

文章编号: 1005-5630(2022)04-0032-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.004.005

高速平衡零拍探测器的设计与实现

滕鑫, 余慧敏, 梁焰

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 平衡零拍探测器存在共模抑制比小、响应带宽低等问题。针对以上问题, 尝试从两方面进行改进: 一方面, 通过测试探测器中光电检测器(PIN 光电二极管)的响应特性, 选择性能相近的器件进行平衡探测, 以提升共模抑制比; 另一方面, 采用跨阻放大与比例运放级联的方式对光电流信号进行提取, 解决一级采样放大器增益带宽积局限的问题, 在保障灵敏度的同时提升探测器的响应带宽。由此实现了 300 MHz 的平衡零拍探测, 共模抑制比高达 66 dB, 并有效检测了光信号中的量子散粒噪声, 为高速灵敏探测提供了一种有效技术方案。

关键词: 平衡零拍探测; 跨阻放大器; 量子噪声; 共模抑制比; 散粒噪声与电子噪声比值
中图分类号: TN 253 **文献标志码:** A

Design and implementation of high-speed balanced homodyne detector

TENG Xin, SHE Huimin, LIANG Yan

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Balanced homodyne detectors have the disadvantages such as small common mode rejection ratio (CMRR) and low response bandwidth, etc. To address the problems, we designed a scheme to test the response characteristics of the photodetector (PIN photodiode) in the detector and selected devices with similar performance for balanced detection to improve the CMRR. Furthermore, the scheme of cascading transimpedance amplification and proportional operational amplifier were proposed to extract the photocurrent signal, which solved the problem of the limitation of the gain bandwidth product of the primary sampling amplifier and improved the response bandwidth of the detector while ensuring the sensitivity. As a result, we achieved 300-MHz balanced homodyne detection and the CMRR went up to 66 dB. We also detected the quantum shot noise in the optical signal. These achievements provide an effective technical scheme for high-speed sensitive detection.

收稿日期: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62175152)

作者简介: 滕鑫 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为量子探测。E-mail: 1140539657@qq.com

通信作者: 梁焰 (1986—), 女, 副教授, 研究方向为量子探测、激光雷达、光谱检测。

E-mail: yanliang@usst.edu.cn

Keywords: balanced homodyne detection; trans-impedance amplifier; quantum noise; common-mode rejection ratio; shot noise to electronic noise

引言

平衡零拍探测器 (balanced homodyne detectors, BHD) 在量子随机数产生、量子噪声分析、外差探测、微弱信号检测等领域有着重要的应用^[1-6]。这些领域的发展也在推动着平衡零拍探测器的性能参数不断地提升。2001年, 康斯坦茨大学的 Hansen 设计出检测空间光谱的平衡零拍探测器, 在峰值响应波长为 790 nm 时, 信号带宽达到 1 MHz, 散粒噪声与电子噪声比值为 14 dB, 共模抑制比达到 85 dB^[2]。2012年, 卡尔加里大学设计出带宽为 100 MHz, 散粒噪声与电子噪声比值为 13 dB, 共模抑制比为 52.4 dB 的平衡宽带探测器^[3]。2013年, 牛津大学的 Merlin Cooper 设计出了一款适用于 830 nm 波长的直流耦合探测器, 其信号带宽为 80 MHz, 共模抑制比达到了 63 dB, 在 5 mW 的入射光功率下, 散粒噪声与电子噪声比值达到了 14.5 dB^[4]。2018年, 一种通过提高量子熵含量来提升随机数产生速率的方法被提出, 在经过数据并行处理后实时产生速率能够达到 8.25 Gbps。由于随机数的上限等于最小熵和采样率的乘积, 因此采样率越大, 随机数的产生速率也就越高。将平衡零拍探测器作为检测器件时, 当采样率超过平衡零拍探测器带宽的两倍时, 采样点之间会出现自相关现象, 这将影响随机数的随机性, 需要通过提高平衡零拍探测器的带宽来加以改进^[5]。2021年, 山西大学物理工程学院量子光学团队研制了带宽为 10 MHz, 信噪比为 14 dB, 共模抑制比为 43 dB 的平衡零拍探测器, 并对其噪声特性进行分析, 找出探测带宽和信噪比不能同时提高的原因^[6]。由于应用领域的需求在不断提高, 研制具有高带宽、高共模抑制比以及高散粒噪声与电子噪声比值的探测器势在必行。

本文首先从提升平衡零拍探测器的平衡性能入手, 对平衡零拍探测器中光电检测器 (PIN 光电二极管) 的响应特性进行测试, 选择性能相近的 PIN 光电二极管进行平衡探测。接着对放大电路进行改进, 采用跨阻放大的方式, 将光电流

信号转化为光电压, 另外还增加了二级比例运放的设计, 通过采用两级放大级联的方案, 解决一级采样放大器增益带宽积局限的问题, 缓和平衡探测器增益与带宽之间相互制约的矛盾, 最终实现了高共模抑制比的突破, 在保障探测灵敏度的同时提升了探测器的响应带宽, 并能够满足散粒噪声测量极限的需求。

1 平衡零拍探测器的原理

平衡零拍探测器的基本结构如图 1 所示, 主要包括 4 个部分, 分别为光电检测部分、信号跨阻放大提取部分、二级运算放大部分, 信号输出分析部分。

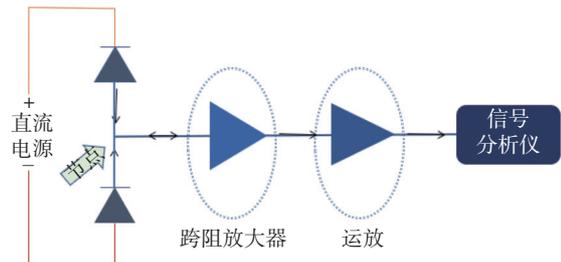


图 1 平衡零拍探测器结构图

Fig. 1 Schematics of BHD structure

光电检测部分的基本原理如图 2 所示, 弱信号光与强本振光在低损耗的分束器上相干结合后, 分别入射到两个相似的光电二极管上, 平衡探测器的接收端采用两个光电二极管串联的方式, 接收到的光电流信号在电路节点处作差, 所得的差值信号即可反应出信号光的相关信息^[7-9]。这样的设计不仅避免了传统方案中使用减法器对采样后的电压信号进行做差处理的复杂操作, 还可以同时抑制两束光的共模噪声, 提高平衡零拍探测器的共模抑制比。

2 探测器的设计

2.1 光电管的选择

平衡探测器的性能, 特别是共模抑制比, 在

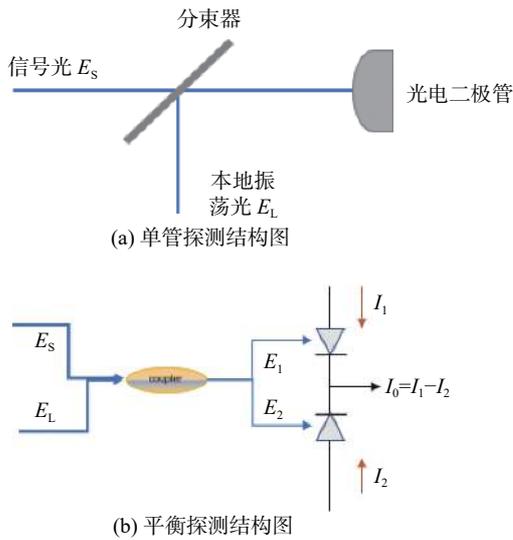


图 2 光电检测部分的基本原理
Fig. 2 Schematics of photodetector

很大程度上受到光电二极管的影响。以往的光电检测系统中使用的光电二极管包括 PIN 型光电二极管、雪崩光电二极管 (avalanche photo diode, APD) 或者光电倍增管。在结构上, APD 较 PIN 管多了一个雪崩增益区, 能够利用载流子的雪崩倍增效应来放大光电信号, 实现对微弱光信号的测量, 同时还具有超低噪声、高速、高互阻增益的特点。然而, APD 通常置于 60 V 以上的高反向偏置电压下工作, 以产生雪崩倍增效应。在倍增状态下, APD 通常用于探测功率在 1 nW 至几

微瓦之间的入射光。当入射光功率过大时, 倍增系数反而会下降, 从而引起光电流的畸变, 且倍增电流与入射光功率不再具有线性关系, 输出幅度反而随之减小^[10]。另一方面, APD 在工作时极易受到温度变化的影响, 随着温度的改变会出现一些额外的噪声。这对于要求高饱和功率且希望噪声光电流与入射光功率成线性关系的量子探测实验来说, 显然是不适宜的。相较而言, PIN 管具有结构简单、低暗电流、小结电容、低偏置电压、宽线性范围等优点, 更能够满足低噪声光电检测系统的需求。设计中选择作为光电检测器件的 PIN 管型号为 LSIPD-A75 (Lighthsensing)。LSIPD-A75 的截止频率高达 2.5 GHz, 结电容约为 1 pF, 暗电流为 0.2 pA, 能够响应的光波段范围为 800~1700 nm。在 1310 nm 波长处的响应度为 0.85 A/W, 在 1550 nm 处的响应度为 0.95 A/W。此外, 在反向偏压为 20 V 时, 其能承受的最大电流为 4 mA, 相对于 0.95 A/W 的电流响应度其能够承受的最大光强为 15 mW。根据以上参数比较, 该型号的 PIN 管用于平衡零拍探测器的光学检测结构中较为合适。由于在平衡探测器中的两个 PIN 管需要特性尽量一致, 于是对选定型号的 50 支 PIN 管进行了 0~49 编号后, 用相同的光源测定其光学响应度和结电容, 测试系统如图 3 所示。

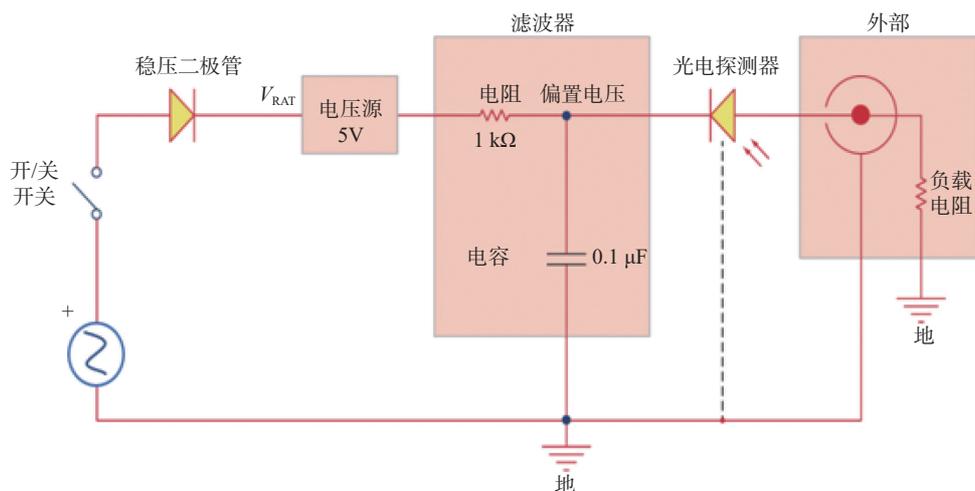


图 3 PIN 管测试系统示意图
Fig. 3 Schematics of PIN test

给 PIN 管加 5 V 的反向偏压并进行微调, 保证每个管子的结电容相同, 同时输入重复频率

为 10 MHz、脉冲光宽度为 5 ns、输入光功率为 11 μW 的 1550 nm 脉冲光信号, 测试结果如图 4

所示。由图可知, 不同 PIN 管的响应度和响应速率存在一定的差异。图 4(a) 为根据测试结果所绘制的曲线。将其中较接近的两组结果细节放大后如图 4 (b) 所示。最终挑选出性能最接近的两个 PIN 管, 编号分别为 33 与 37。

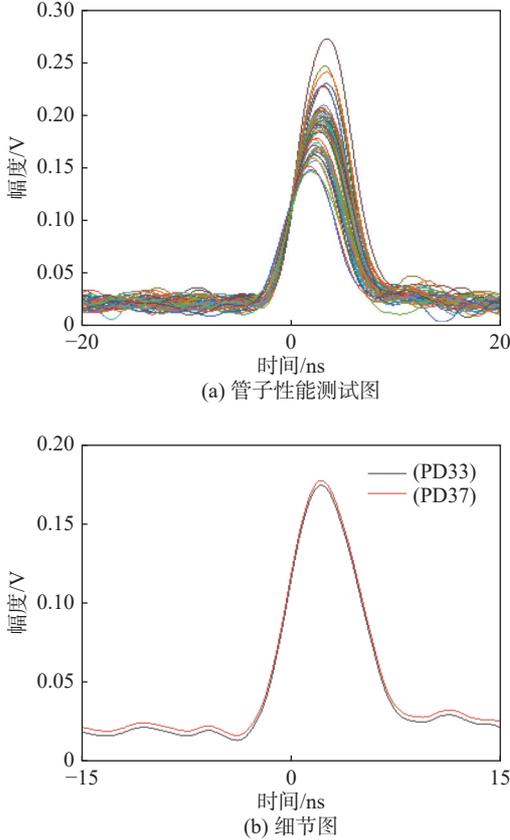


图 4 PIN 管性能测试结果

Fig. 4 Test results of PIN performance

2.2 信号放大电路

平衡探测器的放大电路部分将经过光电检测

部分得到的光电流信号或光学噪声放大并输出^[11]。探测器放大部分电路的原理图如图 5 所示。根据基尔霍夫电流定律, PIN 型光电二极管 (U_1, U_2) 产生的电流信号在光电二极管之间的节点处相减, 做差后的电流信号在进入放大器之前不能确定其方向, 因此选用双电源供电的放大器。由跨阻放大器 OPA855 (8 GHz) 将光电流信号直接转变为电压信号并实现一级放大, 其输出为:

$$V_{01} = I_{pd} \times R_2 \quad (1)$$

式中: I_{pd} 为量子检测实验中光学噪声电流; R_2 为反馈电阻。跨阻放大器的带宽计算公式为:

$$f_{-3dB} = \sqrt{\frac{GBW}{2\pi C_T R_{10}}} \quad (2)$$

式中 C_T 表示运算放大器反向输入端的总电容。式(2)表明在增益带宽积一定的情况下, 跨阻放大器的带宽与反馈电阻值成反比^[12]。

之后一级信号输入到二级运算放大器中, 为了使平衡零拍探测器拥有更高的带宽。继续选用 OPA855 作为二级比例运放的放大器件。这样的二级放大设计进一步增大了探测器的增益。最终的电路输出为:

$$V_{out} = -\frac{R_3}{R_6} V_{01} = -I_{pd} R_{10} \frac{R_3}{R_6} \quad (3)$$

关于放大器的饱和问题, 由于量子光学实验中交流信号主要是光学噪声电流, 当一束完全相干光输入到光电二极管后, 光学散粒噪声转化为噪声电流, 其计算公式为^[13]:

$$\overline{i_{Np}^2} = 2 \frac{e^2 \eta}{h\nu} P \Delta f \quad (4)$$

式中: $e = 1.60217 \times 10^{-19}$; P 为入射光功率;

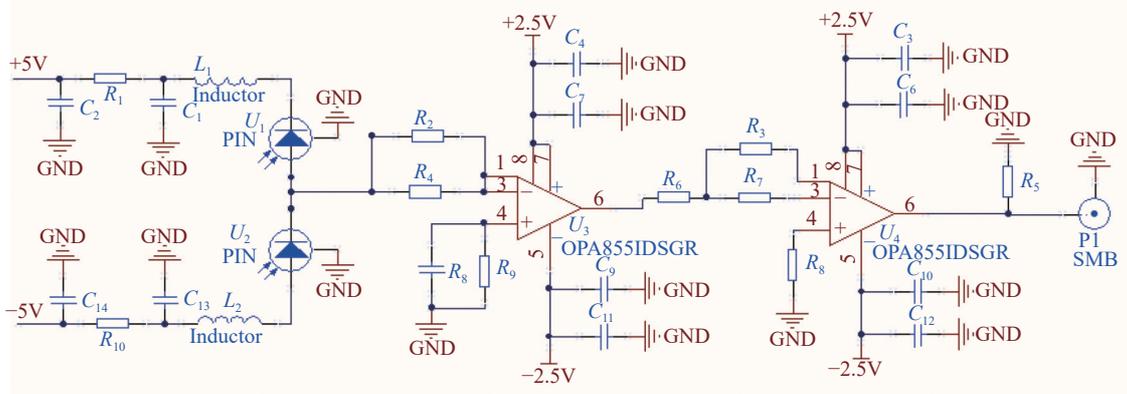


图 5 探测器电路原理图

Fig. 5 Schematic diagram of detector circuit

Δf 为探测器带宽； η 为 PIN 管的量子效率； $h=6.62607015 \times 10^{-34}$ J·s 为普朗克常量； ν 为入射光频率^[14]。根据 PIN 管参数表中给出的数据以及光源频率的设置 $P=200$ mW， $\Delta f=10$ MHz，入射光波长 1 550 nm(此时 LSIPD-A75 的响应度最大，为 0.95 A/W，量子效率为 85%)计算，则 $\overline{i_{Np}^2}$ 最大为 4 μ A。因此流入 OPA855 的电流实际上远小于 OPA855 芯片的饱和电流 (10 mA)，故运放并不会产生饱和。

3 探测的性能测试

为了对探测器性能进行测试，设计了如图 6 所示的测试系统。采用电光调制器产生 1 550 nm 的光源，通过信号发生器(Tektronix AFG3252C, 240 MHz)产生脉冲波形。连续光激光器产生的连续光信号在电光调制器(MXER-LN-10)的调制下，产生脉冲光，在经过分束器后，一端接可调光衰减器，另一端接相位延时器(MDL-002, 350 ps)，这样可以在进行共模抑制比测量时更好的调节光源，使输入两端的光源的幅度相

同，保持 180°相位差，更好地实现共模抑制效果^[15]。

平衡零拍探测器的性能包括 3 个重要参数：带宽、共模抑制比、散粒噪声与电子噪声的比值^[16]。首先对共模抑制比进行测试，信号发生器设置调制光脉冲信号频率为 10 MHz，入射探测器管子两端的光功率为 8 μ W。设置频谱仪的起始频率与截止频率为 10 Hz~100 MHz，设置视图带宽为 1 MHz，分辨率带宽为 1 kHz。电光调制器的输出光信号是经过相位调制的，因此探测器的输出端能够测得的是拍频光信号。分别记录单端输入与双端输入的噪声功率，测量结果如图 7 所示。频率为 10 MHz 时的单端输入信号幅度为 -30 dBm，双端输入时信号幅度为 -96 dBm，故其共模抑制比约为 66 dB。图中紫色区域可以见到除信号外的其他噪声信号分布于 10~20 MHz，40~45 MHz 以及 90 MHz 附近。然而在双端入射时，这些噪声均被抑制。进一步证明了平衡探测方案对于微弱信号检测是可行的，高共模抑制比更加说明了双管串联平衡方案与 TIA 二级级联放大方案是可行性的。

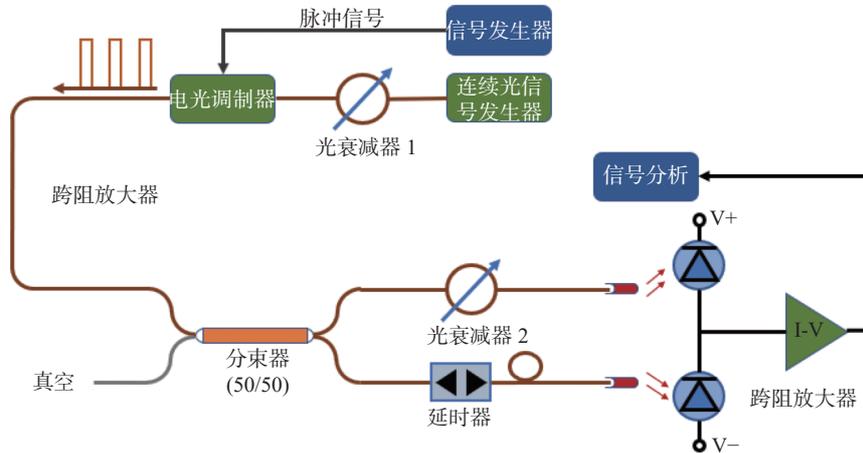


图 6 测试系统图

Fig. 6 Diagram of the testing system

接下来进行平衡零拍探测器对散粒噪声与电子噪声比值的测量。当平衡零拍探测器测得的散粒噪声与量子噪声的比值在 10 dB 以上时才能够对正交态光场的噪声进行解压并重组^[17]。为了观察这一参数，在保证共模抑制比的调节参数不变的情况下，设置频谱仪的频率范围为 10 Hz~

300 MHz，视频带宽为 1 kHz，分辨率带宽为 1 MHz，增大连续光的功率，分别对 1 mW、3 mW、5 mW、7 mW、9 mW 连续光输入时的散粒噪声进行测量。测量发现，在 5 mW 附近时，探测器的散粒噪声与电子噪声的比值为 10 dB，依旧未达到极限。最终在入射连续光功率为 10 mW

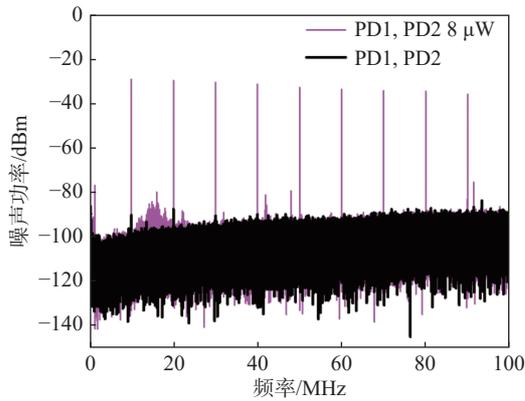


图7 共模抑制比测试结果

Fig. 7 Schematic of the CMRR

时达到最大值 15.8 dB。由图 8 可知, 入射光功率超过 3 mW 时, 在 0 Hz ~ 300 MHz 频率范围内, 散粒噪声幅度超过电子噪声幅度 10 dB 以上。可见, 在此范围内能够实现对光场压缩态的测量。由于带宽在光电探测器中的描述为: 该探测器在某一频率范围内具有能够响应量子噪声的能力。因此, 本设计研制出的平衡零拍探测器的带宽可以定义为 300 MHz。在频谱图中可以看到当频率达到 300 MHz 时, 散粒噪声与电子噪声的幅度开始向频谱仪本地噪声降低, 这也进一步说明了平衡零拍探测器的带宽为 300 MHz。

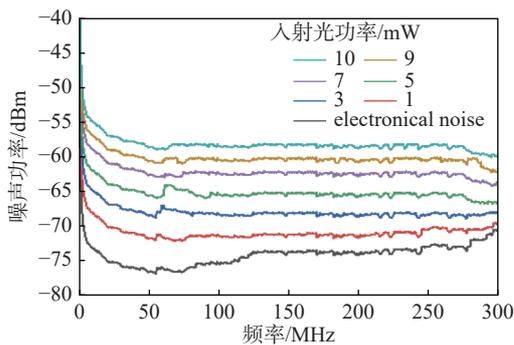


图8 探测器散粒噪声与电子噪声比值图

Fig. 8 Ratio of detector shot noise to electronical noise

最后, 选取由文献查得的具有创新代表性的平衡零拍探测器以及市面上成熟的产品, 如索雷博公司(Thorlabs)的PDB465C与本设计研制的探测器性能参数作比较, 结果显示, 本设计研制的探测器总体性能更具优势。具体参数对比如表 1 所示。

表 1 各探测器性能参数对比
Tab. 1 Comparison of the parameters

探测器	文献[17]PDB465C	本文设计研制的探测器	
带宽/MHz	300	200	300
共模抑制比/dB	—	>25	66
散粒噪声与电子噪声比值/dB	14	10	15.8

4 结论

介绍了基于基尔霍夫电流定律设计的两管串联电路, 并通过 TIA 电路和比例运算放大电路两级级联的方式实现了电流电压信号转换和放大。该设计方案突破了传统减法器的局限, 缓和了高带宽与高增益之间的矛盾。改进后的探测器信号带宽达到 300 MHz, 能够实现对微瓦量级光功率的检测。对于量子噪声测量而言, 其可用带宽为探测器全部带宽范围, 饱和功率在 5.5 mW 以上, 且能够达到 66 dB 的共模抑制比, 散粒噪声与电子噪声的比值达到了 15.8 dB, 具有非常突出的优势。在噪声谱中可以看到存在一些干扰因素的影响, 在后续工作中, 将会通过减少外部噪声干扰, 进一步对探测器进行金属屏蔽, 挑选出能够实现更高增益带宽积、同时拥有更小输入电容能力的跨阻放大器。针对二级放大部分, 将挑选出压摆率低且负载能力更强的运算放大器, 以实现探测器各项性能参数的更进一步优化。

参考文献:

- [1] 李福利. 高等激光物理学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 373 – 380.
- [2] HERRERO-COLLANTES M, GARCIA-ESCARTIN J C. Quantum random number generators[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(1): 015004.
- [3] KUMAR R, BARRIOS E, MACRAE A, et al. Versatile wideband balanced detector for quantum optical homodyne tomography[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 5259 – 5267.
- [4] COOPER M, SÖLLER C, SMITH B J. High-stability time-domain balanced homodyne detector for ultrafast optical pulse applications[J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(8): 611 – 616.

- [5] GUO X M, CHENG C, WU M C, et al. Parallel real-time quantum random number generator[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5566 – 5569.
- [6] 潘国鑫, 刘惠, 翟泽辉, 等. 平衡零拍探测器的噪声特性分析与实验研究 [J]. *量子光学学报*, 2021, 27(2): 109 – 116.
- [7] 王金晶. 平衡零拍探测器的研制 [D]. 太原: 山西大学, 2012: 57.
- [8] HADERKA O, MICHÁLEK V, URBÁŠEK V, et al. Fast time-domain balanced homodyne detection of light[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(15): 2884 – 2889.
- [9] PAINCHAUD Y, POULIN M, MORIN M, et al. Performance of balanced detection in a coherent receiver[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3659 – 3672.
- [10] 郑公爵, 戴大鹏, 方银飞, 等. 具有两级放大的平衡零拍光电探测器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 040401.
- [11] HUANG D, FANG J, WANG C, et al. A 300-MHz bandwidth balanced homodyne detector for continuous variable quantum key distribution[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(11): 114209.
- [12] 王金晶, 贾晓军, 彭堃堃. 平衡零拍探测器的改进 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0127001.
- [13] WONG N C, HALL J L. Servo control of amplitude modulation in frequency-modulation spectroscopy: demonstration of shot-noise-limited detection[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1985, 2(9): 1527 – 1533.
- [14] 刘建强. 连续变量量子密钥分发光源及探测器的研究 [D]. 太原: 山西大学, 2016: 61.
- [15] 周倩倩. 用于量子光学实验的宽带低噪声探测器研制及应用 [D]. 太原: 山西大学, 2010.
- [16] 高亢. 利用零拍探测系统测量脉冲激光器噪声 [D]. 天津: 天津大学, 2012: 65.
- [17] 蔡少卓. 面向量子随机数产生的平衡零拍探测器的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021: 74.

(编辑: 李晓莉)