

·信号与信息处理·

## 基于变背景自适应远距离激光测距接收电路设计

侯作风, 郎建华

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:**在高速机动目标侦察系统的测距系统中,当背景随机变化时激光测距系统作用距离应达到数十千米,根据背景噪声自适应调节工作状态从而达到较高灵敏度和信噪比。针对APD探测器的背景噪声和倍增特性,开展了自适应偏置控制方法研究;基于“恒虚警率”控制方法,设计了激光测距接收前端电路,分别采用TPG和TPB信号控制电路增益和雪崩倍增因子,在“静态闭环”状态下测试了自适应特性;在外场试验中测试了实际测距的“动态闭环”状态,通过搭建的试验装置,完成了对远距离目标探测的试验。

**关键词:**光电侦察转塔系统;激光测距;雪崩光电二极管

中图分类号:TN710.6

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2018)-01-0036-05

## Design of Receiving Circuit in Long-distance Laser Range Finding Based on Variable Background-adaptation

HOU Zuo-feng, LANG Jian-hua

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

**Abstract:** In a laser range finding system of a high maneuvering target reconnaissance system, when background changes randomly, the operation distance of the system is as far as a few dozens of kilometer. According to background noise, the operation state is adjusted adaptively to achieve higher sensitivity and signal noise ratio (SNR). According to the background noise and multiplication characteristics of the avalanche photo diode (APD) detector, the adaptive bias control method is researched. Based on constant false alarm rate control method, the laser range finding receiving front-end circuit is designed. The circuit gain and avalanche multiplication factors are controlled by time programmable gain (TPG) and time programmable bias (TPB) signals respectively. The adaptive characteristics are tested under static closed loop state. The dynamic closed loop state in field experiment is tested. The experiment of long-distance target detecting is completed through the experimental devices.

**Key words:** electro-optical reconnaissance turret system; laser range finding; avalanche photo diode (APD)

光电侦察转塔系统针对高速机动目标,在系统应用中担负着重要任务。配置有激光测距的光电转塔系统可实时获取目标距离信息从而完成对目标探测、跟踪、高精度定位。在保证系统搜索侦察的同时也能精确测量目标距离,即使保持雷达静默依然能够提供目标运动参数,确保与之配套的武器系统精确打击<sup>[1]</sup>。光电作战能力的不断提高,推动光电侦察系统作用距离和识别能力的提升,因此光电转塔系统中激光测距系统的技术性能尤为重要。

然而受限于电路体制,一般军用激光测距技术采用跟踪模式或低重频测距,背景变化速率低,探测器的偏置控制采用“开关步进”方式。但是在某些目标高速机动,系统探测视场背景高速大范围变化时,传统测距系统就不能适应快速随机背景变化,若直接移植到光电侦察转塔系统只能降低战术技术指标使用。

另外目标随机出现,快速搜索跟踪模式测距需要做到“随时测距”,测距子系统为外触发工作。这

收稿日期:2017-11-13

作者简介:侯作风(1983-),男,吉林白城人,硕士,研究方向为光电工程技术。

种使用方式也是一般激光接收系统不能做到的。

综上,针对高速机动目标侦察的激光测距子系统的接收电路,需自动动态调整APD最佳倍增因子M(最佳工作点)以适应环境背景随机变化获得最大探测信噪比,从而扩展最大测距范围或最小可探测目标截面积。

### 1 APD噪声特性

APD器件量子效率高,内部倍增10~100倍,且倍增后的噪声仅与放大器本身的热噪声电平相当,从而大大提高了接收系统的信噪比,广泛用于激光测距。但APD器件在倍增过程中产生的附加噪声又成了限制信噪比进一步提高的障碍,目前仅探测 $10^{-8}$  W量级的回波光功率。

噪声与噪声抑制直接关系光电探测信噪比,APD光电探测系统内部噪声主要来源于APD载体电荷的随机运动,导致的电压或电流的随机波动<sup>[10]</sup>。主要有:散粒噪声、热噪声、产生-复合噪声和 $1/f$ 噪声。外部噪声主要是背景光噪声<sup>[9]</sup>。

APD倍增之前的平均直流电流 $I$ 由三部分电流组成:由光功率为 $P_s$ 的信号光产生的信号光电流 $I_s$ ;由光功率为 $P_b$ 的背景光入射探测器产生的噪声电流 $I_b$ ;探测器暗电流 $I_d$ 。

$$I = I_s + I_b + I_d = \frac{\eta e}{h\nu} (P_s + P_b) + I_d \quad (1)$$

根据相关文献,APD的光电探测信噪比(SNR)定义为信号光产生的光电流与APD噪声电流之比

$$SNR = I_s / I_n = \frac{MI_s}{[2eM^2F_nB(I_b + I_d) + (\frac{4KTF_n}{R_{eq}})]^{0.5}} \quad (2)$$

式中, $M$ 为APD的倍增因子; $P_s$ 为探测器接收的信号功率; $P_b$ 为入射背景光功率; $I_d$ 为APD探测器的暗电流; $\eta$ 为APD的量子效率; $h$ 为普朗克常数; $\nu$ 为光波频率; $K$ 为玻尔兹曼常数; $T$ 为绝对温度; $B$ 为接收系统带宽; $R_{eq}$ 为等效负载电阻; $F_n$ 为APD后级放大电路的噪声系数; $F_m$ 称为附加噪声因子,与APD倍增过程有关,可以用倍增因子 $M$ 和离子化率计算(麦金太尔(McIntyre)公式)如下

$$F = M \cdot k_{eff} + (1 - k_{eff}) \cdot (1 - 1/M) \quad (3)$$

其中,倍增因子 $M$ 和离子化率(空穴电离率) $k_{eff}$ 由

APD的pn结剖面类型决定。当 $k < 0.1$ 且 $M > 20$ 时,可近似为

$$F_m = F = 2 + M \cdot k - 2k \quad (4)$$

当倍增因子小于10时,散粒噪声的增长幅度很小,信号的增长幅度比散粒噪声大很多,而热噪声的大小和倍增因子无关,因此随着偏压的增加,APD探测器输出信号的信噪比会有所增加。当倍增因子超过10以后,散粒噪声的增长幅度迅速变大,当倍增因子达到一定值时,散粒噪声的增长幅度和信号噪声相同,此时APD探测器输出信号具有最大的信噪比。当倍增因子超过这个值之后,散粒噪声的增长幅度超过信号,输出信号的信噪比开始下降。

因此信噪比最大时的倍增因子出现在信号和散粒噪声的增长速度相同时,此时是探测器的最佳工作点,所施加在探测器上的反向偏压值为最佳工作点电压<sup>[5]</sup>。

### 2 APD测距接收前端电路

根据“恒定虚警率”控制方法<sup>[2][8]</sup>设计了激光接收模拟前端电路。针对光电侦察转塔系统工作方式需求,提出如下设计原则:

基于“恒定虚警率”方法实现偏置电压自适应控制<sup>[7]</sup>;针对深度雪崩状态下,强光背景导致的饱和和损坏,设计保护抑制电路;具备多种触发工作模式(内触发、外触发、重频),可实时受控,也可单独工作;具有TPB和TPG,实现雪崩增益和VGA增益分别可编程控制。

虚警率(FAR)和倍增因子(M)是背景光强、环境温度和击穿电压(VBR)的函数。为了在探测过程获得稳定的倍增因子,工程中采用“恒虚警率”方法控制偏置电压。图1为测距接收电路框图。

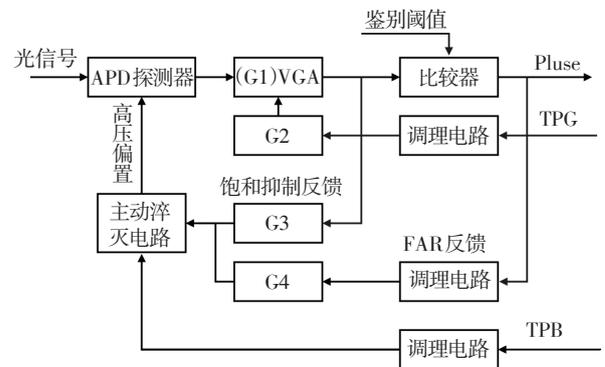


图1 测距接收电路框图

将 FAR 作为反馈回路控制偏压下降。当背景光强和环境温度变化导致 FAR 电平上升时,进而控制主动淬灭,降低偏置电压,使得最终 FAR 和偏压达到动态平衡实现自适应<sup>[4]</sup>。这时偏置电压处于击穿电压( $V_{BR}$ ),即探测器恰好刚刚进入雪崩区状态,倍增因子较大且稳定。这种基于反馈的自适应调整过程,暂称为“静态闭环”状态。

接收回波过程中,TPB 信号打破反馈机制,将偏压下调,APD 回到线性模式,这时反馈环节失效,噪声电平不足以超过阈值判别电平,而目标回波可超过阈值判别电平,信号上的脉冲代表目标回波。然后接收时间轴对应目标距离增大趋于最大测程,偏置电压渐接近  $V_{BR}$ ,达到可稳定探测的最大增益,并最终回到雪崩区状态。接收时段结束后电路再次进入“静态闭环”状态。

### 3 测距接收电路设计

针对测距接收电路,文中进行了“静态闭环”和“动态闭环”两种状态的特性研究。

探测器作为雪崩虚警率检测元件,实现了偏置电压围绕雪崩偏置点的动态自动闭环控制。上电并进入“静态闭环”测试波形图见图 2。

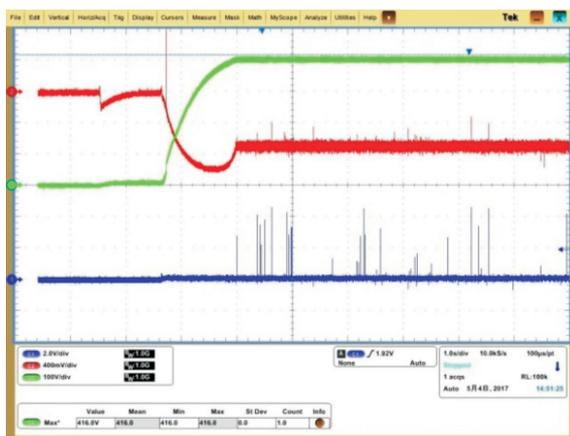


图2 “虚警回波”、探测器输出信号和偏置电压变化特征

上电过程中,随着偏置电压(绿色)逐步接近雪崩电压点,实现闭环,APD 输出回波信号(红色)由 0V 动态变化到某一平衡点,同时回波脉冲信号相应随机跳动。这时候调整探测器的背景光通量,可看到降低背景光通量,偏压随之上升。反之,增大背

景光通量偏置电压随之降低,若继续增加甚至导致信号饱和<sup>[6]</sup>,雪崩特征消失。

“静态闭环”令探测器处于临界雪崩状态。“虚警回波”(雪崩噪声)随机出现,但频率较低,偏置电压随噪声频率自动调节。

“虚警回波”信号经过 F-V 调理后形成 FAR 反馈信号。如图 3 所示,“虚警回波”的每一脉冲使得 FAR 信号上升。

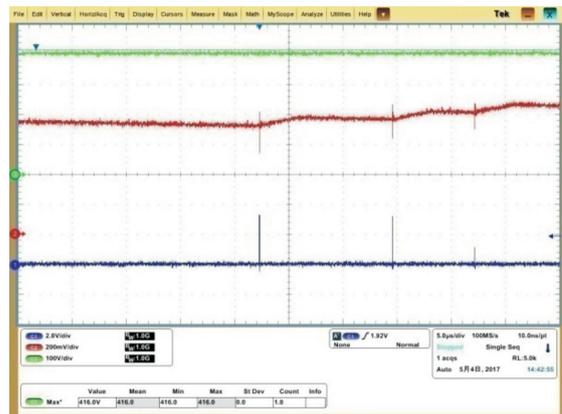


图3 “虚警回波”(蓝色)、FAR 信号、偏置电压(绿色)的细节特征

当背景光强和环境温度变化导致 FAR 电平变化。FAR 反馈环路使得最终 FAR 和偏压自适应调节,从图中可见,反馈信号随着回波信号的脉冲出现相应上升,但偏压变化宏观上并不显著,这时因为偏压处于击穿电压附近,很小的幅度变化即可引起雪崩或回到线性区,这就是所谓的雪崩淬灭,是临界雪崩的特点,犹如“刀锋之舞”。倍增因子较大且稳定同时获得较稳定的 FAR。

接收回波过程中,收到外触发信号(蓝色)后,首先降低 VGA 增益(绿色)<sup>[3]</sup>,发射激光束后再逐步平滑提升增益,达到抑制近程散射回波的目的。TPG 信号直接控制着 VGA 的增益曲线,当测距发射触发信号发出后,VGA 增益即进入编程状态,激光发射前增益已经调节到最小,激光发射后平滑升高 VGA 增益,数公里距离后保持最大状态。

为了动态程序控制 APD 的内部增益,令其随着接收时间轴推移平滑提高倍增因子 M,文中提出了时间可编程偏置控制(即 TPB)。TPB 是接收模拟前端的输入信号,来源于驱动数字电路。

详细测试信号,见图 4。

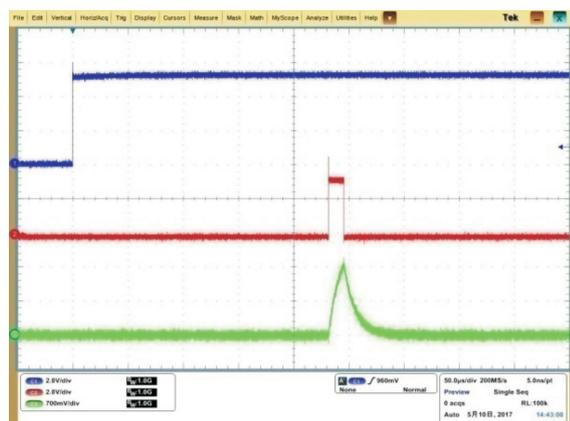


图4 动态闭环的外触发信号、增益控制、TPG信号  
的细节特征

接收到外触发信号(蓝色)后,驱动控制电路发出TPB信号,TPB信号经过调理后变换为偏压(绿色)控制电压,激光发射前偏置电压由雪崩电压点下降,从而进入线性状态,而后逐渐上升偏压,当超过最大测程,回到雪崩状态,即回到“静态闭环”状态。雪崩“虚警回波”(红色)由雪崩状态变为线性转台最终再次回到雪崩状态。

系统侦察过程中,静态闭环状态的光背景随机变化,偏压随之浮动,因此系统的增益也是不断调整,虚警回波信号动态稳定。见图5。

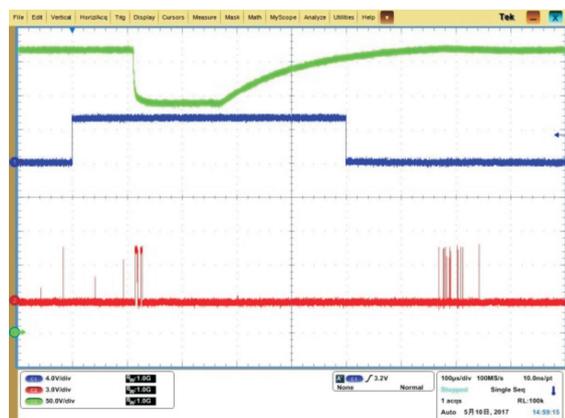


图5 动态闭环的外触发信号、“虚警回波”、  
偏压信号的细节特征

## 4 试验结果

设计的激光接收模拟前端,分别采用进口两种型号和国产一种型号的探测器进行了测试试验。通过多种组件组合搭建的试验装置进行了内场测

试和外场试验。

内场测试中,0~3 000 lux 照度环境背景条件下,接收电路模块均可正常“静态闭环”;环境温度变化并未导致电路失控,偏压可随环境温度变化自动调节。外场试验中,当转塔系统以360°/s 运转条件下对30~40 km 目标完成测距,达到了设计技术要求。

对漫反射目标进行测量时,测距方程<sup>[1]</sup>为

$$P_b = \frac{4P_t \tau_a^2 A_s A_r \rho}{\pi^2 \theta^2 L^4} \quad (5)$$

式中, $\tau_a$ 为激光单程大气透过率; $P_t$ 为激光脉冲峰值功率; $A_s$ 为目标截面积; $A_r$ 为接收孔径面积; $\rho$ 为目标漫反射系数; $\theta$ 为激光发射束散角; $P_b$ 为激光接收回波功率; $L$ 为目标距离。

通过 Modtran 软件设定中等气象条件的模型,计算了目标所在探测仰角条件下的对应探测距离的大气透过率。

根据试验当日环境调节、试验装置参数和目标参数估算系统最小可探测功率可达 $5 \times 10^{-9}$  W,高于一般测距系统的 $2 \times 10^{-8}$  W。

## 5 结论

针对光电侦察转塔系统的远程测距能力需求,采用APD探测器设计远距离变背景自适应激光测距接收电路。优化设计了F-V变换电路、光背景保护抑制电路,采用主动淬灭电路,实现恒虚警率控制,自动适应背景和温度变化。

试验装置进行的动态外场实验中,实现了对目标远程测距能力。证明了远距离背景激光测距接收技术的可行性和设计方案的正确性。

## 参考文献

- [1] 戴永江. 激光雷达[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [2] 郭颖,陈奕,黄庚华,等. 一种应用于高精度脉冲激光测距的自动增益控制方法[J]. 激光与红外,2010,40(4).
- [3] 刘春生,李小波. AD603在信号采集系统中的应用[J]. 国外电子元器件,2000(11).
- [4] 王剑英,齐亚斌. 脉冲激光雷达系统虚警分析[J]. 红外与激光工程,2006,10,35(增刊).
- [5] 安毓英,曾晓东,冯喆珺. 光电探测与信号处理[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [6] 姜燕冰,严惠民,王启明. APD探测电路脉冲饱和现象及解决方法[J]. 光学仪器,2009.

- [7] 陈殿仁,邹超.APD激光回波信号探测电路系统研究[J]. 长春理工大学学报,2002.
- [8] 曾光宇.光电检测技术[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [9] 邵军虎,黄涛,王晓波,等.硅雪崩二极管光子辐射特性的实验研究[J].光子学报,2005.
- [10] 赵洪志,李乃吉,赵达尊.基于背向喇曼散射的分布式光纤温度传感器APD最佳雪崩增益的分析[J].光子学报,1996.

### 《光电技术应用》编辑部征稿通知

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。期刊的影响因子连续几年上升,2015年、2016年两年连续入选《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

期刊所设栏目主要有:综述,光电系统,光学设计,红外技术,激光技术,光电探测,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真等。

期刊拥有优秀的编委会成员,审稿专家涉及光电技术的各个领域,具有审稿速度快、质量高,编辑人员具有较高的职业素质,工作认真负责、反馈速度快,期刊版面设计合理、美观大方,印刷质量好,出刊及时。对于优秀论文可以减收或不收版面费。

编辑部通信地址:天津市空港经济区纬五道9号;邮政编码:300308;联系电话:022-59067938;联系人:朱编辑 牛编辑;投稿邮箱:aoe-cetc@vip.163.com。

《光电技术应用》编辑部