

近地层紫外动态目标探测微弱信号放大器设计

李旭辉^{1,2}, 吴晗平^{1,2}, 李军雨^{1,2}, 王连振^{1,2}, 岳健民^{1,2}

(1. 湘潭大学材料与光电物理学院, 湖南 湘潭 411105;

2. 武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205)

摘要: 针对紫外探测器输出信号微弱, 常规放大电路难以实现对微弱信号放大, 为此设计了一种适于近地层紫外动态目标探测的微弱信号放大器。通过分析探测器输出信号特点, 提出了微弱信号放大器的指标要求。围绕预定的指标要求设计电荷前置放大电路、整形滤波电路以及增益调整电路, 使放大器的输出波形满足总体设计要求。经软件 Multisim 模拟仿真结果表明, 该放大器各项指标均达到设计要求, 可以将探测器输出电荷脉冲信号放大整形输出相应准高斯脉冲波形, 为后续处理提供可靠的信号, 具有一定适用性。

关键词: 紫外探测; 红外探测; 微弱信号放大; 前置放大电路; 整形滤波

中图分类号: TN23 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)06-0471-04

Design of Weak Signal Amplifier for UV Dynamic Target Detection in the Surface Layer

LI Xu-hui^{1,2}, WU Han-ping^{1,2}, LI Jun-yu^{1,2}, WANG Lian-zhen^{1,2}, YUE Jian-min^{1,2}

(1. Faculty of Material and Photo-electronic Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: Aiming at that UV detector output signal is weak and the conventional amplifier circuit amplifying weak signals is difficult to realize, therefore a UV weak signal amplifier which is suitable for dynamic target detection near surface is designed in this paper. By analyzing the characteristics of the detector output signal, the index requirements of weak signal amplifier are proposed in this paper. Around predetermined targets, the charge pre-amplifier circuit, shaping filter circuit and gain amplifier are designed to make amplifier output waveform meet the requirements of the overall design. The circuit is designed and simulated by Multisim, and the simulation results show that all the indexes of the amplifier meet design requirements. This circuit can accurately amplify output signal of charge pulse detector and output corresponding quasi-Gaussian pulse shaping waveforms for subsequent processing to provide reliable signal, which has some applicability.

Key words: UV detection, infrared detection, weak signal amplification, preamplifier circuit, shaping filter

0 引言

随着现代战争的发展需求, 针对高空高速运动目标(飞机、导弹), 红外探测在探测精度与目标识别方面凸显不足, 较其而言, 近地层紫外探测在目标识别和探测精度方面的良好性能可弥补红外探测的不足, 提高对目标的识别能力^[1-3]。

相比于红外探测, 近地层紫外探测具有背景干扰小、虚警率低、隐蔽性好等优点^[3]。但是由于目

标辐射的紫外光信号一般较微弱, 且紫外大气衰减严重, 紫外光到达探测系统时已离散为光子形态。经探测器接收转换之后的电信号将十分微弱, 因此, 对紫外微弱信号的低噪声放大处理是实现紫外目标检测识别的重要前提^[4], 放大器性能高低直接影响近地层紫外探测系统的灵敏度和作用距离。因此, 本文通过分析紫外探测器输出信号的特点, 设计了一种适于近地层的紫外动态目标微弱信号放大器。

收稿日期: 2013-10-30; 修订日期: 2014-04-17。

作者简介: 李旭辉(1987-), 男, 湖南郴州人, 硕士研究生, 主要研究方向为紫外探测系统技术。E-mail: lixuhui604@163.com。

通讯作者: 吴晗平(1964-), 男, 湖南澧县人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光电子系统总体技术及设计。E-mail: wuhanping601@sina.com。

1 探测器输出信号分析

在近地层紫外探测中，随着目标逼近，探测器在单位时间内接收到的光子数量会越来越多，相应的需要大量的动作开关才能完成光子计数，这就要求紫外探测器件不仅要有高增益而且还要有高速率。工作在盖革模式下的III族氮化物雪崩光电二极管(APD)可满足以上两个要求，实现在日盲区光子计数^[5]。APD作为一种新型半导体的紫外探测器，最大的特点就是器件内部具有雪崩倍增效应，当入射光子功率较强时，单位时间内接收到的光子数量较多，光电子脉冲互相叠加，APD输出较高的直流电平，如图1(a)所示；当入射光子功率很弱时，单位时间内接收到的光子数量较少甚至是单个光子，此时APD输出的光子脉冲呈现出不连续的随机分布，如图1(b)所示^[6]。

2 放大器基本结构及其指标要求

在近地层紫外探测中，微弱的光信号更多地表现出粒子特性，并呈现通量的随机涨落，粒子性和随机性给系统带来的是与目标信号息息相关的离散信号^[7]。为了减小紫外光信号的粒子特性对探测系统的影响，文中采用电荷放大电路对一定时间范围内的微弱紫外光信号进行积分放大，以抵消光子通量涨落造成的影响。微弱信号放大处理基本流程图如图2所示。探测器接收到紫外光子信号，输出相

应的电荷脉冲，经电荷放大电路输出对应的脉冲电压信号，再经滤波整形及增益调整，最后输出相应的准高斯波形以供后续处理。

放大器的主要技术要求为：

- 1) 放大器输入等效噪声电压 $\leq 5 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ ；
- 2) 灵敏度 $ACQ \geq 10^{12} \text{ V/C}$ ；
- 3) 放大器的增益 $\geq 60 \text{ dB}$ ；
- 4) 放大器供电电压 $-12 \sim +12 \text{ V}$ ；

3 微弱信号放大器设计

文中针对紫外 APD 类光子探测器输出的微弱信号，按照微弱信号的处理流程以及各项指标要求设计适用于近地层紫外动态目标微弱信号处理的放大器。

3.1 电荷前置放大电路设计

前置放大电路的设计对整个放大器性能起决定性作用^[8]，前置放大电路性能优劣关系到整个紫外探测系统的成败，好的前置放大电路不仅可以提高近地层紫外探测系统的探测距离，而且能够确保探测精度。

前置放大电路基本电路如图3所示。它包括低噪声N沟道结型场效应管2N4416，以及低噪声运算放大器AD8615，APD通过电容C₁与放大电路输入端耦合，电容C₁起隔离直流作用，反馈电容C_f对APD产生的电荷脉冲进行积分转换，并以电压信号形式输出。电容C_f上电荷通过反馈电阻R_f释放。

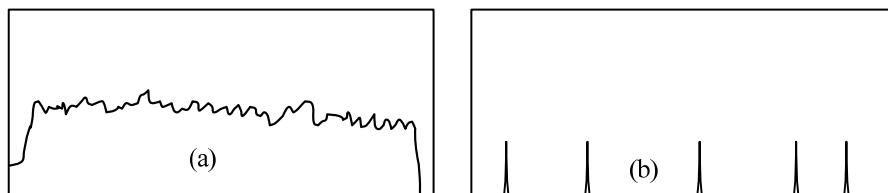


图1 强光与弱光信号 APD 输出比较

Fig.1 APD output of strong and weak light signal

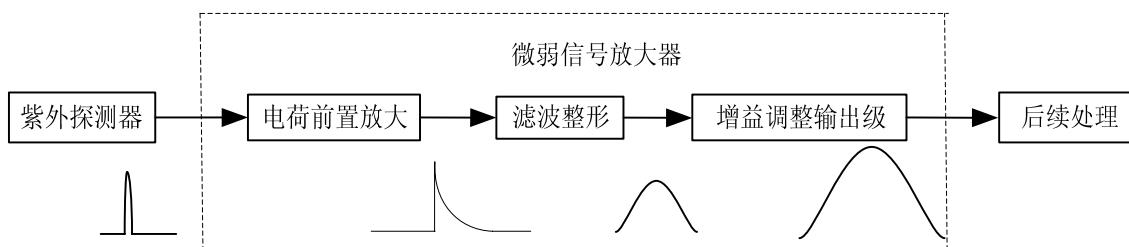


图2 微弱信号放大处理基本流程图

Fig.2 Basic flow chart of weak signal amplification

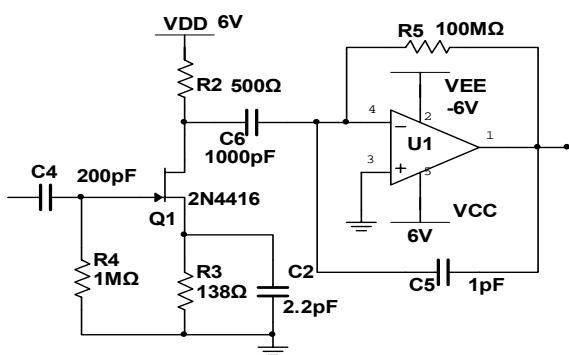


图3 电荷前置放大电路

Fig.3 Charge preamplifier circuit

前置放大电路的输出电压 V_{out} 可以表示为:

$$\begin{aligned} V_{\text{out}} &= -A_0 A_1 V_{\text{in}} \\ &= \frac{-A_0 A_1 Q}{C_i + (1 + A_1) C_f} \\ &\approx -A_0 \frac{Q}{C_f} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: V_{in} 为输入电压的幅度; A_0 、 A_1 分别为场效应管和运放的放大倍数; C_i 是输入电容(包括 APD 的结电容、放大器的输入电容以及引线的分布电容); C_f 为反馈电容, 由于 $(1 + A_1)C_f \gg C_i$, 所以 C_i 的变化对前置放大的影响可以忽略不计, 从而确保了前置放大器的输出电压有很好的稳定性。并且从(1)式中可知前置放大器的灵敏度 A_{CQ} 为 C_f 的倒数, C_f 越小, 电路灵敏度越高。取 $C_f = 1 \text{ pF}$, 那么 $A_{\text{CQ}} = 10^{12} \text{ V/C}$, 就能满足设计灵敏度要求。

3.2 整形滤波电路设计

探测器输出的电荷信号经过电荷前置放大电路后, 由于反馈回路释放电阻的存在, 输出信号波形呈指数衰减形状, 它的前端上升时间很短, 而后端下降时间较长, 这种信号不适合直接接入采集系统, 需要进一步处理。对于电荷灵敏前置放大级来说,

一般使用高斯整形放大电路对信号进行再处理^[9-10]。如图 4 所示, 整形放大电路由两部分组成, 分别为极零相消除电路和 S-K 低通滤波电路。

极零相消除电路的时间常数 $\tau = R_4 C_5$, 为达到极零相消除的目的, 使 τ 等于电荷放大电路中的积分时间常数。经过极零相消除处理的信号仍然不能直接采集, 仍需进一步改善信号波形。设计中采用两级运算放大器构成的 S-K 低通滤波电路对信号进行处理, S-K 低通滤波电路结构简单, 输入阻抗高, 输出阻抗低, 为得到较好的波形, 采用两级二阶 S-K 低通滤波电路。通过计算, 选取 $5R_6 = R_7$, $2C_6 = C_7$, 使得输出波形近似为准高斯波形。

3.3 增益调整输出级电路设计

为了满足设计增益需求, 且根据电路的实际用途, 当目标距离探测器较远时, 信号较弱, 电路输出也较弱, 当目标信号临近时, 信号逐渐变强。为了提高探测系统的精度, 输出级电路要拥有增益控制的能力, 其电路图如图 5 所示, 由 AD795 构成的同相放大电路, 通过调整 R_{13} 的阻值时, 达到控制放大器的输出幅值的功能。根据前级电路的输出幅值以及考虑后续采集电路对信号的要求, 将增益控制电路放大倍数设置在 1~10 之间连续可调, 使输出信号的幅值不会过大也不会过小。

4 电路仿真与结果分析

使用 Multisim11.0 对设计电路进行仿真。为了更好的模拟探测器的输出信号, 信号源根据 APD 紫外探测器的输入输出特性设定为一系列幅值和时间间隔随机变化的电流脉冲信号, 进行仿真测试。

放大器的整体仿真波形如图 6 所示, a 信号波形为 APD 探测器的输出电荷脉冲, b 信号波形为电荷前置放大电路的输出波形, c 信号波形为放大器输出端的输出波形。从图 6 中几个关键电路输出的

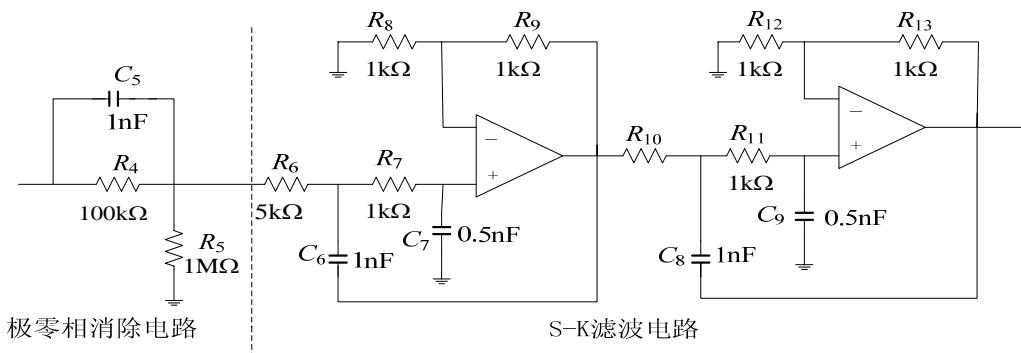


图4 整形放大基本电路图

Fig.4 Plastic and amplification basic circuit diagram

波形可知该放大器总体输出波形满足设计要求。根据各主要器件的数据参数表，在仿真分析中发现电路的供电电压在±6 V时，放大器的输出效果最好，因此将放大器的供电电压确定为±6 V。

放大器的频率响应如图7所示，图7中曲线a为增益调整输出级放大倍数为1的频率响应，图7中曲线b为增益调整输出级放大倍数为10的频率响应。从两图对比中可知，当增益调整输出级放大倍数从1调到10时，频率响应曲线大体变化不大，从图7中a、b曲线对比可以知道该微弱信号放大器的总体增益在60~80 dB连续可调，+3 dB带宽约为20 kHz，中心频率为10 kHz。基本达到指标要求。放大器的整体噪声功率密度曲线如图8所示，在放大器的带宽内，噪声密度在1 kHz处最大，为4.80 nV/Hz^{1/2}≤5 nV/Hz^{1/2}，符合设计要求。

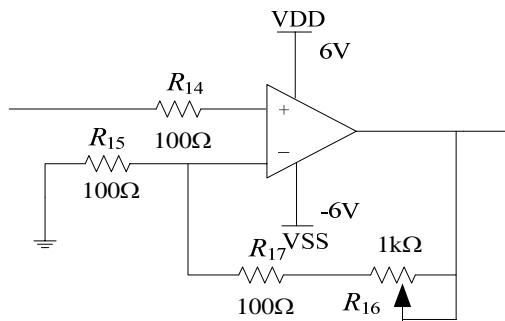


图5 增益调整电路
Fig.5 Gain control circuit

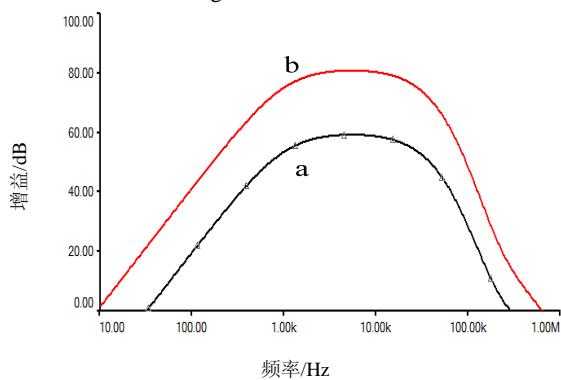


图7 放大器的频率响应
Fig.7 Frequency response of the amplifier

参考文献：

- [1] 吴晗平. 光电系统设计基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 胡绍华, 冷锋, 卢峰. 紫外告警技术综述[J]. 舰船电子对抗, 2005, 28(1): 12-15.
- [3] 周伟, 吴晗平, 吕照顺, 等. 空间紫外目标探测系统技术研究[J]. 现代防御技术, 2011, 39(6): 172-178.
- [4] 周伟, 吴晗平, 吴晶, 等. 紫外目标探测弱信号处理方法研究[J]. 红外技术, 2012, 34(9): 508-514.
- [5] 王忆峰, 余连杰, 马钰. 日盲单光子紫外探测器的发展[J]. 红外技术, 2011, 33(12): 715-720.

根据上述的仿真结果可知，该微弱信号放大器基本满足设计要求。

5 结束语

低噪声微弱信号放大器是近地层紫外探测技术的关键部分，是连接探测器与控制处理中心之间的桥梁。文章通过分析目标辐射和探测器输出特性，从电荷灵敏的角度出发，设计了近地层紫外动态目标微弱信号放大器。该微弱信号放大器不仅可实现对探测器输出的微弱信号进行放大，而且还能有效的抑制探测器的结电容和暗电流噪声，放大整形后可为后续信号采集电路提供准高斯脉冲波形。经适当调整，该微弱信号放大器也可适用于其他微弱光信号检测，具有一定的实用意义。

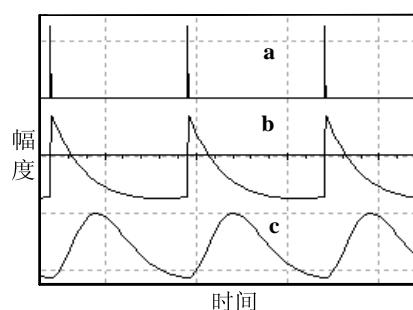


图6 波形仿真图
Fig.6 Waveform simulation diagram

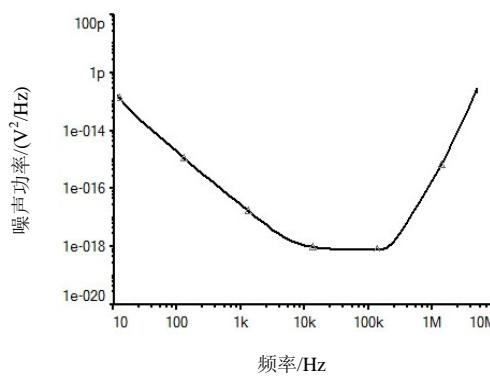


图8 放大器的整体噪声功率密度曲线
Fig.8 Noise power density curve of the amplifier

- [6] 寇松峰. APD 光子计数成像技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [7] 何玲平. 极紫外光子计数探测器成像特性研究[D]. 长春: 中国科学院, 2010.
- [8] 徐伟, 陈钱, 顾国华, 等. 用于APD激光探测的电荷灵敏前置放大器设计[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 27-30.
- [9] 蔡欣, 肖沙里, 张流强. 基于碲锌镉探测器脉冲整形电路设计[J]. 光电子技术, 2010, 30(1): 64-67.
- [10] 张兴华, 赵宝升, 缪震华, 等. 紫外单光子成像系统的研究[J]. 物理学报, 2008, 57(7): 4238-4243.