spectrum of photodiode and transimpedance chip

图7(b)中红色实线为AD8671作为探测器跨阻芯片时的电子学噪声,蓝色实线为AD797作为探测器跨阻芯片时的电子学噪声。图中数据为LPSD算法处理结果,由图7(b)可知当两个芯片作为光电探测器跨阻芯片时,电子学噪声在0.1 mHz~1 Hz范围内均低于 $1.94 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$,但AD797在高于0.1 Hz频段的电子学噪声低于AD8671,选用AD797更优于AD8671,故选用AD797作为探测器的跨阻芯片。

通过上述对比,最终选用LTZ1000和AD797作为探测器主要芯片稳定探测器电压漂移和降低探测器电子学噪声。同时,使用低噪声电源,在没有光源的情况下测量光电探测器的电子学噪声,并利用高精度万用表对探测器电子学噪声进行测试,进一步利用激光器输出8 mW光功率对探测器抬高进行评估,最后使用LPSD算法对测试结果进行处理。图8(a)为探测器时域数据,可知光电探测器电子学噪声在5 h内波动峰峰值为 $3.42 \times 10^{-6} \text{ V}$,均值为 $-1.45 \times 10^{-5} \text{ V}$;图8(b)中红色实线为探测器电子学噪声经过LPSD算法处理

结果,从图中可知光电探测器电子学噪声在0.1 mHz~1 Hz范围内低于 $1.74 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$,该电子学噪声满足空间引力波探测要求。为当入射光功率8 mW激光时,在1 Hz以内探测器对应的功率谱密度达到40 dB以上,在空间引力波频段完成对激光强度噪声的表征,如图8(b)中蓝色实线。

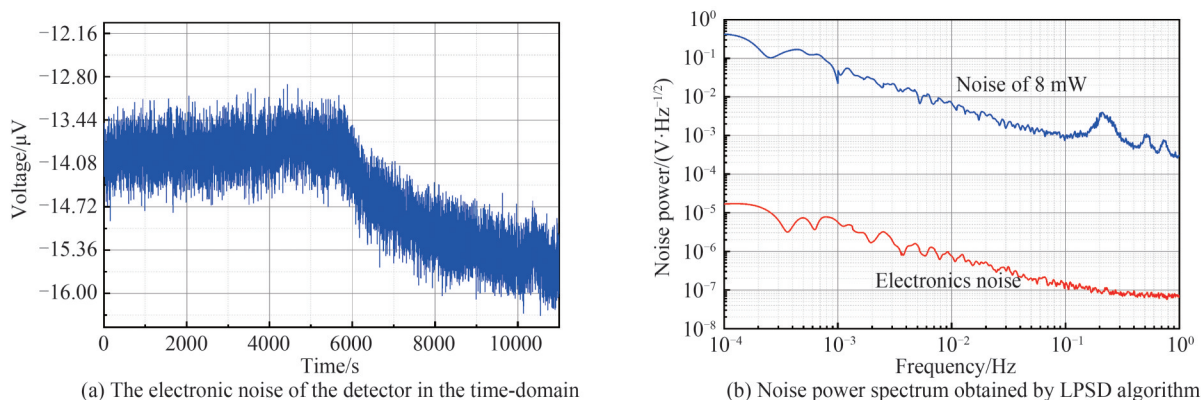


图8 探测器电子学噪声测试表征
Fig 8 The electronic noise of the detector

3 结论

从空间引力波频段激光强度噪声抑制中低噪声光电探测的需求出发,在分析光电探测噪声传递的基础上构建低噪声光电探测器,采用稳定基准电压作为光电二极管的反偏电压,结合跨阻放大电路设计,并采用低噪声芯片、低温漂电阻以及电磁屏蔽等手段研发低噪声光电探测器。搭建探测器测试平台,利用高精度数字万用表对低噪声光电探测器的电子学噪声及增益特性进行长时间测试采集,并通过LPSD算法进行频域噪声功率谱分析。所研发探测器在0.1 mHz时,电压噪声谱密度达到 $1.649 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$;在1 mHz时,电压噪声谱密度达到 $6.95 \times 10^{-6} \text{ V/Hz}^{1/2}$;在1 Hz时,电压噪声谱密度达到 $7.07 \times 10^{-8} \text{ V/Hz}^{1/2}$;其电子学噪声低于空间引力波频段激光强度噪声要求。在8 mW光入射探测器时,增益为40 dB以上。所研制探测器为光电负反馈法抑制空间引力波频段激光强度噪声提供了实验方案及关键器件。

参考文献

- [1] BAILES M, BERGER B K, BRADY P R, et al. Gravitational-wave physics and astronomy in the 2020s and 2030s[J]. Nature Reviews Physics, 2021, 3(5): 344-366.
- [2] LUO Z, WANG Y, WU Y, et al. The Taiji program: a concise overview[J]. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2021, 2021(5): 05A108.
- [3] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(3): 035010.
- [4] BADARACCO F, HARMS J, DE ROSSI C, et al. KAGRA underground environment and lessons for the Einstein Telescope[J]. Physical Review D, 2021, 104(4): 042006.
- [5] LI Qinghui, LI Wei, SUN Yu, et al. Laser parameters requirement for third-generation ground-based gravitational wave detection[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(16): 164203.
李庆回,李卫,孙瑜,等.面向第三代地基引力波探测的激光源需求分析[J].物理学报,2022,71(16):164203.
- [6] ZHANG Xinmin, SU Meng, LI Hong, et al. Primordial gravitational waves and the ali probe project[J]. Modern Physics, 2016, 28(2): 3-9.
张新民,苏萌,李虹,等.原初引力波与阿里探测计划[J].现代物理知识,2016,28(2):3-9.
- [7] HAMMESFAHR A. LISA mission study overview[J]. Classical and Quantum Gravity, 2001, 18(19): 4045.
- [8] ZHANG Lihua, LI Ming, GAO Yongxin, et al. The spacecraft system and platform technologies for gravitational wave detection in space[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(1-2): 129-137.
张立华,黎明,高永新,等.空间引力波探测航天器系统及平台技术[J].中山大学学报(自然科学版),2021,60(1-2):129-137.
- [9] LANGE B O. The control and use of drag-free satellites[M]. Palo Alto :Stanford University, 1964.
- [10] HU Ming, LI Hongyin, ZHOU Zebing. Drag-free control technology and its applications [J]. Manned Spaceflight, 2013(2): 61-69.

- 胡明, 李洪银, 周泽兵. 无拖曳控制技术及其应用[J]. 载人航天, 2013 (2): 61-69.
- [11] ZHU Zhu, ZHAO Yanbin, YOU Chaolan, et al. Drag-free control of non-contact satellite platform for space gravitational wave detection[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S): 9-13.
祝竺, 赵艳彬, 尤超蓝, 等. 面向空间引力波探测的非接触式卫星平台无拖曳控制技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(S): 9-13.
- [12] DENG Jianfeng, CAI Zhiming, CHEN Kun, et al. Drag-free control and its application in China's space gravitational wave detection[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 503-514.
邓剑峰, 蔡志鸣, 陈琨, 等. 无拖曳控制技术研究及在我国空间引力波探测中的应用[J]. 中国光学(中英文), 2019, 12(3): 503-514.
- [13] LIAN X, ZHANG J, YANG J, et al. The determination for ideal release point of test masses in drag-free satellites for the detection of gravitational waves[J]. Advances in Space Research, 2021, 67(2): 824-833.
- [14] MING M, LUO Y, LIANG Y R, et al. Ultraprecision intersatellite laser interferometry [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2(2): 022003.
- [15] LI Hongyin, LIU Yanchong, WANG Chengrui, et al. Preliminary design consideration and development of TianQin inertial sensor[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(1-2): 186-193.
李洪银, 刘雁冲, 王铖锐, 等. 天琴惯性传感器初步设计思考与进展[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(1-2): 186-193.
- [16] WU Shufan, WANG Nan, GONG Deren. Key technologies for space science gravitational wave detection[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(2): 118-127.
吴树范, 王楠, 龚德仁. 引力波探测科学任务关键技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(2): 118-127.
- [17] ZIEMER J K, MARRESE R C M, ARESTIE S M, et al. LISA colloid microthruster technology development plan and progress[J]. IEPC, 2019, 895.
- [18] LIU Hui, WANG Shangsheng, YU Daren, et al. Life assessment research status of micro-Newton electric propulsion system for space gravitational wave detection[J]. Chinese Space Science and Technology, 2021, 41(5): 10-20.
刘辉, 王尚胜, 于达仁, 等. 空间引力波探测微牛电推进寿命评估研究现状[J]. 中国空间科学技术, 2021, 41(5): 10-20.
- [19] LIU Qiang, WANG Zaiyuan, WANG Jiehao, et al. Research progress on low-noise laser for space-based gravitational wave detector (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7): 0751409.
柳强, 王在渊, 王浩浩, 等. 面向空间引力波探测的低噪声激光器研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7): 0751409.
- [20] WANG Zaiyuan, WANG Jiehao, LI Yuhang, et al. Single-frequency laser with low intensity noise in milli-hertz band for space-based gravitational wave detection[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(5): 054205.
王在渊, 王浩浩, 李宇航, 等. 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[J]. 物理学报, 2023, 72(5): 054205.
- [21] WILLKE B, UEHARA N, GUSTAFSON E K, et al. Spatial and temporal filtering of a 10-W Nd:YAG laser with a Fabry-Perot ring-cavity premode cleaner[J]. Optics Letters, 1998, 23(21): 1704-1706.
- [22] CHEN Y, ZHANG J, LI Y. Reduction of intensity noise of single-frequency Nd:YVO₄ laser using mode cleaner[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(3): 197-200.
- [23] TSE M, YU H, KIJBUNCHOON, et al. Quantum-enhanced advanced LIGO detectors in the era of gravitational-wave astronomy[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(23): 231107.
- [24] ACERNESE F, AGATHOS M, AIELLO L, et al. Increasing the astrophysical reach of the advanced virgo detector via the application of squeezed vacuum states of light[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(23): 231108.
- [25] LIU Kui, YANG Rongguo, ZHANG Hailong, et al. Noise suppression of single frequency fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1852-1856.
刘奎, 杨荣国, 张海龙, 等. 单频光纤激光器的噪声抑制[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1852-1856.
- [26] 张骥. 光纤激光器噪声测量与抑制技术的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [27] WANG Yajun, GAO Li, ZHANG Xiaoli, et al. Recent development of low noise laser for precision measurement (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(12): 20201073.
王雅君, 高丽, 张晓莉, 等. 用于精密测量的低噪声激光器研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(12): 20201073.
- [28] KWEE P, WILLKE B, DANZMANN K. Shot-noise-limited laser power stabilization with a high-power photodiode array[J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2912-2914.
- [29] LI Yuqiong, WANG Luyu, WANG Chenyu. Preliminary test of performance detection and analysis of weak-light detector for space gravitational wave detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1710-1718.

- 李玉琼,王璐钰,王晨昱.面向空间引力波探测的弱光探测器性能检测与分析[J].光学精密工程,2019,27(8):1710-1718.
- [30] WANG Weijie, LI Fan, LI Jianbo, et al. Research on low noise balanced homodyne detection system for space-based gravitational wave detection (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 20220300.
王炜杰,李番,李健博,等.面向空间引力波探测的低噪声平衡零拍探测系统研究(特邀)[J].红外与激光工程,2022,51(6):20220300.
- [31] COOLEY J W, TUKEY J W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series[J]. Mathematics of Computation, 1965, 19(90): 297-301.
- [32] DE S K, STEBBINS J L, CHEN L H, et al. Design, synthesis, and structure-activity relationship of substrate competitive, selective, and in vivo active triazole and thiadiazole inhibitors of the c-Jun N-terminal kinase[J]. Journal of Medicinal Chemistry, 2009, 52(7): 1943-1952.
- [33] ZHAO Zilin, LI Fan, LI Ruixin, et al. Noise characterization of low noise voltage reference at low frequency band[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2022, 28(1): 1-7.
赵子琳,李番,李瑞鑫,等.低频段低噪声电压基准源的电压噪声测试与表征[J].量子光学学报,2022,28(1):1-7.
- [34] ZHOU H, WANG W, CHEN C, et al. A low-noise, large-dynamic-range-enhanced amplifier based on JFET buffering input and JFET bootstrap structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 15(4): 2101-2105.
- [35] KAY A. Operational amplifier noise: techniques and tips for analyzing and reducing noise[M]. Amstel dam: Elsevier, 2012.
- [36] 王锦荣.压缩光源中高性能光电探测器的实验研究[D].太原:山西大学,2021.
- [37] TRÖBS M, HEINZEL G. Improved spectrum estimation from digitized time series on a logarithmic frequency axis[J]. Measurement, 2006, 39(2): 120-129.
- [38] JUNKER J, OPPERMANN P, WILLKE B. Shot-noise-limited laser power stabilization for the AEI 10 m Prototype interferometer[J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 755-758.
- [39] LI Fan, WANG Jiawei, GAO Zichao, et al. Laser intensity noise evaluation system for space-based gravitational wave detection[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(20): 209501.
李番,王嘉伟,高子超,等.面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统[J].物理学报,2022,71(20):209501.
- [40] Analog devices[DB/OL]. [2023-02-06].<https://www.analog.com/cn/products/max6350.html#product-overview>.
- [41] Analog devices[DB/OL]. [2023-02-06].<https://www.analog.com/cn/products/ltz1000.html>.

Low Noise Photoelectric Detection Technology for Laser Intensity Noise Suppression in mHz Band

ZHENG Liang¹, LI Fan¹, WANG Jiawei¹, LI Jianbo¹, GAO Li¹, HE Ziyang¹, SHANG Xin¹,
YIN Wangbao^{2,3}, TIAN Long^{1,3}, YANG Wenhai⁴, ZHENG Yaohui^{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)

(4 China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: The high sensitivity of gravitational wave detection provides a new way to explore the universe. Gravitational wave detection is a field of modern physics that has gained significant importance. The primary focus of space gravitational wave detection is to capture gravitational wave signals in the frequency range of 0.1 mHz to 1 Hz, which are mainly released by double compact star systems and astronomical events such as the merger of double black hole celestial bodies with a maximum mass ratio. This detection method complements ground-based gravitational wave and primary gravitational wave detection techniques. Space gravitational wave detection primarily relies on the establishment of a high-precision space inertial reference load ultra-stable platform across multiple satellites and high-precision inter-satellite laser interferometry technology as its core, including the tow-free control technology, ultra-high-precision inter-satellite laser interferometry technology, ultra-high sensitivity inertial sensing technology, precision formation technology, micro-new micro-push technology, and more. The laser source noise of spaceborne

laser systems directly affects the sensitivity of ultra-high precision inter-satellite laser interferometry technology. Therefore, it is necessary to suppress laser intensity noise. Low noise laser source is essential to build a large-scale laser interferometer device for both space and ground-based gravitational wave detection. With suppressing the noise of the laser source by photoelectric feedback, the sensitivity of the gravitational wave detection device is improved. In the photoelectric feedback loop, the signal detected by the photodetector is first subtracted from the signal of voltage reference source, after passing through the proportional integral differentiator, it is then fed back to the pump photocurrent to suppress the noise of the laser source. During the feedback process, the photoelectric detection is the first stage to acquire the signal, the noise level of the photodetector will directly affect the performance of subsequent feedback loop. To improve the accuracy of the detection and level of the noise suppressing, the electronic noise of the photodetector must be restrained while the detection range must be expanded. To deal with the problems mentioned above, the photodetector with low noise is finally designed by choosing low noise voltage reference chip, low dark current photodiode, using low temperature drift factor element, designing transimpedance amplifiers circuit together with precise temperature controlling and electromagnetic shielding. Photodiodes need to be loaded with appropriate reverse bias for photoelectric conversion. The voltage stability of the reverse bias will directly affect the stability of photoelectric conversion in the photodiode, thus affecting the electronic noise of the photoelectric detection system. At the same time, the electronic noise of the photodetector is measured using a low noise power supply without a light source, and the electronic noise of the detector is tested using a high-precision multimeter. The performance of the designed photodetector is evaluated with the low frequency intensity noise evaluation system. The results show that the electronic noise spectral density of the detector is less than $1.649 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$, $1.649 \times 10^{-5} \text{ V/Hz}^{1/2}$ at 0.1 mHz, $6.95 \times 10^{-6} \text{ V/Hz}^{1/2}$ at 1 mHz, $7.07 \times 10^{-8} \text{ V/Hz}^{1/2}$ at 1 Hz at the frequency of the space gravitational wave band. The gain of the photodetector is 40 dB with 8 mW laser injecting into the photodiode. The performance of the designed photodetector satisfies the requirement of laser noise suppressing for gravitational wave detection. In order to characterize the relative intensity noise of a laser light source and address the need for noise suppression in space gravitational wave detection, a system is developed to evaluate laser intensity noise for this purpose. This system includes a key device in the feedback loop for suppressing relative intensity noise within the frequency band of space gravitational wave detection: a low noise photodetector. Such photodetector plays a crucial role in the devices of laser noise suppressing for gravitational wave detection.

Key words: Laser amplifier; Space-based gravitational wave detection; Photoelectric detection; Voltage noise characterization; Logarithmic spectral density algorithm

OCIS Codes: 140.3280; 270.3430; 040.5160; 140.3425; 380.3400