

文章编号: 1001-3806(2012)03-0326-04

脉冲激光引信光电转换系统的设计

赵忠伟, 张玉钧, 沈超

(电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 为了应对脉冲激光引信回波信号弱、脉宽窄的特性, 获得目标尽量多的不失真信息, 对光电探测器的特性和放大电路的带宽进行了分析, 设计了一套实用的光电转换系统, 包括 PIN 探测电路、前置放大电路和主放大电路。经过 TINA 和 MULTISIM 软件模拟仿真和实验验证, 设计的光电转换系统的带宽为 61.089MHz, 增益为 72.14dB。结果表明, 该系统对于脉宽为十几纳秒的回波脉冲信号进行了很好的低噪声、不失真放大, 满足了设计要求, 回波信号经光电转换系统后输出的信号与应用需要相匹配, 为激光引信的后续信号处理提供了稳定可靠的信号。

关键词: 光电子学; 激光引信; 光电转换系统; 前置放大电路; 主放大电路

中图分类号: TJ43⁺9.2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.010

Design of a photoelectric conversion system for pulse laser fuze

ZHAO Zhong-wei, ZHANG Yu-jun, SHEN Chao

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: For responding to the weak signal and narrow pulse width feature of echo signals in pulse laser fuze and getting enough no distortion information of objectives, the feature of photodiode detector and the bandwidth of amplifier circuit were analyzed, and then an practical photoelectric conversion system was designed, including the PIN detector circuit, pre-amplifier circuit and main amplifier circuit. Through the actual experiments and simulation with the TINA and MULTISIM softwares, the bandwidth was 61.089MHz and the gain was 72.14dB. The result shows that the echo signal with pulse width more than 10ns was amplified with low noise and no distortion, which meets the designed requirements. The processed signals match the need of the following control system.

Key words: optoelectronics; laser fuze; photoelectric conversion system; pre-amplifier circuit; main amplifier circuit

引言

随着激光引信技术研究的深入和窄激光发射技术的发展, 激光引信采用的发射信号的脉宽逐渐减小, 频谱则越来越宽, 携带的目标信息也更丰富, 同时也要求激光引信接收系统具有很高的工作带宽^[1-2]。由于目标种类和交会状态千差万别, 目标回波信号幅度变化动态范围非常大, 为了获得足够的系统灵敏度和目标尽量多的不失真信息, 激光引信接收机必须能够响应微弱的信号, 并对其有足够的增益^[3-5]。而这一切都首先取决于激光引信的光电转换系统。因此, 光电转换系统的设计是激光引信接收机的重要部分。

本文中针对激光引信回波信号弱、脉宽窄的特性, 设计了光电转换系统, 包括探测器、前置放大电路和主放大电路 3 部分, 很好地解决了激光引信接收机前端

弱信号处理问题, 实现了信号的低噪声宽带放大, 极大地方便了后续的逻辑电路进一步处理。

1 光电探测器

激光引信中采用的探测器主要分为 PIN 光电二极管和雪崩光电二极管(avalanche photo diode, APD)两种。APD 探测器需要很高的反向偏置电压, 而且往往需要根据环境温度调整探测器的偏压, 所以电路较为复杂, 一般不适用于体积受限的空空导弹引信^[6-8]。因此, 在本设计中选择使用 PIN 探测器, 其探测电路如图 1 所示。

探测器工作在光导模式^[9], 在该模式下光电流的大小与负载无关, 且光电流正比于光辐射强度, 此时图 1 电路的等效电路如图 2 所示。图 2 中, R_1 为探测器负载电阻; R_j 为探测器结电阻; R_s 为探测器串联电阻; C_j 为探测器结电容; I_p 为光照产生的光电流, 等效为电流源; C 为耦合电容, 高频时可以忽略; R_{in} 为前放输入电阻; C_{in} 为前放输入电容。

由于 $R_j \geq R_1 \geq R_s$, 所以探测器电路的截止频率近

作者简介: 赵忠伟(1986-), 男, 硕士, 主要研究方向为光电子信息处理技术。

E-mail: zzw-6497358@163.com

收稿日期: 2011-08-22; 收到修改稿日期: 2011-09-27

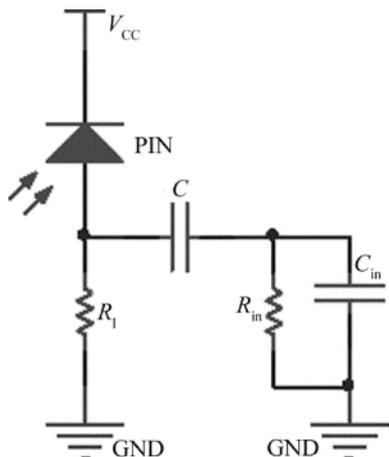


Fig. 1 PIN photodiode detector circuit

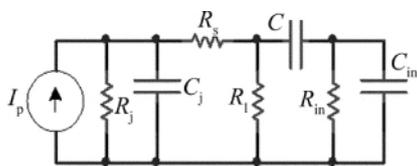


Fig. 2 Equivalent circuit of PIN detector circuit

似计算为:
$$f = \frac{1}{2\pi(R_1 // R_{in})(C_{in} + C_j)} \quad (1)$$

$$C_j = \frac{A}{[(V_r + 0.5)\rho]^\alpha} \quad (2)$$

式中 A 为光敏面面积, V_r 为反向偏置电压, ρ 为基底电阻系数, α 为固定系数, 一般取值 $0.33 \sim 0.5$ 。

由(1)式、(2)式可以看出, 要获得足够大的截止频率, 应选用较小的光敏面积、较大的基底电阻系数的 PIN 二极管。为了不失真地响应脉宽为纳秒级的回波信号, 本文中选用型号为 S5973-01 的 PIN 二极管, 其带宽为 1.5GHz 。

2 放大电路设计

2.1 放大电路的带宽分析

放大电路包括前置放大电路和主放大电路两部分, 主要对探测器输出的弱信号进行低噪声宽带放大, 能不失真地响应信号波形的前沿及脉宽^[10]。因此, 带宽 B_w 是放大电路性能优劣的重要指标之一, 本设计中以包含信号 90% 能量的带宽作为 B_w 。

通常认为激光引信回波脉冲信号为钟形信号, 如图 3 所示, 其数学表达式为:

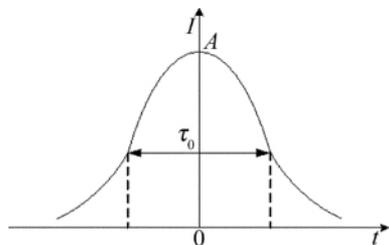


Fig. 3 Bell echo pulse signal

$$I(t) = Ae^{-\beta^2 t^2} \quad (3)$$

式中 A 为脉冲峰值, $\beta = 1.66/\tau_0$, τ_0 为脉冲宽度。其频谱为:

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{A\sqrt{\pi}}{\beta} \times \exp[-\omega^2/(4\beta^2)] \quad (4)$$

式中 ω 为角频率。激光脉冲能量 E 为:

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |I(\omega)|^2 d\omega = \frac{A^2}{\beta} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (5)$$

包含信号 90% 能量 $E(\Delta\omega)$ 为:

$$E(\Delta\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\Delta\omega}^{\Delta\omega} |I(\omega)|^2 d\omega = 0.9E \quad (6)$$

式中 $\Delta\omega$ 为包含信号 90% 能量时角频率宽度的一半, 即半角频宽。由(4)式、(5)式可得 $\Delta\omega = \frac{2.8}{\tau_0}$, 即得放大电路的带宽为:

$$B_w = \frac{2 \cdot \Delta\omega}{2\pi} = \frac{0.89}{\tau_0} \quad (7)$$

在本设计中脉冲宽度定义为幅值的一半处的宽度, 假定激光近炸引信回波脉宽为 $\tau_0 = 15\text{ns}$, 由(7)式可得带宽为 59.33MHz 。

2.2 电路设计

在常见的放大电路的设计中, 通常采用集成运算放大器^[11], 但考虑到光电探测器的应用场合和对带宽等特殊要求, 本文中设计了采用双极晶体管型的跨阻式前置放大电路和集成运算放大器级联构成的主放大电路。

2.2.1 前置放大电路设计 在前放电路中, 晶体管按共集、共射依次组合, 共射极输出反馈进入第 1 级共集电极电路的基极, 形成跨阻。其中 Q_1 和 Q_2 采用特征频率为 5GHz 的 NPN 型三极管 BFR92。电路原理图如图 4 所示。 Q_1 接成共集电极模式, 用来实现电流放大与电阻的匹配; Q_2 接成共射级模式, 一方面用来提供所需的电压增益, 另一方面充分利用反馈电阻提供输入信号的反相输出; C_1 和 C_3 是耦合电容, 用来隔离输入、输出与电路直流的关系, 同时能够使信号顺利输入和输出, C_2 为旁路电流, R_3 和 R_5 的作用是给三极管提

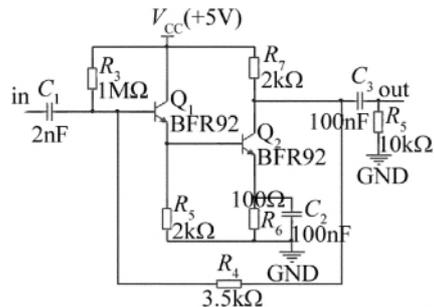


Fig. 4 Pre-amplifier diagram

供合适的基极偏置电压,使发射结正偏,提供合适的静态工作点。 R_7 的作用是将变化的电流信号转化为变化的电压信号。 R_6 是级内反馈电阻,为 Q_2 组成的放大电路提供直流负反馈。 R_4 为反馈电阻,是连接整个前置放大的输入和输出之间的反馈网络,使整个电路形成一个电压并联负反馈,达到稳定输出电压的作用,同时 R_4 也是整个电路的一个关键电阻, R_4 增大会使输出电压的放大倍数增大,但当 R_4 过大又会导致系统带宽变窄,使系统失真,一般 $R_4 < 10k\Omega$,在此选用 $3.3k\Omega$ 的阻值。

在TINA软件下进行模拟仿真,当输入信号为带宽15ns、幅值1mV的钟形信号时,经前置放大后,输出信号脉宽为18.21ns,幅值为-19.84mV,反相放大增益为25.96dB。输入输出信号波形如图5所示, i_{in} 为输入信号, i_{out} 为输出信号。进行实物实验得到前置放大电路的输出信号如图6所示,从中可以看出,信号的脉宽为20.64ns,幅度为17.5mV左右,实际增益为24.86dB,与仿真结果近似。

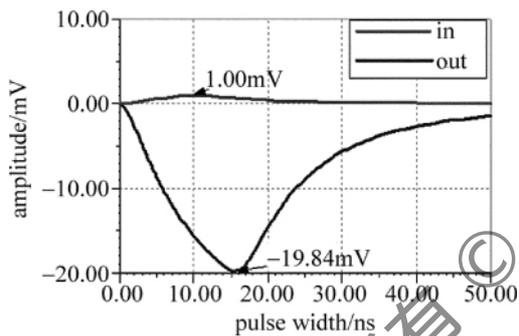


Fig. 5 Simulation of pre-amplifier circuit

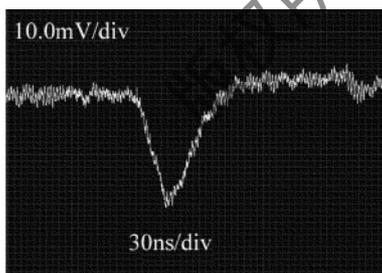


Fig. 6 Experiment of pre-amplifier circuit

为了确保输出信号不失真,前置放大电路带宽要大于59.33MHz,通过MULTISIM软件仿真,利用波特图仪测量前置放大电路的幅频特性,当输入为60MHz和1mV的正弦信号时,得到电路的幅频响应曲线,如图7所示,图7a、图7b和图7c分别为前置放大电路的下限频率、中频频率和上限频率的波特图,由仿真结果可知,电路的通频带为736.475kHz~61.825MHz,带宽为61.825MHz-736.475kHz \approx 61.089MHz,设计结果略大于59.33MHz,既满足了信号放大不失真又避免了带宽太大而增加噪声。

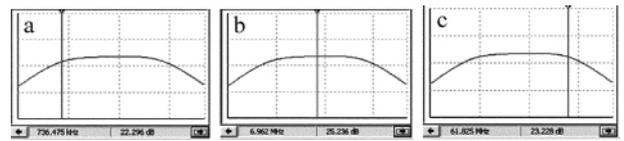


Fig. 7 Amplitude-frequency response curve of pre-amplifier circuit
a—lower limit frequency b—intermediate frequency c—upper limit frequency

2.2.2 主放大电路设计 前置放大器实现了光电转换和阻抗匹配变换,但由于后续信号处理电路的输入电平门槛较高,因此还需对前置放大器输出的弱脉冲信号进行放大。本文中设计了由增益带宽积为1.6GHz的集成运算放大器OPA657构成的两级级联放大电路,如图8所示,第1级为反相放大,第2级为同相放大, C_8 用来滤除直流信号。

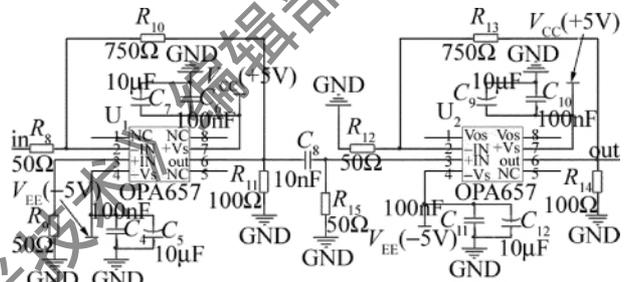


Fig. 8 Main amplifier circuit diagram

由电路图可知第1级反相放大增益为: $A_1 = R_{10}/R_8 = 750/50 = 15 = 23.52\text{dB}$;第2级正相放大增益为: $A_2 = 1 + R_{13}/R_{12} = 1 + 750/50 = 16 = 24.08\text{dB}$,总的增益为47.6dB。在TINA环境下仿真,得到第1级放大和第2级放大仿真图,如图9和图10所示, i_{in} 为输入, i_{out} 为输出。第1级放大的输入为前置放大的输出信号,第2级放大的输入为第1级放大的输出信号。

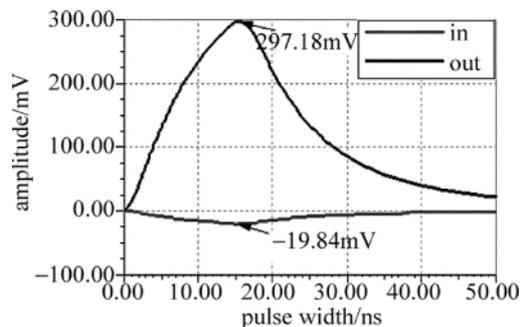


Fig. 9 Simulation of the first amplifier circuit

由图9和图10可知,经主放大电路后,输出信号达到4.75V,增益为47.58dB,仿真结果与理论计算值基本吻合。由MULTISIM仿真得到主放大电路的幅频响应曲线如图11所示,可知主放大电路的带宽为69.581MHz,保证了信号不失真。经实物实验,当输入为前放实际输出的信号时,得到主放大电路的输出信号如图12所示,从图中看出,输出脉冲信号脉宽为

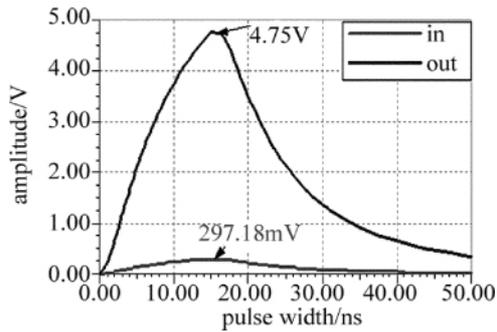


Fig. 10 Simulation of the second amplifier circuit

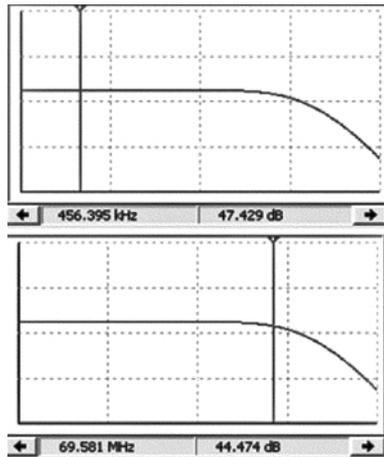


Fig. 11 Amplitude-frequency response curve of main amplifier circuit

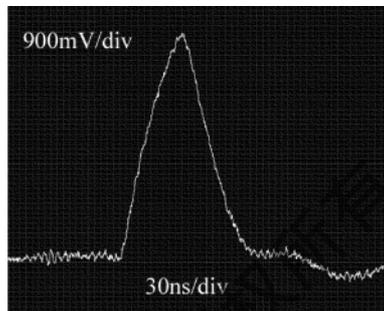


Fig. 12 Experiment of the main amplifier circuit

31.4ns 幅值为 4.05V 左右,实际增益为 47.28dB,比仿真结果略小,但满足实际需要。

3 结论

根据脉冲激光引信回波特性和引信的使用要求,

本文中针对脉宽为 15ns 的弱回波信号,设计了激光引信接收机中的光电转换系统,包括以 PIN 光电二极管为探测器的探测电路、前置放大电路和主放大电路。经实际测试,测得整个系统的带宽为 61.089MHz,增益为 72.14dB,对于脉宽为十几纳秒的回波脉冲信号进行了很好的低噪声、不失真放大,极大地方便了激光引信接收系统中后续信号的处理。

参考文献

- [1] LIU J J, von der LIPPE C M. Advanced high-bandwidth optical fuzing technology [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 6017: 60170F1-60170F7.
- [2] LIU P, LI P, CHEN H M. Research on improving measurement precision of pulse laser fuse [J]. Laser Journal, 2010, 31(1): 14-16 (in Chinese).
- [3] STEPHEN B A. Optical communication receiver design [M]. Washington: SPIE, 1997: 254-286.
- [4] JI T G, ZHANG H, CHEN B L. The research of improving the precision for phase laser proximity fuze [J]. Laser Journal, 2004, 25(6): 11-12 (in Chinese).
- [5] WANG Ch Y, XIE J, BIAN B M, et al. Optimum signal threshold ratio for improving the ranging accuracy of lidar [J]. Laser Technology, 2007, 31(4): 408-411 (in Chinese).
- [6] LI Zh, DENG J H, ZHANG Y, et al. Design of the underwater laser fuze receiver system based on APD [J]. Laser and Infrared, 2009, 39(7): 753-756 (in Chinese).
- [7] YOUNG S K, IN S J, KWANG H K, et al. Design and characterization of CMOS avalanche photodiode with charge sensitive preamplifier [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(3): 1376-1380.
- [8] HAMRITA H, RAULY E, BLUMENFELD Y, et al. Charge and current-sensitive preamplifier for pulse shape discrimination techniques with silicon detectors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2004, A531(3): 607-615.
- [9] ZHAO Y, ZHANG Y. Theory and technology of photoelectric signal detection [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005: 81-82 (in Chinese).
- [10] MENG L, YU L L, PU Y Q, et al. Design of amplifying circuit for tiny signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1012-1013 (in Chinese).
- [11] LI Ch Q, MEI X L, MING Q. Implementation of weak optical signal detection circuit [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(5): 724-727 (in Chinese).

(上接第 314 页)

970 (in Chinese).

- [7] SONG Q M, HUANG F, LI M, et al. Graded refractive-index SiO_x infrared rugate filter prepared by reactive magnereon sputtering [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 2144-2149 (in Chinese).
- [8] DENG H X, ZU X T, ZHENG W G, et al. Gradient optical film taking the place of classical high-reflectivity film [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(1): 58-62 (in Chinese).

- [9] NI X W, LU J, HE A Zh, et al. Study of damage mechanism of optical dielectric film by high power laser [J]. Laser Technology, 1994, 18(6): 348-351 (in Chinese).
- [10] QIN J L, YI K, SHAO J D, et al. Soft X-ray reflectivity of periodic graded-index multilayers [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(8): 1191-1193 (in Chinese).