

〈系统与设计〉

自适应增益光电探测电路设计

李新东, 王娟, 冯宗鑫, 师韩冰, 王坤

(西安建筑科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 在激光模拟实兵对抗系统中, 为解决传统光电探测电路受环境影响大, 系统不稳定、检测效能低的问题, 设计了一种基于单片机的增益自适应光电探测电路。在传统光电探测电路的基础上改用两个对称分布的跨阻放大反馈电路, 消除光电探测器偏置分量, 抑制前置放大电路的系统噪声; 采用自动增益控制电路使不同射击距离下输出信号幅值保持稳定; 采用多级滤波的方式去除信号的直流分量并有效抑制背景噪声, 为信号的进一步处理提供准备。通过实验验证与 TINA-TI 仿真分析结果表明, 该光电探测电路可以实现增益自适应变化, 在不同入射距离下输出电压幅值基本稳定在 2V 左右。其性能明显优于传统固定增益电路, 极大地提高了对光电信号的探测能力, 该结果验证了本文提出的光电探测电路设计的科学性和可行性。

关键词: 光电探测器; 电路设计; 跨阻放大; 自动增益; TINA-TI 仿真

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)01-0012-08

Adaptive Gain Photoelectric Detection Circuit Design

LI Xindong, WANG Juan, FENG Zongxin, SHI Hanbing, WANG Kun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In laser simulation combat systems, the traditional photoelectric detection circuit is significantly affected by the environment, the system is unstable, and the detection efficiency is low. To solve this problem, a gain-adaptive photoelectric detection circuit based on a single-chip microcomputer was designed according to the principle of photoelectric signal detection. Based on a traditional photoelectric detection circuit, two symmetrically distributed transimpedance amplification feedback circuits were used to eliminate the bias of the photodetector and suppress the system noise of the preamplifier circuit. An automatic gain-control circuit was used to stabilize the output signal amplitude at different shooting distances. The multistage filtering method was used to remove the DC component of the signal and effectively suppress the background noise, providing preparation for further signal processing. Experimental verification and TINA-TI simulation analysis show that the photoelectric detection circuit achieves an adaptive gain change, and the output voltage amplitude is stable at approximately 2 V at different incident distances. Its performance is clearly better than that of a traditional fixed-gain circuit, significantly improving the detection ability of the photoelectric signal. The results verified the scientific nature and feasibility of the proposed photoelectric detection circuit design.

Key words: photoelectric detector, circuit design, transresistance amplification, automatic gain, TINA-TI simulation

0 引言

光电探测电路是激光模拟实兵对抗系统的重要

组成部分, 基于光电效应原理, 实现光电转换与信号处理^[1-2]。在设计中, 高灵敏度、低噪声、低失真和高增益需要重点考虑, 其接收灵敏度与信噪比对系统的

收稿日期: 2022-09-01; 修订日期: 2023-02-15。

作者简介: 李新东(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测与信号处理方面的研究。E-mail: lee@xauat.edu.cn。

通信作者: 王娟(1979-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事新能源材料与器件方面的研究。E-mail: juanwang@xauat.edu.cn。

基金项目: 西安市自然科学基金(XA2020-CXRCFW-0247); 西安市清洁能源重点实验室(2019219914SYS014CG036)。

性能具有重要影响^[3]。而电路的噪声是影响信噪比的主要因素, 探测器在进行光电信号转换过程中会伴随着噪声电流(电压)的存在, 经放大电路放大, 噪声也随之放大, 从而严重影响光电探测器的效率^[4-6]。

当射击距离较长, 激光脉冲信号到达光电探测器时变得微弱, 甚至被噪声完全埋没, 从而使得探测器对光信号的探测本领受到限制。因此有效抑制环境光产生的噪声干扰成为光电探测电路设计中一个非常重要的挑战^[7-8]。系统保持接收信号强度稳定是实现高通信速率、低误码率的必要条件^[9-10]。为了确保输出信号稳定, 方便后续处理, 需要信号处理电路能够相应的改变放大器增益, 提高信噪比与对微弱信号检测的能力^[11-14]。

Li 等人^[15]利用对数放大器和积分放大器的功能, 有效地提取信号, 设计了一种微弱光信号检测系统。He 等人^[16]基于 LabVIEW 设计了一种微弱光电信号采集与处理系统。Wu 等人^[17]提出了一种锁相放大技术来检测微弱信号, 具有一定应用价值。

实兵交战系统中的光电探测属于微弱信号探测领域, 所需放大倍数高, 对电路低噪声要求高。为解决环境光以及噪声对系统探测性能的影响, 本研究基于信号差分和自动增益控制原理设计了一种性能优良的光电探测电路。采用对称跨阻放大回路结构消除暗电流噪声与环境光引起的直流偏移; 通过自动增益控制电路对信号进行自适应放大, 使信号幅值在正常范围内保持稳定, 提高信号采集效率; 采用多次滤波的方式去除信号的直流分量并能够较好地抑制背景

噪声; 借助主控芯片的 ADC 模块对信号进行采集, 提取信号中的信息。

1 方案设计

在激光模拟实兵对抗系统中, 光电探测器采用光伏特性 PIN 光电二极管, 为准确获取激光传递的信息, 需设计与之相匹配的检测电路, 达到信号高效检测的目的^[18-20]。整体结构如图 1 所示, 首先, 光电探测器接收激光信号, 并将其转换为电流信号, 通过跨阻放大器将光电探测器输出的电流信号转换为电压信号同时进行放大; 其次, 为了扩大系统增益, 在跨阻放大电路后增加一级放大电路对信号进行放大; 随后将放大后的电压信号接入带通滤波电路进行降噪; 最后, 经单片机将带通滤波电路输出的模拟信号转换为数字信号做采样处理。

为消除光电探测器的暗电流噪声与环境光引起的直流偏移, 系统采用两路对称的跨阻放大器, 一路接光电探测器正极, 另一路接光电探测器负极, 将两路信号通过差分放大电路进行叠加得到脉冲电压信号, 从而实现对光电探测器噪声与跨阻放大器噪声抑制; 采用自动增益控制(automatic gain control, AGC) 电路解决由于射击距离不同导致接收到信号强弱不一致的问题, 在输入信号幅值变化很大的情况下, 使输出信号仅在较小范围内变化, 保证了信号输出的稳定性; 采用带通滤波器可以滤除所需频率范围之外的干扰, 提高信噪比。

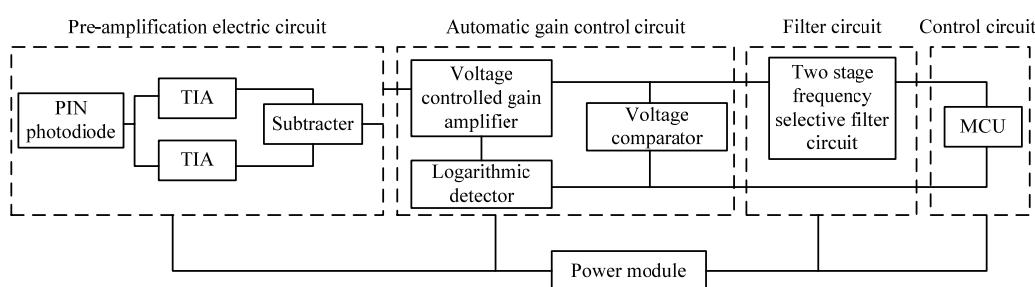


图 1 光电探测电路系统总体结构

Fig.1 Overall structure of the photoelectric detection circuit system

2 光电探测器选型

光电探测器的探测模式主要有两种, 光电导模式和光伏模式。光电导式需外加偏置电压, 适合于高速光转换的应用。光电压式存在入射光时才会产生光电流, 适合精确测量^[21-22]。本文采用光伏式, 可有效降低噪声的影响, 从而实现对微弱信号的精确探测。光电探测器是根据光电转换定律将光辐射量转化为光电流量。其光电转化模型如下:

$$i(t) = \frac{e\eta}{hv} P(t) \quad (1)$$

式中; $i(t)$ 为产生的光电流; $P(t)$ 为光功率; $h\nu$ 为光子能量; η 为探测器量子效率; e 是电子电荷; 可以看出, 光电流主要受光功率与探测器的量子效率的影响, 当探测器确定时, 探测器的量子效率是一个常值, 故光电流只与光功率有关。

不同光电探测器性能不同, 因此选择一个合适的光电探测器是实现光电检测的前提^[23]。光电探测器选

型要充分考虑灵敏度、光谱利用率系数、频率等,同时还应考虑无规则噪声的影响。这里选用深圳市诚强光电数码有限公司生产的CHQ0038L型PIN光电探测器接收激光信号并实现光电转化。该光电探测器具有接收角度宽、距离长、可靠性高、抗干扰能力强、光功率转化效率显著的特点。对噪声或干扰信号引起的杂散输出脉冲具有一定的抑制作用。其性能参数如表1所示。

表1 光电探测器性能参数

Table 1 Performance parameters of photoelectric detector

Type	CHQ0038L
Spectral response/nm	500-1100
Central wavelength λ_p /nm	960
Short circuit current/ μ A	63
Dark current/nA	1
Operating voltage/V	2.7-5.5
Sensitivity@980 nm /(A/W)	0.59
Angle of arrival/ $^{\circ}$	± 45

3 光电探测电路设计

由于激光在传输过程中受环境天气等各种因素影响,能量在大气中的衰减严重,此时光电探测器接收到的光功率微弱,容易受其他信号的干扰^[24-26]。因此,设计合理的信号处理电路,选择匹配的电气参数是提高电路抗干扰能力与稳定性关键^[27-29]。

3.1 前置放大电路设计

为使光电探测器的输出信号易于检测,首先需要考虑如何将光电探测器输出的电流信号转换为易于

检测的电压信号。这里采用TI公司生产的OPA380型运算放大器实现光电信号的I-V转换,该放大器具有低噪声、低偏置电流和高速特性,是宽带跨阻抗和电压放大器应用的理想解决方案,其电路如图2所示。

该前置放大电路由3部分构成,分别是前面两个对称的跨阻放大电路和将两个跨阻放大电路信号进行叠加的差值电路。两个跨阻放大电路的输出通过积分器反馈给正输入端,可有效补偿由于太阳光或其他外部光源引起的直流输出偏移。采用差分配置更好地抑制由于耦合干扰引起的噪声,抵消共模干扰信号,达到提高电路信噪比与探测精度的目的。

为了补偿光电二极管的内部结电容带来的振荡问题以及RC滤波后导致的相位迟滞问题,电路采用补偿电容 C_3 、 C_{18} 与反馈电阻 R 并联用于滤除信号中的高频噪声以防止电路自激振荡。电路中并联两个相反方向的肖特基二极管 D_1 、 D_2 改变跨阻放大器不同方向的反馈量,起到施密特效果。为了提高电路的灵敏度,降低噪声,反馈电阻采用T型网络布局,通过减小寄生电容来实现更大的跨阻增益。

3.2 自动增益控制电路

系统为了扩展入射光强的范围,在前置放大电路后加入自动增益控制电路,使电路增益随信号强弱自适应调整,放大电路输出信号经滤波器滤除截止频率为33 kHz的低频调制分量和噪声后,产生用以控制增益受控放大器的电压。使得在射击距离近,激光能量强时,放大电路增益减小;射击距离远,激光能量弱时,放大电路增益增大。始终将信号保持在0.5~5 V之间,便于后续采集与处理。STC15F2K60S2主控芯

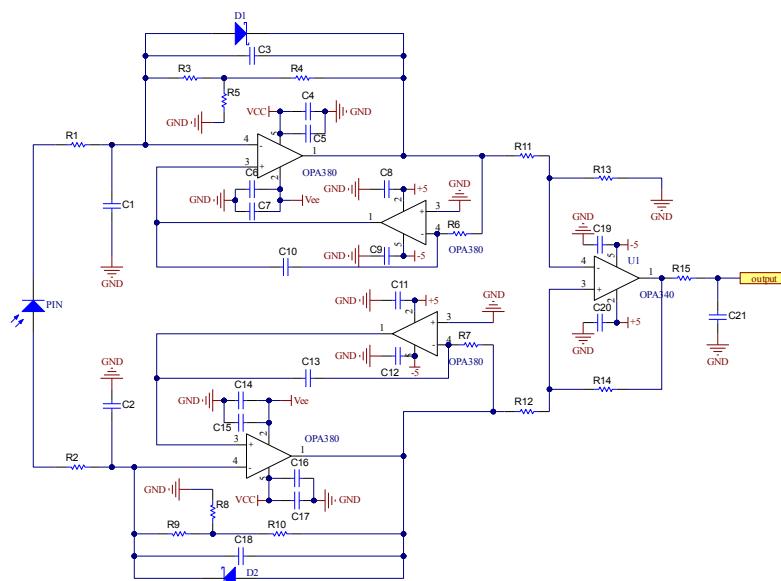


图2 前置放大电路

Fig.2 Preamplifier circuit

片通过脉冲峰值的大小来判断放大电路的增益是否处于合适档位，继而控制放大电路改变增益，从而实现自增益控制。

电路选用 TI 公司的一款可变增益芯片 VCA810，这是一款高增益，可调范围宽带的压控放大器，具有很好的带宽和噪声特性，是精密 AGC 应用的理想选择，电路如图 3 所示。AGC 的环路部分采用 OPA820 作为电压比较器，AD8307 用于幅值检测构成对数检波环路。比较器将 VCA810 输出与 DAC 输入的电压进行比较，输出线性电压，经过电容滤除直流分量再输入至 AD8307 检波环路，对 VCA810 增益进行自动控制。电压比较模块中电阻 R_7 避免高频时产生的自激震荡，电容 C_{15} 作为相位补偿构成 AGC 反馈回路。当输入信号小的时候提高 VCA810 的增益，在信号大的时候降低增益，但不改变响应的基本对数性质。其增益与控制电压的关系可表示为：

$$G_{dB} = -40 \times (V_c + 1) \quad (2)$$

式中: V_c 为检波器 AD8307 的输出电压, 通过单片机控制电压 V_c 从 $-2 \sim 0$ V 变化, 从而改变放大器增益。

G_{dB} 在 $-40 \sim 40$ dB 范围内线性变化。当 VCA810 的输出大于 DAC 输入引脚的电压时, OPA820 输出正向摆动, 电压保持电容上的电压随之上升, VCA810 的增益控制引脚电压随之上升, 从而降低 VCA810 的增益。当 VCA810 的输出小于 DAC 输入引脚的电压时, OPA820 输出负向摆动, VCA810 的增益控制引脚电压随之下降, 从而升高 VCA810 的增益。由此种负反馈机制的电路, 完成了自动增益控制功能, 以满足信号处理对距离衰减效应的补偿的要求, 保持很好的线性输出。

3.3 选频滤波电路设计

系统信号中心频率为 38kHz，低于或高于这个频率都会对信号产生影响，为了提高信噪比消除噪声的干扰，这里对信号进行选频滤波使得信号的质量更佳。其电路如图 4 所示，采用双运放 LM324 芯片组成多路反馈拓扑结构的四阶巴特沃斯带通滤波电路滤除通频带以外的噪声信号，方便后续对信号进行采集处理。

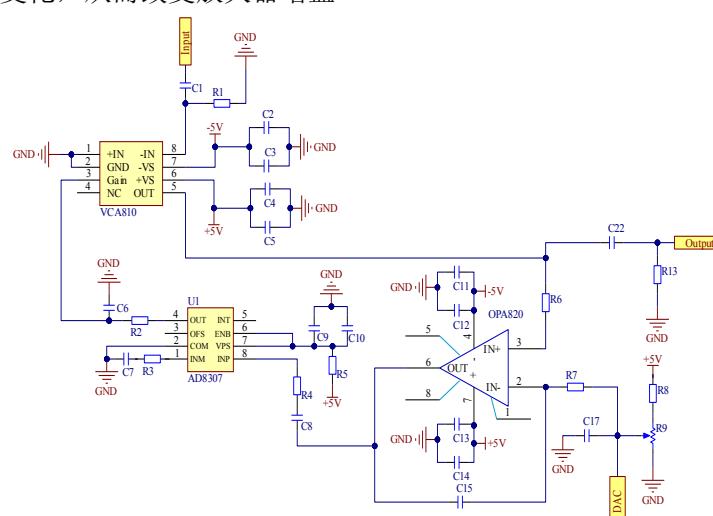


图3 自动增益控制电路

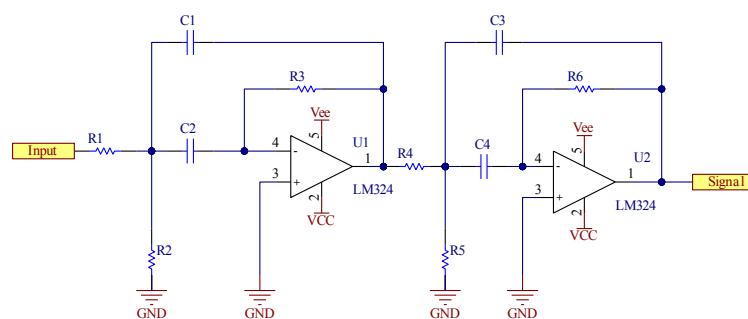


图 4 选频滤波电路

确定选频滤波电路中心频率为38 kHz, 增益为0 dB, 经仿真软件TINA-TI对信号与噪声进行分析可知通频带 Δf 越小, 电路的输出噪声越小。但减小通频带, 会影响信号的波形。综合考虑这两方面因素, 最终确定滤波电路-3 dB通频带带宽为10 kHz, 取 $C_1=C_2=C_3=C_4=C=10\text{ nF}$ 。根据文献[30]计算得到元器件 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ 的值。确定好各元器件参数后仿真得到带通滤波电路的频率响应曲线如图5所示, 结果显示该滤波器在38 kHz附近增益曲线平坦, 滤波效果优良, 性能稳定, 能够很好地保持信号波形, 抑制噪声。

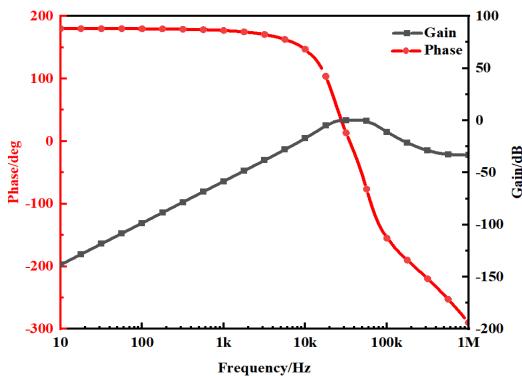


图5 带通滤波器频率响应曲线

Fig.5 Frequency response curves of bandpass filter

3.4 控制电路设计

整个激光模拟对抗光电探测系统采用STC公司的STC15F2K60S2型号单片机作为控制单元, 具有高速、高可靠、低功耗、超强抗干扰等优点。通过单片机内置的A/D转换模块把检测到的模拟信号转换为计算机能够识别的数字量, 并通过高低电平时间的长短对信号进行解码获得激光传输的信息, 然后通过D/A转换变为电压或电流信号, 驱动执行元件。

3.5 软件设计

主控芯片STC15F2K60S2的控制程序采用keil uVision5软件编写实现, 系统程序采用C语言编写。单片机控制部分主要包括系统初始化、信号采集、DA输出、与上位机通信等, 主要流程如图6所示。

系统在运行前初始化, 比较输入信号幅值的强弱来确定DA输出的电压值, 进一步对自动增益控制环路的增益进行控制, 保证输入单片机的信号幅值在规定范围内, 便于对信号进行采集。将采集到的信号经过A/D转换之后进行解码获得信号传输的信息, 将信息经D/A转化为电压信号驱动执行元件响应。

4 实验结果与分析

在完成各个子模块的设计后, 为提高实验结果的准确性与说服力, 信号处理模块采用PCB来实现, 所设计的PCB如图7(a)所示, 将设计好的PCB进行制板焊接搭建实验平台, 如图7(c)所示。图7(b)为激光发射端实物图, 所采用的激光波长为980 nm。

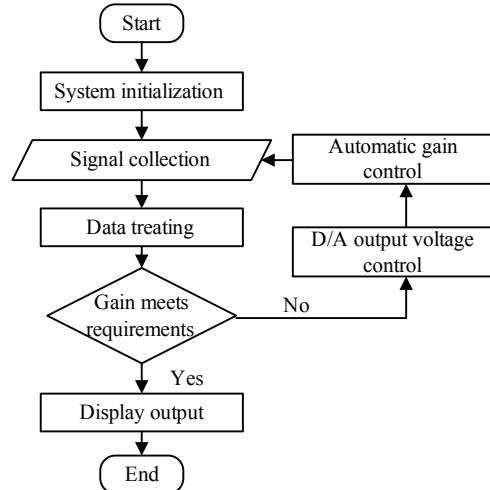


图6 系统软件流程图

Fig.6 System software flow chart

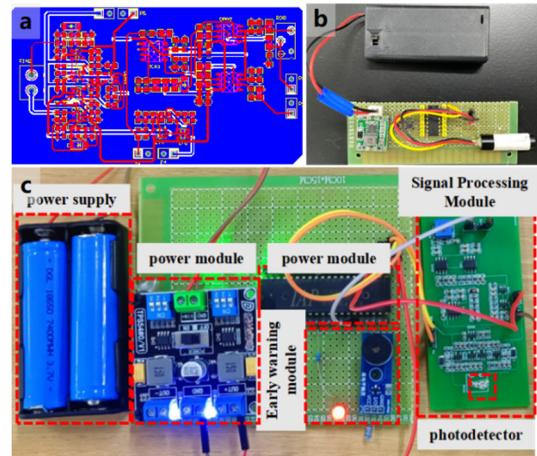


图7 实验平台。(a)信号处理模块PCB图, (b)发射端实物图, (c)实验平台实物图

Fig.7 Experiment platform. (a) Signal processing module PCB diagram, (b) Transmitter diagram, (c) Experimental platform physical map

为了验证激光接收电路对接收信号的处理效果, 对电路性能进行实验分析, 图8为电路的波形图, 其中图8(a)为本研究输入输出波形, 图8(b)为传统系统输入输出波形。由图8(a)看到输入输出波形具有很好的保持, 说明系统性能稳定可靠。对比图8(a),(b)电路优化前后系统噪声抑制效果明显, 输出信号稳定, 误码率降低30%, 信号的传输效果得到改善。

理想情况下,增益自适应控制电路输出信号的幅度应在不同输入信号强度下保持不变。为了验证电路增益的自适应性能,通过改变激光管的驱动电压(或是改变发射与接收端之间的距离)观察输出波形,并测量光电接收电路输出信号幅值,与无自动增益光电检测电路进行对比如图 9 所示。从图上可以看到移动距离在 1~10 m 范围内,采用固定增益,不同移动距离下输出信号的幅度变化很大,且存在距离过小输出信号饱和,距离过大输出信号弱,从而导致后续信号处理时高低电平出现误判的现象。而采用增益自适应控制电路输出信号幅度基本保持恒定,可有效解决固定增益存在的信号误判问题。



图 8 波形图(a)本系统输入输出波形, (b)传统系统输入输出波形

Fig.8 Waveform (a) Input and output waveform of this system, (b) Input and output waveform of traditional system

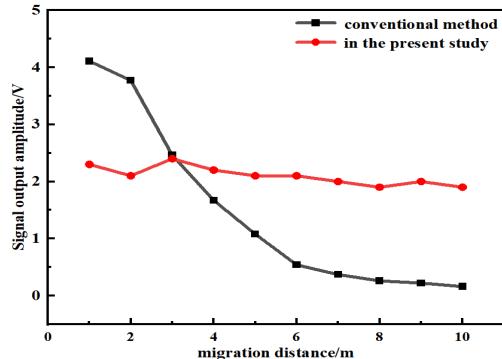


图 9 移动距离与输出电压幅度关系

Fig.9 Relationship between moving distance and output voltage amplitude

利用 TINA-TI 仿真测试光电探测电路在增益最大时的频率特性曲线如图 10 所示,可以看出电路在 38 kHz 频率附近曲线平坦,说明在此范围内电路性能稳定。幅频特性曲线的通频带增益大小与输入信号强度有关,但是其曲线形状、上限截止频率却与信号强弱无关,输入信号越弱,幅频特性曲线增益越大。

由于整个光电探测电路中光电探测器和前置放大电路的噪声影响比较大,为了验证前置放大电路的降噪效果,采用 TINA-TI 软件对前置放大电路进行仿真分析,得到该电路与传统前置放大电路的输出噪声曲线与信噪比曲线如图 11、12 所示,可以看到在频率为 38 kHz 处电路噪声为 3.46 μ V, 信噪比为 109 dB, 相较于传统前置放大电路输出噪声降低效果显著,系统噪声得到明显抑制,纹波干扰得到消除,电路信噪比得到提高,方便信号的进一步处理,对微弱信号的探测性能得到提升。

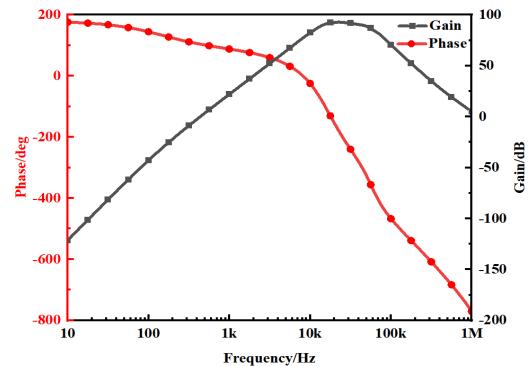


图 10 电路频率响应曲线

Fig.10 Circuit frequency response curves

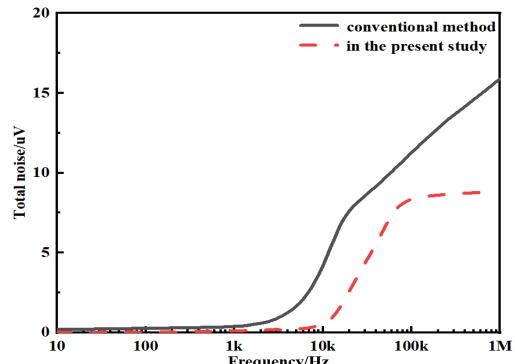


图 11 电路输出噪声曲线

Fig.11 Circuit output noise curves

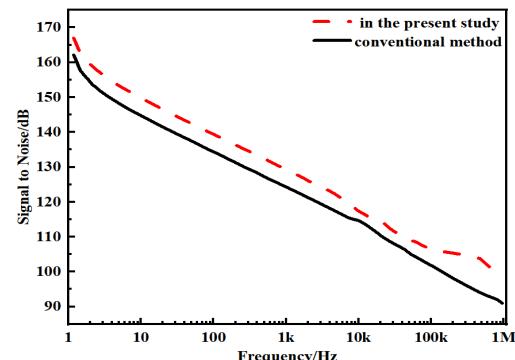


图 12 电路信噪比曲线

Fig.12 Signal-to-noise ratio curves of circuit

为验证电路的选频滤波效果,通过 TINA-TI 软件的扫频功能改变输入信号的频率,测得电路在不同频

率下的输出特性曲线如图 13 所示, 从图中可以看到频率越接近中心频率 38 kHz, 其波形保持的越完整, 证明该电路具有很好的选频滤波效果, 可有效滤除低频与高频噪声, 保证信号的输出质量。

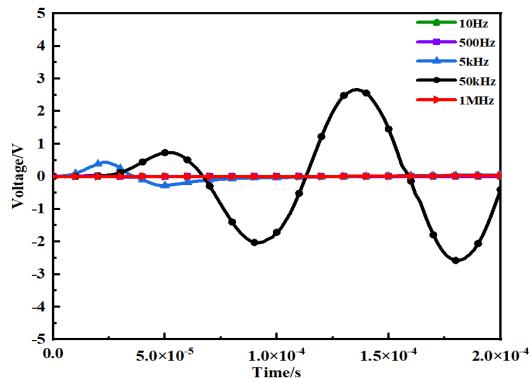


图 13 电路在不同频率下滤波效果图

Fig.13 Circuit filter effect diagram at different frequencies

5 结论

本文依据信号叠加原理与自动增益控制理论设计并实现了一种增益自适应光电探测电路, 采用两个对称的跨阻放大电路叠加的结构, 有效抑制了系统噪声与暗电流, 采用自动增益控制电路对信号进行放大, 避免因距离太近导致信号饱和, 实现对光电信号的高增益、低噪声放大。通过实验分析与 TINA-TI 仿真结果表明: 系统可实现对激光脉冲信号进行采集、转换和放大, 设计能够保证输出信号幅值基本稳定在 2 V 左右, 提高探测系统的信噪比, 具有良好的稳定性和噪声抑制效果, 电路的最低噪声为 3.46 μ V, 信噪比为 109 dB。探测能力得到大幅提升, 满足实际应用需求, 为光电检测技术的研究提供了参考。下一步设想在激光模拟实兵对抗系统中得到应用。

参考文献:

- [1] FANG R, WANG C. Design and analysis of APD photoelectric detecting circuit[C]//Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences, SPIE, 2015, 9795: 547-552.
- [2] 齐靓. 某反坦克导弹激光模拟器的设计与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [3] QI L. The Design and Implementation of an Anti-tank Missile Laser Simulator [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [4] ZHANG Y, GUO Y, HE G. Design of photoelectric amplification circuit for laser fuze[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 692(2): 022010.
- [5] WANG L, ZHANG Y, LI H, et al. Study on long distance transmission technique of weak photocurrent signal in laser gas sensor[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(4): 042802.
- [6] XIE N, ZHANG Z, CHEN W. Design of signal conditioning circuit for photoelectric sensor[C]// 7th International Conference on Education, Management, Computer and Medicine (EMCM), 2017: 533-537.
- [7] REN M Y, TIAN L, WANG W, et al. Design of pre-amplifiers for photoelectric detector[C]//Applied Mechanics and Materials, 2013, 380: 3308-3311.
- [8] WANG L, ZHANG Y, LI H, et al. Study on long distance transmission technique of weak photocurrent signal in laser gas sensor[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(4): 042802.
- [9] KONG L, CHEN Y, Boon C C, et al. A wideband inductorless dB-linear automatic gain control amplifier using a single-branch negative exponential generator for wireline applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2018, 65(10): 3196-3206.
- [10] KO C T, KUAN T K, SHEN R P, et al. A 387.6 fs integrated jitter and-80dBc reference spurs ring based PLL with track-and-hold charge pump and automatic loop gain control in 7 nm FinFET CMOS[C]//Symposium on VLSI Circuits. IEEE, 2019: C164-C165.
- [11] 王涛, 蔡喜平, 刘洋, 等. 可见光通信自适应接收系统的实验研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(2): 18-21.
- [12] WANG T, CAI X P, LIU Y, et al. Experimental study of adaptive receiving system for visible light communication[J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(2): 18-21.
- [13] 张天宇, 贾方秀. 基于 PSD 窄脉冲激光信号检测放大电路噪声分析及参数匹配研究[J]. 现代电子技术, 2019, 42(10): 35-39.
- [14] ZHANG T Y, JIA F X. Noise analysis and parameter matching based on PSD[J]. Modern Electronic Technology, 2019, 42(10): 35-39.
- [15] LI C Y, CHENG Z, CHEN F, et al. Design of a photoelectric detection circuit in particle analysis apparatus for clinical liquid sample[C]//Applied Mechanics and Materials, 2015, 696: 134-140.
- [16] QIN J, CUI S, DAI J. Noise analysis and compensation strategy of photoelectric detection circuit[C]//Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1601(2): 022047.
- [17] LI X, RAO W, GENG D. Design and analysis of weak optical signal detection system based on photoelectric detection technology[J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2018, 13(4): 458-466.
- [18] HE L L, ZHANG Z, GE L F. A design of weak photoelectric signal acquisition and process system based on LabVIEW[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2010, 47(534): 65-68.
- [19] WU Zaiqun. Study on detection of weak signal by phase lock-in amplification[C]// 9th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). IEEE, 2017: 109-112.
- [20] Electronics, 2019, 30(6): 1064-1073.

- 112.
- [18] 张书博, 王昌建. 具有抗干扰功能的激光测距电路的设计与实现[J]. *激光杂志*, 2017, **38**(12): 105-109.
- ZHANG S B, WANG C J. Design and implementation of laser ranging circuit with anti-interference function[J]. *Laser Magazine*, 2017, **38**(12): 105-109.
- [19] ZHENG A L, ZHANG J, HUANG B Z. Stability analysis and design of a mono-pulse photoelectric detecting system[C]//*Applied Mechanics and Materials*, 2013, **389**: 680-684.
- [20] TAN Y Y, ZHANG H, ZHANG X J, et al. Design of low-noise receiving amplifier circuit for laser proximity fuze[C]//*Advanced Materials Research*, 2014, **926**: 452-455.
- [21] MENG X, YUAN H, WANG Y. Research on the construction method of photoelectric detection preamplifier circuit combined with single chip microcomputer technology[C]// *IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*, 2021: 516-520.
- [22] WANG J, XIA K, LI T, et al. Self-powered silicon PIN photoelectric detection system based on triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2020, **69**: 104461.
- [23] LI C, LU J, ZHAO Y, et al. Highly sensitive, fast response perovskite photodetectors demonstrated in weak light detection circuit and visible light communication system[J]. *Small*, 2019, **15**(44): 1903599.
- [24] YANG H, XU X, LUO M, et al. Design of quadrant photoelectric detection system and method of displacement calculation[J]. *Optik*, 2019, **199**: 163335.
- [25] KUANG X, FAN F, WANG T. A transimpedance amplifier with DC photocurrent rejection for infrared optical receiver[C]//*IEEE 16th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2015: 270-273.
- [26] BAI J, WU T, SHEN F, et al. A novel design of analog signal power amplifier module for relay protection tester[C]// *5th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology*, 2017: 1071-1076.
- [27] ZHANG X, LI H, ZHANG S. Design and analysis of laser photoelectric detection sensor[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, **63**(12): 3092-3099.
- [28] LI H, LEI Z. Study and analysis on a new optical detection design method for photoelectric detection target[J]. *Sensor review*, 2013, **33**(4): 315-322.
- [29] SHI A, LIANG Y. A design of signal processing circuit based on the dual-lateral PSD[C]// *5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. IEEE*, 2013, **1**: 255-258.
- [30] Arthur B. Williams. 模拟滤波器与电子设计手册[M]. 路秋生译. 北京: 电子工业出版社, 2016.
Arthur B Williams. *Analog Filter and Circuit Design Handbook* [M]. Translation by Qiu-sheng L. Beijing: Electronic Industry Press, 2016.