

## 激光与光电子学进展

面向连续变量量子随机数产生的宽带高平坦度  
平衡零拍探测器邓娟<sup>1,2</sup>, 郭龔强<sup>1,2</sup>, 林鸿<sup>1</sup>, 林杰弘<sup>1</sup>, 郭晓敏<sup>1\*</sup><sup>1</sup>新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原理工大学物理学院, 山西 太原 030024;<sup>2</sup>密码科学技术国家重点实验室, 北京 100878

**摘要** 面向连续变量量子随机数产生的应用场景, 基于级联放大的方式构建宽带高增益平衡零拍探测器, 首次将分布参数电路分析法、优化仿真法引入到平衡零拍探测器的电路设计中, 针对性地改善该特高频电路的传输特性, 并以系统稳定性指标为指导, 寻求电路设计及关键元器件参数的最优解, 完成电路设计。最终制作出带宽高于 1.65 GHz、在 0.2~930 MHz 范围内增益平坦度达到  $\pm 2$  dB 的平衡零拍探测器。该研究为宽带平衡零拍探测器提供了一种新的设计思路, 实验所得探测器的性能有利于更高效地提取连续变量量子态随机熵源, 将有效促进连续变量量子随机数发生器的速率提高和实用化发展。

**关键词** 量子光学; 量子随机数发生器; 平衡零拍探测器; 高带宽及高平坦度; 分布参数电路分析法

中图分类号 O431.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231233

Broadband and High-Flatness Balanced Homodyne Detector for  
Continuous-Variable Quantum Random Number GenerationDeng Juan<sup>1,2</sup>, Guo Yangqiang<sup>1,2</sup>, Lin Hong<sup>1</sup>, Lin Jiehong<sup>1</sup>, Guo Xiaomin<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, College of Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;<sup>2</sup>State Key Laboratory of Cryptology, Beijing 100878, China

**Abstract** This study presents a high-gain broadband balanced homodyne detector, utilizing cascade amplification to generate continuous-variable quantum random numbers. The innovative approach of distributed parameter circuit analysis and optimization simulation is introduced into the circuit design of the broadband balanced homodyne detector. The objective is to enhance the transmission attributes of the ultra-high-frequency circuit. This is realized by optimally combining different elements and selecting key electronic components, guided by system stability indicators. Hence, a balanced homodyne detector was developed with a bandwidth surpassing 1.65 GHz and gain flatness of  $\pm 2$  dB within the 0.2–930 MHz range. This study proposes a novel design perspective for broadband balanced homodyne detectors. The enhanced features of the detectors facilitate a more efficient derivation of continuous-variable quantum state random entropy sources, thereby propelling the rate enhancement and practical advancement of continuous-variable quantum random number generators.

**Key words** quantum optics; quantum random number generator; balanced homodyne detector; high bandwidth and flatness; distributed parameter circuit analysis

## 1 引言

平衡零拍探测器是量子光学测量和量子信息处理的重要工具<sup>[1-2]</sup>, 常应用于光学相干层析成像<sup>[3]</sup>、相干激

光雷达<sup>[4]</sup>、光子量子传感<sup>[5-6]</sup>、连续变量量子密钥分发<sup>[7-8]</sup>、量子计算<sup>[9-10]</sup>、量子随机数发生器<sup>[11-13]</sup>等。针对不同应用场景, 国内外众多研究机构开展了相应研究<sup>[14-16]</sup>。平衡零拍探测技术最早由 Yuen 和 Chan<sup>[17]</sup>于

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-06-01; 录用日期: 2023-06-20; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(62075154, 62175176)、山西省重点研发计划(国际科技合作 201903D421049)

通信作者: \*guoxiaomin@tyut.edu.cn

1983年提出,主要用于探测电磁场的压缩态。2001年,康斯坦茨大学 Hansen 等<sup>[18]</sup>研制了用于时域脉冲光子态测量的平衡零拍探测系统,该探测系统在 1 MHz 的脉冲重复率下实现了 1 MHz 的探测带宽。2011年,加拿大多伦多大学 Chi 等<sup>[19]</sup>用于高斯调制相干态量子密钥分发所研制的平衡零拍探测器带宽达到 104 MHz,共模抑制比达到 46 dB。2013年,上海交通大学 Huang 等<sup>[20]</sup>研制了一种高速平衡零拍探测器,该探测器带宽为 300 MHz,信噪比高于 14 dB,共模抑制比为 54 dB。2016年,山西大学刘建强等<sup>[21]</sup>研制了一种双臂可精确自动平衡的时域脉冲平衡零拍探测器,平衡精度达  $10^{-5}$  以上。2018年,北京邮电大学 Zhang 等<sup>[22]</sup>研制了一种用于连续变量量子密钥分发的平衡零拍探测系统,实现了 1.2 GHz 的高带宽、18 dB 的信噪比、57.9 dB 的共模抑制比。2023年,中国科学院国家授时中心王少锋等<sup>[23]</sup>基于 R-C 耦合跨阻设计了 1 kHz~200 MHz 平衡零拍探测器,其共模抑制比高达 70 dB,信噪比可达 20 dB。先前的平衡零拍探测系统的研究重点大多针对量子态的高精度测量和表征,主要包括量子特性产生的带宽范围内的信噪比和共模抑制比的提高。

本文研究了适用于连续变量量子随机数产生的平衡零拍探测器。量子随机数基于量子本质的测不准原理提供真正的随机性<sup>[24]</sup>,连续变量量子随机数发生器基于平衡零拍探测系统对量子态分量起伏的测量提取真随机数<sup>[25]</sup>。平衡零拍探测系统的高带宽、鲁棒性、可集成化和对现有通信系统兼容性使得连续变量量子随机数发生器尤其实用化前景。对于连续变量量子随机

数发生器,其产生速率上限决定于量子最小熵和采样率的乘积,提高最小熵的研究方案有增强本底光<sup>[26]</sup>、以反压缩分量为熵源<sup>[27]</sup>、优化采样范围<sup>[28-29]</sup>等,然而这些方案效果有限。本课题组在增强本底光提高量子/经典噪声比方案的基础上提出了提取平衡零拍探测带宽内多量子频模的并行量子随机数产生方案<sup>[30-32]</sup>,显著突破了以往串行方案的速率瓶颈,但是随着随机数并行与硬件后处理能力的提升,随机数产生速率的限制因素再次回到了其根本——熵源带宽。想要基于平衡零拍探测更高效地提取量子熵源,就要求平衡零拍探测器带宽进一步提升,并且带宽内的信噪比能够更加平滑和恒定<sup>[31]</sup>,本文就此展开研究。

本文采用低噪声、高增益、高带宽的射频(RF)放大器以级联的方式来提高探测系统的增益以及信噪比。为了研制高带宽、高稳定性的平衡零拍探测器,首次将分布参数电路分析法、优化仿真法引入到电路设计中来针对性地改善该特高频电路的传输特性,并以系统稳定性指标为指导,寻求电路设计及关键元器件参数的最优解,完成电路设计,最终制作出了带宽高于 1.65 GHz、在 0.2~930 MHz 范围内增益平坦度达到  $\pm 2$  dB 的平衡零拍探测器。

## 2 级联射频放大平衡零拍探测器电路初步设计及分析

### 2.1 探测器基本结构

初步构建的平衡零拍探测电路基本结构如图 1 所示,主要包括以下四部分:光电流差值信号产生部分、L-C 交直流分离部分、交流放大部分和直流放大部分。

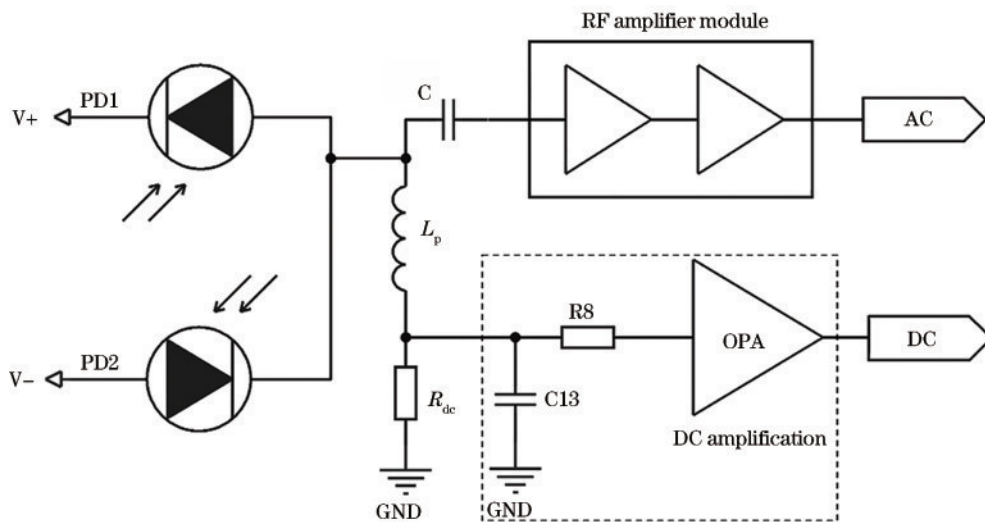


图 1 级联射频放大平衡零拍探测器电路基本结构

Fig. 1 Basic structure of cascaded RF amplification balanced homodyne detector circuit

图 1 中, PD1、PD2 是串联连接的两个光电二极管,串节点处的光电流信号经 L-C 耦合结构分成直流信号和交流信号两部分,其中交流分量源于量子态正交分量的起伏,尽管极其微弱的量子起伏在进入探

测系统之前已经由本底光进行了放大,但其仍可能被频谱仪及电路电子噪声所湮没,故选取低噪声、高增益的 ERA-3+ 型号射频放大器采用级联放大结构来实现高增益的交流放大。直流分量用于检测入射光的强

度,采用运算放大器(OPA: OP27)同向放大结构设计直流放大电路。

## 2.2 光电二极管的等效电路模型及分析

图 2 是光电二极管的等效电路模型图,借此分析光电二极管的信噪比。

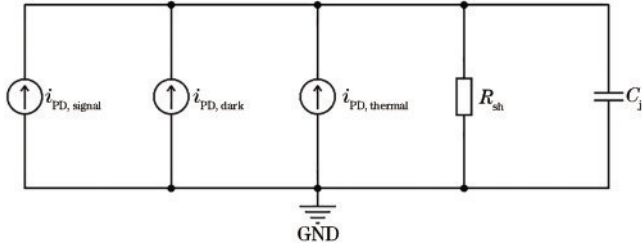


图 2 光电二极管的等效电路模型

Fig. 2 Circuit equivalent model of photodiodes

图中,  $i_{PD,signal}$  为光电二极管的感应光电流,  $i_{PD,dark}$  为光电二极管的暗电流噪声,  $i_{PD,thermal}$  为光电二极管的热噪声,  $C_j$  为光电二极管的结电容,  $R_{sh}$  为光电二极管的分流电阻。光电二极管的噪声主要包括暗电流噪声和热噪声。光电二极管热噪声的计算公式为

$$\Delta i_{PD,thermal} = \sqrt{4kT/R_{sh}}, \quad (1)$$

式中:  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  是玻尔兹曼常数;  $T(\text{K}) = 273.15 + t(\text{°C})$  为工作的绝对温度;  $R_{sh}$  为光电二极管的分流电阻。光电二极管暗电流噪声的计算公式为

$$\Delta i_{PD,dark} = \sqrt{2e i_{PD,dark}}, \quad (2)$$

式中: 基本电荷  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。单个光电二极管的噪声谱密度为

$$\Delta i_{PD,elec} = \sqrt{(\Delta i_{PD,thermal})^2 + (\Delta i_{PD,dark})^2}. \quad (3)$$

单个光电二极管对光的响应电流谱密度为

$$\Delta i_{PD,signal} = \sqrt{2e i_{PD,signal}}, \quad (4)$$

式中:  $i_{PD,signal} = P \cdot S_\lambda$  为光电二极管对入射光的感应电流;  $P$  为入射光的功率;  $S_\lambda$  为光电二极管对波长为  $\lambda$  的入射光的响应度。一对型号相同的光电二极管在串联的情况下,总噪声谱密度  $\Delta i_{PD,elec,total} = 2\Delta i_{PD,elec}$ , 总的光电响应电流谱密度  $\Delta i_{PD,signal,total} = 2\Delta i_{PD,signal}$ , 由此,得到串联光电二极管的输出信噪比为

$$R_{SN,PD,OUT} = 10 \lg \left[ \frac{(\Delta i_{PD,signal,total})^2}{(\Delta i_{PD,elec,total})^2} \right] = 10 \lg \left( \frac{2e \sqrt{2e \cdot P \cdot S_\lambda}}{4kT/R_{sh} + 2e i_{PD,dark}} \right). \quad (5)$$

光电二极管对平衡零拍探测器的性能起着重要的作用,选用灵敏度高、结电容小、内阻大、暗电流小的 PD 可有效降低平衡零拍探测器的电子噪声<sup>[33-34]</sup>。LSIPD-LD50 具有低暗电流 (5 pA)、结电容 (0.8 pF), 以及较高的响应带宽 (3 GHz)、量子效率 (72.12%) 和响应度 (0.9 A/W), 故选择一对 LSIPD-LD50 型号的光电二极管来产生光电流差值信号。

## 2.3 交流放大电路的等效模型及分析

图 3 是平衡零拍探测器中交流放大电路的等效模型示意图。左边的虚线框内是光电二极管 PD1 与 PD2 串联自减后所构成的等效电路,其中,  $i_{PD,signal,total}$  为串联光电二极管总的散粒噪声,  $i_{PD,elec,total}$  为串联光电二极管总的电子学噪声。右边的虚线框内是由串联光电二极管的结电容  $C_{j,total}$ 、隔交电感  $L_p$  及取样电阻  $R_{dc}$  组成的 LC 谐振电路。AC OUT 是放大后的交流信号的输出端。对于 LC 谐振电路,其阻抗为

$$Z_{LC}(\omega) = \frac{R_{dc}^2 + (\omega L_p)^2}{R_{dc} + j\omega \left[ R_{dc}^2 C_{j,total} + (\omega L_p)^2 C_{j,total} - L_p \right]}. \quad (6)$$

LC 谐振电路的谐振频率  $\omega_r$  为

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{C_{j,total} \cdot L_p} - \frac{R_{dc}^2}{L_p^2}}. \quad (7)$$

由于平衡零拍探测系统的探测带宽为谐振电路中谐振频率  $\omega_r$  附近的一阶带通响应<sup>[35]</sup>, 所以探测带宽的计算公式为

$$f_B = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{2(R_r - R_{dc}) \cdot C_{j,total}}, \quad (8)$$

式中:  $R_{dc}$  为电感  $L_p$  的串联电阻;  $R_r$  为 LC 谐振回路的峰值阻抗为  $R_r = L_p / (R_{dc} \cdot C_{j,total})$ 。目前待确定的参数有分流电感  $L_p$ 、取样电阻  $R_{dc}$ , 在第 3 节将介绍通过优化仿真的方式来确定这些参数。

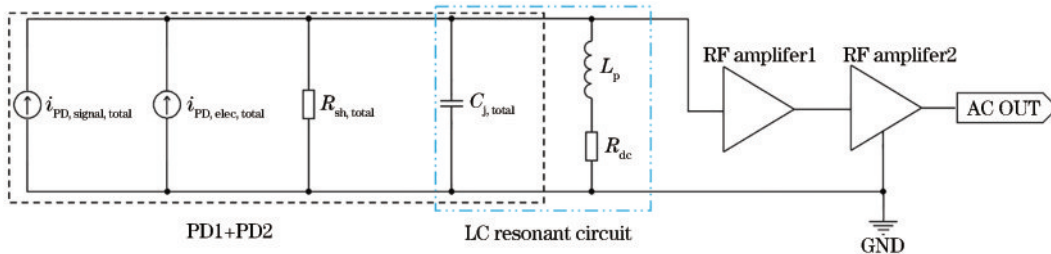


图 3 BHD 交流放大电路的等效模型

Fig. 3 Equivalent model of BHD AC amplification circuit

## 2.4 平衡零拍探测器的信噪比分析

在探测器中信噪比为量子散粒噪声与电子学噪声的比值,其计算公式为

$$R_{SN} = 10\lg\left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{elec}}}\right), \quad (9)$$

式中: $P_{\text{elec}}$ 为平衡零拍探测器输出电子噪声的功率; $P_{\text{signal}}$ 为平衡零拍探测器交流输出信号的功率。首先通过光电二极管的等效电路模型对所研制的平衡零拍探测器的信噪比进行预测,然后利用级联的射频放大器的噪声系数( $N_F$ )来计算探测器的信噪比,噪声系数的计算公式为

$$N_F(\text{dB}) = 10\lg\left(\frac{R_{SN,BHD,IN}}{R_{SN,BHD,OUT}}\right) = 10\lg\left(\frac{R_{SN,PD,OUT}}{R_{SN,BHD,OUT}}\right), \quad (10)$$

式中: $R_{SN,BHD,IN}$ 为探测器的输入端的信噪比; $R_{SN,BHD,OUT}$ 为探测器输出端的信噪比。为了便于计算,将平衡零拍探测器的输入端的信噪比作为光电二极管输出端的信噪比,即 $R_{SN,PD,OUT} = R_{SN,BHD,IN}$ 。本文所设计的平衡零拍探测器的交流放大部分采用两级射频放大器级联的方式,则总的噪声系数为

$$N_{F,\text{total}}(\text{dB}) = N_{F1} + \frac{N_{F2} - 1}{G_1}, \quad (11)$$

式中: $N_{F1}$ 为第一级放大器的噪声系数; $N_{F2}$ 为第二级放大器的噪声系数; $G_1$ 为第一级放大器的增益。由于两级放大都是用的同一款芯片,根据ERA-3+射频放大器产品说明书可知 $N_{F1} = N_{F2} = 2.7 \text{ dB}$ , $G_1 = G_2 = 21 \text{ dB}$ ,故射频放大器级联的总噪声系数为 $N_{F,\text{total}} = 2.78 \text{ dB}$ 。设入射光功率为 $0.1 \text{ mW}$ ,由式(5)可知,光电二极管的输出信噪比 $R_{SN,PD,OUT}$ 约为 $72.13 \text{ dB}$ ,再由式(10)最终得到平衡零拍探测器的信噪比约为 $38.03 \text{ dB}$ 。

由于交流放大电路中部分关键器件的选型难以在理论模型的基础上进行确定,故将建立交流放大电路的仿真链路,通过优化仿真模拟分析,来完成探测电路的具体设计。

## 3 基于优化仿真完成交流放大电路部分的设计

采用ADS(Advanced Design System)仿真软件对平衡零拍探测器的交流放大电路进行优化仿真,以提高电路的传输质量为指导来完成电路的具体设计和关键器件选型。由于GHz量级以上的探测带宽属于特高频范畴,故将分布参数电路分析法引入到宽带平衡零拍探测器的设计中,以高频电路传输特性为指导对宽带平衡零拍探测器设计中具体电路结构和原件选型加以确定。具体采用分布电路分析法中的网络模型分析法,该方法被称为“黑盒”设计法,其基于简化网络的输入输出特性,避开电路的复杂性和非线性,大量减少有源和无源器件的数目,成为射频、微波电路设计和

仿真中的首选。

### 3.1 网络模型分析法关键参数分析

网络模型分析法中S(Scatter)参数是表征微波网络传输特性的一个非常重要的参数,其描述了整个网络模型的频域特性。在一个二端口网络中,S参数用于描述输入和输出端口之间的能量传递情况。S参数由 $S_{11}$ 、 $S_{12}$ 、 $S_{21}$ 、 $S_{22}$ 所组成,其中, $S_{11}$ 是输入回波损耗,即输入端口反射的能量, $S_{12}$ 是 $S_{21}$ 相反方向上传递的能量, $S_{22}$ 是从输出端反射的能量, $S_{21}$ 是输入端口到输出端口所传递的能量。在S参数仿真中, $S_{11}$ 、 $S_{22}$ 的值需小于 $-10 \text{ dB}$ ,且越小越好,以减少端口反射损耗,保证网络的稳定性和信号的完整性。同时, $S_{12}$ 的值需小于 $-20 \text{ dB}$ ,且越小越好,以减少反向传输干扰,提高正向传输质量。

在高频电路中,所有元件都会表现出不同程度的容性和感性,这将会影响电路的稳定性。在周期性的电压作用下,高频电路中的容性元件会产生周期性的交变电流,导致感性元件产生额外的感应电动势,并反过来作用于容性元件,从而引起电路振荡。因此,在设计高频电路的时候,必须对其稳定性进行仿真分析。斯特恩稳定因子常用于表征放大电路的稳定性<sup>[36]</sup>,其定义为

$$\begin{cases} K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{21}| |S_{12}|}, \Delta = S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21} \\ M_{\text{mu}}(R) = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{12} \cdot S_{21}| + |S_{22} - \Delta \cdot S_{11}^*|} \\ M_{\text{mu}}(S) = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{12} \cdot S_{21}| + |S_{22} - \Delta \cdot S_{22}^*|} \end{cases}, \quad (12)$$

式中:稳定性系数因子 $K$ 用来度量射频放大器的稳定性;负载稳定系数因子 $M_{\text{mu}}(R)$ 与源稳定性系数因子 $M_{\text{mu}}(S)$ 均用来度量电路的稳定性。当 $K$ 、 $M_{\text{mu}}(R)$ 与 $M_{\text{mu}}(S)$ 均大于1时,电路是无条件稳定的,否则电路会存在不稳定和振荡的可能。

敏感度分析指的是电路器件参数每改变1%对应的良率百分比变化值。敏感度分析可以识别出对电路性能影响最大的器件参数,以便进行针对性的优化设计。同时,敏感度分析还可以用于验证电路器件是否符合设计要求。优化仿真是一种通过改变电路元件参数以达到预设目标的方法,本文使用OPTIM控件,通过设置需优先优化的参数目标,以此为指导来寻求电路设计的最优解,达到提高电路性能的效果。

### 3.2 基于高频传输特性下的稳定性仿真及敏感度分析

将初步设计的平衡零拍探测系统中交流放大电路视为一个二端口网络,并建立如图4所示的仿真链路。在仿真链路中,各元器件的参数值是根据射频放大器

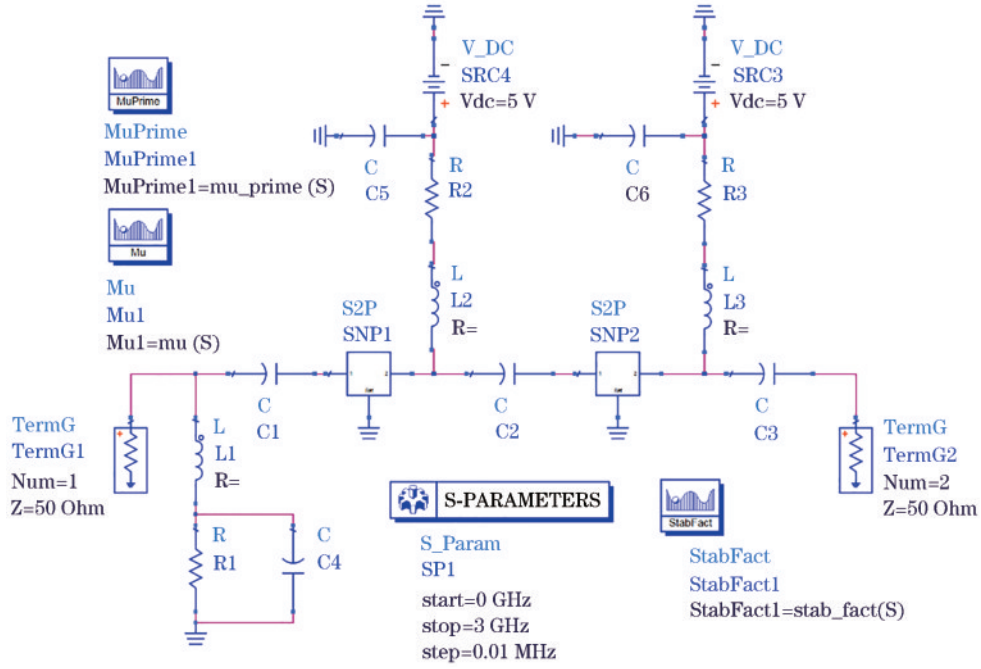


图 4 交流放大电路的二端口等效模型以及仿真链路图

Fig. 4 Two-port equivalent model and simulation link diagram of AC amplification circuit

说明书以及相关参考文献[37-38]暂定,在此基础上对该链路进行仿真优化。

图 4 中:SNP1、SNP2 为交流信号放大电路中射频放大器 ERA-3+ 的 SP 模型,该模型包含了放大器各个频率的 S 参数;Term1 为 50 Ω 的源阻抗,代表光电流差值信号输入的端口;Term2 为 50 Ω 的负载阻抗,代表探测器交流输出的端口。

对交流放大电路的 S 参数进行仿真的过程中主要

用到了 S-PARAMETERS 仿真控件。由于稳定性仿真要求仿真带宽要大于仿真链路实际带宽的两倍,故在 S 参数仿真控件中设定仿真带宽为 3 GHz。S 参数仿真结果如图 5 所示,结果显示,  $S_{11}$  在 0~793 MHz、 $S_{22}$  在 0~211 MHz 的频率范围内是大于 -10 dB 的,不符合 S 参数仿真的要求,故  $S_{11}$ 、 $S_{22}$  还需进一步优化,否则交流放大电路的输入与输出信号在传输过程中损耗较大,导致平衡零拍探测器的信噪比较低。

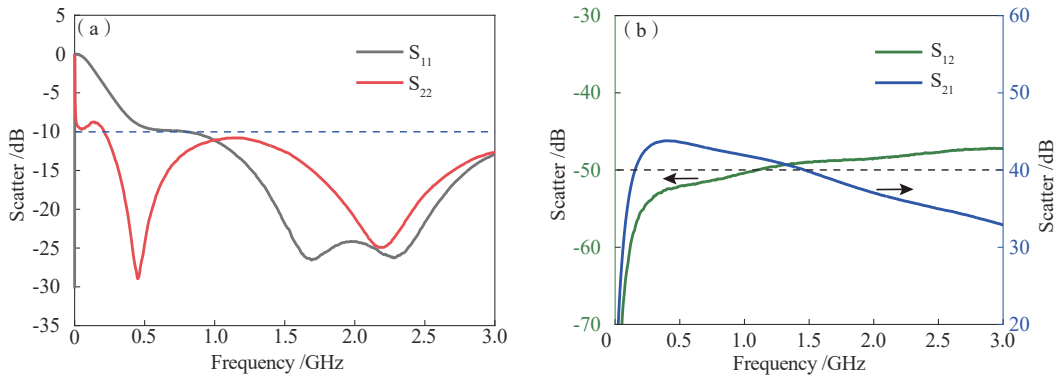


图 5 交流放大电路的 S 参数仿真结果

Fig. 5 S parameters simulation results of the AC amplification circuit

在交流放大电路的稳定性仿真过程中主要用到 StabFact、Mu1 和 MuPrime1 仿真控件,仿真结果如图 6 所示。可以看出,稳定因子系数  $K$ 、 $M_{mu}(R)$ 、 $M_{mu}(S)$  在 0~3 GHz 频率范围均大于 1,稳定系数因子符合设计要求,链路也处于绝对稳定。

在优化仿真之前,先进行敏感度分析,来确定需要进行优化的元件。首先根据 S 参数的仿真要求,在

GOAL 目标控件中设定仿真需要达到的目标,同时将仿真链路中的耦合电容 C1-C3、滤波电容 C4-C6、隔交电感 L1-L3、电阻 R1-R3 设置为变量,利用 Sensitivity 控件进行敏感度仿真分析,仿真结果如图 7 所示。图中,Sens variables 表示不同的元件,Impact depth 代表了元件的参数变化(主要是元件的数值与误差精度)对 S 参数的影响程度,impact  $S_{11}$  代表了对  $S_{11}$  的影响,

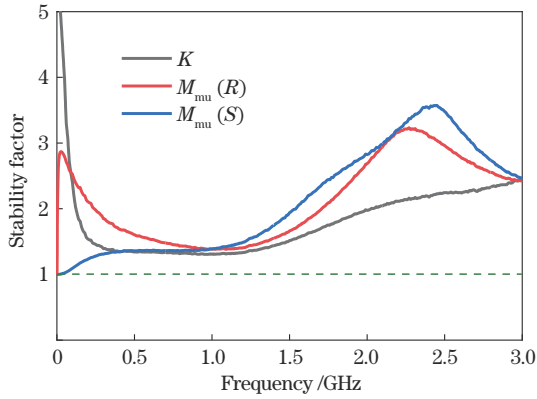


图 6 交流放大电路的稳定性仿真结果

Fig. 6 Stability simulation result of the AC amplification circuit

impact  $S_{12}$  代表了对  $S_{12}$  的影响, impact  $S_{21}$  代表了对  $S_{21}$  的影响, impact  $S_{22}$  代表了对  $S_{22}$  的影响, 并且纵轴数值的绝对值越大表示该元件的参数变化对  $S$  参数的影响也就越大。结果表明, 电容  $C3$ 、 $C4$ , 电感  $L1$ 、 $L3$ , 以及电阻  $R1$  对  $S$  参数的影响相对较大, 其影响程度分别对应图中用短箭头所指向的数值。

电容  $C4$  的设计目的仅仅是在直流放大部分仅起到滤波和抗干扰的作用, 但是经过敏感度分析发现其对  $S_{11}$ 、 $S_{21}$  也产生了较大的影响。在仿真链路中  $L1$ 、 $R1$  的参数值的变化分别对  $S_{21}$ 、 $S_{11}$  影响程度为 3.08 和 4.65, 高于其他元器件对  $S$  参数的影响。综合考虑, 将电容  $C4$  放置在靠近运算放大器 OP27 的输入端, 这较以往的直流放大部分的电路设计有很大的不同, 本文着重考虑了电容  $C4$  的摆放位置, 以降低直流放大部分对交流放大部分的影响, 提高交流放大的增益与信号传输质量, 从而提高平衡零拍探测器的信噪比。

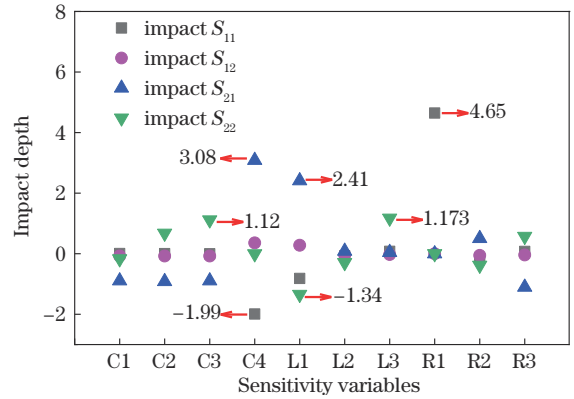


图 7 交流放大电路的敏感度分析结果

Fig. 7 Sensitivity analysis results of AC amplification circuit

同时分别对电阻  $R1$ 、 $R3$  的阻值与误差精度, 电感  $L1$ 、 $L3$  感值与误差精度, 电容  $C3$  的容值与误差精度进行优化。

### 3.3 基于敏感元器件参数优化仿真并完成电路设计

在优化仿真中, 为了使仿真结果与实际电路更加接近, 我们使用高精度仿真模型 (非理想仿真模型)——Murata 电感和电容仿真模型来替换链路中的理想电容电感器件仿真模型, 并将电容  $C3$ 、电感  $L1$ 、 $L3$ 、电阻  $R1$  设置为变量, 并根据  $S$  参数的仿真要求来设置 Goal 仿真目标控件中的优化目标, 设定  $S_{11}$ 、 $S_{22}$  在  $0\sim 3$  GHz 频率范围小于  $-10$  dB,  $S_{12}$  在  $0\sim 3$  GHz 频率范围小于  $-20$  dB。  $S_{21}$  是交流放大部分的增益, 为 42 dB, 由于射频放大器 ERA-3+ 的增益随着频率的增加而逐步下降, 为了提高增益以及增益平坦度, 故设定  $S_{21}$  在 1.2 GHz 频率范围内大于 40 dB。同时, 在 OPTIM 优化仿真控件中将仿真次数设置为 10000 次, 进行优化仿真, 仿真结果如图 8 所示。

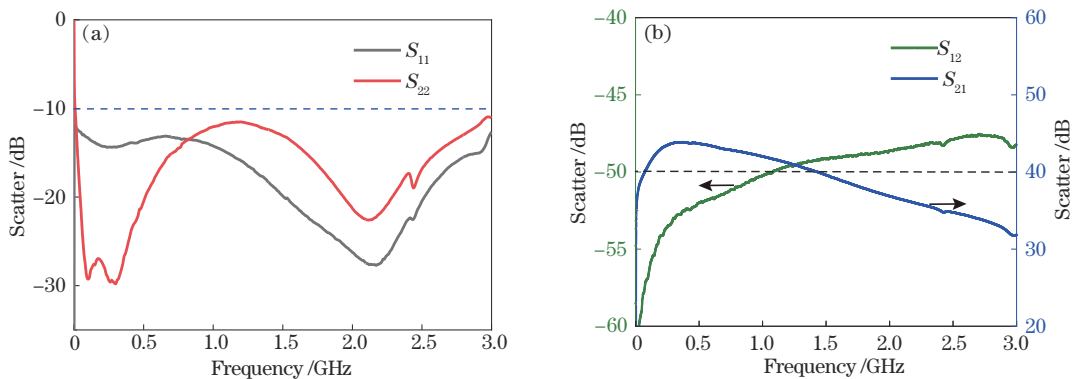


图 8 交流放大电路的优化仿真结果

Fig. 8 Optimized simulation results of AC amplification circuit

由图 8 所示的仿真结果可知,  $S$  参数均满足要求, 与此同时也确定电路实际使用的 Murata 电感  $L1$  为 47 nH、电感  $L3$  为 820 nH、电容  $C3$  为 8200 pf、电阻  $R1$  为 159  $\Omega$ , 其中电感的误差精度为  $\pm 1\%$ , 电容和电阻的误差精度为  $\pm 5\%$ 。此时, 将  $L_1 = L_p = 47$  nH,  $R_1 =$

$R_{dc} = 159 \Omega$  代入式 (8) 后计算出的带宽约为 1.9 GHz, 符合我们的研究目标。最后根据仿真优化的结果在第二节的平衡零拍探测器的电路结构上进行调整, 最终完成的平衡零拍探测器的电路设计原理图如图 9 所示。

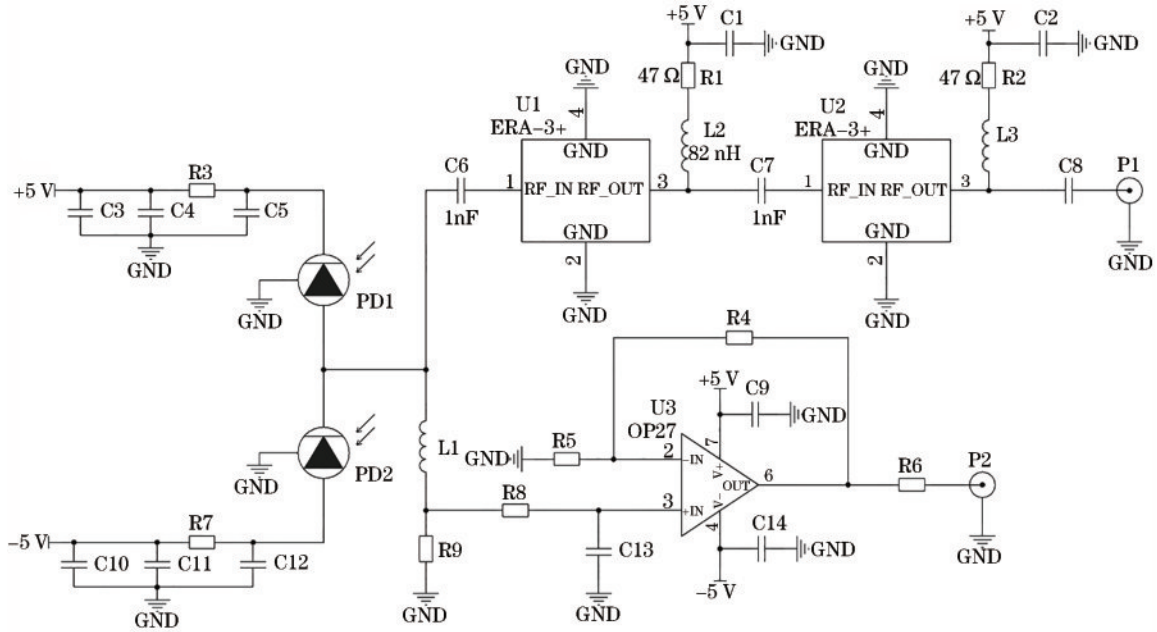


图 9 平衡零拍探测器的原理图

Fig. 9 Schematic diagram of balanced homodyne detector

#### 4 平衡零拍探测器的实物制作与性能测试

根据平衡零拍探测器的原理图,采用 AD(Altium Designer)软件进行 PCB 版图设计,在设计中采用了四层板来保证电源地平面的完整性,提供极低的电源阻抗和分布的去耦电容。同时,为了保证高频信号的稳定性和连续性,还考虑了高频信号线的完整参考地和 50 Ω 阻抗匹配。根据 50 Ω 特性阻抗的要求,确定高频

信号线的线宽、铺地间距以及调整线路结构,完成平衡零拍探测器的 PCB 版图设计,并在此基础上,进行电路制作和性能测试。

平衡零拍探测器的性能测试装置如图 10 所示。该实验装置包括使用输出波长为 1550 nm 的激光器 (ROI: LP1550Y) 提供本底振荡光,以及频谱分析仪 (Agilent: E4407B) 和示波器 (LeCroy: DDA-3000) 等设备对探测器的交流输出进行测量和分析。

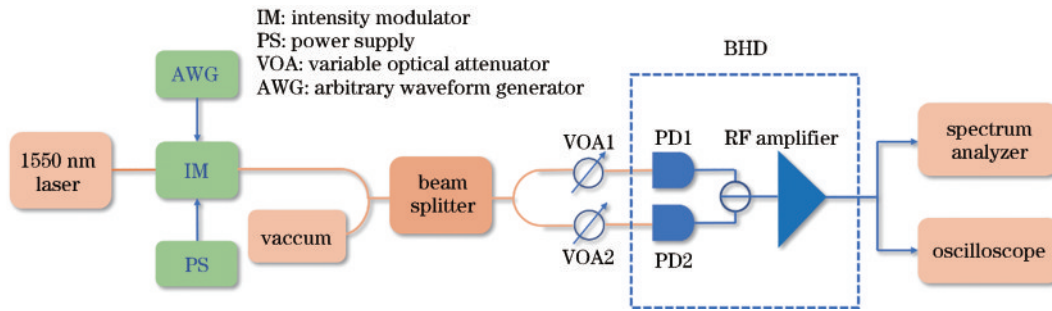


图 10 平衡零拍探测器的性能测试装置图

Fig. 10 Performance test device diagram of balanced homodyne detector

通过控制激光器,本底激光总强度逐步提高,对应测得输出信号频谱如图 11(a)所示。在低频区域 0~500 MHz,由于 1/f 噪声和仪器噪声的叠加非常强,以致于这一阶段探测器的基底噪声较高,信噪比仅有 13 dB,而在 0.2~930 MHz 频率范围内,信号的增益平坦度为 ±2 dB,随着频率增加到 1.2 GHz,信噪比达到最高 32 dB,当频率超过 1.2 GHz 时,信号谱幅度有所下降,直到 1.65 GHz 探测器的信噪比降到 10 dB 以下,故平衡零拍探测器的可用带宽约为

1.65 GHz。图 11(b)分析了频率 200 MHz、400 MHz、600 MHz、800 MHz、900 MHz、930 MHz 处的量子噪声功率与入射光功率的关系,由图可知,量子噪声功率整体上随着入射光功率的增大而线性增大,这表明平衡零拍探测器在 0.2~930 MHz 处有良好的交流响应特性。

测试共模抑制比时,通过任意波形发生器 (Hantek: HDG2102B) 给强度调制器输入频率为 100 MHz、幅度为 110 mV 的正弦信号,调节激光器的

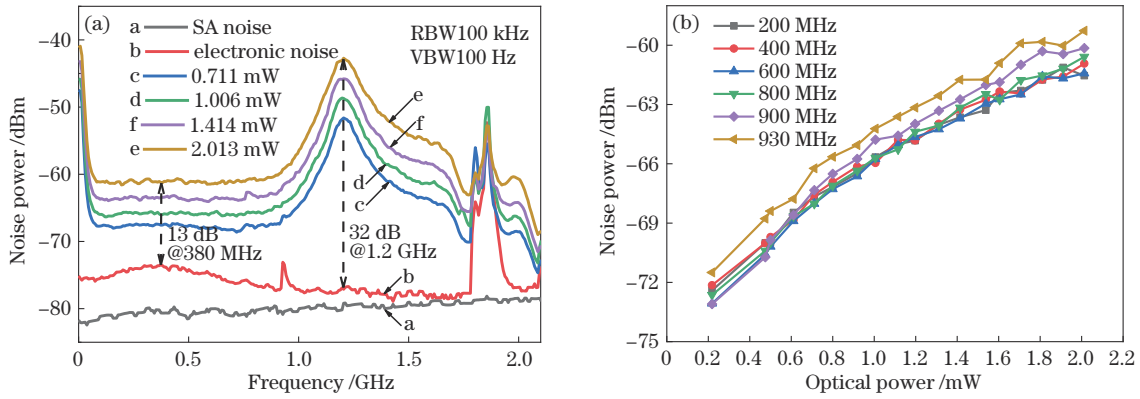


图 11 平衡零拍探测器的测试结果。(a) 探测带宽和信噪比; (b) 噪声功率随入射光功率的变化

Fig. 11 Performance test results of balanced homodyne detector. (a) Detection bandwidth and signal-to-noise ratio; (b) variation curve of noise power with incident light power

输出功率和光纤衰减器,使探测器中的两个光电二极管接收到的光强均为 0.1 mW,记录光电二极管单端接光与双端接光时输出信号频谱。将两次测得的信号频谱进行比对得到平衡零拍探测器的共模抑制比,如图 12 所示。由图可知,PD1(0.1 mW)为 PD1 单独通 0.1 mW 光时,在分析频率 100 MHz 处输出的功率谱,其峰值为 -55 dBm,PD1&PD2(0.1 mW)为同时给光电二极管 PD1、PD2 通 0.1 mW 光时,在分析频率 100 MHz 处输出的功率谱,其峰值为 -70 dBm,将这两处功率谱的峰值相减得到共模抑制比为 15 dB。

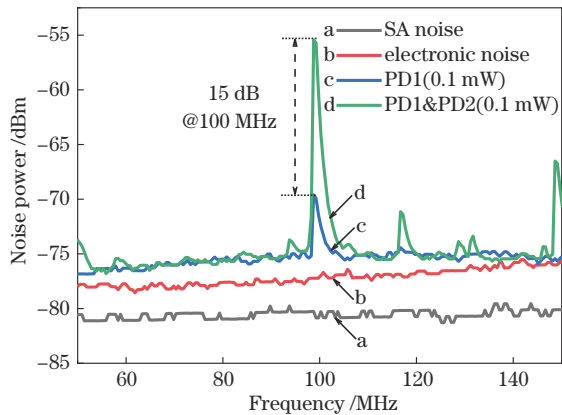


图 12 共模抑制比测试结果

Fig. 12 Common mode rejection ratio test results

平衡零拍探测系统的性能测量结果显示,可用探测带宽能达到为 1.65 GHz,信噪比大于 13 dB,共模抑制比约为 15 dB。这较其他平衡零拍探测器在带宽上有了很大的提升,并且在 0.2~930 MHz 的带宽范围内有相对稳定的信噪比,故该平衡零拍探测系统能够稳定、可靠地用于连续变量量子随机数发生器。由于在实际的电路板中不可避免地存在寄生电容,实验测得的探测带宽与理论值 1.9 GHz 有一定的差距。

## 5 结 论

本文从连续变量量子随机数发生器的应用需求出发,研究高探测带宽、带宽内信噪比平滑稳定的平衡零拍探测器。首先,交流放大部分采用了低噪声、高增益、高带宽的射频放大器以级联的方式来提高探测系统的增益以及信噪比。其次,根据射频放大器总的噪声系数来模拟预测了我们所研制探测器的信噪比,并通过构建交流放大电路的等效模型分析了探测电路的带宽。然后,利用 ADS 仿真软件构建了平衡零拍探测系统中交流放大电路的仿真链路,进行了 S 参数、稳定性、敏感度分析以及优化仿真,以系统稳定性指标为指导,寻求电路设计及关键元器件参数的最优解,改进了电路设计方案。最后,制作平衡零拍探测器的实际电路并搭建实验平台对其性能进行了测试。研究结果显示,该探测系统的探测带宽可达 1.65 GHz,最低信噪比可达 13 dB,在 0.2~930 MHz 内有线性放大的增益且增益平坦度达到  $\pm 2$  dB,该特性可支持连续变量量子熵源高带宽、多频模的并行高效提取,有效提高连续变量量子随机数发生器的产生速率。该项工作为宽带平衡零拍探测器提供了一种新的研究思路,为改善包含特高频电路的探测系统的稳定性提供了有效途径。

注意到目前实验所得探测器带宽范围内的信噪比与理论值 36.47 dB 有一定的差距,并且共模抑制比也并不是很高,为此,本文使用高频结构仿真器(HFSS)对平衡零拍探测系统的 PCB 版图通过设置集总端口的方式进行了电磁仿真,并结合第三节中平衡零拍探测系统交流放大电路的仿真链路进行协同仿真,得到交流放大电路中的两个光电二极管 PD1、PD2 的接入端口反射系数和稳定性如图 13 所示。

从图 13(a)协同仿真的稳定性仿真结果可知,平衡零拍探测系统的交流放大电路处于无条件稳定,但是由图 13(b)光电二极管 PD1、PD2 的接入端口反射系数仿真结果发现,PD1( $S_{11}$ )在 656~1023 MHz 和



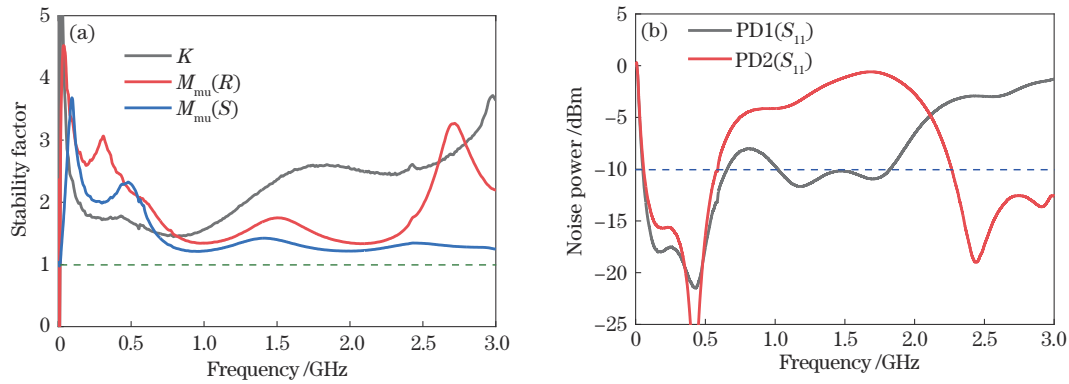


图 13 交流放大电路的协同仿真结果图。(a) 稳定性仿真结果;(b) 端口反射系数仿真结果

Fig. 13 Collaborative simulation result diagram of AC amplification circuit. (a) Stability simulation results; (b) reflection coefficient of the access port of photodiodes PD1 and PD2

1. 82~3 GHz 频率范围内高于  $-10$  dB, PD2( $S_{11}$ ) 在 588~2265 MHz 内也是高于  $-10$  dB, 由此可推断探测器的 PCB 版图设计存在一定问题, 导致两个光电二极管 PD1、PD2 的接入端口反射率较大, 不仅信号传输受损, 两个光电二极管 PD1、PD2 的接入端口的对称性也较差, 从而导致信噪比以及共模抑制比较低, 这表明 PCB 版图设计存在进一步优化空间。

### 参 考 文 献

- [1] Lvovsky A I, Raymer M G. Continuous-variable optical quantum-state tomography[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(1): 299-332.
- [2] Leonhardt U, Paul H. Measuring the quantum state of light[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1995, 19(2): 89-130.
- [3] Fercher A F, Drexler W, Hitzinger C K, et al. Optical coherence tomography-principles and applications [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2003, 66(2): 239-303.
- [4] Wang R, Chen L, Zhao Y M, et al. A high signal-to-noise ratio balanced detector system for 2  $\mu$ m coherent wind lidar[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(7): 073101.
- [5] Lawrie B J, Lett P D, Marino A M, et al. Quantum sensing with squeezed light[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(6): 1307-1318.
- [6] Pirandola S, Bardhan B R, Gehring T, et al. Advances in photonic quantum sensing[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(12): 724-733.
- [7] Grosshans F, Van Assche G, Wenger J, et al. Quantum key distribution using Gaussian-modulated coherent states [J]. *Nature*, 2003, 421(6920): 238-241.
- [8] Qin H, Kumar R, Makarov V, et al. Homodyne-detector-blinding attack in continuous-variable quantum key distribution[J]. *Physical Review A*, 2018, 98(1): 012312.
- [9] Larsen M V, Guo, X S, Breum C R, et al. Deterministic generation of a two dimensional cluster state[J]. *Science*, 2019, 366(6463): 369-372.
- [10] Bourassa J E, Alexander R N, Vasmer M, et al. Blueprint for a scalable photonic fault-tolerant quantum computer[J]. *Quantum*, 2021, 5: 392-424.
- [11] Drahi D, Walk N, Hoban M J, et al. Certified quantum random numbers from untrusted light[J]. *Physical Review X*, 2020, 10(4): 041048.
- [12] Xu B J, Chen Z Y, Li Z Y, et al. High speed continuous variable source-independent quantum random number generation[J]. *Quantum Science and Technology*, 2019, 4(2): 025013.
- [13] Gehring T, Lupo C, Kordts A, et al. Homodyne-based quantum random number generator at 2.9 Gbps secure against quantum side-information[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 605-615.
- [14] Du S N, Li Z Y, Liu W Y, et al. High-speed time-domain balanced homodyne detector for nanosecond optical field applications[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(2): 481-486.
- [15] 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.  
Pan G X, Liu H, Zhai Z H, et al. Analysis of the noise spectra in balanced homodyne detector[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2021, 27(2): 109-116.
- [16] Liu J Q, Cao Y X, Wang P, et al. Impact of homodyne receiver bandwidth and signal modulation patterns on the continuous-variable quantum key distribution[J]. *Optics Express*, 2022, 30(15): 27912-27925.
- [17] Yuen H P, Chan V W S. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. *Optics Letters*, 1983, 8(3): 177-179.
- [18] Hansen H, Aichele T, Hettich C, et al. Ultrasensitive pulsed, balanced homodyne detector: application to time-domain quantum measurements[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(21): 1714-1716.
- [19] 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.
- [20] Huang D A, Fang J A, 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.

- [21] 刘建强, 王旭阳, 白增亮, 等. 时域脉冲平衡零拍探测器的高精度自动平衡[J]. 物理学报, 2016, 65(10): 100303.  
Liu J Q, Wang X Y, Bai Z L, et al. Highprecision auto-balance of the time-domain pulsed homodyne detector[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(10): 100303.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Weedbrook C, Pirandola S, García-Patrón R, et al. Gaussian quantum information[J]. Reviews of Modern Physics, 2012, 84(2): 621-669.
- [25] Gabriel C, Wittmann C, Sych D, et al. A generator for unique quantum random numbers based on vacuum states [J]. Nature Photonics, 2010, 4(10): 711-715.
- [26] Guo X M, Liu R P, Li P, et al. Enhancing extractable quantum entropy in vacuum-based quantum random number generator[J]. Entropy, 2018, 20(11): 819-831.
- [27] Zhu Y Y, He G Q, Zeng G H. Unbiased quantum random number generation based on squeezed vacuum state[J]. International Journal of Quantum Information, 2012, 10(1): 1250012.
- [28] Haw J Y, Assad S M, Lance A M, et al. Maximization of extractable randomness in a quantum random-number generator[J]. Physical Review Applied, 2015, 3(5): 054004.
- [29] Zhang J, Zhang Y, Zheng Z, et al. Finite-size analysis of continuousvariable source-independent quantum random number generation[J]. Quantum Information Processing, 2021, 20(1): 02936.
- [30] 吴明川, 成琛, 张江江, 等. 高速量子随机数产生中的实时并行后处理[J]. 光通信研究, 2020(5): 1-6.  
Wu M C, Cheng C, Zhang J J, et al. Real-time and parallel post-processing for high-speed quantum random number generation[J]. Study on Optical Communications, 2020(5): 1-6.
- [31] 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.
- [32] Guo X M, Wu M C, Zhang J J, et al. Parallel and real-time post-processing for quantum random number generators[J]. Quantum Physics, 2021, 2107: 14177-14186.
- [33] Wang S F, Xiang X A, Zhou C H, et al. Simulation of high SNR photodetector with L-C coupling and transimpedance amplifier circuit and its verification[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(1): 013107.
- [34] Lang S B, Zhang S C, Li X L, et al. Low noise balanced homodyne detector for quantum noise measurement[J]. IEEE Access, 2022, 10: 27912-27916.
- [35] Serikawa T, Furusawa A. 500 MHz resonant photodetector for high-quantum-efficiency, low-noise homodyne measurement[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(6): 063120.
- [36] LudwigReinhold, BretchkoPavel. 射频电路设计: 理论与应用[M]. 王子宇, 张肇仪, 徐承和, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 316-317.  
Ludwig R, Bretchko P. RF circuit design[M]. Wang Z Y, Zhang Z Y, Xu C, et al., Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 316-317.
- [37] 宋振辉, 魏福立. ERA 系列单片放大器及其应用[J]. 半导体情报, 1999, 36(3): 61-64.  
Song Z H, Wei F L. Monolithic amplifier of ERA[J]. Semiconductor Information, 1999, 36(3): 61-64.
- [38] 江成龙. 可调谐光电振荡关键技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 37-38.  
Jiang C L. Research on key technology of tunable photoelectric oscillation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014: 37-38.