文章编号:1001-5078(2009)07-0753-04

光电技术与系统。

基于 APD 的水下激光引信接收系统仿真设计

李 哲^{1,2},邓甲昊²,张 毅²,卜 方² (1.海军装备研究院,北京 100161; 2.北京理工大学,北京 100081)

摘 要:讨论了基于 APD 探测器的水下激光引信接收系统设计。主要研究 APD 的探测特性, 设计接收系统的偏置电路、温度补偿电路、探测器放大电路,并对仿真结果进行分析。 关键词:雪崩光电二极管(APD);水下激光引信;接收系统

中图分类号:TN312⁺.7 文献标识码:B

Design of the underwater laser fuze receiver system based on APD

LI Zhe^{1,2}, DENG Jia-hao², ZHANG Yi², BU Fang²

(1. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China; 2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper discusses design of the underwater laser fuze receiver system based on APD. Detection characteristices of APD are researched, and in this paper a few circuits of the receiver system are designed such as bias circuit, temperature compensation circuit and detector amplifier. In the end, this paper analyses simulation result. Key words: avalanche photodiodes; the underwater laser fuze; receiver system

1 引 言

激光引信是随着激光技术发展而出现的一种新型近炸引信,其在精确定距、抗电磁干扰及目标识别方面具有独特的优势^[1]。鱼雷作为现代海战的主战武器之一,其地位越来越重要,如果让鱼雷配有激光引信将会使其作用半径增大,提高其毁伤概率,从而使鱼雷在海战中发挥更大的作用。

与大气传输相比,激光在水中的传输具有特殊 性,这决定了水下激光引信的探测系统与普通激光 引信有很大不同:首先,激光水下传输的强衰减性, 要求发射功率更大的激光器和灵敏度更高的探测器 与之匹配;其次,海水对激光的后向散射给目标探测 造成很大影响,需要专门的抗干扰手段;最后,海水 透光窗口在蓝绿光波段,需要蓝绿激光器和对蓝绿 光敏感的接收装置与之相适应。

雪崩光电二极管(APD)与硅光电二极管相比 具有接收波段宽、灵敏度高、信号增益、响应时间短 等优点,特别适合探测弱光信号。本文正是基于 APD 的上述特性,对水下激光引信接收系统进行设 计,以期对鱼雷激光引信的研制提供借鉴。

2 水下激光引信基本组成和 APD 器件分析

2.1 水下激光引信工作原理及组成

水下激光引信原理图如图1所示。泵浦电路受 同步控制电路控制激励蓝绿激光器发出高峰值功率 的窄脉冲,经光学系统准直后向目标发射。当光信 号处于往返途中时,距离选通电路处于关闭状态,回 波光信号经光电探测器转化为电信号,送放大电路 放大,此时开启距离选通门,将回波信号引入下一 级,进行数字信号滤波、信号检测和目标识别,若判 断为目标则驱动执行器引爆战斗部^[2]。



作者简介:李 哲(1979-),男,硕士,工程师,主要研究方向为 探测、制导与控制技术。E-mail;jing19821119@ sohu. com 收稿日期;2008-12-25;修订日期;2009-04-24

本系统激光器选用激光二极管泵浦固体激光器,工作物质为 Nd: YAG, 被动调 Q 方式, KTP 晶体 倍频、峰值发射功率 1 kW、脉宽 20 ns、脉冲重复频 率 10 kHz。APD 探测器采用硅传感器公司的蓝绿 光增强型 APD,温度为 23 ℃条件下,倍增因子 M 达 到 100 时,偏置电压约为 120 V,温度系数为 0.88 V/K,响应波段为 300~1000 nm。

2.2 APD 接收器的主要探测特性^[3]

1)信号增益特性

雪崩光电二极管的电流倍增因子 M 随外加偏 压 U 的变化而变化,可以用下面经验公式近似 表示:

$$M = \frac{1}{\left(1 - \frac{U}{U_R}\right)^n} \tag{1}$$

其中,n 是与 PN 结的材料和结构有关的常数,对于 硅器件, $n = 1.8 \sim 4$,对于锗器件 $n = 2.8 \sim 8$, U_B 是 雪崩击穿电压。

2) 偏压特性

为达到较好的电流倍增特性,要求 APD 的偏置 电压较高,从几十伏到几百伏不等,一般情况下,当 APD 偏置电压选择在 90% 的雪崩击穿电压时,可达 到较高的接收信噪比。

3) 温度特性

在偏置电压不变的情况下, APD 的信号倍增因 子 M 随温度的变化而变化。在实际应用中, 为保证 接收信号的稳定, 要求 APD 的倍增因子 M 稳定, 这 需要使 APD 的偏置电压随温度变化而变化。APD 的温度特性用温度系数表征。

4) 响应时间和频率特性

响应时间 τ 受三种因素综合作用的限制:载流 子的扩散、载流子在耗尽层内的漂移时间和耗尽层 的电容。频率响应特性用 3 dB 带宽表征, $f_{3dB} = \frac{0.35}{t_a}$,其中, t_r 为脉冲阶跃上升时间。

5)噪声特性

APD 接收器的噪声主要包括光生电流和暗电流引起的粒散噪声、负载电阻产生的热噪声等。

由光生电流引起的粒散噪声为:

$$I_{sp} = \sqrt{2qI_P\Delta fM^k} \tag{2}$$

其中, I_p 是无雪崩效应时的光电流;对于硅管,k取 2.5; Δf 是接收系统带宽。

暗电流引起的粒散噪声为:

$$I_{sn} = \sqrt{2qI_{d1}\Delta f M^k} + 2qI_{d2}\Delta f \tag{3}$$

)

其中, $I_D = I_{d1} + I_{d2}$ 是无雪崩效应时的暗电流; I_{d1} 为体漏电流; I_{d2} 为表面漏电流。相比之下,前一项远大于后一项,所以后一项常忽略。

由负载电阻 R_l产生的电流热噪声为:

$$I_{jn} = \sqrt{\frac{4K_B T \Delta f}{R_l}} \tag{4}$$

接收机信噪比为:

SNR =
$$\frac{I_p^2}{I_{sn}^2 + I_{sp}^2 + I_{jn}^2}$$
 (5)

3 接收系统设计分析

针对 APD 的主要特性和发射系统相关性能,设 计水下激光引信接收系统。本节主要介绍 APD 偏 置电路、温度补偿电路、前置放大电路和主放大电路 的设计分析。

3.1 升压电路设计分析

鱼雷内部电源一般不超过 20 V,而 APD 需要的 偏置电压高达 100 V 以上,因此需要专门的升压电 路,本案采用 DC - DC 开关升压的方法,将 3 ~ 16 V 的直流电压最大升高到 120 V。升压芯片采用凌特 公司的 LT3482,输出电压通过反馈电阻进行调节。 升压和温度补偿电路如图 2 所示。



图 2 升压和温度补偿电路图

3.2 温度补偿电路分析设计

通过二极管正向压降随温度变化而变化的特性,构成温度补偿电路,通过对偏置电路的温度扫描 仿真,可得到升压电路输出电压随温度变化的曲线。 升压和温度补偿电路的电压输出随温度变化的关系 曲线如图 3 所示,近似是斜率约为 0.90 V/℃的直 线,与 0.88 V/℃的温度系数相接近,在工程上影响 较小,可认为该电路基本满足要求。



3.3 前置放大电路

前置放大器常与光电探测器统筹设计并装配成 光电转换 - 前置放大电路,目前常采用集成运算放 大器进行设计。图 4 是一种简单的探测器偏置和前 置放大电路原理图,该电路在接收高频信号时,无法 同时满足增益和带宽的要求。本案采用如图 5 所示 的电流 - 电压转换电路,其中,反馈电阻 *R_f* 决定电 流 - 电压转换系数,调节 *R_f* 即可得到所需的放大倍 数。电路的接收带宽由下式确定:

$$f_{\rm 3dB} = \sqrt{\frac{f_c}{2\pi R_f (C_i + C_f)}} \tag{6}$$

其中, f_e 为运算放大器增益带宽积; C_i 为 APD 的结电容; C_f 为反馈电容。





为保持电路稳定性,需要将一个反馈电容 C_f 与 R_f 并联,通过选用合适容值的 C_f ,便可使 1/F 的斜 坡变平从而获取最佳的性能,在 1/F 曲线和运算放 大器开环增益 A 曲线的交点处 $\psi(1/F) = 45^\circ$,这样 可使 $\psi(1/F) + \psi(A)$ 距离产生震荡的 180°,仍有 45°的裕度,从而避免震荡。 C_f 可通过下式获取:

$$\frac{1}{2\pi R_f C_f} = \sqrt{\frac{f_c}{2\pi R_f (C_i + C_f)}}$$
(7)

本案选用 LT1364 高性能运算放大器设计前置 放大电路, LT1364 增益带宽积为 70 MHz, R_f 取 3 kHz, APD 的结电容为 $C_i = 2.5$ pF。下面对前置放 大器的增益、带宽和信噪比等特性进行分析。 根据公式(7),可得反馈电容 $C_f \approx 2 \times 10^{-12}$ F, 取为 $C_f \approx 2.6 \times 10^{-12}$ F。

前置放大器增益 A 即为反馈电阻 R_f。 根据公式(6)可得该电路的接收带宽为:

$$f_{\rm 3dB} = \sqrt{\frac{f_c}{2\pi R_f (C_i + C_f)}} =$$

 $\sqrt{\frac{70 \times 10^6}{2\pi \times 3 \times 10^3 \times 5.1 \times 10^{-12}}} = 28.1 \times 10^6 \text{ Hz}, \ \vec{\text{m}}$

SPICE 仿真值约为29 MHz,基本一致。

图 6~8 分别为该电路的幅频特性图和脉宽 20 ns 信号的输出信号时域图。



本课题发射信号峰值功率为1 kW,在探测距离 10 m条件下,根据探测方程可得接收端经过雪崩增 益后的信号电流峰值约为 $I_p = 2.73 \times 10^{-5}$ A,则光 生电流粒散噪声为:

$$\begin{split} I_{sp} = &\sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2.73 \times 10^{-7} \times 29 \times 10^{6} \times 100^{2.5}} \\ = &5 \times 10^{-7} \text{ A} \\ & \text{L$istrick mathematication matching methods} \\ I_{jn} = &\sqrt{\frac{4K_B T \Delta f}{R_l}} = &\sqrt{\frac{4 \times 4.14 \times 10^{-21} \times 29 \times 10^{6}}{3 \times 10^{3}}} \\ = &12 \times 10^{-9} \text{ A} \\ & \text{He} \ & \text{He} \ & \text{Karl matching methods} \\ I_{sn} = &\sqrt{2qI_{d1}\Delta f M^k + 2qI_{d2}\Delta f} \end{split}$$

 $=\sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-9} \times 10^{-2} \times 29 \times 10^{6} \times 100^{2.5}}$ $= 3 \times 10^{-9} \text{ A}$

从上面的分析可以看出,在 APD 接收器条件 下,随着发射功率的提高,探测器的主要噪声是光电 流产生的粒散噪声。

根据公式(5),前置放大电路的接收信噪比为:

SNR = 10 log
$$\frac{I_p^2}{I_s^2 + I_{jn}^2} = 10 \log \frac{(2.73 \times 10^{-5})^2}{25 \times 10^{-14}}$$

= 35 dB

3.4 主放大电路的设计分析

主放大电路采用两级比例放大电路,根据放大 倍数计算公式 $A = 1 + \frac{R_1}{R_2}$,可得两级主放大电路的放 大倍数约为 44 倍。图 9 为前置放大和主放大电 路图。



图9 前置放大和主放大电路图

图 10 为 SPICE 仿真的信号三级放大输出,光生 电流 *I_p* 经过三级放大后,输出电压约为4 V,达到进 一步信号处理的要求。



4 结束语

与其他引信接收系统相比,本系统选用 APD 作 为光电探测器,提高了弱信号探测的信噪比,一定程 度上克服了激光水下传输强衰减带来的探测难题, 同时为了适应 APD 探测器高偏压和信号增益对温 度变化敏感的特点,设计了升压和温度补偿电路。 在信号放大环节选用电流 - 电压转换电路,同时满 足了信号增益和接收带宽的要求,从仿真结果来看, 三级放大电路的信号输出基本满足进一步信号处理 的要求。

参考文献:

- [1] 潘曙光.水下激光引信探测技术研究[D].北京:北京 理工大学,2005:35-46.
- [2] 黄勇,邓甲昊.水下激光引信探测及距离选通技术研 究[J].红外与激光工程,2007,36(增刊):92-94.
- [3] 王清正,胡渝.光电探测技术[M].北京:电子工业出版社,1993:67-82.