

## 多像素平衡零拍探测器研究

王少锋<sup>1,2\*\*</sup>, 李汉卿<sup>1</sup>, 李康康<sup>1</sup>, 刘鹏<sup>2,3</sup>, 李娟<sup>2,3</sup>, 董瑞芳<sup>2,3\*</sup><sup>1</sup>山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006;<sup>2</sup>中国科学院国家授时中心中国科学院时间基准及应用重点实验室, 陕西 西安 710600;<sup>3</sup>中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

**摘要** 平衡零拍探测技术是测量压缩态量子噪声的主要方法之一,通过光电二极管阵列和多路并行电感-电容(L-C)耦合跨阻的方式,实现了一种低噪声、高信噪比的多像素平衡零拍探测器,探测器的工作带宽为 5 MHz。每一个像素通道中,光功率为 1.66 mW 的 815 nm 激光入射时,散粒噪声功率在 2 MHz 分析频率处比电子学噪声高 23 dB。当光强分布在所有像素通道时,各通道散粒噪声功率和入射光强成正比,验证了探测器可以实现多通道并行的平衡零拍探测。该探测器可实现量子光学频率梳的频谱可分辨平衡零拍探测,为量子光学频率梳在量子精密测量领域的应用提供高性能的探测工具。

**关键词** 探测器; 跨阻放大器; 量子光学频率梳; 平衡零拍探测器; 光电二极管阵列; 信噪比

**中图分类号** O431.2

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231925

## 1 引言

平衡零拍探测器<sup>[1]</sup>(BHD)作为量子光学测量的重要工具,具有灵敏度高、动态范围大、抗干扰能力强等特点,可以有效地提取量子态正交分量的噪声起伏,并将其放大至宏观水平,同时还能抑制经典共模噪声,现已广泛应用于量子噪声测量、引力波探测、高灵敏时延抖动测量、连续变量量子密钥分发和量子随机数发生器等研究领域<sup>[2-13]</sup>。

探测器的共模抑制比、工作带宽、信噪比一直是研究热点。2011年 Chi 等<sup>[8]</sup>研制了工作带宽为 104 MHz、共模抑制比为 46 dB 的平衡零拍探测器,并将其应用于连续变量量子密钥分发。2014年 Zhou 等<sup>[5]</sup>提出了一种基于场效应管的自举结构,降低了平衡零拍探测器的电子学噪声,大幅提高了探测器的信噪比,1.52 mW 的入射功率下的信噪比约为 28 dB。2015年 Jin 等<sup>[14]</sup>通过光电流“自减”设计,精密调节分束器的分束比,以及可调反向偏压设计,使得探测器的共模抑制比得到大幅提高,达到 75.2 dB。2017年基于电感-电容(L-C)耦合的光电探测器的噪声理论模型被完善<sup>[15]</sup>,在理论指导下通过优化电路板寄生参数以及元器件选择可以实现高信噪比的散粒噪声探测。2018年 Zhang 等<sup>[16]</sup>基于射频放大器研制了 1.2 GHz 带宽的平

衡零拍探测器,10.05 mW 入射功率下的信噪比约为 18 dB,共模抑制比为 57.9 dB,相比基于跨阻放大器(TIA)的平衡零拍探测器,其工作带宽更大,但是全带宽内的增益平坦度并不理想。2018年马丽霞等<sup>[17]</sup>面向连续变量量子储存,实现了信噪比为 12 dB、响应时间为 65 ns 的快速响应平衡零拍探测器。2021年靳晓丽<sup>[18]</sup>通过优化电路设计实现了 kHz 量级的低频平衡零拍探测器,当入射功率为 14.4 mW 时,散粒噪声在 50~100 kHz 处比电子学噪声高 31 dB。2023年李卫等<sup>[19]</sup>采用 L-C 共振结构和运算放大器实现了一种高信噪比集成化的共振光电探测器,在 20 MHz 共振频率下提高了探测器的信噪比,但是共振型的探测器仅工作于共振频率点,不能实现宽带探测。邓娟等<sup>[20]</sup>优化了基于射频放大器的平衡零拍探测器的增益平坦度,实现在 0.2~930 MHz 内增益平坦度达到 ±2 dB 的平衡零拍探测器,有效促进连续变量量子随机数发生器的产生速率提升。2023年王少锋等<sup>[21]</sup>基于电阻-电容(R-C)耦合跨阻放大电路,实现了从音频到射频范围内的高效平衡零拍探测,以用于低频引力波探测和高速量子随机数发生器等领域,实现的工作带宽为 1 kHz~200 MHz,共模抑制比为 70 dB,信噪比为 20 dB。上述探测器均基于单个光电二极管,实现了单频光源的量子噪声测量。

收稿日期: 2023-12-12; 修回日期: 2023-12-27; 录用日期: 2024-01-02; 网络首发日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(12033007, 61801458, 12103058, 12203058, 12074309, 61875205)、中国科学院青年创新促进会项目(2021408, 2022413, 2023425)、中国博士后科学基金(2022M723174)

通信作者: \*dongruifang@ntsc.ac.cn; \*\*wangshaofeng@sxu.edu.cn

光学频率梳的频谱宽度在纳米量级,频域包含上万种模式,是一种良好的多模资源。光学频率梳基于非线性过程可以产生突破散粒噪声极限的量子光学频率梳<sup>[12,22]</sup>,量子光学频率梳在量子精密测量领域有着巨大的应用前景<sup>[4,23-25]</sup>,光谱可分辨的平衡零拍探测是量子光学频率梳的一种重要探测手段。2021年Cai等<sup>[23]</sup>提出了一种基于量子光学频率梳和光谱可分辨平衡零拍探测的测量方案,在单次测量过程中实现了突破散粒噪声极限的多个参数测量。本文理论分析了平衡零拍探测器的噪声来源并对R-C耦合和L-C耦合的探测器噪声进行理论仿真比较,在理论指导下采用光电二极管阵列和多路L-C耦合跨阻放大电路进行多像素平衡零拍探测器设计,光学频率梳经光栅的色散后注入光电二极管阵列,实现了光学频率梳8个光谱频带的量子噪声起伏的并行同步探测,各通道独立工作,每通道的工作带宽为5 MHz,信噪比为23 dB,线性度良好。该多像素平衡零拍探测器拓展了单个二极管平衡零拍探测器的应用范围,实现了多模光源的频谱可分辨探测,为量子光学频率梳在量子精密测量领域的应用提供高性能的探测工具。

## 2 基本原理

### 2.1 探测器电路结构

图1是用于量子光学频率梳探测的多像素平衡零拍探测器(MBHD)的原理框图和实物图。MBHD由两个高度对称的多像素光电探测器(MPD)和多通道减法器构成。每个MPD包括光电二极管阵列(PD array)、L-C耦合结构、交流放大电路和直流放大电路。在光电二极管阵列每个像素点的放大电路中,通过施加反向偏置电压 $V_B$ ,提高光电二极管的响应速度,光

二极管产生的光电流信号通过L-C耦合结构分为交流信号(AC)与直流信号(DC),分离交直流信号的频率拐点为 $1/(2\pi CL)$ , $C$ 为耦合电容值, $L$ 为高共振频率的电感值。交流信号通过跨阻放大器将光电流信号转化为电压信号并对其进行放大,交流输出用于测量入射光的强度噪声。直流信号经过直流电阻 $R_{DC}$ 后转化为电压信号,并通过隔离放大器输出。两个MPD中编号相同的一对像素点分别产生光电流,然后经各自的交流放大电路产生电压输出,并通过减法器消除探测结果中的共模信号,完成多像素并行平衡零拍探测,多通道直流输出通过多功能数据采集卡(DAQ)监测所有像素点的光强。

### 2.2 电子学噪声分析

电子学噪声是影响平衡零拍探测器性能的重要因素,降低电子学噪声可显著提升探测器的信噪比,由于多像素探测器为多路并行结构,各通道的光电二极管以及放大器均独立工作,因此以其中一个像素通道为例分析其电子学噪声<sup>[15,26-29]</sup>。

一个像素通道的光电探测电路的电子学噪声主要由以下4部分构成:光电二极管暗电流产生的噪声 $e_{PD}$ 、跨阻放大电路中反馈电阻的热噪声 $e_{Rf}$ 、跨阻放大器输入电压噪声产生的噪声 $e_{TIA-V}$ 和跨阻放大器输入电流噪声产生的噪声 $e_{TIA-I}$ 。

光电二极管由于暗电流引入的噪声可表示为

$$e_{PD} = \sqrt{2qi_{dk}} \times |Z_i|, \quad (1)$$

式中: $q$ 代表电子量; $i_{dk}$ 为光电二极管的暗电流; $Z_i$ 代表跨阻放大电路的增益阻抗,可表示为

$$Z_i = \frac{R_f}{1 + j2\pi f C_f R_f}, \quad (2)$$

式中: $f$ 为分析频率; $C_f$ 为反馈电容; $R_f$ 为反馈电阻; $j$ 是虚数单位。

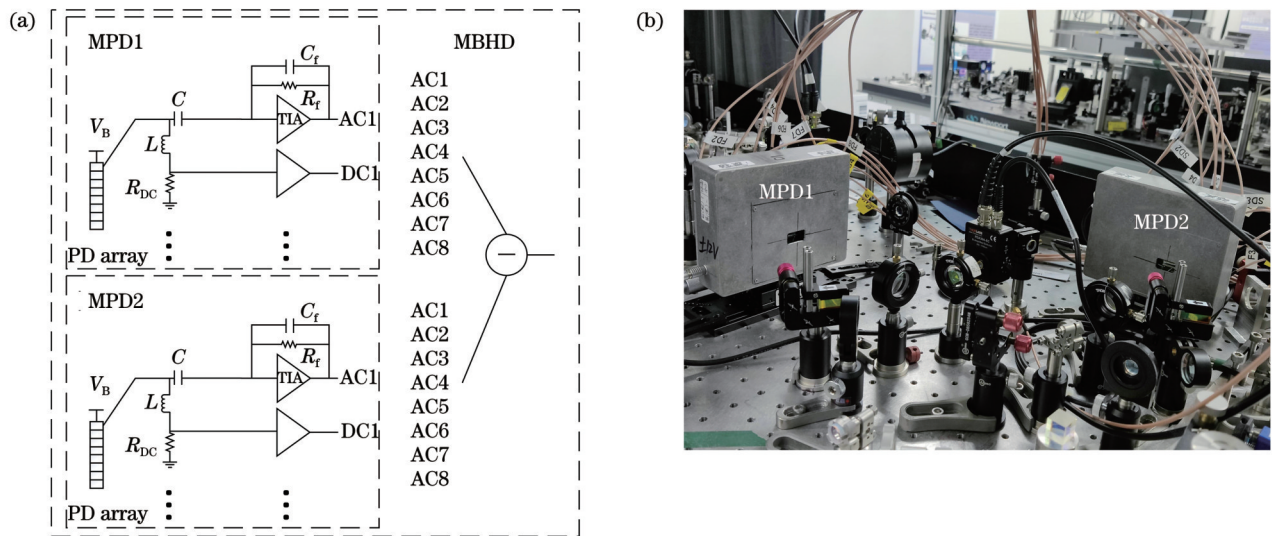


图1 多像素平衡零拍探测器。(a)原理框图;(b)实物图

Fig. 1 Multi-pixel balanced homodyne detector. (a) Circuit schematic diagram; (b) physical image



跨阻放大电路中反馈电阻的热噪声为

$$e_{\text{Rf}} = \sqrt{\frac{4kT}{R_f}} \times |Z_i|, \quad (3)$$

式中:  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度。

跨阻放大器的输入电流噪声  $i_{\text{in}}$  引起的噪声输出为

$$e_{\text{TIA-I}} = i_{\text{in}} \times |Z_i|. \quad (4)$$

跨阻放大器的输入电压噪声  $e_{\text{in}}$  引起的噪声输出为

$$e_{\text{TIA-V}} = e_{\text{in}} \times |Z_o|, \quad (5)$$

式中:  $Z_o$  为跨阻放大器的电压噪声增益, 可表示为

$$Z_o = \frac{Z_d + Z_i}{Z_d}, \quad (6)$$

$$Z_d = \frac{1}{j2\pi f(C_d + C_{\text{in}}) + \frac{1}{R_{\text{DC}} + j2\pi fL}}, \quad (7)$$

式中:  $C_{\text{in}}$  为跨阻放大器的输入电容;  $C_d$  为光电二极管的结电容。由此可见, 反馈电阻、直流电阻、电感值、光电二极管的暗电流和结电容、跨阻放大器的输入噪声, 都会影响探测器的电子学噪声。选择低暗电流的光电二极管可以降低  $e_{\text{PD}}$ , 低结电容的光电二极管和低输入电压噪声  $e_{\text{in}}$  的跨阻放大器可以降低  $e_{\text{TIA-V}}$ , 低输入电流噪声  $i_{\text{in}}$  的跨阻放大器可以降低  $e_{\text{TIA-I}}$ 。降低反馈电阻  $R_f$  可以降低  $e_{\text{Rf}}$ , 同时会降低信号的增益, 因此需要根据信噪比以及工作带宽合理选择反馈电阻的取值。

综合式(1)~(7), 上述 4 种噪声共同组成了放大器的电子学噪声。4 种噪声互不相关, 单个像素通道的总电子学噪声可表示为

$$e_{\text{ele}} = \sqrt{e_{\text{PD}}^2 + e_{\text{Rf}}^2 + e_{\text{TIA-I}}^2 + e_{\text{TIA-V}}^2}. \quad (8)$$

### 3 实验结果

为实现量子光学频率梳的高信噪比测量, 选用滨松光子学株式会社的 S8558 硅基光电二极管阵列, 其响应度为  $0.59 \text{ A/W@815 nm}$ , 阵列由 16 个水平排列的光电二极管像素组成, 各个光电二极管像素独立工作, 每个像素点的面积为  $0.7 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 实验中采用中间的 8 个像素点作为使用单元。在反向偏置电压为  $10 \text{ V}$  时, 各个像素点的暗电流为  $50 \text{ pA}$ , 结电容为  $5 \text{ pF}$ , 皮安量级的暗电流引入的噪声  $e_{\text{PD}}$  相比其他三种噪声可以忽略。跨阻放大器选用德州仪器公司的低噪声放大器 OPA657, 增益带宽积为  $1.6 \text{ GHz}$ , 输入电压噪声为  $4.8 \text{ nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ , 输入电流噪声为  $1.3 \text{ fA} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ , 输入电容为  $5.2 \text{ pF}$ 。跨阻放大电路中的反馈电容为  $1 \text{ pF}$ , 反馈电阻为  $80 \text{ k}\Omega$ 。跨阻放大器的噪声  $e_{\text{TIA-V}}$  和  $e_{\text{TIA-I}}$  以及反馈电阻  $R_f$  的热噪声  $e_{\text{Rf}}$  共同构成了探测器的总噪声, 每一部分均不可忽略。

为了避免直流信号迅速饱和, 跨阻放大器、平衡零

拍探测器采用 R-C 耦合或 L-C 耦合来分离交直流信号并分别进行放大, 从而增大探测器的动态范围。当探测器工作于 kHz 量级分析频率时, R-C 耦合优于 L-C 耦合<sup>[21]</sup>, 同时要求较大的直流电阻  $R_{\text{DC}}$ 。根据式(8)理论计算了 3 种情况下单个像素通道的总电子学噪声, 如图 2 所示。在分析频率为  $1 \sim 5 \text{ MHz}$  内: 当采用 L-C 耦合, 直流支路  $L=1 \text{ mH}$ 、 $R_{\text{DC}}=1 \text{ k}\Omega$  时, 电子学噪声最小; 当采用 R-C 耦合且  $R_{\text{DC}}=10 \text{ k}\Omega$  时, 电子学噪声最大; 当  $R_{\text{DC}}=20 \text{ k}\Omega$  时, 电子学噪声居中。由此可见, 没有电感时, 随着直流电阻  $R_{\text{DC}}$  的增大, 总电子学噪声减小, 然而由于 MBHD 由两个对称的 MPD 和减法器构成, 在单个的 MPD 中  $R_{\text{DC}}$  的增大会导致光电二极管两端的反向偏置电压迅速下降, 这严重影响光电二极管的响应速度, 大大降低了探测器的最高可探测光功率, 所以  $R_{\text{DC}}$  的最大取值受到限制, 因此 R-C 耦合的电子学噪声在  $1 \sim 5 \text{ MHz}$  分析频率内比 L-C 耦合大。实验中采用电子学噪声最小的 L-C 耦合结构且  $R_{\text{DC}}=1 \text{ k}\Omega$ , 当入射光功率为  $1 \text{ mW}$  时, 由于光电二极管的响应度为  $0.59 \text{ A/W}$ , 光电二极管两端的反向偏置电压仅下降  $0.59 \text{ V}$ 。根据 S8558 数据手册,  $0.59 \text{ V}$  压降对光电二极管结电容的影响可以忽略不计, 光电二极管响应速度的影响可以忽略, 因此 L-C 耦合可以提高探测器的最大可探测光功率。

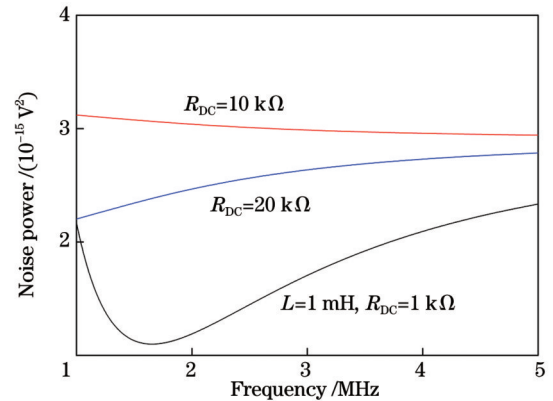


图 2 单个像素点的电子学噪声功率理论仿真结果  
Fig. 2 Theoretical simulation results of electronic noise power of single pixel

为测试 MBHD 各个通道的性能, 搭建如图 3 所示的实验装置。入射光源为中心波长为  $815 \text{ nm}$ 、脉冲宽度为  $130 \text{ fs}$ 、重复频率为  $75 \text{ MHz}$  的锁模飞秒脉冲, 激光通过 50:50 的分束器后分别入射到两个反射光栅, 利用光栅实现激光在水平方向的色散, 再通过透镜将发散激光转换为平行光束。光电二极管阵列的相邻像素点之间存在  $0.1 \text{ mm}$  的缝隙, 激光在像素点边界的衍射效应导致两个多像素光电探测器对应像素点的入射光源的频率成分不一致, 降低了探测器的共模抑制比。为了避免这种不良影响, 实验中采用微透镜阵列 (MLA) 将入射光源精确地聚焦在两个多像素光电探

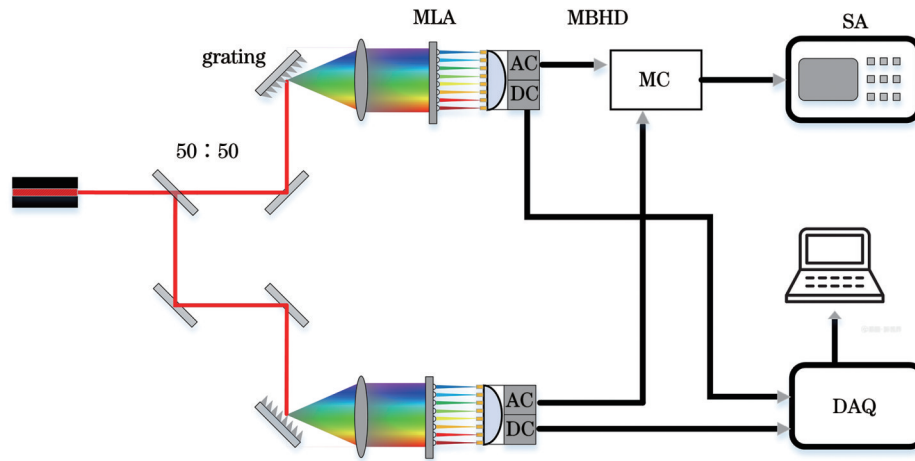


图 3 多像素平衡零拍探测器测试装置图

Fig. 3 Test devices of multi-pixel balanced homodyne detector

测器的 8 个像素点上,这确保了对应的一对像素点的光谱一致性。两个探测器的各 8 个交流输出经过减法器 (MC, ZFSCJ-2-2-S, Mini-Circuits 公司) 后接入频谱分析仪 (SA, N9020A, 是德科技) 进行测量,两个探测器的 8 个直流信号分别被多通道数据采集卡 (DAQ, USB3151, 北京阿尔泰科技发展有限公司) 采集,用于监测各个像素点的光强。

由于多像素平衡零拍探测器由两个独立的多像素光电探测器构成,各放大电路增益存在差异,光电二极管阵列的各像素点的响应度也存在一定的差异,因此探测器的增益校准是影响其并行同步探测的关键因素。首先将入射光单独聚焦到一个像素点,用 DAQ 记录对应的直流电压值,接着对两个探测器剩余的所有像素点进行同样的操作,得到 16 个微小差异的直流电压,然后在 DAQ 的采集程序中补偿各个通道的增益误差,使所有的直流电压值均相同,从而实现各像素点直流增益的补偿校准;将入射光单独聚焦到一个像素点,使用频谱仪记录对应的交流输出端的噪声曲线,然后对两个探测器剩余的所有像素点进行同样的操作,分别调节各个像素点放大电路中的反馈电阻  $R_f$  (滑动变阻器),使所有像素点的交流输出端的噪声曲线完全重合,从而实现对各像素点交流增益的补偿校准。

探测器经过直流和交流增益校准后,按照图 3 的测试装置,注入两个光电二极管阵列的光功率均为 2.2 mW,两个探测器中对应的每一对像素点用于测量输入光中 8 个光谱频率带的散粒噪声。水平移动两个探测器,使每个探测器 8 个像素点收集的总光强一致,以及 8 个像素点的光强分布也一致,呈高斯分布。使用频谱仪测量 8 对像素点的交流输出经过减法器后的散粒噪声功率,频谱仪的分辨率带宽 (RBW) 为 100 kHz,视频带宽 (VBW) 为 100 Hz,平均次数 (AVG) 设置为 10。测试结果如图 4 所示,圆圈

为其中一个探测器的 8 个像素点对应的直流电压,方块为 2 MHz 分析频率处的散粒噪声功率。由此可得,当光强分布在所有像素通道时,各通道散粒噪声功率和入射光强成正比,这验证了多像素平衡零拍探测器可以实现光谱可分辨的多通道并行平衡零拍探测。

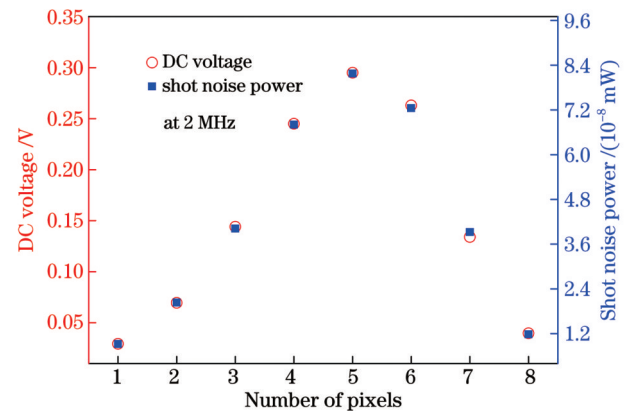


图 4 各通道的直流电压与散粒噪声功率

Fig. 4 DC voltage and shot noise power of different channels

为测试多像素平衡零拍探测器单个像素点的信噪比,将入射光注入两个探测器对应的单个像素点中,当入射光功率分别为 1.660 mW、0.834 mW、0.418 mW、0.208 mW、0.102 mW 时,平衡零拍探测器的散粒噪声功率以及电子学噪声功率如图 5 所示。测试结果表明:多像素平衡零拍探测器的 3 dB 工作带宽为 5 MHz,当入射光功率为 1.660 mW 时,在 2 MHz 分析频率处,散粒噪声功率比电子学噪声功率高 23 dB。对比不同入射光功率下的散粒噪声功率,发现入射光功率下降一半时,散粒噪声功率下降 3 dB,这表明光功率在 0.102~1.660 mW 内时,探测器具有良好的线性增益。

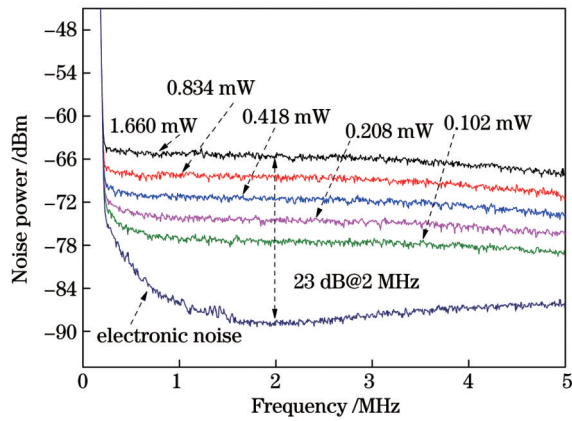


图5 单个像素点在不同入射光功率下的散粒噪声功率和探测器电子学噪声功率

Fig. 5 Shot noise power under different incident optical power and electronic noise power of detector for single pixel

## 4 结 论

理论分析平衡零拍探测器的噪声来源,分别对 L-C 耦合和 R-C 耦合跨阻放大电路的电子学噪声进行了理论仿真,结果表明:在实验条件下,L-C 耦合是最优选择。选用多像素光电二极管阵列,并对各个像素通道的直流和交流增益进行校准,研制了高性能的多像素平衡零拍探测器。每个像素通道中,光功率为 1.660 mW 的 815 nm 激光入射时,散粒噪声功率在 2 MHz 分析频率处比电子学噪声高 23 dB。入射光经光栅后水平散射,照射所有像素通道,各通道散粒噪声功率分布和入射光强分布成正比,这验证了多像素平衡零拍探测器可以实现光谱可分辨的多通道并行平衡零拍探测。该探测器为基于量子光学频率梳的量子精密测量提供了高性能的探测工具。

### 参 考 文 献

[1] Yuen H P, Chan V W. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. *Optics Letters*, 1983, 8(3): 177-179.

[2] Lvovsky A I, Raymer M G. Continuous-variable optical quantum-state tomography[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(1): 299-332.

[3] Leonhardt U. Measuring the quantum state of light[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(12): 1827-1828.

[4] Wang S F, Xiang X, Treps N, et al. Sub-shot-noise interferometric timing measurement with a squeezed frequency comb[J]. *Physical Review A*, 2018, 98(5): 053821.

[5] Zhou H J, Yang W H, Li Z X, et al. A bootstrapped, low-noise, and high-gain photodetector for shot noise measurement [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(1): 013111.

[6] Grote H, Weinert M, Adhikari R X, et al. High power and ultra-low-noise photodetector for squeezed-light enhanced gravitational wave detectors[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20107-20118.

[7] Khalaidovski A, Vahlbruch H, Lastzka N, et al. Long-term stable squeezed vacuum state of light for gravitational wave detectors[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29(7):

075001.

[8] Chi Y M, Qi B, Zhu W, et al. A balanced homodyne detector for high-rate Gaussian-modulated coherent-state quantum key distribution[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(1): 013003.

[9] Ma X C, Sun S H, Jiang M S, et al. Enhancement of the security of a practical continuous-variable quantum-key-distribution system by manipulating the intensity of the local oscillator[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(3): 032310.

[10] Ivanova A E, Chivilikhin S A, Popov I Y, et al. On the possibility of using optical Y-splitter in quantum random number generation systems based on fluctuations of vacuum[J]. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2015, 6(1): 95-99.

[11] 魏世海, 樊矾, 杨杰, 等. 高速小型化光子随机数发生器[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0512001.

Wei S H, Fan F, Yang J, et al. Ultrafast compact optical quantum random number generator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0512001.

[12] 王少锋, 项晓, 董瑞芳, 等. 量子光频梳产生实验研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1027003.

Wang S F, Xiang X, Dong R F, et al. Research on experimental generation of quantum optical frequency comb[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1027003.

[13] 彭堃焯, 贾晓军, 苏晓龙, 等. 连续变量量子态的光学操控[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900107.

Peng K C, Jia X J, Su X L, et al. Optical manipulations of quantum states with continuous variables[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900107.

[14] Jin X L, Su J, Zheng Y H, et al. Balanced homodyne detection with high common mode rejection ratio based on parameter compensation of two arbitrary photodiodes[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23859-23866.

[15] Wang S F, Xiang X, Zhou C H, et al. Simulation of high SNR photodetector with L-C coupling and transimpedance amplifier circuit and its verification[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(1): 013107.

[16] Zhang X X, Zhang Y C, Li Z Y, et al. 1.2-GHz balanced homodyne detector for continuous-variable quantum information technology[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 6803810.

[17] 马丽霞, 秦际良, 闫智辉, 等. 用于连续变量量子存储的快速响应平衡零拍探测器[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0227001.

Ma L X, Qin J L, Yan Z H, et al. Fast response balanced homodyne detector for continuous-variable quantum memory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0227001.

[18] 靳晓丽. ~kHz 量级平衡零拍探测器的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0927003.

Jin X L. Study on kHz balanced homodyne detector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0927003.

[19] 李卫, 武志学, 王庆伟, 等. 高信噪比集成化共振光电探测器 [J]. *光学学报*, 2023, 43(7): 0727001.

Li W, Wu Z X, Wang Q W, et al. Integrated resonant photodetector with high signal-to-noise ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0727001.

[20] 邓娟, 郭龔强, 林鸿, 等. 面向连续变量量子随机数产生的宽带高平坦度平衡零拍探测器[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(11): 1104001.

Deng J, Guo Y Q, Lin H, et al. Wideband and high-flatness homodyne detector for continuous variable quantum random number generation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(11): 1104001.

[21] 王少锋, 刘宣泽, 李汉卿, 等. 基于 R-C 耦合跨阻设计的 1 kHz~200 MHz 宽带平衡零拍探测器[J]. *光学学报*, 2023, 43(9): 0923001.

Wang S F, Liu X Z, Li H Q, et al. Design of 1 kHz~200 MHz broadband balanced homodyne detector based on R-C coupled circuit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(9): 0923001.

[22] Pinel O, Jian P, de Araújo R M, et al. Generation and



- characterization of multimode quantum frequency combs[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(8): 083601.
- [23] Cai Y, Roslund J, Thiel V, et al. Quantum enhanced measurement of an optical frequency comb[J]. *NPJ Quantum Information*, 2021, 7: 82.
- [24] Lamine B, Fabre C, Treps N. Quantum improvement of time transfer between remote clocks[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(12): 123601.
- [25] Thiel V, Roslund J, Jian P, et al. Quantum-limited measurements of distance fluctuations with a multimode detector [J]. *Quantum Science and Technology*, 2017, 2(3): 034008.
- [26] Johnson M. Photodetection and measurement: maximizing performance in optical systems[M]. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [27] Graeme J G. Photodiode amplifiers: OP AMP solutions[M]. Boston: McGraw Hill, 1996.
- [28] 张正茂, 陈峰. 光电探测放大器的噪声分析[J]. *光电技术应用*, 2012, 27(3): 37-40.  
Zhang Z M, Chen F. Noise analysis of opto-electronic detection amplifier[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(3): 37-40.
- [29] 王少锋, 董瑞芳, 刘涛, 等. L-C 耦合电路对散粒噪声探测器电子学噪声的影响[J]. *光子学报*, 2017, 46(7): 0704001.  
Wang S F, Dong R F, Liu T, et al. Effect of L-C combination circuit on electronic noise of shot noise photodetector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 0704001.

## Multi-Pixel Balanced Homodyne Detector

Wang Shaofeng<sup>1,2\*\*</sup>, Li Hanqing<sup>1</sup>, Li Kangkang<sup>1</sup>, Liu Peng<sup>2,3</sup>, Li Juan<sup>2,3</sup>, Dong Ruifang<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>*College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Time Reference and Applications, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, Shaanxi, China;*

<sup>3</sup>*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

### Abstract

**Objective** As an important tool for quantum optical measurement, the balanced homodyne detector (BHD) is highly sensitive to the amplitude and phase of the incident light. It can reliably extract quantum fluctuations, suppress classical common-mode noise, and amplify quantum fluctuations to the macro level. Additionally, it has been widely employed in quantum noise measurement, gravitational wave detection, high-sensitivity interferometric timing measurement, continuous variable quantum key distribution, and quantum random number generator. The common-mode rejection ratio (CMRR), operating bandwidth, and signal-to-noise ratio (SNR) of the detector have been the research focuses. The optical frequency comb contains a large number of equally spaced longitudinal modes, which is a good multi-mode resource. The spectrum width of the optical frequency comb is in the order of nanometers. The quantum optical frequency comb which breaks the limit of shot noise can be generated by nonlinear processes. Quantum optical frequency comb has a great application prospect in quantum precision measurement. Spectrally resolved balanced homodyne detection is an important detection method of quantum optical frequency comb. We analyze the noise source of the balanced homodyne detector theoretically and design the multi-pixel balanced homodyne detector (MBHD) based on photodiode array and multi-channel inductance-capacitance (L-C) coupled transimpedance amplifier (TIA) circuit. These designs enable MBHD to meet multi-channel parallel and high-SNR quantum noise measurements.

**Methods** The MBHD consists of two highly symmetrical multi-pixel photodetectors (MPDs) and a multi-channel subtracter (Fig. 1). Each MPD includes a photodiode array, a multi-channel L-C coupled structure, AC amplification, and DC amplification. The photocurrent generated by the corresponding pair of pixels in the two MPD flows through their respective AC amplification outputs, and the common-mode signal in the detection result is eliminated by the subtracter to complete the multi-pixel parallel balanced homodyne detection. Multi-channel DC output monitors the optical power of all pixels by a multi-function data acquisition card (DAQ). In the amplification circuit structure of the single pixel in MPD, the generated photocurrent signal is divided into DC signal and AC signal through the L-C coupled circuit. The AC signal is converted into a voltage signal by a TIA and is further adopted to measure the intensity noise power of the incident light. The DC signal is converted into a voltage signal by a load resistor and a isolation amplifier. Additionally, an equivalent noise model is built to analyze the electronic noise. Due to the multi-channel parallel structure of the MBHD, each channel is similar to each other and independent. The electronic noise of the single-pixel channel includes the noise generated by the dark current of the photodiode, the thermal noise generated by the feedback resistance in the transimpedance amplifier circuit, the noise generated by the input voltage noise of the transimpedance amplifier, and the noise generated by the input current noise of the transimpedance amplifier. Theoretical analysis shows that a reasonable selection of feedback resistance

and inductance, photodiode with low dark current and low junction capacitance, and the TIA with low input noise can reduce the electronic noise of the detector. Meanwhile, the L-C coupled structure is better than the R-C coupled structure in experimental conditions (Fig. 2).

**Results and Discussions** The device is constructed to test the performance of MBHD (Fig. 3). AC output of MBHD is connected to a spectrometer to measure the bandwidth and SNR. The DC signals of each pixel are measured by a DAQ to monitor the optical powers of each pixel. When the optical power is distributed on all pixel channels, the distribution of the shot noise power in each channel is proportional to the distribution of the incident optical power, which verifies that the multi-pixel BHD can achieve spectrally resolved multi-channel parallel balanced homodyne detection (Fig. 4). When the incident optical power is 1.660 mW, 0.834 mW, 0.418 mW, 0.208 mW, and 0.102 mW respectively, the shot noise spectrum and electronic noise spectrum of one pixel are measured at different analysis frequencies (Fig. 5). The test results show that the 3 dB bandwidth of MBHD is 5 MHz. The resolution bandwidth is set to 100 kHz, the video bandwidth is 100 Hz, and the number of averaging times is 10. When the incident optical power is 1.660 mW, the shot noise power is 23 dB higher than the electronic noise power at the analysis frequency of 2 MHz. By comparing the shot noise power under different incident optical power, the shot noise power decreases by 3 dB when the incident optical power decreases by half, which indicates that the detector has a good linear gain within 0.102 mW to 1.660 mW of the optical power.

**Conclusions** Based on the noise model of the BHD, the electronic noise source is analyzed theoretically. The results indicate that the L-C coupled structure is better. By adopting the multi-pixel photodiode array and L-C coupled structure, a high-performance multi-pixel BHD is developed. In each pixel channel, when the 815 nm laser with optical power of 1.660 mW is incident, the shot noise power is 23 dB higher than the electronic noise at the analysis frequency of 2 MHz. By employing the grating to scatter the incident light horizontally, the shot noise power in each channel is proportional to the incident optical power. It is verified that the multi-pixel BHD can realize the spectrally resolved multi-channel parallel balanced homodyne detection. The detector provides a high-performance detection tool for quantum precision measurement based on quantum optical frequency comb.

**Key words** detectors; transimpedance amplifier; quantum optical frequency comb; balanced homodyne detector; photodiode array; signal-to-noise ratio