

高速弱光探测条件下光电探测器噪声特性分析

曾维强

(桂林光翼智能科技有限公司, 广西 桂林 541000)

摘要 高速弱光探测场景中光电探测器的噪声表现会对系统灵敏度与信噪比产生影响。针对 1 550 nm 波段微弱光信号的探测需求, 通过开展理论分析构建散粒噪声与电路噪声数学模型, 研究跨阻放大器里寄生电容、反馈元件对噪声频谱的影响规律, 借助 PSpice 仿真工具, 对电路参数进行优化设计, 构建平衡零拍探测测试系统, 对不同光功率条件下的频域噪声特性展开测量操作。实验结果表明, 优化后的探测器在 15 MHz ~ 1 GHz 频段内信噪比能够维持在 10 dB 以上, 共模抑制能力达到 60 dB, 该方案已成功应用于宽带压缩光场测量实验当中, 证实了弱光工况下噪声特性与电路参数之间的定量关联。

关键词 光电探测器; 弱光探测; 噪声特性; 跨阻放大; 信噪比

中图分类号: TN2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.003

0 引言

量子通信、光纤传感、激光雷达等应用对高速弱光探测性能提出极高的标准, 探测器的噪声特性直接决定系统的整体水平。在弱光环境中, 散粒噪声源于光电流的量子涨落, 电子学噪声包含跨阻放大器电压波动、电流干扰以及热效应, 共模噪声体现探测器两臂的匹配程度好坏。目前的研究多集中在常规光功率场景, 对弱光条件下噪声机制、频率响应特性及电路参数间作用规律缺乏深入研究。通过精确测量弱光探测中各类噪声的频谱分布状况, 明确噪声功率与光照强度、电路设计参数之间的数学关联, 为提升探测器性能、增强弱光探测能力提供重要理论支持。

1 光电探测噪声理论

1.1 弱光探测噪声机理

光电探测器在低照度环境中的噪声表现由散粒噪声、电子学噪声及共模噪声三类噪声源决定。散粒噪声是因光子撞击光电二极管的随机性与光电转换时载流子生成的量子起伏, 其噪声强度与入射光强度呈现正比关系, 在弱光场景下成为制约探测能力的关键因素, 电子学噪声是源于跨阻放大器中运放的电压噪声、电流噪声及反馈电阻的热噪声^[1]。共模噪声由探测器双路光电二极管输出信号的幅度差与相位差所致, 散粒噪声在理想状态下呈现出白噪声的特征, 电子学噪声在低频段会受到 1/f 噪声的影响而在高频段则显现为白噪声平台。

1.2 噪声特性数学模型

跨阻放大电路的信号增益特性决定噪声功率谱的频率响应, 考虑光电二极管结电容、运算放大器输入电容及电路板寄生电容的综合影响, 信号增益可表示为:

$$G(f) \approx \frac{R_F}{1 + if \left(2\pi R_F C_F + \frac{1}{A_0 f_0} \right) - \frac{2\pi f^2}{A_0 f_0} R_F (2C_{PD} + C_{IN} + C_P + C_F)} \quad (1)$$

式(1)中, R_F 为反馈电阻, C_F 为反馈电容, C_{PD} 为光电二极管结电容, C_{IN} 为运算放大器输入电容, C_P 为寄生电容, A_0 为运算放大器开环增益, f_0 为单位增益带宽。探测器总噪声功率由各噪声源贡献叠加, 散粒噪声功率谱表示为:

$$U_{shot} = -\sqrt{4qP\rho\Delta f} |G(f)| \quad (2)$$

式(2)中, q 为电子电荷量, P 为入射光功率, ρ 为光电二极管响应度, Δf 为分析带宽, 电子学噪声功率谱需综合考虑运算放大器电压噪声 e_n 、电流噪声 i_n 以及反馈电阻热噪声的频域特性, 建立完整的噪声数学模型, 为后续电路设计优化提供理论基础。

2 探测器系统设计

2.1 光电转换电路设计

光电转换电路选择双光电二极管反接构成差分探测方案, 以 InGaAs PIN 型光电二极管当作核心光电转换元件, 此元件在 1 550 nm 波长处量子效率能达到 95%、结电容为 1.1 pF、暗电流仅 0.5 nA。把两光电二

作者简介: 曾维强 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 微弱光探测和分布式光纤传感技术。

极管 PD1 与 PD2 进行反向串联后, 利用 L-C 耦合网络分离光电流的交直流分量, 其中交流信号经过隔直电容输送到跨阻放大电路, 直流信号则通过电感接入监测电路, 实现光功率平衡监控与相位锁定^[2]。反馈网络由电阻 R_f 与电容 C_f 并联构成, 探测器带宽满足关系式:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3)$$

式(3)中, C 为光电二极管结电容、分布电容及寄生电容之和, R 为终端电阻。

2.2 噪声抑制技术方案

要抑制电子学噪声需要从电路结构与元件选用两个维度开展, 直流放大级选用低噪声运放 LMH6624, 其输入电压噪声指标是 $0.92 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、输入电流噪声为 $2.3 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。针对寄生电容问题通过优化 PCB 布线方案解决, 采用双面板设计把两只光电二极管分设于正反两面, 确保双路信号传输路径长度达到完全一致。共模噪声的抑制依赖于双臂光电二极管参数的高度匹配, 实验中严格筛选量子效率、暗电流、等效电容及等效电阻等参数一致的器件对, 借助对称布局来减小输出信号的幅度差与相位差^[3]。共模抑制比定义为:

$$CMRR = \left| \frac{P_{\text{Unbalanced}}}{P_{\text{Balanced}}} \right|$$

表征探测器抑制共模信号的能力水平。

2.3 电路参数仿真优化

电路仿真基于 PSpice 软件构建完整的噪声等效模型, 运算放大器输入噪声用电压、电流噪声源表征, 光电二极管光电流噪声与反馈电阻热噪声分别等效为电流源, 仿真中改变反馈电阻从 $2.2 \sim 8.2 \text{ k}\Omega$ 、反馈电容从 $2 \sim 3.9 \text{ pF}$, 获得不同参数组合下的噪声功率谱曲线。图 1 展示四种反馈参数设置下的模拟曲线, 当反馈电阻从 $2.2 \text{ k}\Omega$ 增至 $8.2 \text{ k}\Omega$ 时, 散粒噪声功率谱整体上移表明增益提升, 但高频截止频率降低, 而在反馈电阻 $6.8 \text{ k}\Omega$ 、反馈电容 2.0 pF 配置下, 2 MHz 频点处散粒噪声与电子学噪声相差 22 dB , 对应最佳信噪比, 3 dB 带宽约 480 MHz , 满足高速探测要求^[4]。

2.4 实验测试平台搭建

实验测试平台由光源调制系统、探测器本体及信号分析系统三部分组合, 1550 nm 光纤激光器所输出的光要经过模式清洁器进行滤波, 通过半波片与偏振分束器调整光功率。电光振幅调制器 (EOAM) 的作用是生成调制信号用于测试探测器的频率响应特性, 调制后的光束经过 $50:50$ 分束器被均匀分成两路并分别注入探测器的双臂, 两个焦距为 30 mm 的透镜可确保光束完全耦合到光电二极管的探测区域^[5]。探测器的交流输出接入频谱分析仪来采集噪声功率谱且分辨率带宽 (RBW) 设置为 100 kHz 、视频带宽 (VBW) 设置为 300 Hz , 直流输出连接示波器以监控光功率平衡状态。

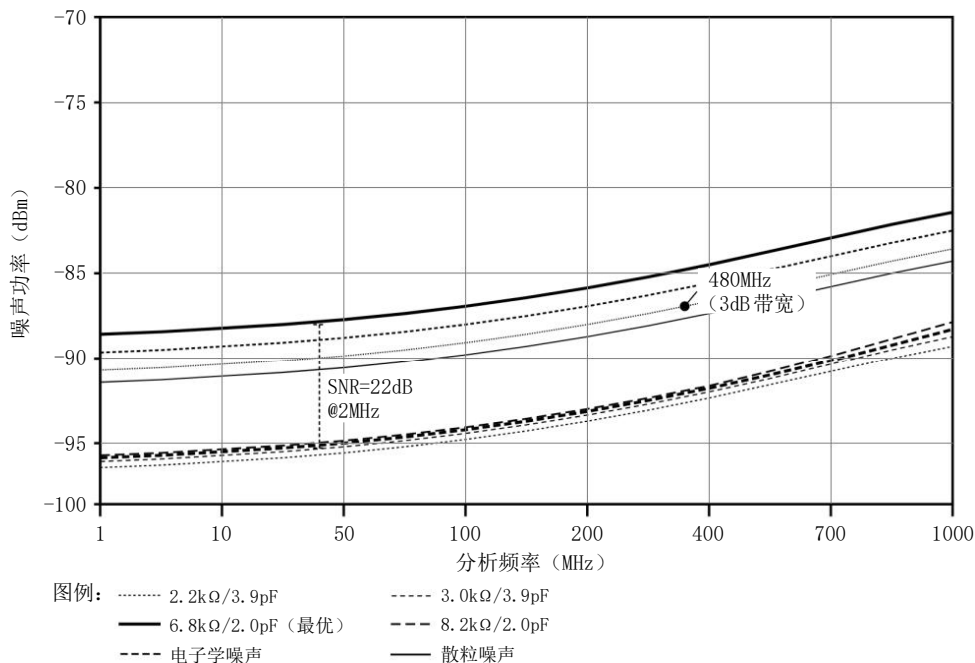


图 1 不同反馈参数配置下噪声功率谱仿真曲线

3 噪声特性实验验证

3.1 频域噪声功率谱测试

频域噪声功率谱测试借助频谱分析仪在 15 MHz ~ 1 GHz 频段逐点扫描展开, 通过对比遮光时的电子学噪声与不同光功率注入下的散粒噪声功率谱曲线, 检验探测器噪声特性与理论模型的符合状况, 测试过程中入射光功率从 0.6 mW 逐步提升到 9.6 mW, 每个功率点都会采集完整的频域噪声功率谱数据。

表 1 数据表明, 反馈电阻 6.8 kΩ 搭配反馈电容 2.0 pF 的参数组合在 2 MHz 分析频率处获得最高信噪比 22 dB。通过对比理论计算值、仿真结果以及实验数据, 反推出电路板寄生电容集中在 65 ~ 68 pF 的范围之内, 该值明显高于光电二极管结电容与运算放大器输入电容之和, 证实了 PCB 布局优化对减少寄生电容的重要意义。

表 1 不同反馈参数配置下探测器噪声特性对比

反馈电阻 RF (kΩ)	反馈电容 CF (pF)	3dB 带宽 (MHz)	信噪比 @2MHz (dB)	电子学噪声 (dBm)	寄生电容 Cp (pF)
2.2	3.9	850	18.5	-92.3	65
3.0	3.9	720	19.8	-93.1	67
6.8	2.0	480	22.0	-95.6	67
8.2	2.0	380	21.2	-94.8	68

3.2 信噪比特性评估

通过测量不同光功率之下散粒噪声功率与电子学噪声功率比例, 能够评估信噪比特性并定量描述探测器弱光环境性能表现。实验选用反馈电阻为 6.8 kΩ 以及反馈电容为 2 pF 的最优参数, 在 200 MHz、400 MHz、600 MHz、800 MHz 及 900 MHz 五个典型频率点采集噪声功率数据, 当入射光功率从 1 mW 增加至 8 mW 时, 五个频率点的散粒噪声功率都随光功率严格线性增加, 线性拟合相关系数均高于 0.99。信噪比在 550 MHz 处达到最大值 12 dB, 降低到 1 GHz 时为 10.73 dB。

3.3 弱光压缩态探测验证

弱光压缩态探测实验依靠光学参量放大器 OPA 产生 1 550 nm 正交振幅压缩态光场, 探测器直流输出信号用来锁定本振光与压缩光的相对相位到零相位, 确保测量压缩态光场的正交振幅分量噪声特性, 交流输出信号连接频谱分析仪记录压缩态噪声功率谱。

表 2 数据表明, 探测器在 3.5 ~ 71.5 MHz 宽带范围内所测得的压缩态噪声功率都低于散粒噪声基准, 在 21.5 MHz 分析频率处观测到最高达到 -2.5 dB 的压缩度, 压缩带宽受限于 OPA 腔的谐振特性而非探测器带宽, 证明 1 GHz 带宽的探测器能够支撑更宽频段的非经典光场探测需求。

表 2 宽带压缩态探测性能参数

测试项目	测量结果
压缩带宽范围 (MHz)	3.5 ~ 71.5
最高压缩度 (dB)	-2.5 @ 21.5 MHz
本振光功率 (mW)	8.0
共模抑制比 (dB)	60.65 @ 20 MHz
直线性度偏差 (%)	0.7
腔锁定频率 (MHz)	56.35

4 结束语

基于跨阻放大电路的高速弱光探测器设计表明, 寄生电容、反馈网络参数及 PCB 布局对噪声特性影响相当显著。实验数据与理论计算、电路仿真结果达成高度吻合, 验证了噪声模型准确性。该探测器在 15 MHz ~ 1 GHz 频段内实现 10 dB 以上的信噪比, 在 20 MHz 处共模抑制比能达 60.65 dB, 已成功用于 3.5 ~ 1.5 MHz 宽带压缩态光场测量。研究表明, 在弱光条件下, 散粒噪声占主导且电子学噪声需严格控制, 明确寄生电容约 67 pF, 对高频响应存在限制作用, 以及运算放大器实际噪声参数高于标称值的现象, 并通过优化电路拓扑、选用低噪声器件、改进 PCB 对称布局, 能进一步提升探测器在弱光条件下的性能。

参考文献:

- [1] 尚鑫, 李番, 马正磊, 等. 0.1mHz—1Hz 频段超低噪声光电探测器实验研究 [J]. 物理学报, 2025, 74(05): 279-286.
- [2] 段放世, 李超, 索普一, 等. 高性能 GHz 带宽平衡零拍探测器的研制 [J]. 量子光学学报, 2025, 31(01): 27-34.
- [3] 伍凯凯, 谢博娅, 陈琳, 等. 基于光学偏振控制的散粒噪声极限微振动光学测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(07): 241-250.
- [4] 滕鑫, 余慧敏, 梁焰. 高速平衡零拍探测器的设计与实现 [J]. 光学仪器, 2022, 44(04): 32-38.
- [5] 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(02): 109-116.