

# 激光与光电子学进展

## ~kHz 量级平衡零拍探测器的研究

靳晓丽<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>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, 山西 太原 030006;

<sup>2</sup>山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

**摘要** 平衡零拍探测技术是低频段测量压缩态量子噪声的主要方法之一, 信噪比和饱和功率是制约低频段平衡零拍探测的重要参数。基于电感的阻抗随频率变化的特点, 利用电流电压转换频率函数, 使光电流低频(或直流)部分的转换阻抗小于高频部分, 从而提高了光电探测器的饱和功率和信噪比。结合仪表放大电路和跨阻运算放大电路, 获得了具有直流和交流输出的高信噪比和高共模抑制比的~kHz量级平衡零拍探测器, 实测系统共模抑制比为 54 dB。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, 探测器饱和功率为 17 mW。

**关键词** 量子光学; 探测器; 信噪比; 电感阻抗

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0927003

## Study on kHz Balanced Homodyne Detector

Jin Xiaoli<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

**Abstract** The balanced homodyne detection technique is the one of the main methods for the detection of squeezed state quantum noise in the low frequency range, in which the signal-noise ratio and saturation power are the important parameters limiting balanced homodyne detection. Based on the characteristic of inductance impedance changing with frequency, a current-voltage-conversion frequency function is adopted to make the conversion impedance corresponding to the low-frequency (or direct current) component of photocurrent is lower than that corresponding to the high-frequency part, and thus the saturation power and signal-noise ratio of the photodetector are both enhanced. By combining the instrument amplifier and trans-resistance operational amplifier circuit, a kHz balanced homodyne detector with high signal-noise ratio and high common-mode rejection ratio for direct current and alternating current output is obtained, whose measured common-mode rejection ratio is 54 dB. When the input power is 14.4 mW, the shot noise at 50–100 kHz is 31 dB higher than the electronic noise and the saturation power of the detector is 17 mW.

**Key words** quantum optics; photodetector; signal-noise ratio; inductance impedance

**OCIS codes** 270.5570; 270.6570; 270.5585

收稿日期: 2020-07-28; 修回日期: 2020-09-07; 录用日期: 2020-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61805131, 61775127)

\*E-mail: jinxiaoli@sxu.edu.cn

## 1 引言

压缩态光场是精密测量<sup>[1-2]</sup>和量子信息研究<sup>[3]</sup>的重要光源,已被广泛应用于引力波探测<sup>[4]</sup>、纠缠态光场构建等领域<sup>[5-7]</sup>,其中测量精度和保真度均受压缩态光场的限制。自 1986 年 Wu 等<sup>[8]</sup>采用光学参量振荡方式获得单模真空压缩态光场以来,测量得到的压缩度常常被系统的损耗、相位噪声和探测系统的性能限制。德国研究者通过降低系统(压缩光的产生、传输和探测过程)的损耗和提高相位锁定的稳定度,在实验上逐步获得了测量频率在~MHz 量级的 10 dB 的 1064 nm 和 15 dB 的 1550 nm 的真空压缩态光场<sup>[9-10]</sup>。

自 1983 年 Yuen 等<sup>[11]</sup>使用一对增益相同的光电探测器构成平衡零拍探测器以来,平衡零拍探测方法成为测量压缩态的主要方法之一<sup>[12-13]</sup>。共模抑制比是平衡零拍探测系统抑制经典噪声能力的一个重要指标<sup>[14]</sup>。2016 年,靳晓丽等<sup>[15]</sup>基于平衡零拍探测器的自减方案,通过采用差分微调电路和可调的偏置电压来补偿两光电管差异,在分析频率 1~5 MHz 处获得了共模抑制比为 63 dB 的平衡零拍探测器。除此之外,信噪比也是影响光电探测器准确测量量子噪声的因素,为了减小光电探测器的电子学噪声对测量压缩度的影响,通常需要信噪比大于 10 dB<sup>[4]</sup>。2014 年,本课题组通过采用自举结构的电路设计,获得了入射激光功率为 410  $\mu\text{W}$ ,散粒噪声在分析频率 1.5~3 MHz 处比电子学噪声高 18 dB 的高信噪比的光电探测器<sup>[16-18]</sup>。

目前针对压缩态量子噪声的测量多集中在射频段(~MHz),这是由于固体激光器受弛豫振荡的影响,在数十 kHz 处都有较大的强度噪声,该强度噪声随测量频率的增加而减小,当测量频率大于 500 kHz 时,固体激光器的强度噪声基本可以达到量子噪声极限。然而,稳定的高压压缩度的连续变量压缩态光场作为提高引力波探测精度的一种重要工具,其检测频率一般在低频段<sup>[4]</sup>。平衡零拍探测方法的高共模抑制比能够有效对抗本地振荡光的强度噪声对测量压缩度的影响<sup>[19]</sup>,已成为测量低频段压缩态光场压缩度的最佳方法。

本文针对~MHz 量级的平衡零拍探测器在低频段中的问题,理论分析了低频段各部分噪声源在总输入噪声中的占比。分析结果表明,随着测量频率的降低,由取样电阻和运算放大器输入电压噪声引起的噪声成分占主导地位。本文提出了一种新

的方法,结合之前的设计工作,使光电二极管产生的光电流经电阻转化为光电压时电阻值随频率发生变化,从而获得了~kHz 量级高信噪比和高共模抑制比的平衡零拍探测器。

## 2 电路设计理论背景

### 2.1 存在的问题

目前,实验中多采用图 1 所示的基于单电路板自减方案的平衡零拍探测器,即通过对两光电二极管产生的光电流信号相减后的电流差信号进行信号处理(经过相同的电子元件),有效消除电子元件差异的影响,从而提高了平衡零拍探测器的共模抑制比,其中 Phd 1 和 Phd 2 为光电二极管,  $R_f$  为反馈电阻,  $BV$  为偏置电压。光电流差信号在跨阻运算放大器中进行电流-电压( $I-V$ )放大后得到差分电压信号。

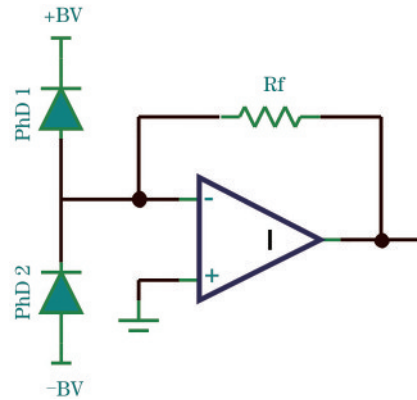


图 1 基于自减方案的平衡零拍探测电路

Fig. 1 Balanced homodyne detection circuit based on self-subtraction

根据电流  $I$  产生的散粒噪声谱密度  $\sqrt{2e|I|}$  可知,图 1 所示的  $I-V$  转化电路的光电流的散粒噪声谱密度  $\tilde{I}_s$  为

$$\tilde{I}_s = \sqrt{2e(|I_1| + |I_2|)}, \quad (1)$$

式中:  $I_1$  和  $I_2$  分别表示两光电管由于光照射产生的光电流,与光电管的响应度和光功率有关;  $e$  为基本电荷量。

由于反馈电阻引入了热噪声,Johnson 噪声谱密度  $\tilde{I}_T$  为

$$\tilde{I}_T = \sqrt{\frac{4KT}{R_f}}, \quad (2)$$

式中:  $K$  为波尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $R_f$  是反馈电阻的阻值。

由于光电流交流部分中的散粒噪声携带有需要测量的量子信息,因此以光电流产生的散粒噪声谱密度  $\tilde{I}_s$  作为测量的信号,在不考虑运算放大器输入噪声和光电管结电容的情况下,得出最大信噪比为

$$S_N = \frac{\tilde{I}_s}{\tilde{I}_r} = \sqrt{\frac{e(|I_1| + |I_2|)R_f}{2KT}} \quad (3)$$

由此可见,为了获得高的信噪比,通常需要增大反馈电阻的阻值。然而,由于图 1 所示电路中的光电流的交流部分和直流部分共用一个运算放大器,当两光电管的光功率不相等或者单个光电管注入光功率时,受运算放大器供电电压的限制,  $R_f$  的阻值过大,直流部分极易使跨阻运算放大器饱和,这样就大大降低了光的饱和功率。

针对上述问题,在光电流信号进入运算放大器之前,先通过由取样电阻 ( $R_d$ ) 和电容 ( $C_1$ ) 组成的电阻电容 (RC) 滤波电路将交直流电路分开,如图 2 所示,光电流差信号经过 RC 滤波电路,交流部分通过  $C_1$  后在跨阻运算放大电路中进行  $I-V$  放大;直流部分经取样电阻转化为电压,后续经比例放大电路进行电压放大。图 2 的优点是取样电阻的引入使直流信号不再进入跨阻放大电路,跨阻放大电路不易饱和,并且取样电阻阻值的选择更加灵活。但是,为了避免由反偏电压、光电二极管和取样电阻组成的电路饱和,通常取样电阻阻值选取小于  $500 \Omega$ 。在考虑运算放大器输入噪声和光电管结电容的情况下,跨阻放大电路输出端的电子学噪声主要来源于跨阻运算放大器的输入电流噪声密度  $\tilde{I}_N$ 、输入电压噪声密度  $\tilde{E}_N$  和电阻的热噪声密度  $\tilde{I}_N$ 。电路输入总噪声电流密度  $\tilde{I}_{eq}$  为

$$\tilde{I}_{eq} = \sqrt{\tilde{I}_N^2 + \frac{4KT}{R} + \left[ \frac{\tilde{E}_N(1 + 2\pi FC_s R)}{R} \right]^2} \quad (4)$$

式中:  $\frac{4KT}{R}$  为电阻的热噪声密度,其中  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_f}$ ,  $R_d$  为取样电阻的阻值,  $R_f$  为跨阻运放的反反馈电阻阻值;  $C_s$  为反相端总电容(包括光电二极管的结电容、跨阻运算放大器的输入电容和寄生电容,寄生电容相对很小可忽略);  $F$  为测量频率。  $\frac{1}{2\pi FC_s}$  为反相端总电容的阻抗,反相端总电容越小,总噪声越小。

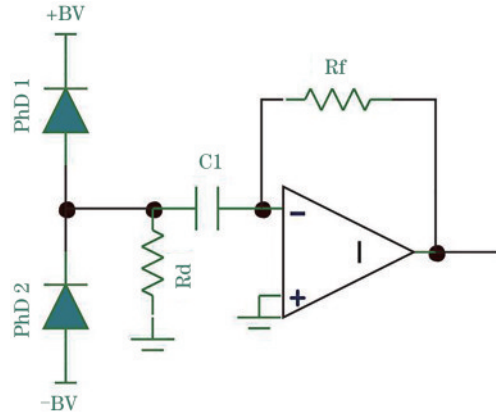


图 2 带 RC 滤波电路的平衡零拍探测电路

Fig. 2 Balanced homodyne detection circuit with RC filter circuit

不难看出,由于取样电阻的存在,图 2 相比图 1,不仅增加了由取样电阻引入的热噪声,而且由跨阻运算放大器输入电压噪声引起的噪声成分由于取样电阻的存在也增大。同时,取样电阻越小,总噪声越大,尤其是随着测量频率的降低,电容阻抗越大,由取样电阻引起的噪声成分占据了噪声的主导地位;但取样电阻越大,由反偏电压、光电二极管和取样电阻组成的电路越易饱和,探测器的交流饱和功率越低。

本文提出了一种不同的方法,即当光电二极管产生的光电流经电阻转化为光电压时,电阻值随频率发生变化,也就是光电流低频(或直流)部分的转换阻抗小于高频部分,进而提高了光电探测器的饱和功率以及低频段的信噪比。

### 2.2 电路改进

如图 3 所示,利用电感的感抗随频率变化的特点,用大电感  $L_1$  取代了传统固定电阻,即光电二极管产生的光电流经电感转化的光电压随频率发生变

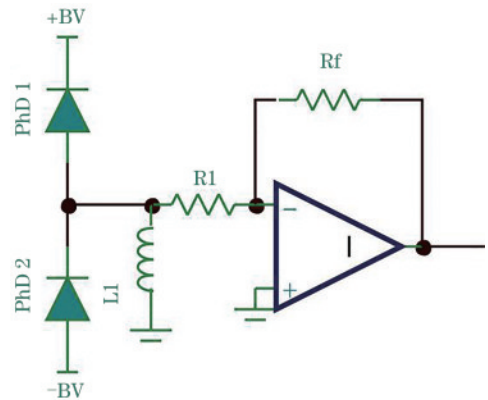


图 3 大电感代替固定电阻的电路设计

Fig. 3 Circuit design with large induction instead of fixed resistance

化,根据电感阻抗  $Z = 2\pi fL$  ( $f$  为频率,  $L$  为电感量) 可知,当光电流为低频(或直流)时,电感的阻抗很小,当单个光电管注入光功率或两光电管的光功率差很大时,由反偏电压、光电二极管和电感组成的探测器的直流回路仍然不易饱和。而当极点频率  $f = 1$  kHz 时,电感量  $L = 500$  mH,电感阻抗  $Z = 3.14$  k $\Omega$ 。可见频率大于 1 kHz 时电感阻抗远大于通常取样电阻 ( $< 500 \Omega$ )。根据(4)式和上述分析可知,跨阻运算放大器输入电压噪声引起的噪声成分随着电感阻抗的增大而减小,同时电路中的电阻  $R_1$  和电感  $L_1$  构成滤波电路,阻止低频(或直流)部分进入跨阻放大器。

由此可见,当光电流低频(或直流)部分的转换阻抗小于高频部分时,光电探测器的饱和功率和 kHz 量级信噪比得到提高。当传统固定电阻阻值大时,光电探测器低频(或直流)部分的饱和功率低,当传统固定电阻阻值小时,光电探测器的 kHz 量级电子学噪声大。所提方法克服了传统固定电阻的缺点,能够测量激光器的 ~kHz 量级强度噪声以及非经典光场在此频段的压缩噪声谱。

### 3 ~kHz 量级平衡零拍探测器的电路设计

~kHz 量级平衡零拍探测器的电路设计如图 4 所示,光电二极管 PhD 1 和 PhD 2 串联节点输出的

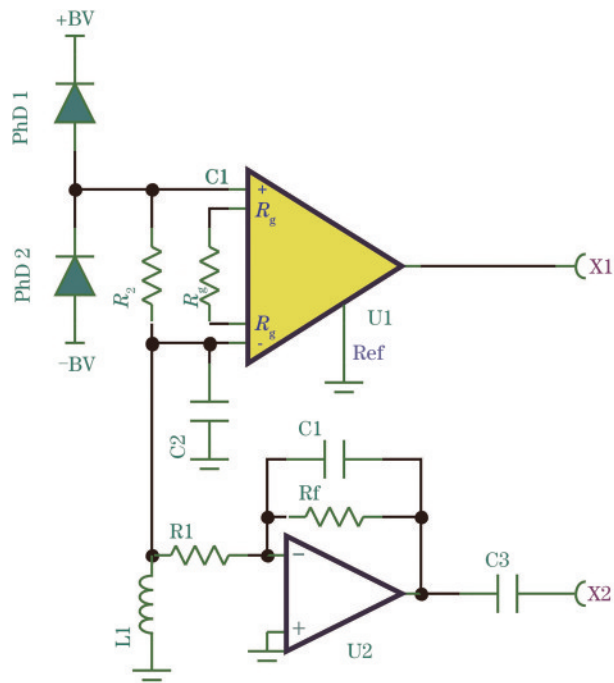


图 4 ~kHz 量级平衡零拍探测器的电路图

Fig. 4 Circuit of kHz balanced homodyne detector

光电流差信号首先经过由 39.9  $\Omega$  取样电阻 ( $R_2$ ) 和仪表放大器 INA128(U1) 构成的差分电路。仪表放大器的增益电阻 ( $R_g$ ) 为 1 k $\Omega$ ,根据仪表放大器 INA128 的增益公式  $G = 1 + \frac{50}{R_g}$  可知,探测器的直流增益为 51 倍,仪表放大器 INA128 输出 X1 信号的电压理论值  $U = R_v \cdot P \cdot R_2 \cdot 51$ ,其中  $R_v$  为光电二极管的光谱响应度,  $P$  为入射光功率。将 X1 信号接至示波器以实时监测各个光电管的光强变化情况;信号再经由电感  $L_1$  和电阻  $R_1$  构成的高频滤波电路进入跨阻放大器 ADA4817-1(U2)。电感  $L_1$  是绕线型电感,其直流电阻为 30  $\Omega$ ,电感值为 500 mH,电阻  $R_1$  为 1.3 k $\Omega$ ,可知滤波器的极点频率为 413 Hz,跨阻放大器 ADA4817-1 的反馈电阻  $R_f$  和补偿电容  $C_1$  分别为 20 k $\Omega$  和 20 pF,跨阻运放增益为 20 kV/A,反馈电阻和补偿电容构成的低通滤波极点频率为 398 kHz。将跨阻放大器 ADA4817-1 输出的 X2 信号接至频谱分析仪以测量激光器的 ~kHz 量级强度噪声以及非经典光场在此频段的压缩噪声谱。

### 4 性能测试

采用图 5 所示的实验装置来检测 ~kHz 量级平衡零拍探测器的性能。单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光器输出的 1064 nm 激光首先经过半波片(HWP1)和偏振分束棱镜(PBS1)以精细地调节光功率;其次,为了测量探测器的共模抑制比,通过调节 HWP2,将产生的 45° 线偏振光注入到电光振幅调制器(EOAM)中,通过将信号发生器(SG)产生的调制信号加载到 EOAM 的射频端(RF)上,对光场进行调制;最后,利用 PBS2、HWP3 和 PBS3 组成的 50:50 分束器精细地调节分束比,分束器输出的两束光分别通过聚焦透镜 L3 和 L4 注入到光电管 PhD 1 和 PhD 2 中。将

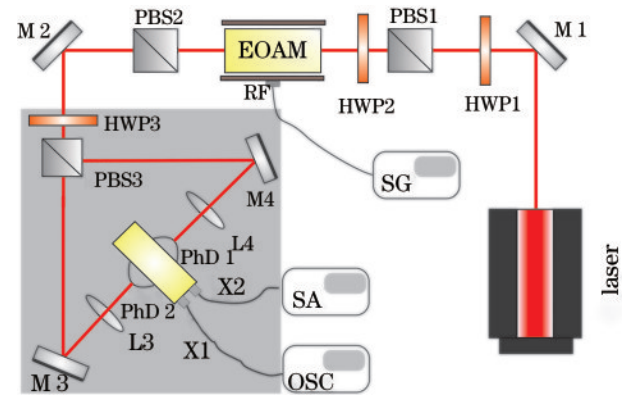


图 5 性能测试装置图

Fig. 5 Experimental setup for performance test



探测器输出的 X1 信号接至示波器 (OSC), 用于实时监测两个光电管光强变化情况; 将探测器输出的 X2 信号接至频谱分析仪 (SA), 用于测量激光器的强度噪声 (kHz 量级) 以及压缩光场在此频段的压缩噪声谱。探测器的两个 InGaAs 光电管型号为 ETX500。

在光路搭建好后, 调节波片 HWP3, 使得分束棱镜 PBS3 后的两束光光功率相同, 利用 HWP1 改变光功率, 使得注入 PhD 1 和 PhD 2 的激光功率依次均为 225  $\mu\text{W}$ 、450  $\mu\text{W}$ 、900  $\mu\text{W}$ 、1.8 mW、3.6 mW 和 7.2 mW。表 1 所示为各个光电二极管 X1 输出端在数字示波器上显示的直流输出电压, 具体步骤是先挡住 PhD 2, PhD 1 照射 (对应的直流输出电压为  $V_1$ ), 然后挡住 PhD 1, PhD 2 照射 (对应的直流输出电压  $V_2$ ), 最后两个光电管一起照射 (对应的直流输出电压  $V_3$ )。

表 1 实测的直流输出电压  
Table 1 Measured DC output voltage

Optical power /mW	$V_1$ /mV	$V_2$ /mV	$V_3$ /mV
0.225	300	-297	3
0.45	600	-595	5
0.9	1210	-1207	3
1.8	2440	-2445	-5
3.6	4860	-4867	-7
7.2	9608	-9621	-13

图 6 所示为频谱分析仪上的测量结果, 其中曲线 a 为通过旋转波片 HWP3, 当一个光电管的入射光功率为 450  $\mu\text{W}$ , 另外一个光电管的入射光功率为 0 (或挡住光), 探测器 X2 输出端口接到频谱分析仪上所测得的功率谱, 即激光器功率为 450  $\mu\text{W}$  时 1~330 kHz 范围内的强度噪声。曲线 a 上的两尖峰分别对应电光振幅调制器上加载的 50 kHz 调制信

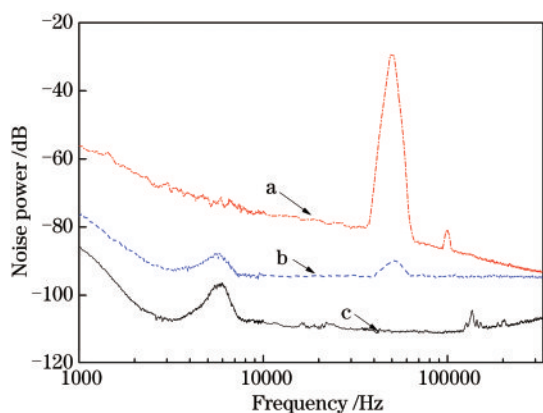


图 6 1~330 kHz 范围内激光器的强度噪声  
Fig. 6 Laser intensity noise in range of 1-330 kHz

号 -30 dB 噪声和调制信号产生的二次谐波噪声; 曲线 b 为两光电管的入射光功率均为 225  $\mu\text{W}$  时 1~330 kHz 处的功率谱, 即入射光功率为 450  $\mu\text{W}$  时的散粒噪声基准 (SNL); 曲线 c 为探测器的电子学噪声 (EN)。从图 6 中可以看出, 当入射功率为 450  $\mu\text{W}$  时, 在 1~15 kHz 范围内激光器的强度噪声比散粒噪声基准高 20 dB 左右, 在 10~100 kHz 范围内散粒噪声基准比电子学噪声高 15 dB 左右。共模抑制比可表征平衡零拍探测器抑制经典噪声的能力, 可以看出, 分析频率 50 kHz 处的共模抑制比为 54 dB, 如此高的共模抑制比能有效对抗本地振荡光的强度噪声对测量压缩度的影响<sup>[19]</sup>。

在分束棱镜 PBS3 后两束光光功率相同的情况下, 注入两光电管的激光功率依次均为 450  $\mu\text{W}$ 、900  $\mu\text{W}$ 、1.8 mW、3.6 mW 和 7.2 mW, 将探测器 X2 输出端口接到频谱分析仪, 分析频率在 400 Hz~330 kHz 范围内的输出功率噪声谱如图 7 所示, 从下至上依次为探测器的电子学噪声及激光输入光功率为 900  $\mu\text{W}$ 、1.8 mW、3.6 mW、7.2 mW、14.4 mW 时所对应的散粒噪声基准 (SNL)。可以看出, 当激光总功率为 900  $\mu\text{W}$  时, 散粒噪声谱线在 50 kHz 处比电子学噪声高 19 dB, 此时的电子学噪声最小。在测量频率高于 3 kHz 的条件下, 注入激光总功率每增加一倍, 散粒噪声基准增加 3 dB, 这表明测量频率大于 3 kHz 时, 探测器的信噪比具有良好的线性。当入射功率为 14.4 mW 时, 3~330 kHz 范围内的散粒噪声基准比电子学噪声至少高 28 dB, 探测器的饱和功率为 17 mW。

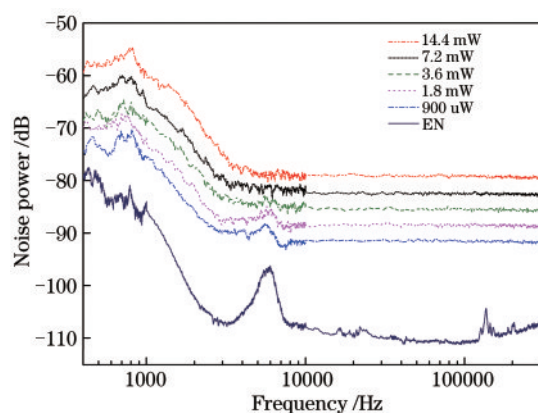


图 7 不同光功率激光入射下的量子噪声谱线  
Fig. 7 Quantum noise curves under different power lasers

## 5 结 论

对平衡零拍探测器在低频段的输入电流总噪声进行了定量分析, 根据各噪声源的特点, 利用电

感阻抗随频率变化的特点,使光电二极管产生的光电流经电感转化的光电压亦随频率发生变化,光电流低频(或直流)部分的转换阻抗小于高频部分,从而提高了光电探测器的交流饱和功率以及低频段的信噪比。结合仪表放大电路和跨阻放大电路,设计了具有交流和直流输出的高信噪比和高共模抑制比的~kHz量级平衡零拍探测器。实测共模抑制比为 54 dB,能有效对抗 1~100 kHz 范围内 450  $\mu$ W 本地振荡光的强度噪声(20 dB 左右)对测量压缩度的影响,当入射功率为 14.4 mW 时,3~330 kHz 范围内的散粒噪声基准比电子学噪声至少高 28 dB,50~100 kHz 处的散粒噪声基准比电子学噪声高 31 dB。该探测器能测量激光器的 kHz 量级强度噪声以及非经典光场在此频段的压缩噪声谱。

### 参 考 文 献

- [1] Goda K, Miyakawa O, Mikhailov E E, et al. A quantum-enhanced prototype gravitational-wave detector[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(6): 472-476.
- [2] Grote H, Danzmann K, Dooley K L, et al. First long-term application of squeezed states of light in a gravitational-wave observatory[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(18): 181101.
- [3] Braunstein S L, van Loock P. Quantum information with continuous variables[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77(2): 513.
- [4] Stefszky M S, Lowry C M M, Chua S Y, et al. Balanced homodyne detection of optical quantum states at audio-band frequencies and below[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29(14): 145015.
- [5] Furusawa A, Sørensen J L, Braunstein S L, et al. Unconditional quantum teleportation[J]. *Science*, 1998, 282(5389): 706-709.
- [6] Bowen W P, Treps N, Buchler B C, et al. Experimental investigation of continuous-variable quantum teleportation[J]. *Physical Review A*, 2003, 67(3): 032302.
- [7] Takei N, Yonezawa H, Aoki T, et al. High-fidelity teleportation beyond the no-cloning limit and entanglement swapping for continuous variables[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(22): 220502.
- [8] Wu L A, Kimble H J, Hall J L, et al. Generation of squeezed states by parametric down conversion[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 57(20): 2520.
- [9] Mehmet M, Ast S, Eberle T, et al. Squeezed light at 1550 nm with a quantum noise reduction of 12.3 dB[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25763-25772.
- [10] Vahlbruch H, Mehmet M, Danzmann K, et al. Detection of 15 dB squeezed states of light and their application for the absolute calibration of photoelectric quantum efficiency[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 110801.
- [11] Yuen H P, Chan V W. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. *Optics Letters*, 1983, 8(3): 177-179.
- [12] Breitenbach G, Schiller S, Mlynek J, et al. Measurement of the quantum states of squeezed light[J]. *Nature*, 1997, 387(6632): 471-475.
- [13] Wenger J, Brouri R T, Grangier P, et al. Pulsed homodyne measurements of femtosecond squeezed pulses generated by single-pass parametric deamplification[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(11): 1267-1269.
- [14] Jin X L, Su J, Zheng Y H, et al. Influence of the non-ideal balanced homodyne detection on the measured squeezing degree[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1027001.  
靳晓丽, 苏静, 郑耀辉, 等. 非理想平衡零拍探测系统对实测压缩度的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1027001.
- [15] Jin X L, Su J, Zheng Y H, et al. Balanced homodyne detection with high common mode rejection ratio for squeezed light detection[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2016, 22(2): 108-114.  
靳晓丽, 苏静, 郑耀辉, 等. 用于压缩光探测的高共模抑制比平衡零拍探测器[J]. *量子光学学报*, 2016, 22(2): 108-114.
- [16] Zhou H J, Yang W H, Li Z X, et al. A bootstrapped, low-noise, and high-gain photodetector for shot noise measurement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(1): 013111.
- [17] Zhou H J, Wang W Z, Chen C Y, et al. A low-noise, large-dynamic-range-enhanced amplifier based on JFET buffering input and JFET bootstrap structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2101-2105.
- [18] Wang J J, Jia X J, Peng K C, et al. Improvement of balanced homodyne detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0127001.  
王金晶, 贾晓军, 彭堃堃, 等. 平衡零拍探测器的改进[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0127001.
- [19] Yang W H, Jin X L, Yu X D, et al. Dependence of measured audio-band squeezing level on local oscillator intensity noise[J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 24262-24271.