

文章编号: 1001-3806(2017)06-0881-05

## 星载激光雷达高灵敏信号探测的关键技术研究

武学英, 崔健永, 郑伟, 李辰, 郑永超

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 为了提高星载激光雷达探测灵敏度, 采用高增益放大电路设计了探测电路, 理论分析了探测概率、虚警率、信噪比等指标的制约关系, 对带宽、增益、阈值门限等参量进行优化设计, 并进行了实验验证。结果表明, 探测电路实现了灵敏度 9nW, 探测概率 95%, 虚警率  $10^{-5}$ , 相比国内同类产品有显著提高。这一结果对星载激光雷达的发展是有帮助的。

**关键词:** 光电子学; 灵敏度; 高增益放大; 星载; 激光; 阈值

**中图分类号:** TN958.98; TN247

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.06.023

### Key technology on high-sensitivity detection in spaceborne laser radars

WU Xueying, CUI Jianyong, ZHENG Wei, LI Chen, ZHENG Yongchao

(Beijing Institute of Space Mechanics &amp; Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to improve the detection sensitivity of a spaceborne lidar, high gain amplifier circuit was used to design the detection circuit. The relationships among detection probability, false alarm rate, signal-to-noise ratio and other indicators were analyzed theoretically. Bandwidth, gain, threshold and other parameters were optimized. Experimental verification was also carried out. The results show that the sensitivity of detection circuit is 9nW, the detection probability is 95%, and the false alarm probability is  $10^{-5}$ . Compared with the domestic similar products, the detection circuit has been significantly improved. The study is helpful for the development of spaceborne lidars.

**Key words:** optoelectronics; sensitivity; high gain amplifier; spaceborne; laser; threshold

### 引言

激光雷达在对地测绘、空间对抗、大气探测等领域发挥着重要作用, 是快速发展的新兴观测手段。目前制约我国星载激光雷达发展的技术环节主要体现在: 长寿命、高功率激光器的研制; 高灵敏度探测接收电路的研制等。空间平台的激光雷达系统中, 微弱信号探测电路是系统的核心功能单元。激光高灵敏度信号探测技术, 可有效缓解激光器发射功率、大口径发射/接收光学系统的压力, 提高系统的探测概率和可靠性等性能指标<sup>[1-4]</sup>。

由于星载激光雷达作用距离远, 回波能量微弱, 需要高增益电路进行小信号放大, 然后才可识别和处理, 因此电路增益是探测接收电路的重要参量之一。此外, 由于背景光辐射噪声, 探测器噪声和放大电路噪声等各种噪声的影响, 微弱回波信号极易被噪声淹没, 因此在微弱信号放大的同时有效地抑制噪声, 才能提高

电路输出信噪比, 在保证探测概率的前提下降低接收系统的虚警率, 满足系统应用指标需求。

本文中结合激光雷达方程的理论分析和工程实践, 基于关键技术, 研究了探测电路增益、带宽、阈值电压等参量的设计方法, 并进行了降噪声抗干扰设计, 最后进行了联调测试及分析。

### 1 应用背景和任务要求

本单元应用于某卫星的激光雷达系统, 探测目标为远距离的空间飞行目标, 最小照射截面面积为  $1\text{m}^2$ 。其激光器为激光二极管 (laser diode, LD) 抽运的全固态脉冲激光光源, 激光工作波长  $1.064\mu\text{m}$ , 采用脉冲工作体制。

据点目标激光雷达方程, 目标回波信号的光功率为<sup>[5]</sup>:

$$P_r = \frac{\tau_a^2 \eta_r \rho_t P_t A_t A_r \cos\theta}{\pi \Omega_s R^4} \quad (1)$$

式中,  $\tau_a$  为激光在大气中的单程透射率,  $\eta_r$  为光学系统的效率,  $\rho_t$  为目标的反射率,  $P_t$  为发射机输出的激光功率,  $A_t$  为垂直于光束的目标被照面积,  $A_r$  为光学系统的有效接收面积,  $\theta$  为发射机的发射光学系统光

作者简介: 武学英 (1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为激光光电探测。

E-mail: xiaowu8653@163.com

收稿日期: 2016-12-15; 收到修改稿日期: 2017-04-13

轴与目标法向的夹角,  $\Omega_r$  为发射机输出的激光光束的立体角,  $R$  为目标与激光雷达的距离。

根据(1)式推算,当  $R = 80\text{km}$  时,目标回波信号的最小光功率为  $P_r = 9\text{nW}$ ,此即系统中探测接收电路的灵敏度要求;另外,还要保证探测概率不小于 95%、虚警概率不大于  $10^{-5}$ 。针对要实现的功能和输入信号特征分析,回波小信号探测电路的设计,关键技术包含 3 个方面:(1)光电探测器的选型。为满足对纳秒宽度的微弱激光信号的快速响应的要求,应选择符合光谱灵敏度、频率灵敏度、等效噪声功率以及可靠性等性能的探测器;(2)多级放大电路的设计。为满足高灵敏度响应要求,设计高增益的多级放大电路,以及合理的带宽参量;为抑制电路噪声,将印制电路板 (printed circuit board, PCB) 合理布局布线,降低噪声,提高信噪比;(3)阈值判断。为满足高探测概率以及低虚警率要求,根据信号特点以及电路参量,设计合适的阈值判断电路。

根据上述分析,作者设计了回波信号的探测接收电路,原理框图如图 1 所示。光电探测器将接收到的微弱光脉冲信号进行光电转换,输出具有一定幅度的电流脉冲,电流脉冲经匹配前置放大器后转换为电压,经同轴电缆传输到主放大电路进行多级放大以及阈值判断<sup>[6-8]</sup>。

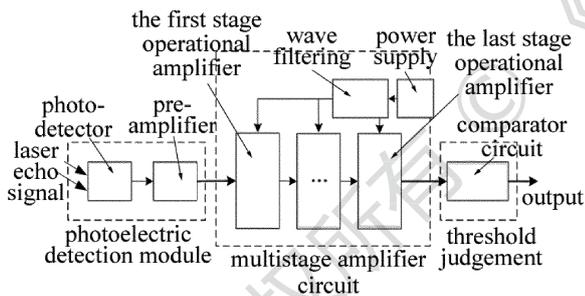


Fig. 1 Principle block diagram of the detecting and receiving circuit

## 2 高灵敏探测的关键技术分析

### 2.1 光电探测组件

本系统采用脉冲激光的直接探测体制,信号极其微弱,应综合考虑光谱灵敏度、频率灵敏度、等效噪声功率以及可靠性等因素。硅雪崩光电二极管 (avalanche photodiode, APD) 组件能够符合本项目指标要求<sup>[9-10]</sup>。

(1)光谱灵敏度:  $1.064\mu\text{m}$  波长激光在该探测器的光谱响应带内,且响应度  $R_e = 200\text{kV/W}$  较高。若目标回波信号的功率为  $P_r = 9\text{nW}$ ,则 APD 输出为  $P_r \times R_e = 1.8\text{mV}$ ,配合后端的高增益放大电路,能够输出满足要求幅度的信号,详见下面第 2.2.1 节中分析。

(2)频率灵敏度: APD 截止响应频率为  $200\text{MHz}$ 。因回波信号的脉冲宽度为  $7\text{ns} \sim 10\text{ns}$ ,探测电路带宽要求  $36\text{MHz}$ ,详见下面第 2.2.2 节中分析。APD 的响应带宽应覆盖电路要求的带宽指标,显然能够满足要求。

(3)等效噪声功率:  $P_{\text{NEP}} = 100\text{fW/Hz}^{1/2}$ ,等效噪声功率小,探测微弱信号的能力强,理论上具有  $1.414\text{nW}@200\text{MHz}$  的能力。

(4)可靠性:抗辐照总剂量  $50\text{krad}(\text{Si})$ ,能够满足星载平台宇航设备的空间抗辐照指标的要求,可靠性高。

### 2.2 多级放大电路<sup>[11-16]</sup>

2.2.1 增益 当回波信号峰值功率  $P_r = 9\text{nW}$  时,工作在最佳信噪比条件下 APD 组件的响应度  $R_e = 200\text{kV/W}$ ,因此,APD 组件输出回波电压为:

$$V_s = P_r \times R_e = 1.8\text{mV} \quad (2)$$

由(2)式,回波信号峰值功率为  $9\text{nW}$  时,APD 探测组件输出信号脉冲幅度为  $1.8\text{mV}$ ,需经过多级放大电路放大为伏特量级,方便后端电路直接识别和处理。即多级放大电路输入  $V_{\text{in}} = V_s = 1.8\text{mV}$ ,若放大电路输出信号幅度要达到  $V_{\text{out}} = 1.8\text{V}$ ,则回波信道增益为:

$$G_a = V_{\text{out}}/V_{\text{in}} = 60\text{dB} \quad (3)$$

因电路增益较大,拟选择 3 级放大电路对信号进行放大,每级的增益均为  $20\text{dB}$ 。

2.2.2 带宽 根据不同的回波脉冲特性,放大电路需设置不同的带宽。

利用傅里叶定理推导可得,放大电路的带宽和回波脉冲的上升时间之间有一个经验公式,上升时间越短,电路的带宽需设置得越大,详细可见参考文献 [11],本文中不展开论述。实际应用中,为了提高作用距离,满足测距精度,使得接收机获得最大的信噪比,尽量选择较窄的带宽,对于直接探测体制,带宽一般按下式选取:

$$B_{-3\text{dB}} = 0.25/\tau \quad (4)$$

式中,  $\tau$  是回波脉冲的宽度,为  $7\text{ns} \sim 10\text{ns}$ 。

脉冲的宽度  $\tau = 7\text{ns}$  时,放大电路的带宽  $B_{-3\text{dB}}$  需为  $36\text{MHz}$ ;脉冲的宽度  $\tau = 10\text{ns}$  时,放大电路的带宽  $B_{-3\text{dB}}$  需为  $25\text{MHz}$ 。

本文中放大电路的带宽  $B_{-3\text{dB}}$  设置为  $36\text{MHz}$ 。

2.2.3 各级放大电路的设计 由于回波信号具有脉冲窄、能量微弱等特点,根据回波信号的特点,放大电路的设计必须满足高增益、宽带宽和低噪声等要求,因此选用超低噪声高频运算放大器,增益  $G = 20\text{dB}$  时带宽约为  $60\text{MHz}$ ,高于系统带宽要求  $36\text{MHz}$ 。电压噪声尽可能低,一般应为几个  $\text{nV/Hz}^{1/2}$ 。其次,运算放大器还应能够适应空间环境的应用要求,具有高的质量等

级以及抗辐照总剂量指标。

回波信号三级放大电路原理图如图2所示。其中,每级运放的增益由本级反馈电阻和反向输入端电

阻的比值确定,级联总增益为各级增益之和。为了尽可能抑制噪声及反向过冲,在两级运放之间加入超低噪声系数晶体三极管,构成射级跟随器。

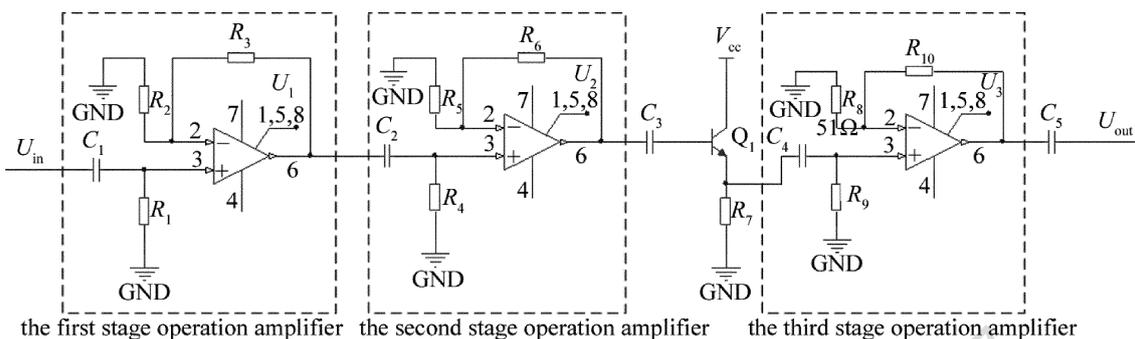


Fig. 2 The principle diagram of the main amplifier circuit for the echo signal

2.2.4 PCB的综合噪声抑制设计 根据回波信号的特点,为实现高信噪比输出,PCB布线应注意以下几点。

(1)电源线、地线等印制导线在印制板上排列要恰当,尽量做到短而直,减小信号线与回线之间所形成的环路面积。采取由一个电感器和两个电容器组成的π型滤波器作为滤波措施,并选用阻容与感容的去耦网络将电源与电路进行隔离,以减少电路间的耦合现象,从而防止电路中侵入干扰信号。

(2)电源线、地线等印制导线对高频信号应保持低阻抗。在频率很高的情况下,电源线、地线或信号导线都会成为接收与发射干扰的小天线。降低这种干扰的方法除了加滤波电容外,更值得重视的是减小其高频阻抗。

(3)信号层的地线布设不要出现孤岛现象。各级放大电路信号层的地线布设去耦接地过孔等措施。旁路去耦和优化地线布设可以抑制电路辐射噪声,这是因为这些措施为电磁能量提供更好的路径,减小辐射的电路结构,降低辐射干扰,同时减小了受害导体的回路面积。

(4)抑制电路辐射噪声,除了减小辐射的电路结构,电路中还要避免不必要的高次谐波,如减小信号失真,防止电路自激振荡等。

经过综合噪声抑制技术,本文中研制的多级放大电路噪声下降到原值的1/2,目前约为100mV,信噪比高于8。

### 2.3 阈值判断

2.3.1 阈值判断电路的设计 阈值判断电路采用高速电压比较器,电路原理图如图3所示。该电路比较“+”输入端与“-”输入端两个电压的大小,其中“+”输入端 $V_{in}$ 为多级放大电路输出的模拟脉冲信号,“-”输入端 $V_{th}$ 为阈值电压。当 $V_{in}$ 电压高于 $V_{th}$ 时,电

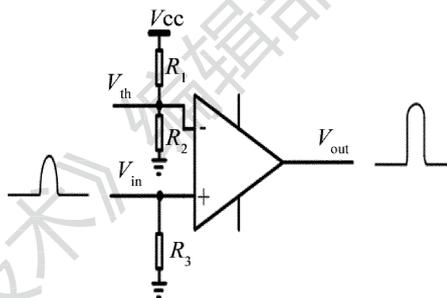


Fig. 3 Threshold judging circuit

压比较器输出 $V_{out}$ 为高电平;当 $V_{in}$ 电压低于 $V_{th}$ 时,电压比较器输出 $V_{out}$ 为低电平。

阈值电压 $V_{th}$ 的设计详见下一节。

2.3.2 阈值的设计 虚警概率指无目标回波信号时,将噪声判断为目标信号的概率,可用下式表示:

$$p_{FA} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{R_{TNR}}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (5)$$

式中, $R_{TNR}$ 为阈值噪声比,即阈值电压 $V_{th}$ 与噪声均方根的比值。高斯误差函数可表示为:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy \quad (6)$$

探测概率指有目标回波信号时,正确判断到目标的概率,表示为:

$$p_d = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{R_{SNR} - R_{TNR}}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (7)$$

式中, $R_{SNR}$ 为信噪比。据(5)式~(7)式, $p_{FA}$ 与 $R_{TNR}$ , $p_d$ 与 $R_{TNR}$ 及 $R_{SNR}$ 的关系分别如图4、图5所示。

由图4可知,若要保证虚警率 $p_{FA} < 10^{-5}$ ,需满足阈值噪声比 $R_{TNR} > 4.3$ ;由图5可知,当阈值噪声比 $R_{TNR} = 5$ 时,要满足探测概率 $p_d > 95\%$ ,系统输出信噪比不得低于6.7。综上分析,只有当放大电路的噪声系数足够小,探测接收电路的输出信噪比满足要求,且阈值电压的设置符合条件时,系统的虚警率以及探测概率等指标才能实现。

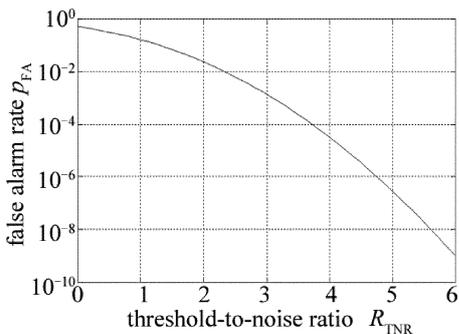


Fig. 4 Relationship between false alarm rate and threshold-to-noise ratio

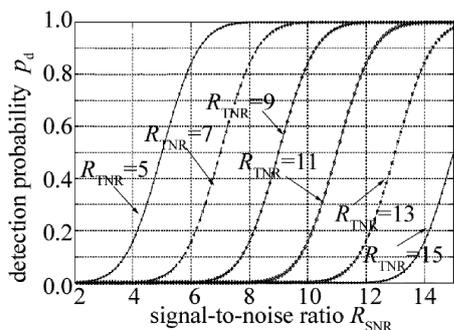


Fig. 5 Relationship between detection probability and signal-to-noise ratio with different threshold-to-noise ratio

根据仿真结果, 阈值判断电路中, 阈值噪声比  $R_{TNR}$  设置为 5。由第 2.2 节中的分析可知, 电路实现的信噪比大于 8, 因此可以满足探测概率  $p_d > 95\%$ , 虚警率  $p_{FA} < 10^{-5}$ 。

图 6 所示为不同阈噪比  $R_{TNR}$  条件下, 监测探测电路的输出信号波形。  $R_{TNR}$  为 6~8 时, 未出现虚警误判的情况, 但阈值逐渐升高时, 丢失信号的概率会随之增加, 即探测概率  $p_d$  降低, 分别约为 95%, 87%, 70%, 这

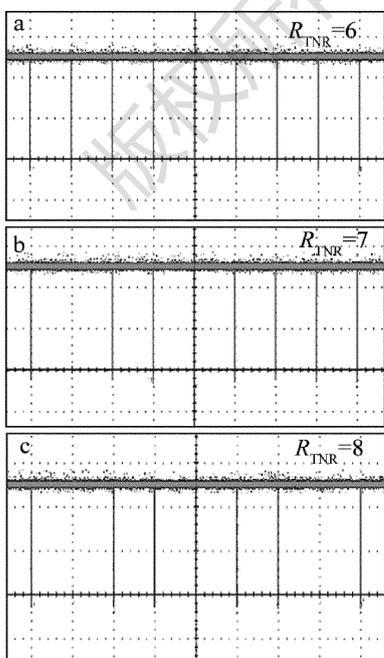


Fig. 6 Output signals when different threshold-to-noise ratio

也验证了图 4 和图 5 的仿真结果。

### 3 设计结果

本文中采用可调功率的 LD 模拟光源, 模拟激光回波信号, 波长  $1.064\mu\text{m}$ , 脉冲宽度 10ns, 通过调节, 可使到达 APD 光敏面的功率为 9nW, 误差不超过 10%, 输出信号如图 7 所示。其中左曲线为输出信号的时域波形, 右曲线为输出信号的频谱分析。由图中可见, 放大后的信号幅度 1.82V, 脉宽 10ns, 因此, 多级放大电路的增益约为 60dB ( $1.82\text{V}/1.8\text{mV}$ )。由图中频谱曲线可见, 带宽约 40MHz。因此, 验证了放大电路的增益和带宽能够满足设计要求。因此, 本文中的电路的探测灵敏度达到 9nW,  $R_{SNR} > 8$ ,  $R_{TNR} = 5$ , 虚警率  $p_{FA} < 10^{-5}$ , 探测概率  $p_d > 95\%$ , 能够满足系统对探测电路的指标要求, 并通过了各项环境试验和外场测试。

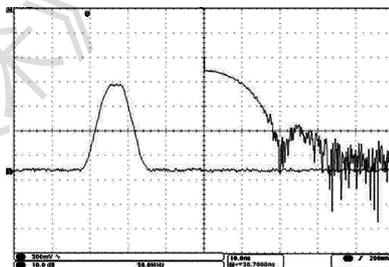


Fig. 7 Output signal waveform and spectrum analysis

### 4 结论

本文中采用 APD 为回波信号探测器, 设计了三级放大电路, 结合电路设计的关键技术, 分析了电路的带宽、增益、阈值门限等参量, 并进行相应设计。应用噪声综合抑制技术, 降低了电路的噪声。提高了灵敏度指标, 实现了高探测概率、低虚警率、高灵敏度探测指标, 为卫星激光探测系统远距离探测任务起到了关键支撑作用。

#### 参考文献

- [1] YAN F J, ZHENG Y Ch, TAO Y L. Analysis and development prospect of laser technology in spaceborne laser ranging system [J]. Space Return and Remote Rensing, 2012, 33 (4): 70-77 (in Chinese).
- [2] ZHANG B, ZHOU G Q, ZHOU X, et al. Design of multi-channel ranging system for lidar [J]. Laser Technology, 2016, 40 (4): 576-581 (in Chinese).
- [3] LUO H J, ZHOU R L, ZHANG Y T. Theoretical analysis of detection performance and range accuracy of photon lidar [J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 411-416 (in Chinese).
- [4] GUO Sh Y, HU X, YAN Zh A, et al. Research development of space-borne lidar in foreign countries [J]. Laser Technology, 2016, 40(5): 772-778 (in Chinese).
- [5] XIONG H F. Laser lidar [M]. Beijing: Beijing Astronautic Press,

- 1994;17-29(in Chinese).
- [6] SHANG H B. Study on noise characteristics for the receiving system of the laser lidar [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2008;73-78 (in Chinese).
- [7] LI H S, LI Zh Q, WANG Zh G. Design of CMOS low-noise amplifier with broad band and linear variable gain [J]. Electronics & Packaging, 2007, 7(10): 21-24(in Chinese)
- [8] DEAN BANEQEE PUBLICATION. PLL performance simulation and design [M]. 3rd ed. Austin, USA: Nation Products from Texas Instruments, 2003;58-71.
- [9] AN Y Y, ZENG X D. Optoelectronic detection principle [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2004; 13-21 (in Chinese).
- [10] WANG X, ZHANG Y K. Accurate measurement technique for the laser detecting sensitivity [J]. Photoelectric Technology Application, 2013, 28(5): 78-80 (in Chinese).
- [11] TONG Sh B, HUA Ch Y. Analog electronic technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 1980;78-91 (in Chinese)
- [12] FAN B S. Research on the signal receiving circuit for the laser radar [D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2008;31-40 (in Chinese).
- [13] CHEN D R, ZOU Ch. The laser echo signal detection circuit system based on APD [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2002, 28(2): 16-18 (in Chinese).
- [14] CHEN D R, JIANG H L, YIN F Ch. Realtime noise compensation for APD detection technology [J]. Chinese Journal of Ordnance Engineering, 1999, 20(2): 127-131 (in Chinese).
- [15] ZHANG Sh R. Analysis and design of the optimal signal to noise ratio detection circuit for the laser range finder [J]. Laser Technology, 1980, 4(3): 11-15 (in Chinese).
- [16] GENG T Q, NIU Y X, ZHANG Y, *et al.* Analysis on the detection ability of the laser active detection system [J]. Laser Technology, 2015, 39(6): 829-833 (in Chinese).