

文章编号 1004-924X(2019)08-1710-09

面向空间引力波探测的 弱光探测器性能检测与分析

李玉琼^{1*}, 王璐钰^{2,3}, 王晨昱^{1,4}

- (1. 中国科学院力学研究所 国家微重力实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院光电研究院 浮空器系统研究发展中心, 北京 100094;
3. 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049;
4. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘要:为了研制出满足未来空间引力波探测需求的弱光探测器,初步进行了弱光探测器性能检测,分析了探测器的响应度、响应带宽、本底噪声等性能指标,以筛选出能满足未来空间引力波探测要求的探测器研制途径和解决方案。首先,根据空间引力波探测太极计划的激光器功率、轨道、星间距等设计方案,推算出太极计划所需探测器的性能指标;然后,与中国电子科技集团公司第四十四研究所、西南技术物理研究所和中国科学院上海技术物理研究所等单位合作研制了 3 款弱光探测器;最后,利用本课题组研制的低噪外差激光干涉系统对其响应度、响应带宽及本底噪声等指标进行检测,并分析了影响探测器性能指标的因素。实验结果表明:其中两款探测器的响应度优于 1.8×10^3 V/W,响应带宽大于 10 MHz;3 款探测器的本底噪声均低于 $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}@10 \text{ mHz}$ (0.1 mHz~1 Hz),信噪比高于 20 dB。这 3 款探测器在响应度、响应带宽和信噪比等方面具有满足未来太极计划实验星要求的潜力。

关键词:空间引力波探测;弱光探测器;太极计划

中图分类号: TN15; P142.84 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192708.1710

Preliminary test of performance detection and analysis of weak-light detector for space gravitational wave detection

LI Yu-qiong^{1*}, WANG Lu-yu^{2,3}, WANG Chen-yu^{1,4}

- (1. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
 2. Center for LTA System Research and Development, Academy of Opto-electronic of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
 3. Academy of Opto-electronic, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
 4. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
- * Corresponding author, E-mail: liyuqiong@imech.ac.cn

Abstract: To develop a weak-light detector that meets the needs of space gravitational wave detection

收稿日期: 2018-12-24; **修订日期:** 2019-01-25.

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(No. XDB23030200); 国家自然科学基金资助项目(No. 61575209); 中国科学院青年创新促进会项目(No. 2018024)

in the future, the performance detection of weak-light detectors was initially carried out, and the performance parameters, such as responsiveness, response bandwidth and background noise, of the detectors were analyzed, for finding out the method and solution of weak-light detector development that can meet the requirements of future space gravitational wave detection. Firstly, according to the design scheme of the space gravitational wave detection, e. g. Taiji, including laser power, orbit design and star spacing, the parameters of the detector required by Taiji were calculated. Next, three kinds of weak-light detectors were developed by the China Electronics Technology Group Corporation No. 44 Research Institute, Southwest Institute of Technical Physics, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences with joint efforts of our research group. Finally, the responsivity, response bandwidth, and background noise of the detectors were tested by the low-noise heterodyne laser interferometry system developed by our research group, and the factors affecting the performance of the detectors were analyzed. The experimental results show that the responsiveness of two detectors is better than 1.8×10^5 V/W and that the response bandwidth is greater than 10 MHz. The ground noise of the three detectors is lower than $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}@10 \text{ mHz}$ (0.1 mHz-1 Hz), and the signal-to-noise ratio is higher than 20 dB. According to the aforementioned experimental results, the three detectors have the potential to meet the requirements of the Taiji Pathfinder in terms of responsiveness, response bandwidth, and signal-to-noise ratio.

Key words: space gravitational wave detection; weak-light detector; Taiji

1 引 言

引力波探测是 21 世纪物理学领域最重要的科学探索之一,它是爱因斯坦广义相对论的直接验证,并将开拓引力波天文学窗口,使人类的视野变得更深远。为探测引力波的波动效应,直接检验爱因斯坦广义相对论,提供引力波存在的直接证据,同时为超越电磁波的相互作用,揭示更多关于恒星、星系及宇宙前所未知的信息,目前国际上已经建立了多个地面引力波天文台,如美国的 LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)^[1-2],意大利-法国合作的 Virgo^[3-4],德国的 GEO 600^[5-6],日本的 TAMA 300^[7-8],以及正在建设的澳大利亚 AIGO^[9-10]等。2016 年 2 月 12 日,PRL (Physical Review Letters) 杂志报道了美国 LIGO 直接探测到来自遥远星系双黑洞碰撞所产生的引力波,这是人类科学史上一个具有里程碑意义的巨大发现,为人类探索、观测宇宙提供了新的手段^[11]。

为了扩展引力波探测的频段范围,并绕过地球地表噪声的影响,欧空局、美国、中国和日本等

国已开始规划建设百万公里量级的长基线空间引力波探测计划,包括欧空局提出的 LISA (Laser Interferometer Space Antenna)^[12-13] 以及 eLISA (evolved-LISA)/NGO (New Gravitational Observatory) 计划^[14-15]、美国的 BBO (Big Bang Observer) 计划^[16-17]、日本的 DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory) 计划^[18-19],以及中国科学院提出的太极计划^[20-22]和中山大学提出的天琴计划^[21,23]等。

太极计划是由中国科学院发起和提出,院内外十多个科研院所共同参与的空间引力波探测计划。其主要科学目标为探测中等质量黑洞并合、中等质量比黑洞双星绕转,以及大质量天体合并时产生的引力波辐射^[24]。太极计划规划在 2033 年前后,发射三颗绕日轨道卫星,组成等边三角形的激光外差干涉测距系统,星间距为 300 万公里,激光干涉测量精度要求为 $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$ ^[25-26]。

由太极计划设计方案可知,波长为 1 064 nm、功率为 2 W 的激光从远端航天器出射后,经过 300 万公里传播到达本地航天器,被直径为 40 cm 的望远镜所接收到的光信号衰减到原功率的

10^{-9} , 而测距科学干涉仪的光电探测器所能接收的光强仅为 100 pW 量级^[28-29]。因此, 弱光探测成为太极计划的重点研究问题。

另外, 为解决激光干涉仪中因激光指向抖动所引起的位移测量误差问题, 需发展激光指向控制技术。目前, 国际上所形成的方法学共识是差分波前检测 (Differential Wave Sensing, DWS) 技术^[28], 此技术最核心的问题是如何设计由四象限探测器和高精度相位计所构成的指向敏感器。由于激光指向控制精度需达 $1 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$, 因此对四象限光电探测器的指标也提出了极其苛刻的要求。在未来的卫星系统中, 为简化系统设计和减少元器件, 科学干涉仪是利用四象限的平均读出来获得位移数据。由此可知, 太极计划需要的探测器是一个四象限探测器。根据太极计划实验星和太极计划的方案设计, 推算出太极计划实验星所需的光电探测器指标参数如下: 工作波长为 1 064 nm; 象限有 4 个; 频响带宽为 1 MHz~20 MHz; 响应度 $\geq 1.8 \times 10^5 \text{ V/W}$; 光敏直径为 1 mm; 等效噪声功率 $\leq 4.5 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$; 等效噪声电流 $\leq 2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$; 象限间距 $\leq 40 \text{ }\mu\text{m}$; 象限间信号串扰 $\leq -20 \text{ dB}$; 象限均匀性优于 99%; 信噪比 $\geq 20 \text{ dB}$ 。太极计划的光电探测器指标参数如下: 工作波长为 1064 nm; 象限有 4 个; 频响带宽 1 MHz~30 MHz; 响应度 $\geq 6 \times 10^6 \text{ V/W}$; 光敏直径为 1 mm; 等效噪声功率 $\leq 1.5 \text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$; 等效噪声电流 $\leq 1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$; 象限间距 $\leq 25 \text{ }\mu\text{m}$; 象限间信号串扰 $\leq -30 \text{ dB}$; 象限均匀性优于 99%; 信噪比 $\geq 30 \text{ dB}$ 。

针对空间引力波探测 LISA 计划的技术需求, Abhay M. Joshi 等人研制了光敏直径为 1 mm 的 InGaAs 低噪四象限光电探测器, 响应频率达 20 MHz, 象限间信号串扰 $< -45 \text{ dB}$, 等效输入电流噪声密度 $< 1.7 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, 耐质子辐射剂量达 30 MeV, 并具备良好的耐冲击和振动性能^[30-32]。而目前国内市场上没有满足空间引力波探测需求的四象限光电探测器, 国际上则对此技术进行封锁。因此, 低噪弱光四象限探测器的自主研发成为必然选择。前期调研可知, 中国电子科技集团公司第四十四研究所、西南技术物理研究所及中国科学院上海技术物理研究所具备研制出满足未

来空间引力波探测需求的光电探测器的能力。因此, 本课题组分别与这 3 个研究所进行了低噪弱光探测器的合作研制, 并进行了性能检测及分析 (为叙述方便, 将上述 3 款探测器分别定义为探测器 A、探测器 B 和探测器 C), 期望能获得未来太极计划所需探测器的技术解决途径。根据四象限探测器的研制方案, 前期研究需要解决探测器的响应度、响应带宽和本底噪声等问题。因此, 本文着重阐述了目前所研制探测器的响应度、响应带宽和本底噪声等性能指标。在后续研究工作中, 再继续解决探测器的均匀性、串扰性以及空间验证等问题。

2 光电探测器设计

2.1 光电探测器参数定义

光电探测器是利用光电效应, 将光信号转换成电学信息的器件。针对本文所着重阐述的响应度、响应频率范围、本底噪声和信噪比等性能指标, 对其物理意义进行定义。

响应度: 探测器光电转换能力, 表征为输出电压与输入光强之比。

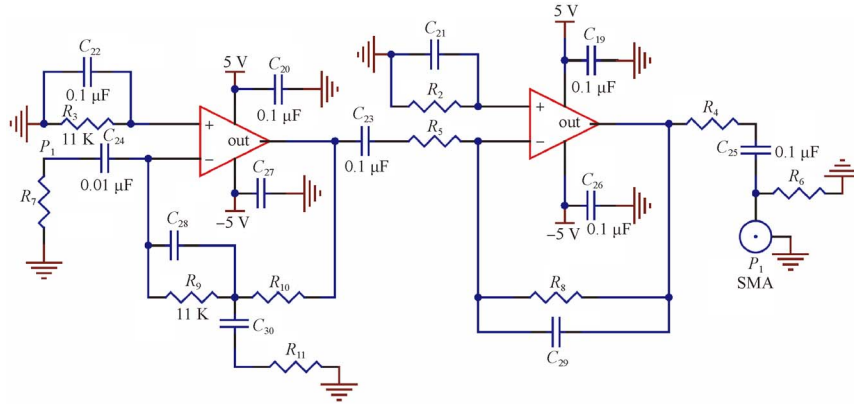
频响带宽: 探测器的 -3 dB 带宽, 针对在 -3 dB 带宽之内的输入频率, 探测器均可以正常响应。

本底噪声: 探测器的电子电路噪声。

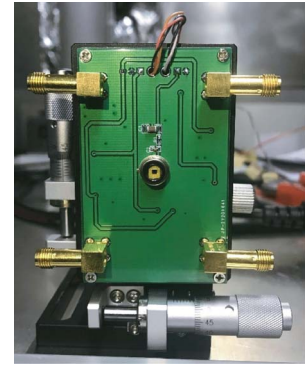
信噪比: 信号幅值与噪声均方根的比值。

2.2 光电探测器电路设计与分析

针对太极计划所需求的弱光探测器, 探测器 A、B、C 的设计原理及实物如图 1~图 3 所示。探测器设计的总体思路如下: 硅基或者 InGaAs 型光电管实现光到电流的转换, 跨阻型放大器实现电流到电压的转换。由于光强太弱, 一级跨阻放大所得到的电压信号依然比较小, 须考虑再用一个反向放大器对电压进行第二级放大, 最后通过阻抗匹配输出, 得到所需求的电信号。为有效滤除外差激光干涉信号的直流本底, 电路设计中采用了隔直和滤波电容。3 款探测器的不同之处在于电阻、电容的参数选择, 以及对探测器响应度、频响带宽以及噪声的平衡考虑。

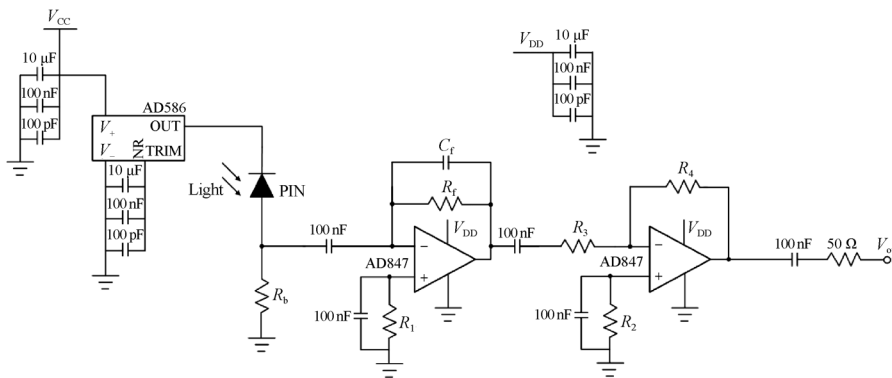


(a)原理图
(a) Schematic diagram

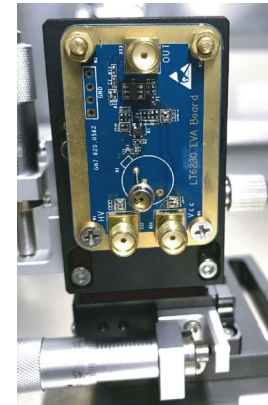


(b)实物图
(b) Physical picture

图 1 探测器 A 的原理图及实物图
Fig. 1 Schematic diagram and physical picture of detector A

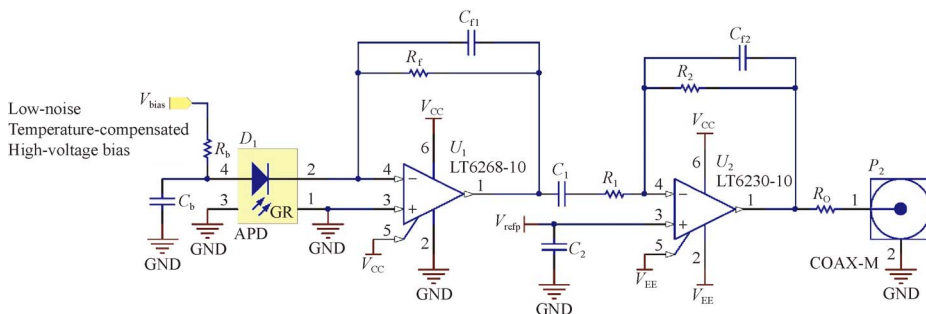


(a)原理图
(a) Schematic diagram

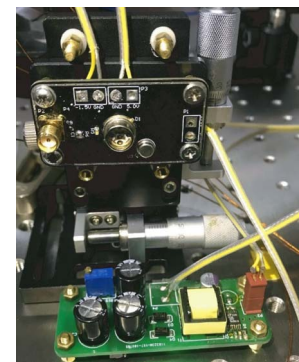


(b)实物图
(b) Physical picture

图 2 探测器 B 的原理图及实物图
Fig. 2 Schematic diagram and physical picture of detector B



(a)原理图
(a) Schematic diagram



(b)实物图
(b) Physical picture

图 3 探测器 C 的原理图及实物图
Fig. 3 Schematic diagram and physical picture of detector C

分析以上原理图可知,3款探测器均采用一阶低通滤波电路以及接地、屏蔽措施,可有效滤除系统中的杂散信号。探测器 A,B 的电路系统具有二阶传递函数,探测器 C 具有三阶传递函数,并且探测器 C 利用两路一阶低通滤波电路能更有效地滤除杂散波信号,从而得到信噪比更高的输出信号。

$$G_C(S) = \frac{R_0 R_f C_1 S}{RR_1 R_2 R_f C_1 C_2 S^3 + (R_1 R_2 C_1 C_2 + RR_1 R_f C_1 C_1 + RR_2 R_f C_1 C_2) S^2 + (RR_f C_1 + R_1 C_1 + R_2 C_2) S + R_f} \quad (3)$$

由传递函数可知,探测器的频响带宽与前向通路中的电阻、电容数值及设计位置有关,性能优良的探测器需要综合考虑电阻电容选值、放大电路形式、集成方式和使用环境等各方面因素。

3 实验系统构建

3.1 实验平台

为有效降低环境中的震动噪声、温度涨落噪声以及电磁噪声等环境噪声对光电探测器性能检测的影响,本文构建了如图 4 所示的低噪实验平台。针对震动噪声采取了隔离地基和气浮支柱相结合的二级减震方案进行隔离,隔振地基的固有频率约为 7.8 Hz,气浮支柱的本征共振频率为 1 Hz;针对温度涨落噪声采用了具备温度调节和恒温功能的净化系统及高真空系统来抑制,本真空系统的极限真空可达 5×10^{-5} Pa,静态工作真空为 5×10^{-2} Pa,能大幅降低由温度波动所引起的热噪声;同时本真空系统采取了全金属密封设计,可大大降低电磁噪声对光电探测器的影响。实验平台如图 5 所示。

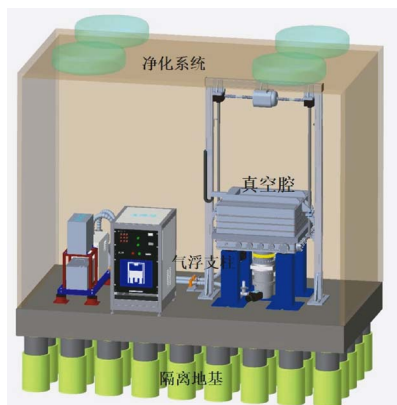


图 4 低噪实验平台原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of low-noise experimental setup

经计算,探测器 A,B,C 的传递函数依次为:

$$G_A(S) = G_1(S) \times G_2(S) = \frac{R_0 R_8 C_{24} C_{23} S^2}{R_9 R_5 C_{23} C S^2 + (R_9 C + R_5 C_{23}) S + 1}, \quad (1)$$

$$G_B(S) = G_1(S) \times G_2(S) = \frac{R_f R_4 C_1 C_2 S^2}{R_f R_3 C_f C_2 S^2 + (R_f C_f + R_3 C_2) S + 1}, \quad (2)$$



图 5 低噪实验平台实物图

Fig. 5 Physical picture of low-noise experimental setup

3.2 外差式激光干涉系统

本实验采用低噪外差式激光干涉系统测试探测器的各项性能指标,它由光源调制系统和干涉仪构成,如图 6 所示。光源调制系统位于真空腔外,其主要功能是提供两束具有一定差分频率的激光,并进行光强衰减。本实验所采用的激光器为 Nd:YAG 固体激光器,波长为 1 064 nm,光功率为 300 mW,频率稳定性优于 0.7 MHz/3 h,光功率稳定性优于 1%/3 h。激光通过法拉第隔离器后经半反半透镜分为两路,然后利用声光调制器(频率稳定性为 10^{-7})对激光进行调频,调频后两束激光的差分频率为 1 kHz~10 MHz,分辨率为 1 kHz。楔形镜片的主要作用是改变激光经声光调制器调制后衍射光的传播方向,使调频后的激光传播方向与光学平台保持平行。同时,采用具有 4 个量级连续可调的中性衰减片衰减激光的光功率,以达到实验所需的弱光要求。最后,通过两个单模光纤将频移光束注入到真空腔内的干涉仪中。

干涉仪位于真空腔中,它是典型的 Mach-Zende 型干涉仪,由光学平台及光学镜片组成。为进一步降低热噪声影响,光学平台采用具有超低热膨胀系数的殷钢光学平台(热膨胀系数为

$\pm 2 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$)。同时,为消除激光频率不稳定性噪声,这里构建等臂长干涉仪。另外,为取得更好的干涉效果,利用两个线偏振片来调节激光的偏振状态,以保证两干涉激光束偏振态的一致性。

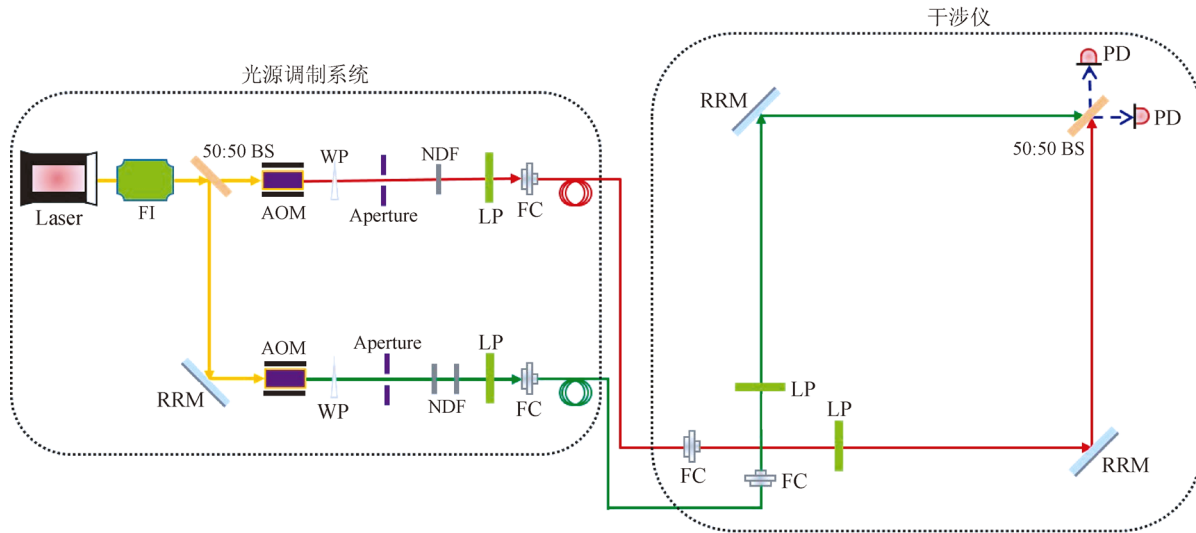


图 6 外差式激光干涉系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of heterodyne laser interferometer

4 实验结果与分析

4.1 响应度

通过调节声光调制器使两路激光差分频率固定为 1 MHz。模拟未来太极计划实验星的干涉光强,将第一干涉光路的光强固定为 $10 \mu\text{W}$ (模拟本地激光光强),在保持各探测器终端输出信号峰峰值为 1 V 的前提下,观测第二路干涉光路所需的光强。由表 1 可知,探测器 A 所需的第二路干涉光光强为 $10 \mu\text{W}$,而 B 和 C 分别仅需 50, 10 nW。此实验结果表明,探测器 B 和 C 较 A 有着更高的响应度,探测器 B 和 C 在响应度方面可满足未来太极计划实验星的需求。根据干涉光强和输出信号峰峰值(假设干涉效率为 100%),可计算 A,B,C 三款探测器的响应度,如表 1 所示。探测器 A 响应度低的主要原因是采用了硅基光电管,对 1 064 nm 波长的激光光电转化效率较低;同时,在综合考虑响应度和频响带宽等方面,此探测器更多地考虑了带宽,选择阻值较小的跨阻,导致探测器 A 将电流转换成电压的放大倍数不够。后续工作中将优化探测器 A 跨阻的阻值,提升响应度。

表 1 探测器响应度

Tab. 1 Responsivity of photodetectors

探测器	第一路干涉 光路光强/ μW	第二路干涉 光路光强/ μW	输出端干涉 信号幅值/V	响应度/ $(\text{V} \cdot \text{W}^{-1})$
A	10	10	1.00	5×10^4
B	10	0.05	1.08	7.2×10^5
C	10	0.01	0.98	1.6×10^6

4.2 响应带宽

在 4.1 实验基础上通过改变差分频率的大小,观测探测器 A,B,C 输出终端信号峰峰值的变化,以评估 3 款探测器的响应带宽。为得到有效的输出信号峰峰值,探测器 A 的干涉光强为 $10 \mu\text{W}$, $10 \mu\text{W}$,探测器 B 的干涉光强为 $10 \mu\text{W}$ 和 50 nW,为与探测器 B 形成对比试验,探测器 C 的干涉光强与探测器 B 保持一致,为 $10 \mu\text{W}$ 和 50 nW。探测器 A,B,C 输出幅值与差分频率的关系如表 2 所示。由表 2 可知,探测器 A 在差分频率达到 10 MHz 时,输出信号幅值仍大于最大幅值的 0.707 倍(707 mV, -3 dB),由此可知,探测器 A 的带宽大于 10 MHz(设计值约为 20 MHz);探测器 B

在差分频率大于 8 MHz 时,输出波形已不是正常的正弦波信号,无法读出峰峰值,故数据不予记录,由表 2 可知探测器 B 在差分频率为 2 MHz 时的输出信号幅值已经小于最大幅值的 0.707 倍,故在预设实验条件下,探测器 B 的带宽不足 2 MHz;探测器 C 在差分频率达到 10 MHz 时的输出信号幅值仍未降至最大幅值的 0.707 倍,即 1.26 V。故在预设实验条件下,探测器 C 的带宽大于 10 MHz(设计值约为 20 MHz)。

表 2 探测器响应带宽

Tab. 2 Bandwidth of photodetectors

差分 频率/MHz	输出幅值/mV		
	探测器 A	探测器 B	探测器 C
1	1 000	1 080	1 780
2	968	705	1 760
3	952	518	1 620
4	958	370	1 640
5	952	280	1 700
6	943	198	1 700
7	951	164	1 740
8	920	144	1 760
9	892	/	1 740
10	852	/	1 720

4.3 本底噪声

本实验利用自主研发的低噪声激光干涉仪和基于数字锁相环技术的测相系统对 3 款探测器的本底噪声进行了测量。评估前,首先测试测相系统的测相噪声。测试流程如下:利用函数信号发生器(安捷伦, 33522A)生成一个频率为 1 MHz、峰峰值为 800 mV 的信号,利用三通 BNC 链接器将此信号分成两路接入到测相系统中测量其相位差,然后利用幅值谱密度(Amplitude Spectral Density, ASD)和线性幅值谱密度(Linear Amplitude Spectral Density, LASD)评估其测相噪声,相位噪声曲线如图 7 所示。由图 7 可知,该测相系统的测相噪声基本满足太极计划需求,在高频段 9 mHz~1 Hz,测相噪声低于 $2\pi \times 10^{-6}$ rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (对应位移噪声为 1 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$);在高频段 0.1~9 mHz,测相噪声随频率的降低而升高,其主要影响因素是环境热噪声^[33]。

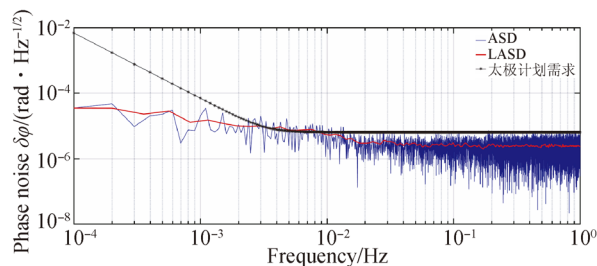


图 7 测相系统的相位噪声

Fig. 7 Phase noise of phase measurement system

为避免其他因素对各探测器本底噪声测试的影响,分别将各探测器的一个输出信号分成两路引入到测相系统中;同时对对比实验结果,干涉信号的差分频率均设定为 1 MHz,真空系统的工作真空度也保持一致(2×10^{-2} Pa);另外,控制一路干涉光路的光强为 10 μW ,另一路干涉光强根据各自响应度进行设定,以保证各个探测器的输出信号峰峰值约为 800 mV。探测器 A, B, C 的本底噪声曲线如图 8 所示,由图 8 可知,探测器 A, B, C 的本底噪声均低于 10 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 mHz~1 Hz,其中探测器 B 的本底噪声低至 4 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 10 mHz~1 Hz。但随着频率降低,探测器 B 的本底噪声随频率降低而线性增大,而探测器 A 和 C 的本底噪声一直保持在 10 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 之下。这表明探测器 B 易受温度噪声波动的影响,需引入温度平衡电路。

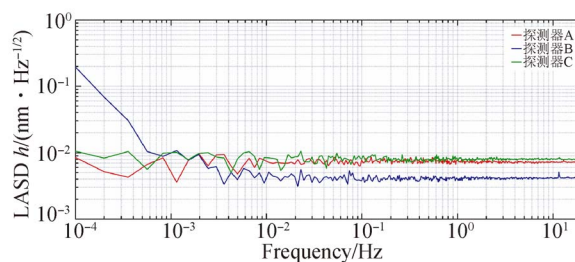


图 8 探测器本底噪声曲线

Fig. 8 Background noise curves of photodetectors

在本底噪声测量中,噪声源不仅包含了光电探测器中的电子电路噪声,还包含了干涉仪自身的噪声,主要噪声包括:(1)激光频率不稳定性噪声: $\delta L = (\Delta f / f) \Delta L = 2.5 \text{ pm} / \sqrt{\text{Hz}}$,其中,激光频率不稳定性 $\Delta f = 0.7 \text{ MHz}$,激光频率 $f = 2.8 \times 10^{14} \text{ Hz}$,干涉臂的不等臂臂长 $\Delta L \approx 1 \text{ mm}$;(2)热噪声: $\delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot \Delta L = 2 \times 10^{-8} / \text{K} \cdot$

200 mK · 1 mm = 4 pm/√Hz, 其中, 光学平台的热膨胀系数 $\alpha = 2 \times 10^{-8} / \text{K}$, 温度涨落 $\Delta T = 200 \text{ mK}$ (长时间的温度涨落, 热噪声主要体现在低频段), 干涉臂的不等臂臂长 $\Delta L \approx 1 \text{ mm}$; (3) 散粒噪声:

$$\delta L = (\lambda/2\pi) \cdot \sqrt{\frac{hc}{\lambda\eta P}} = 0.83 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}},$$

其中激光波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, 普朗克常数 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 光速 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$, 探测器转换效率 $\eta = 0.68 \text{ A/W}$, 光强 $P = 10 \text{ nW}$ (最小值)。从上述分析可知, 激光频率不稳定性噪声为主要噪声源。扣除干涉仪本身的噪声, 探测器的本底噪声低于 $5 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。利用示波器 (安捷伦, DPO4054) 测量探测器 A, B, C 通电无光照情况下的电压输出噪声, 其电压均方根差值均低于 5 mV 。经计算, 其噪声比均大于 20 dB 。

综合探测器 A, B, C 的响应度、响应带宽、本底噪声和信噪比来分析, 探测器 C 可满足目前弱光锁相实验技术系统的需求, 为太极计划实验星弱光锁相控制研究提供了良好的技术支撑。

5 结 论

本文根据空间引力波探测的弱光探测需求,

合作研制了 3 款弱光探测器, 并测试、分析了其响应度、响应带宽、本底噪声及信噪比。实验结果表明: 探测器 B, C 的响应度 $\geq 1.8 \times 10^5 \text{ V/W}$; 探测器 A, C 的响应带宽大于 10 MHz (设计值约为 20 MHz), 基本满足未来太极计划实验星多普勒频移差分频率的要求; 探测器 A, C 的本底噪声低于 $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$, 探测器 B 的本底噪声低于 $5 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}} @ 10 \text{ mHz} \sim 1 \text{ Hz}$; 探测器 A, B, C 的信噪比均高于 20 dB 。综合以上实验结果可知, 探测器 C 在响应度、响应带宽、本底噪声和信噪比等方面基本满足未来太极计划实验星的要求。但此探测器为单象限探测器, 下一步工作将设计、研制四象限光电探测器, 并检测、分析四象限探测器象限间的串扰性和均匀性等参数。

6 致 谢

感谢中国电子科技集团公司第四十四研究所、西南技术物理研究所和中国科学院上海技术物理研究所在探测器研制方面所提供的支持和帮助。

参考文献:

- [1] ABRAMOVICI A, ALTHOUSE W E, DREVER R W P, *et al.*. LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory [J]. *Science*, 1992, 256 (5055): 325-333.
- [2] ARAIN M A, MUELLER G. Design of the advanced LIGO recycling cavities [J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10018-10032.
- [3] ACERNESE F, ANTONUCCI F, AOUDIA S, *et al.*. Performances of the Virgo interferometer longitudinal control system [J]. *Astroparticle Physics*, 2010, 33(2): 75-80.
- [4] BEKER M G, BLOM M, BRAND J F J, *et al.*. Seismic attenuation technology for the advanced Virgo gravitational wave detector [J]. *Physics Procedia*, 2012, 37: 1389-1397.
- [5] HEWITSON M, AUFMUTH P, AULBERT C, *et al.*. A report on the status of the GEO 600 gravitational wave detector [J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2003, 20(17): S581-S591.
- [6] GROTE H. The status of GEO 600 [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2008, 25 (11): 114043-114051.
- [7] ANDO M, COLLABORATION T T. Current status of the TAMA300 gravitational-wave detector [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, 22 (18): S881-S889.
- [8] KAWAMURA S, COLLABORATION T T. Laser Interferometer gravitational wave detector [J]. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 1999, 136: 72-86.
- [9] PATEL J, WOOLLEY A, ZHAO C, *et al.*. Vacuum control system for the AIGO gravitational wave detector [J]. *Vacuum*, 2010, 85(2): 176-179.
- [10] BARRIGA P, BLAIR D G, COWARD D, *et al.*. AIGO: a southern hemisphere detector for the worldwide array of ground-based interferometric gravitational wave detectors [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(8): 084005-1-12.
- [11] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, *et al.*. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116: 061102-1-061102-16.
- [12] DANZMANN K, STUDY TEAM T L. LISA: Laser interferometer space antenna for gravita-

- tional wave measurements [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 1996, 13(11A): A247-A250.
- [13] CORNISH N J. Detecting a stochastic gravitational wave background with the laser interferometer space antenna [J]. *Physical Review D*, 2001, 65(2): 022004.
- [14] AMARO-SEOANE P, AOUDIA S, BABAK S, *et al.*. Low-frequency gravitational-wave science with eLISA/NGO [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29(12): 124016.
- [15] PIJNENBURG J, RIJNVELD N, HOGENHUIS H. Extremely stable piezo mechanisms for the new gravitational wave observatory [J]. *SPIE*, 2013, 8450: 84500C-1-84500C-15.
- [16] CORBIN V, CORNISH N J. Detecting the cosmic gravitational wave background with the big bang observer [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, 23(7): 2435-2446.
- [17] CUTLER C, HARMS J. Big bang observer and the neutron-star-binary subtraction problem [J]. *Physical Review D*, 2006, 73(4): 042001-1-21.
- [18] KAWAMURA S, NAKAMURA T, ANDO M, *et al.*. The Japanese space gravitational wave antenna—DECIGO [J]. *Classical Quantum Gravity*, 2006, 23(3): S125-S131.
- [19] ANDO M, KAWAMURA S, SETO N, *et al.*. DECIGO and DECIGO pathfinder [J]. *Classical & Quantum Gravity*, 2010, 27(8): 084010.
- [20] GONG X F, XU S N, BAI S, *et al.*. A scientific case study of an advanced LISA mission [J]. *Classical Quantum Gravity*, 2011, 28(9): 094012.
- [21] CYRANOSKI D. Chinese gravitational-wave hunt hits crunch time [J]. *Nature*, 2016, 531(7593): 150-151.
- [22] HU W R, WU Y L. The Taiji Program in space for gravitational wave physics and the nature of gravity [J]. *National Science Review*, 2017, 4(5): 685-686.
- [23] LUO J, CHEN S, DUAN H Z, *et al.*. TianQin: a space-borne gravitational wave detector [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035010.
- [24] NI W T. Gravitational wave detection in space [J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2016, 25(14): 163001.
- [25] LI Y Q, LUO Z R, LIU H S, *et al.*. Laser interferometer for space gravitational waves detection and earth gravity mapping [J]. *Microgravity-Science and Technology*, 2018, 30(6): 817-829.
- [26] 姚东, 李钰鹏, 赵亚, 等. 适用于光黏工艺的干涉仪公差保证方法 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 1945-1953.
- YAO D, LI Y P, ZHAO Y, *et al.*. Tolerance assurance of interferometer for optical HCB process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8): 1945-1953. (in Chinese)
- [27] DONG Y H, LIU H S, LUO Z R, *et al.*. A comprehensive simulation of weak-light phase-locking for space-borne gravitational wave antenna [J]. *Science China Technological Sciences*, 2016, 59(5): 730-737.
- [28] DONG Y H, LIU H S, LUO Z R, *et al.*. Methodological demonstration of laser beam pointing control for space gravitational wave detection missions [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(7): 074501.
- [29] LI Y Q, LUO Z R, LIU H S, *et al.*. Path-length measurement performance evaluation of polarizing laser interferometer prototype [J]. *Applied Physics B*, 2015, 118(2): 307-317.
- [30] JOSHI A M, DATTA S, PRASAD N, *et al.*. Reliability testing of ultra-low noise InGaAs quad photoreceivers [J]. *SPIE*, 2018, 10526: 105261J-1-10.
- [31] JOSHI A M, DATTA S. Space qualification of InGaAs photodiodes and photoreceivers [J]. *SPIE*, 2018, 10641: 106410K-1-8.
- [32] JOSHI A, DATTA S, RUE J, *et al.*. Ultra-low noise, large-area InGaAs quad photoreceiver with low crosstalk for laser interferometry space antenna [J]. *SPIE*, 2012, 8453: 84532G-1-10.
- [33] LIU H S, LUO Z R, JIN G. The development of phasemeter for taiji space gravitational wave detection [J]. *Microgravity-Science and Technology*, 2018, 30(6): 775-781.

作者简介:



李玉琼(1982—),男,湖南娄底人,博士,副研究员、中国科学院青年创新促进委员会会员,2005年于陕西科技大学获得学士学位,2010年于北京理工大学获得博士学位,主要从事面向空间引力波探测的激光干涉测量研究。E-mail: liyuqiong@imech.ac.cn