

基于 APD 线列的单光子探测计数研究

张常年, 张栋存, 康小麓

(北方工业大学 电子信息工程学院, 北京 100144)

摘要: 单光子探测系统可以对单个光子进行探测; 探测系统含有探测部分、淬灭电路部分和计数部分; 探测部分主要由工作在盖革模式下的雪崩光电二极管组成; 在盖革模式下的雪崩光电二极管发生雪崩后不能自然停止, 淬灭部分主要为了主动抑制雪崩电流, 快速降低雪崩电压, 以达到提高探测效率, 降低错误计数的目的; APD 线列产生多个光子脉冲信号, 计数部分的主要功能是对多路光子脉冲信号进行计数、显示并且可以控制每路 APD 的比较电压, 保证每路 APD 淬灭电路的正常工作。

关键词: 单光子探测; 雪崩二极管; 淬灭电路; 计数电路

Study of Single-photon Detection Based on the Linear Array APD

Zhang Changnian, Zhang Licun, Kang Xiaolu

(College of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: The single-photon detection system can detect a single photon; detection system includes detection section, quenching circuit section and the counting section; Detecting section consists of avalanche photodiode, which works in Geiger mode; Avalanche photodiode can not stop naturally, quenched section aim to active suppression avalanche current, reduce avalanche voltage rapidly, to reach the goal of improving the detection efficiency and reducing the error count; APD Linear Array produce multiple photon pulse signal, The main function of the counting section is counting and displaying multi-channel photon pulse signals, controlling each road respectively, ensure the normal work of the APD quench circuit.

Keywords: single-photon detection; avalanche photodiode; quenching circuit; counting circuit

0 引言

随着量子信息技术的飞速发展, 单光子探测器已经成为各国重点研究课题之一。光子是最小的能力和信息载体。在可见光段, 一个光子的能量在 10^{-19} J 量级, 要探测如此微弱能量的光子是一个难题, 而新式光电探测技术——单光子探测技术, 可以利用新式光电效应对能量极小的光子进行探测和计数, 因此在天文探测、大气测污、量子通讯等领域受到了深入的研究。目前已经有多种器件可以用来制作单光子探测器, 其中包括光电倍增管、电荷耦合器件、微通道板、混合式光电二极管和盖革模式雪崩光电二极管。多个雪崩光电二极管 (APD) 组成的线列或阵列可作为的单光子探测器的主要器件, 其主要应用于光子成像技术领域, 在探测远程非合作目标时, 探测器收到的回播信号极其微弱, 甚至只有几个或者单个光子的能量, 因此对于这种微弱光信号的探测与成像, 就需要由多个 APD 组成的线列或阵列的单光子探测器对目标进行探测与成像。

1 总体设计

光子探测器主要是由 APD 雪崩光电二极管、放大器、比较器、和光子计数器组成, 由多个 APD 组成的线列光子探测器可以同时进行多路计数。图 1 所示为多个 APD 组成的线列光子探测系统原理图。

探测器工作时, 由于光的量子性, 微弱的光信号是随机分布的, 当探测器检测到了微弱的光信号后, 输出光子脉冲信号。光子脉冲信号为电脉冲信号, 为了使比较器可以更好的比

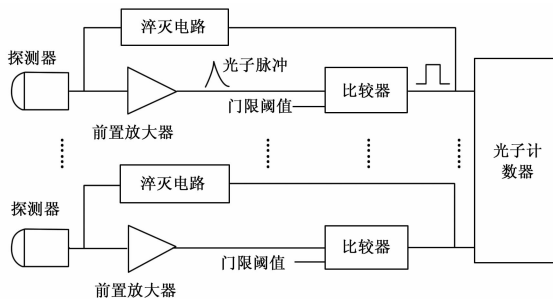


图 1 APD 线列单光子探测系统原理图

较光子脉冲信号与门限值幅度差, 光子脉冲信号需要足够的幅度, 则需要在比较器前加入前置放大器, 光子脉冲信号经放大器放大之后进入比较器与门限值进行比较并整形, 最后输出为 TTL 电平, 再由光子计数器对其进行计数处理。

2 淬灭电路设计

使用 APD 器件设计的单光子探测器具有功耗低、量子效率高、体积小等优点。通常 APD 两端所加的反向电压要高于雪崩击穿电压, 并且雪崩在发生后不能自然停止, 还会产生很大的电流, 容易使管子烧毁。为了解决这些问题, 需要采取措施淬灭雪崩, 抑制雪崩电流, 并为探测下一个光子的到来做好准备。所以淬灭电路设计的优劣, 对于单光子探测器的探测效率和精度起着关键作用。

完成一次淬灭需要有 3 个步骤: 1) 感应雪崩信号的同时输出 TTL 脉冲电平信号。2) 脉冲信号控制 APD 两端的偏置电压, 使其低于雪崩击穿电压, 淬灭雪崩。3) 重新恢复偏置电压, 为下一个光子的到来做好准备。常见的淬灭方式有 3 种: 被动淬灭、主动淬灭和门控淬灭。对于非合作目标的探测

收稿日期: 2016-04-14; 修回日期: 2016-05-24。

作者简介: 张常年 (1958-), 男, 教授, 主要从事电子电路系统方向的研究。

通常使用被动淬灭和主动淬灭的方式,而主动淬灭的响应速度要高于被动淬灭,性能较优。

主动淬灭的工作原理如图2所示。

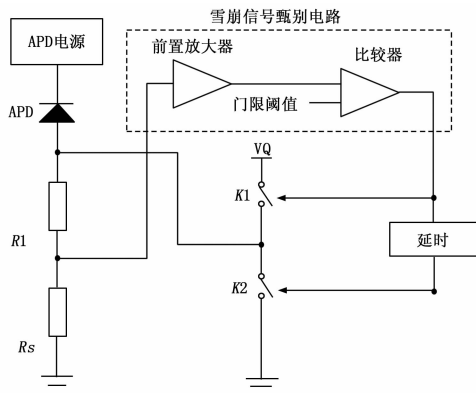


图2 主动淬灭工作原理图

主动淬灭相当于在被动淬灭模式后面加上两个模块:通过反馈的雪崩模块以及恢复模块。它与被动淬灭模式的区别在于利用了反馈的优势,当探测器检测到雪崩信号后立刻反馈到APD的驱动电压上,降低偏置电压至APD的雪崩击穿电压之下,淬灭雪崩。

工作在盖革模式下的APD,其两端电压高于雪崩击穿电压。一旦APD接收到入射光子,雪崩发生,瞬间产生的雪崩大电流,信号提取电阻Rs两端产生雪崩信号,经前置放大器和比较器后输出TTL电平信号控制开关K1闭合,使得APD两端电压降到雪崩电压以下,之后K2闭合使APD恢复至雪崩发生前的状态,为探测下一个光子做好准备。

淬灭电路性能的优劣主要取决于淬灭时间和恢复时间的长短。在淬灭与恢复的过程中,APD无法探测光子,通常将这段无法探测光子的时间称作死时间。死时间越短探测器的精度和工作频率越高。

2.1 雪崩信号甄别电路

前置放大器选用AD8001运放,其-3 dB带宽为880 MHz,响应时间为10 ns。比较器采用AD8611,AD8611的带宽为100 M,响应时间为4 ns。响应时间决定着探测到雪崩发生后产生淬灭的速度。比较器的参考电压Vref可通过STC12C56实现D/A功能,对每个APD单独进行设置,由于每个APD之间存在差异,所以Vref的可以根据实际情况由用户手动调节。图3为雪崩信号甄别电路。

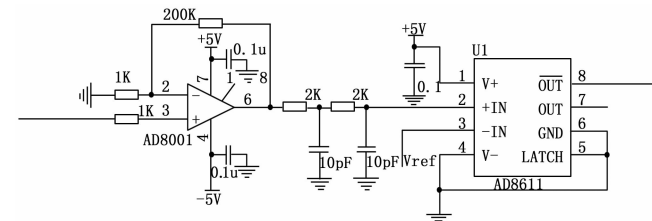


图3 雪崩信号甄别电路

当光子到达时,高速的雪崩信号甄别电路迅速输出雪崩检测信号,淬灭与恢复电路收到信号后开始淬灭。

2.2 淬灭与恢复电路

淬灭与恢复电路收到信号后,控制开关管Q1导通,使得

APD电压下降至 $V_A - V_Q$, V_Q 为LM1117输出电压,可以通过改变可变电阻阻值进行调节,调节 V_Q 使APD电压小于雪崩击穿电压,淬灭雪崩。经短暂延时后恢复信号控制开关管Q2闭合,完成恢复。图4为淬灭与恢复电路。

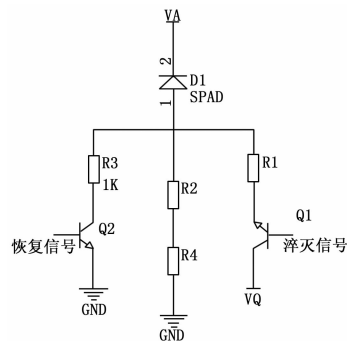


图4 淬灭与恢复电路

3 淬灭电路仿真分析

在制作电路实物之前,需要根据主动淬灭的原理,使用仿真软件对淬灭电路进行仿真分析。由于仿真器件中不存在雪崩二极管(APD)器件,故首先需要对APD建立等效电路模型,其次进行仿真分析。

3.1 APD等效电路模型

如图5所示,开关K模拟光子入射,开关闭合表示有光子入射。电压源为APD器件的雪崩电压。电阻为APD的内阻,电容分别为结电容和分布电容。

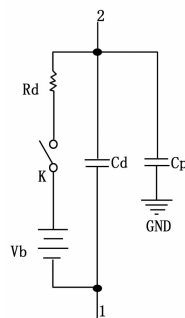


图5 APD等效电路模型

3.2 PSpice电路仿真电路

根据APD等效电路模型,使用PSpice对主动淬灭和被动淬灭进行仿真对比,图6所示。

3.3 仿真分析

根据APD的等效电路模型和主动淬灭电路原理,对4线列的APD的淬灭电路进行仿真,得到淬灭仿真波形,如图7所示。

如图,(a)(b)(c)(d)分别为参数不同的APD得到的波形结果,(e)为被动淬灭模式波形。对比两种淬灭方式,使用主动淬灭方式完全抑制雪崩所需要的时间远远小于被动淬灭模式。结果表明,对比被动淬灭模式,主动淬灭模式的死区时间短,因此提升了光子探测效率,降低错误计数,具有更好的性能。

4 计数电路设计

计数电路部分主要功能有两个:一是对光子脉冲信号进行计数并且显示,二是分别对每路APD的阈值门限电压进行设

485 采用 MAX485 芯片, 与 MAX232 不同, MAX485 需要通过控制切换发送使能和接收使能端进行数据的发送和接收, 为了与其他 3 路串口通信的统一, 利用硬件方式来实现自动收发转换的 RS-485 接口电路, 通过 74HC14 芯片可以判断收发状态从而控制发送使能和接收使能端, 达到自动收发的目的, 如图 11 所示。

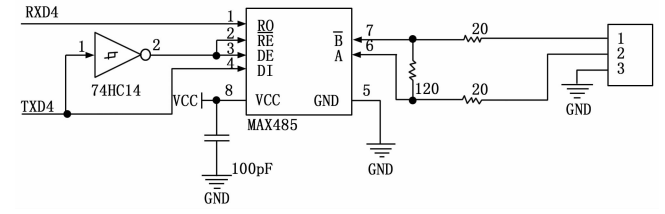


图 11 自动收发转换的 RS-485 接口电路

5 结论

淬灭电路部分使用主动淬灭的方式对雪崩二极管完成淬灭与快速恢复过程, 减少死区时间, 提高探测精度, 提升 APD 寿命; 光子计数电路部分, 采用主从机互相通信的方式, 主机

用于控制与管理从机, 从机负责完成计数和设置阈值电压的功能, 对每个 APD 分别控制, 提高线列 APD 的探测效率, 增加了精确度, 减少错误计数。

(上接第 183 页)

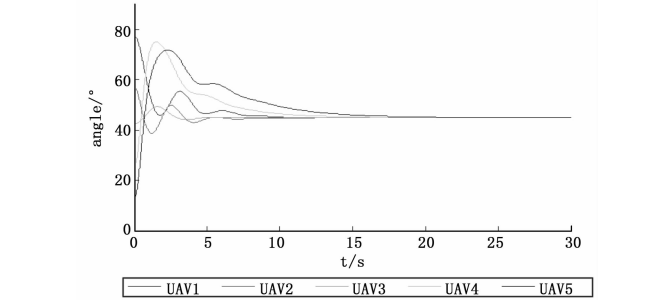


图 6 无人机航迹角变化曲线图

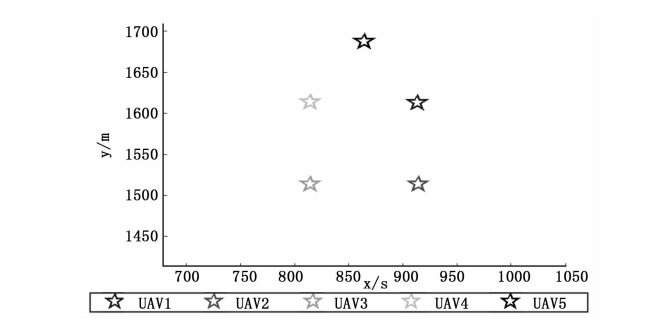


图 7 $t = 20\text{ s}$ 时无人机位置

机之间具有部分通信联络, 无人机根据邻居无人机的速度位置信息进行计算即可达到协同编队的目的。具有结构简单, 所需信息量小等优点。

参考文献:

[1] 沈林成, 牛铁峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
[2] 黄长强, 翁兴伟, 王 勇, 等. 多无人机协同作战技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
[3] Giuliotti F, Pollini L, Innocenti M. Autonomous formation flight [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2000, 20 (6): 34-44.

参考文献:

[1] 冯小溪, 张栋存, 康小麓. APD 单光子探测器的抑制技术 [J]. 中国科技信息, 2015, Z2: 29-31.
[2] 权菊香, 张东升, 丁良恩. Si-APD 单光子探测器的全主动抑制技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2006 (5): 43-46.
[3] 寇松峰, 陈 钱, 顾国华, 等. 基于 APD 阵列的单光子计数成像研究 [J]. 半导体光电, 2008 (6): 968-972.
[4] 张雪皎, 万钧力. 单光子探测器器件的发展与应用 [J]. 激光杂志, 2007 (5): 13-15.
[5] 彭孝东, 周金运, 廖常俊, 等. 雪崩抑制技术在 SPADs 中的应用 [J]. 光子技术, 2004 (2): 66-70.
[6] 林和志, 黄联芬. 零延时 RS-485 接口电路的设计与应用 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2005 (11): 31-33.
[7] 袁 俊, 吴广国, 张国青, 等. SPAD 单光子探测器 SPICE 电路模型的建立与仿真研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2009 (1): 62-68.
[4] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2003, 48 (6): 988-1001.
[5] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time - delays [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 2004, 49 (9): 1520-1533.
[6] Ren Wei. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formation [J]. IEL Control Theory & Applications, 2007, 1 (2): 505-512.
[7] Hong Y, Hu J, Gao L. Tracking control for multi-agent consensus with an active leader and variable topology [J]. Automatica, 2006, 42 (7): 1177-1182.
[8] Dong X W, Yu B C, Shi Z Y. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: theories and applications [J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2014, 23 (1): 340-348.
[9] Morbidi F, Freeman R A, Lynch K M. Estimation and control of UAV swarms for distributed monitoring tasks [A]. Proc. of the American Control Conference [C]. 2011: 1069-1075.
[10] Kuriki Y, Namerikawa T. Consensus-based cooperative control for geometric configuration of UAVs flying in formation [A]. ICE Annual Conference [C]. Nagoya, Japan, 2013: 1237-1242.
[11] Qin J H, Gao H J, Zheng W X. Second-order consensus for multi-agent systems with switching topology and communication delay [J]. Systems&Control Letters, 2011, 60 (6): 390-397.
[12] Richert D, Cortes J. Optimal leader allocation in UAV formation pairs ensuring cooperation [J]. Automatica, 2013, 49 (2013): 3189-3198.
[13] 符小卫, 崔洪杰, 高晓光. 多无人机集结问题分布式求解方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37 (8): 1797-1802.
[14] Jiang F C, Wang L. Consensus in leaderless networks of high-order-integrator agents [A]. Proceeding of American Control Conference [C]. Missouri, 2009: 4458-4463.
[15] 秦梓荷, 林 壮, 李 平, 等. 存在饱和输入量的前驱动船舶编队控制 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2015, 43 (8): 75-78.