

文章编号:1001-9014(2009)01-0050-04

基于FPGA的激光雷达恒虚警率控制技术研究

欧阳俊华, 黄庚华, 程鹏飞, 舒嵘, 王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:研究了激光雷达中的雪崩光电二极管恒虚警率控制技术,提出了一种基于FPGA的恒虚警率控制电路,通过噪声检测能够有效地根据背景辐射进行自适应调整,保持恒定的虚警率,并使雪崩二极管处于最佳工作偏压.实验结果表明其良好地实现了恒虚警率控制.

关键词:遥感技术;激光雷达;恒虚警率;噪声检测

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A

STUDY OF CONSTANT FALSE ALARM RATE CONTROLLING TECHNIQUE BASED ON FPGA IN LIDAR

OUYANG Jun-Hua, HUANG Geng-Hua, CHENG Peng-Fei, SHU Rong, WANG Jian-Yu

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The constant false alarm rate (CFAR) controlling technique of avalanche photo diode (APD) applied in Lidar was studied, and a CFAR controlling circuit based on FPGA was described. Our results show that it is capable of self-adjusting according to the background radiation by means of noise detection, and it can also maintain constant FAR and make the APD in the optimum state of bias voltage. Experimental results indicate that this circuit can well realize CFAR controlling.

Key words: remote-sensing technology; LIDAR; constant false alarm rate (CFAR); noise detection

引言

激光雷达(Light Detecting and Ranging, LIDAR)是一种使用激光作为光源,对目标进行探测、测距的主动遥感技术.国外的激光雷达技术起步较早,美国在上世纪70年代就在Apollo探月工程中应用了激光雷达技术,之后又成功研制了火星轨道激光高度计(MOLA),地球科学激光高度计(GLAS)等星载激光高度计^[1,2].我国的激光雷达技术方兴未艾,由我国自行研制的月球探测激光高度计已于2007年发射升空,完成了获取月球表面三维立体影像和地形地貌等科学探测任务^[3].小型化、高灵敏度和可靠性是激光雷达技术发展的重要方向.这无疑对激光雷达的前端接收系统的性能提出了更高的要求^[4,5].

雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)由于其高灵敏度在激光雷达中得到了广泛的应用.APD利用在强电场的加速作用下产生的雪崩碰撞

效应来获得比一般PIN管等光电二极管更高的光电倍增因子.常用的有达通(Reach-through)型结构.

从激光雷达的应用上来看,其目标的背景辐射往往是多变而复杂的,需要激光雷达的接收系统能够根据背景辐射迅速地做出适当的自动调整.

激光雷达的恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)控制技术是一种新颖的能够通过自动调整电路参数来适应背景变化的技术.恒虚警率控制的效果在很大程度上依赖于噪声检测的方法,一种检测方法是利用电容对噪声电压进行积分,其缺点是易受到电容漏电流和温度系数的影响,且由于使用了分布器件,需要占用较多的线路板空间,不利于激光雷达的小型化.本文提出了一种基于FPGA的CFAR控制技术,使用单片FPGA作为信号处理和单元,具有稳定性好、集成度高的优点,并且详细论述了其理论基础和实现手段.该技术非常适用于小型化激光雷达系统,且未见类似的公开报道.

收稿日期:2008-03-21,修回日期:2008-12-18

Received date: 2008-03-21, revised date: 2008-12-18

基金项目:中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目资助-三维成像激光雷达总体技术(A8)

作者简介:欧阳俊华(1981-),男,广东从化人,博士,主要研究方向为高精度激光雷达技术

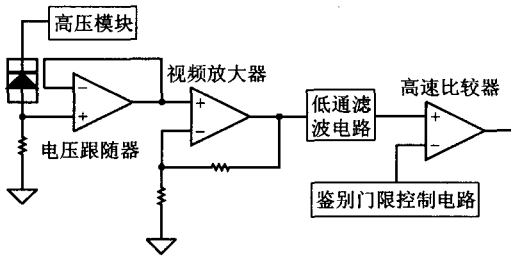


图 1 基于 APD 的激光雷达接收系统框图
Fig. 1 Block diagram of receiving system based on APD of LIDAR

1 恒虚警率控制原理

图 1 是基于 APD 的激光雷达接收系统的基本框图。高压模块产生使 APD 工作于高增益区所需的反向偏置电压, APD 将接收到的光信号转化成电信号, 经过一个低噪声的电压跟随器输出, 之后由一个低噪声、高转换速率的视频放大器放大, 再经过一个优化的低通滤波电路使其获得最大信噪比, 最后经过一个高速差分比较器产生用于使计时电路停止计数的停止脉冲。这是一种前沿鉴别法。

低通滤波器的输出可以近似看作为白噪声, 其统计特性可以由高斯概率密度函数来描述:

$$p(u_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{u_n^2}{2\sigma_n^2}\right), \quad (1)$$

其中, σ_n 为噪声电压 u_n 的标准偏差。

由此可以得出虚警概率, 即噪声电压超过一定鉴别门限的概率:

$$P_{fa} = \int_{V_T}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{u_n^2}{2\sigma_n^2}\right) du_n = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{TNR}{\sqrt{2}}\right), \quad (2)$$

其中, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$ 为标准误差函数, $TNR = V_T/\sigma_n$ 为鉴别门限电压和噪声均方根的比值 (Threshold-to-Noise Ratio)。

由上式可知, 当 TNR 一定时, P_{fa} 保持不变。

超过鉴别门限的噪声脉冲之间间隔的平均长度称为虚警时间 T_{fa} ^[6]:

$$T_{fa} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T_k \quad (3)$$

那么, 虚警概率可以用下面的公式描述:

$$P_{fa} = \frac{\langle t_k \rangle_{av}}{T_{fa}} = \frac{1}{2T_{fa}B}, \quad (4)$$

其中, $\langle t_k \rangle_{av} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N t_k$ 称为噪声超过鉴别门限的平

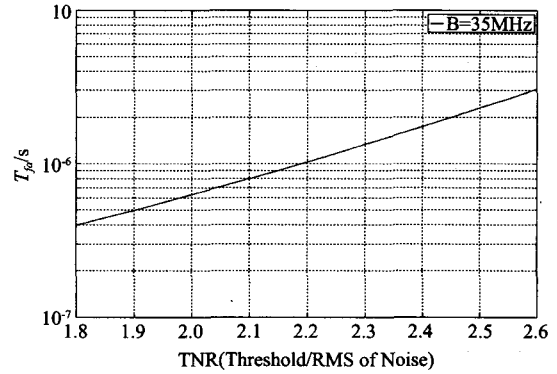


图 2 $T_{fa} - TNR$ 曲线图 ($B = 35\text{MHz}$)
Fig. 2 Curve of T_{fa} vs. TNR ($B = 35\text{MHz}$)

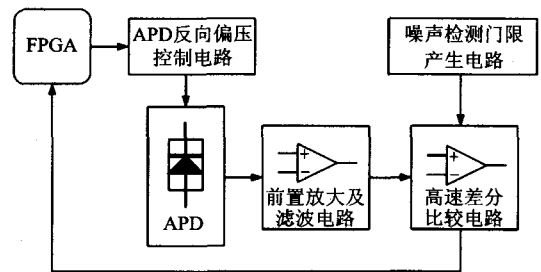


图 3 恒虚警率控制电路框图
Fig. 3 Block diagram of CFAR controlling circuit

均持续时间, 它近似为 LPF 的 3dB 带宽 (单边带宽) 的倒数的一半。

根据式 (2) 和 (4) 可以得到:

$$T_{fa} = \frac{1}{2BP_{fa}} = \frac{1}{B \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{TNR}{\sqrt{2}}\right) \right]} \quad (5)$$

图 2 为 $B = 35\text{MHz}$ 时的 $T_{fa} - TNR$ 曲线图。

由式 (5) 可知, 当 3dB 带宽一定时, 平均虚警时间 T_{fa} 只与 TNR 有关, 所以可以通过控制 TNR 来控制 T_{fa} 。常见的恒虚警率控制有两种方式, 一种是调整鉴别门限, 这是快调整方式; 另一种是在一定的鉴别门限下, 通过调整电路的一些参数, 使得噪声的均方根稳定在一个定值上, 这是慢调整方式。

慢调整方式有两个优势, 一是比较稳定, 二是通过调整电路参数, 使得噪声维持在一定水平上, 可以实现 APD 最佳工作点的选择^[7]。

2 基于 FPGA 的恒虚警率控制电路

2.1 恒虚警率控制电路框图

图 3 是恒虚警率控制电路的框图。APD 偏置电压控制电路产生 APD 所需的反向偏置电压, APD 输出的模拟信号经过前置及滤波电路后, 输入到一个

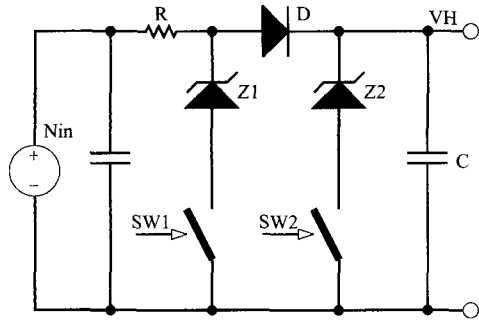


图4 APD 偏压控制电路

Fig.4 Bias voltage controlling circuit of APD

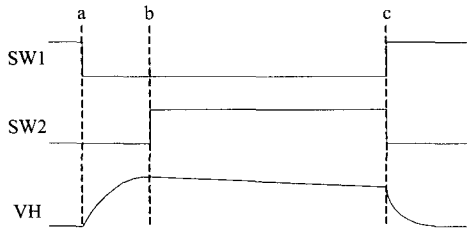


图5 APD 偏压控制电路模拟波形图

Fig.5 Simulative waves of bias voltage controlling circuit of APD

差分比较器。对于超过检测门限的噪声，差分比较器输出脉冲数字信号，再由 FPGA 对该脉冲数字信号进行处理，按照一定的规则对 APD 偏压控制电路进行控制。由此形成一个负反馈的自适应调整回路，实现恒虚警率控制的目的。

2.2 APD 偏置电压控制电路

图4是APD偏压控制电路的原理图，它通过两个开关SW1和SW2对APD的反向偏压进行控制。

图5是该电路正常工作时的模拟波形图。a时刻之前，SW1处于断开状态，SW2处于闭合状态，稳压二极管Z2所在的回路处于导通状态，所以APD的反向偏压VH处于一个较低的水平。a时刻到来时，SW1和SW2均处于断开状态， V_{in} 经过高压电阻R对电容C充电，VH逐渐上升，与此同时，前放及滤波电路输出的噪声也在逐渐增大，当到达一定水平之后，SW1闭合，而SW2仍然处于断开状态，Z1所在的回路导通，由于开关二极管D的单向导通作用，VH停止上升，而维持于一个相对稳定的状态。此后，由于电路的漏电流，VH略有下降。到了c时刻，SW1断开，而SW2闭合，Z1回路断开，Z2回路闭合，电容C放电，VH又重新回到a时刻之前的低水平状态。从状态b到状态c是APD的稳定工作区，可以在这段时间内接收目标反射回来的激光信号。

2.3 噪声检测

噪声检测通过一个差分比较器对输入噪声和噪声检测门限进行比较来实现。通过前面的计算分析可以知道，在带宽一定的条件下，平均虚警时间只和鉴别门限与噪声均方根的比值有关，换言之，当这个比值一定时，平均虚警时间也是一定的，即虚警出现的平均速率一定。恒虚警率控制电路中通过检测噪声脉冲的平均速率来判断噪声的均方根是否达到了预先设定的水平。

根据式(5)，当 $TNR = 2.2$ 时， $T_{fa} \approx 1\mu s$ （参照图2），根据APD的最佳噪声分配原则^[7]，在该接收系统中，使APD工作于最佳工作点下的噪声的均方根值为100mV，由此可以设置噪声检测的门限为220mV，在此设定下，噪声检测比较器输出的噪声脉冲出现的平均速率应该为 $1\mu s$ ，即平均每 $1\mu s$ 检测到一个超过220mV检测门限的噪声脉冲。

在该恒虚警率控制电路中，超过检测门限的噪声脉冲的平均速率检测由FPGA完成。由于3dB带宽较大，噪声脉冲的平均持续时间在几十个纳秒以内，所以需要响应速率在数纳秒以内的高速FPGA来对噪声脉冲进行计数。噪声脉冲平均速率检测需要两个计数器，一个计数器负责对噪声脉冲进行计数，另外一个计数器起定时器的作用，每到了一定的时间长度即将噪声脉冲计数器清零。当噪声脉冲计数器达到一个溢出值后，程序判定噪声脉冲的平均速率超过预定的值。噪声脉冲计数器的溢出值和定时器清零的时间长度的比值就是预定的噪声脉冲平均速率的门限。图6是FPGA中用于噪声检测部分的简化层次结构图。

3 实验结果

为了验证该电路的实际效果，放置APD于卡式接收望远镜内，对室外的固定目标进行了实际的接收实验。下面是实验的结果及数据。

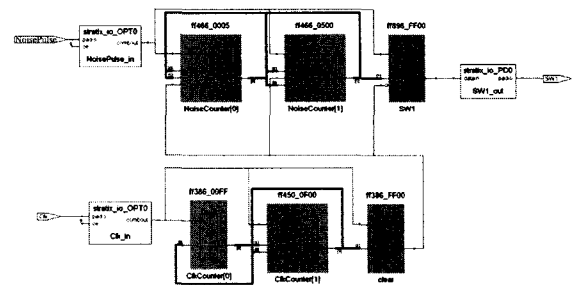


图6 简化的FPGA内部层次结构图

Fig.6 Simplified hierarchical view inside the FPGA

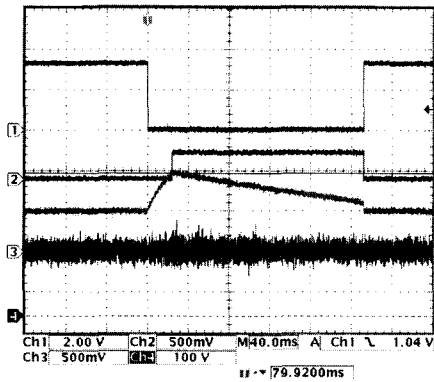


图7 APD 反向偏压建立的实际波形图

Fig. 7 The actual waves of the establishment of reverse bias of APD

表1 不同阈值下的噪声均方根及 APD 偏压

Table 1 Root mean square of noise and the bias voltage of APD at different threshold of noise

噪声检测阈值/mV	噪声均方根/mV	TNR	APD 反向偏压/V
160	72	2.22	322.4
173	79	2.19	334.1
186	83	2.24	340.6
208	95	2.19	348.4
220	99	2.22	352.3
239	106	2.25	357.5
259	115	2.25	360.1
279	122	2.29	362.7
308	134	2.3	364.0

图7是实验中APD反向偏压建立的实际波形图,噪声检测门限为220mV,使用Tektronix公司的TDS 3054B示波器的均方根测量功能,实测得到噪声均方根值为99mV.在图中可以看到随着APD反向偏压(图中的通道4)的建立,噪声(图中的通道3)的相应变化情况.

表1所示为不同噪声检测门限下的噪声均方根值,以及对应的APD的反向偏压.由表中可以看出,TNR的实测值比较合理理论计算值2.2.

图8为一天中不同时间,APD反向偏压的变化曲线,以及相应的噪声均方根值.由图中可以看到,随着背景辐射的变化,APD的反向偏压发生了变化,而噪声的均方根值保持在100mV附近,由于信号检测门限不变,虚警率保持在了恒定的水平上.

4 结语

基于FPGA的APD恒虚警率控制电路,能够有效地根据不同的背景辐射调整APD的反向偏置电

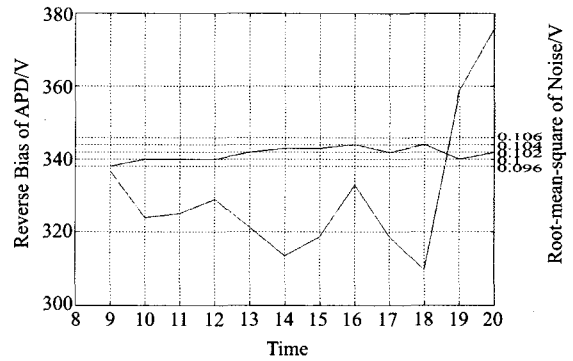


图8 一天内不同时间的APD反向偏压和噪声均方根曲线

Fig. 8 Curves of bias of APD and RMS of noise at different time in one day

压,使噪声大小保持在一定水平,达到恒虚警率控制的目的.该电路已经应用在实际的激光雷达系统中,并取得了良好的实际效果.

REFERENCES

- [1] Bufton J L. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77 (3): 463—477.
- [2] SHI Xiang-Chun, CHEN Wei-Biao, HOU Xia. Application of all solid state laser in space [J]. *Infrared and Laser Engineering* (施翔春,陈卫标,侯霞.全固态激光技术在航天领域的应用. *红外与激光工程*), 2005, 34(2): 127—131.
- [3] HUANG Geng-Hua, WANG Bin-Yong, SHU Rong, et al. Ground-based calibration and performance verification of the lunar observation laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering* (黄庚华,王斌永,舒嵘,等.月球探测卫星激光高度计地面定标与性能验证技术. *红外与激光工程*), 2006, 35: 375—377.
- [4] WU Gang, LI Chun-Lai, LIU Yin-Nian, et al. Study on high resolution time interval measurement module in pulsed laser ranging system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴刚,李春来,刘银年,等.脉冲激光测距系统中高精度时间间隔测量模块的研究. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(3): 213—216.
- [5] QI Hong-Xing, SHU Rong, MA De-Min, et al. Elemental recognition method based on laser induced breakdown spectroscopy [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (齐洪兴,舒嵘,马德敏,等.基于激光诱导击穿光谱技术的元素识别方法. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(4): 52—55.
- [6] HUO Lian-Zheng. Ground-to-air laser ranging receiver with avalanche photodiodes [J]. *Laser Technology* (霍联正.雪崩光电二极管对空激光测距接收机. *激光技术*), 1993, 17(3): 137—141.
- [7] Skolnik M I. *Introduction to Radar Systems (Third Edition)* [M]. McGraw-Hill Companies, Inc., 2001 (左群声,徐国良,马林等.雷达系统导论.第3版,北京:电子工业出版社), 2006: 30—31.