

引用格式:周子昂,羊毅,郝培育.基于InGaAs/InP探测器的单光子探测电路研究[J].电光与控制,2019,26(11):105-110. ZHOU Z A, YANG Y, HAO P Y. Single-photon detection circuit based on InGaAs/InP APD[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(11):105-110.

基于InGaAs/InP探测器的单光子探测电路研究

周子昂^{1,2}, 羊毅², 郝培育²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 单光子探测技术利用单个光子作为信息载体, 可以突破现有激光探测极限, 是目前国内外应用基础研究的热点。采用InGaAs/InP APD(Avalanche Photodiode)探测1064 nm激光时, 存在较大的暗计数和后脉冲概率, 影响探测的准确率。对比分析了3种淬灭方式对单光子探测电路性能的影响, 门控淬灭相比被动淬灭和主动淬灭有更小的死时间, 对暗计数和后脉冲概率有更好的抑制作用。针对门控淬灭方式对比研究了正弦门控滤波法、自差分法、双APD平衡法和电容平衡法4种方案, 以有效降低门控信号产生的尖峰噪声。通过对正弦门控滤波法探测电路的优化设计与调试, 探测电路的死时间为9.3 ns, 在9%的探测效率下暗计数率为 $1.64 \times 10^{-6}/\text{ns}$, 后脉冲概率为3%。

关键词: 单光子探测; 单光子雪崩二极管; 淬灭电路; 正弦门控滤波法

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.11.022

Single-Photon Detection Circuit Based on InGaAs/InP APD

ZHOU Zi-ang^{1,2}, YANG Yi², HAO Pei-yu²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: Single-photon detection technology uses a single photon as the information carrier, which breaks the existing laser detection limit, and is currently a hot topic in applied basic research at home and abroad. When using InGaAs/InP APD (Avalanche Photodiode) to detect 1064 nm laser, there is a large dark-counting rate and after-pulse probability, which affects the accuracy of detection. Compative analysis is made to the effects of three quenching methods on the performance of single-photon detection circuit. Gated quenching has less dead time than passive quenching and active quenching, and has better inhibition of dark-counting rate and after-pulse probability. For the gated quenching method, four schemes of sinusoidal gating of self-differencing, dual-APD balanced detection and capacitance balance are studied to effectively reduce the spike noise generated by the gating signal. By optimizing and debugging the detection circuit of the sinusoidal gating method, the dead time of the detection circuit is 9.3 ns. When the detection efficiency is 9%, the dark-counting rate is $1.64 \times 10^{-6}/\text{ns}$ and the after-pulse probability is 3%.

Key words: single photon detection; single photon avalanche diode; quenching circuit; sinusoidal gating

0 引言

单光子探测技术能够将单个光子级别的光信号转化为宏观可检测的电信号, 有着非常广泛的应用前景, 如激光测距^[1-2]和量子保密通信^[3]。用于单光子探测的探测器主要有雪崩光电二极管(APD)、超导纳米

线单光子探测器(SNSPD)、光电倍增管(PMT)等。PMT在红外波段的量子效率较低, 体积较大、易受外部磁场干扰; SNSPD具有极低暗计数、低时间抖动、极高的量子效率的优势, 但是其工作温度通常在10 K左右甚至更低, 对制冷系统要求非常高; APD有着量子效率较高、响应速度快、雪崩增益大、体积小等优点^[4-6]。在机载远程单光子测距等对重量体积有较大限制的应用中, 采用工作在盖革模式(Geiger mode)下的InGaAs/InP APD, 能提供最优的单光子探测性能。但是工作在盖革模式下, APD产生的雪崩电流有自持性, 在被触发后无法探测后

收稿日期: 2019-08-20

修回日期: 2019-09-18

基金项目: 装备预研中航工业联合基金(6141B05060202)

作者简介: 周子昂(1994—), 男, 河南新乡人, 硕士生, 研究方向为机载单光子测距技术。

续到达的光子,需要淬灭电路将雪崩电流进行淬灭。门控淬灭有最短的死时间、较低的暗计数率和后脉冲概率,适用于高速单光子探测的应用场景。但是门控信号与 APD 耦合时会产生尖峰噪声,需要雪崩信号提取电路抑制尖峰噪声的同时放大雪崩信号使得雪崩信号能够从电噪声中被检出。当前主流的雪崩信号提取方式有正弦门控法、自差分法、双 APD 平衡法和电容平衡法。本文对比了 4 种雪崩信号提取方式的优劣并提出了适用场景,针对机载远程单光子测距,选用正弦门控滤波法设计了一套单光子探测电路并进行了性能测试。

1 单光子探测电路组成及工作原理

1.1 单光子探测电路组成

传统 APD 两端的反向偏压低于击穿电压 V_{br} ,工作在线性模式下产生 $10^2 \sim 10^3$ 的增益。而用于单光子探测时 APD 工作在反向偏压略高于击穿电压 V_{br} 的盖革模式下,内增益可达到 $10^5 \sim 10^6$,能够检测到更微弱的光信号。

单光子探测电路工作原理如图 1 所示,入射光子到达 APD 光敏面后,触发 APD 产生雪崩信号,经前置放大电路放大后与设置的门限阈值进行比较。若放大后的信号大于门限阈值,则输出 TTL 电平由光子计数器进行计数,同时淬灭电路将雪崩信号进行淬灭,为下一个光子的到来做好准备。

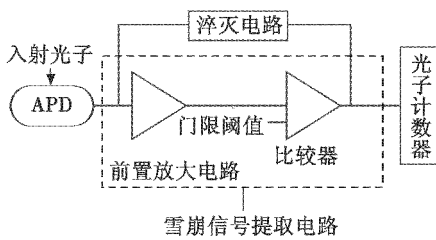


图 1 单光子探测电路工作原理框图

Fig. 1 Schematic of single photon detection circuits

1.2 单光子探测概率模型

在对回波光子进行探测时,考虑死时间、暗计数及背景噪声的影响,单脉冲信号探测概率可以表示为

$$P = e^{-t_d(f_n \cdot u \cdot u_p + f_d)} (1 - e^{-u \cdot n_s \cdot u_p}) \quad (1)$$

式中: t_d 为死时间; f_n 为背景光噪声频率; u 为量子效率; u_p 为门效率; f_d 为暗计数率和后脉冲概率; n_s 为单脉冲回波光子数。由式(1)可知,提升探测概率的主要途径有缩短死时间,减小背景光噪声频率、暗计数率和后脉冲概率,增大量子效率和门效率。先进的淬灭电路能够减小探测时的死时间并增大门效率,同时优化雪崩信号提取电路能够减小暗计数率及后脉冲概

率。因此研究单光子淬灭电路及雪崩信号提取电路对提升单光子探测性能有着重要意义。

2 门控淬灭电路优化分析

2.1 单光子淬灭电路原理

雪崩电流的自持性使得在雪崩发生后入射的光子不能触发 APD,同时持续的雪崩电流会损坏 APD。淬灭电路将雪崩电流熄灭,使 APD 重新进入待测状态。淬灭电路决定了探测的死时间和饱和计数率,对整个单光子探测的性能有着重要影响^[7]。

淬灭电路根据淬灭机理划分为被动淬灭、主动淬灭和门控淬灭。被动淬灭电路比较简单,但是死时间在 $1 \mu s$ 以上;主动淬灭电路复杂,死时间在 $10 ns$ 以上;门控淬灭采用高重频门控信号驱动时,死时间可以缩短到 $10 ns$ 以内。同时,门控淬灭有着最快的淬灭速度、最小的雪崩电荷量,能够抑制暗计数率和后脉冲概率,适用于高速单光子探测应用。本文针对机载远程单光子测距的应用需求,选取死时间最短且能较好抑制暗计数率和后脉冲概率的门控淬灭方案进行重点研究。

门控淬灭电路的高压由周期性的交流电压加上略低于雪崩击穿电压的直流电压组成。如图 2 所示,在门控信号处于低电平状态时,加载在 APD 上的电压小于雪崩电压。门控信号处于高电平时,加载在 APD 上的电压大于雪崩电压,此时入射光子能够触发 APD 产生雪崩电流。

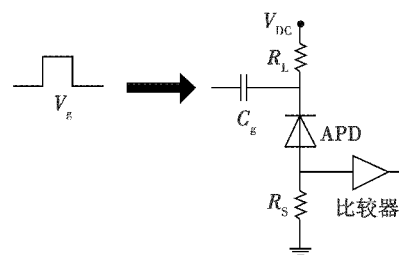


图 2 门控淬灭电路原理

Fig. 2 Gated quenching circuit configuration

但是,门控信号耦合在 APD 上会产生尖峰噪声使得雪崩信号难以提取,需要优化雪崩信号提取电路提高探测性能。为了抑制方波门控产生的尖峰噪声,可以采用正弦门控滤波法、双 APD 平衡法、自差分法和电容平衡法等方案^[8],接下来将对这些方案进行研究分析。

2.2 正弦门控滤波电路研究

2014 年,黄建华等采用 $1 GHz$ 的正弦门控信号驱动,配合 $700 MHz$ 的低通滤波器抑制 $1 GHz$ 以上的谐波噪声。在正弦门幅度为 $11 V$ 、偏压为 $50.4 V$ 时取得

了 10.29% 的探测效率和 $1.4 \times 10^{-5}/\text{ns}$ 的暗计数率，时间抖动为 108 ps^[9]。

因为门控信号变为正弦后，产生的噪声频谱主要为输入正弦信号频谱的整数倍，而雪崩信号通常在 700 MHz 以下，采用低通滤波器进行滤波即可消除噪声。该方法电路简单，门控信号频率达到吉赫兹水平后，有效门脉冲宽度小于 500 ps，雪崩电荷量远小于主动淬灭和被动淬灭，因此可以明显降低后脉冲概率。该方法存在

的问题是采用滤波器时，某些频谱成分被消除造成相位偏移，雪崩信号的半峰全宽会被展宽。

2.3 自差分法研究

袁之良首先提出了自差分方案。如图 3 所示，APD 的阳极信号被分成两路，对其中一路信号进行延时后与另一路进行差分放大。袁之良采用 2 GHz 的方波门控驱动，取得了 23.5% 的探测效率，同时后脉冲概率为 4.84%，暗计数率为 $2.64 \times 10^{-5}/\text{ns}$ ^[10]。

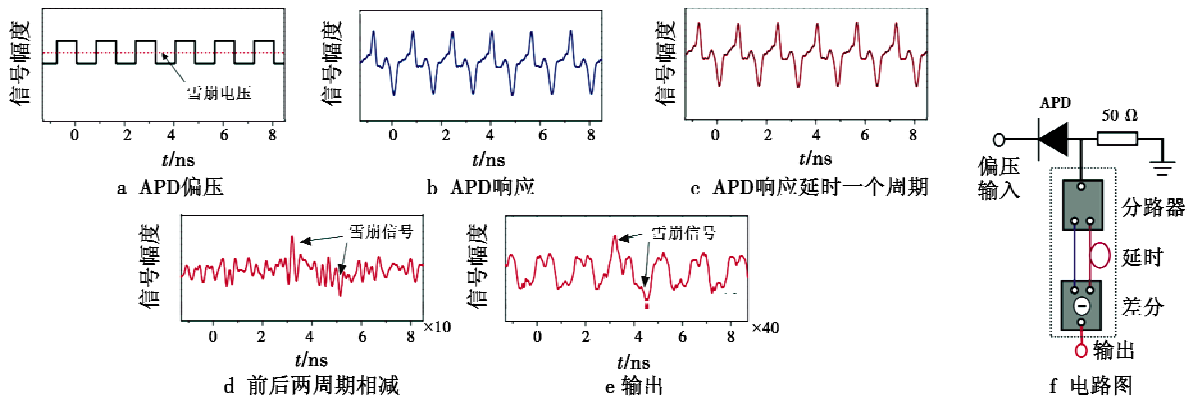


图 3 自差分方波门控电路

Fig. 3 Self-differencing square wave gating circuit

图 4 所示的自差分正弦门控方案^[11]采用 921 MHz 正弦门控，探测效率 9.3%，暗计数概率 $2.8 \times 10^{-6}/\text{ns}$ ，饱和计数率高达 100 MHz。该方案滤波后雪崩信号不会失真，理论上有很高的噪声抑制比。但是该方案对两个信号的延迟精度和衰减水平有较高的要求，需要精细调整。此外，在入射光能量增加或入射光脉宽很宽时，可能出现前后两个门内都有雪崩信号的情况。两个雪崩信号通过差分电路后计数为零，计数率和探测概率因此下降。

有显著增大。在 1.4 ns 的脉冲宽度下，单个雪崩信号的雪崩电荷量只有 0.09 pC 左右，很好地抑制了后脉冲概率。之后，又将方波门控换为正弦门控，为了更精确地相位匹配，在一个支路加入了移相器。10% 探测效率下的暗计数率为 $8.9 \times 10^{-6}/\text{ns}$ ，饱和计数率为 20 MHz。该方案不存在自差分方案中前后两个门内都有雪崩信号时，两个雪崩信号相减使得计数为零的问题，可以在高计数率时使用。但高性能的 APD 价格比较昂贵，采用两个 APD 的成本不适用于一般民用产品，这也是该方案的一大缺点。

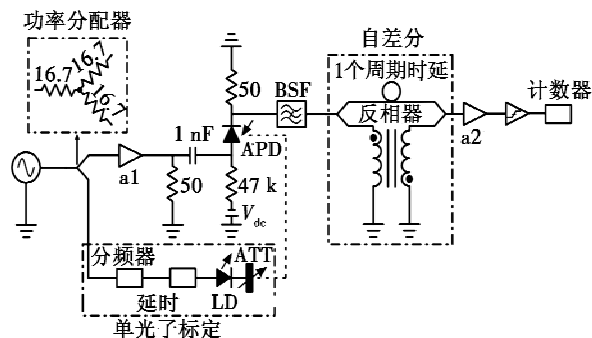


图 4 自差分正弦门控电路

Fig. 4 Self-differencing sine wave gating circuit

2.4 双 APD 平衡法研究

图 5 是双 APD 平衡法的电路原理图，卢致文设计了方波门控的双 APD 平衡法，并对探测效率和暗计数率进行测试^[12]。在计数率从 1 ~ 20 MHz 增大时，暗计数率没

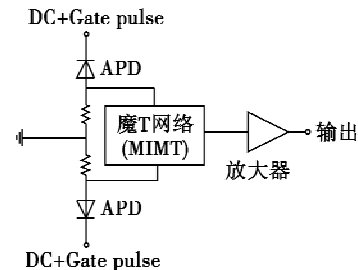


图 5 双 APD 平衡法电路

Fig. 5 Dual-APD balancing circuit

2.5 电容平衡法研究

电容平衡法用电容产生与尖峰噪声相似的信号，再通过魔 T 网络抵消掉尖峰噪声从而提取出雪崩信号。这种方法与双 APD 法类似，用一个合适的电容或者二极管替换了被遮光处理的 APD。

2016年,刘宏敏采用二极管代替电容,并对该探测电路在100~700 MHz频率下进行性能测试。保持10%的探测效率不变,100 MHz频率下暗计数率为 $6 \times 10^{-7}/\text{ns}$,后脉冲概率为2.3%;700 MHz频率下暗计数率为 $4.9 \times 10^{-6}/\text{ns}$,后脉冲概率为7.4%^[13]。该技术在一定程度上突破了电容平衡方法对工作频率上限的限制。

2018年,黄梓楠在电容平衡法中加入如图6所示的低通滤波^[14]。根据文献[13],在同样的探测效率下将暗计数率从 $4.9 \times 10^{-6}/\text{ns}$ 下降到 $4.97 \times 10^{-7}/\text{ns}$,下降了一个数量级,同时,后脉冲概率从7.4%下降到3.7%。

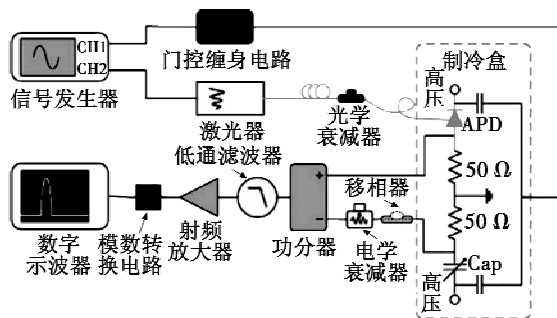


图6 电容平衡法加低通滤波法原理图

Fig. 6 Schematic of capacitance-balancing with low-pass filtering

相比双APD平衡法,电容平衡法用一个合适的电容或者二极管代替被遮光处理的APD,从而降低了成本。但是高频驱动下电容产生的尖峰噪声容易失真,通常用于200 MHz以下。采用与APD电容特性更为接近的二极管后,在高频下的电路性能显著提升,但后脉冲概率与其他方案相比仍然明显较大。文献[14]中,在电容平衡后又加入了低通滤波使得暗计数率减小一个数量级,后脉冲概率减小一半。

表1为各文献中门控淬灭配合4种雪崩信号提取方案的探测电路性能对比,不同方案适用的应用场景不同。

表1 各方案探测电路性能比较

Table 1 The detection circuit performance of each scheme

雪崩信号提取方案	门控频率/GHz	探测效率/%	暗计数率/ns	后脉冲概率/%	饱和计数率/MHz
正弦门控滤波法	1.5	10.8	3.6×10^{-6}	2.80	20
自差分法	2.0	11.8	7.58×10^{-6}	1.43	100
双APD平衡法	0.35	10	8.9×10^{-6}	-	20
电容平衡法	0.70	10	4.9×10^{-6}	7.4	-

本文设计的单光子探测电路将用于机载远程单光子测距,1 ns的时间抖动造成的测距误差只有15 cm,小于百公里测距误差要求。因此,根据表1中各方案探测电路性能的对比,选择暗计数率较小但是时间抖

动较大的正弦门控滤波法开展优化设计。

3 电路设计与实验测试

3.1 偏置电压产生电路设计

由直流高压电源模块、高速数模转换器(DAC)和放大器,通过电阻网络叠加方式可以得到APD所需的直流偏置电压。直流高压电源模块(MOD501382)可以将5 V输入电压转换为20~200 V的高压输出,电压值调节通过一个(DAC)来实现。另外,利用一个高速DAC(AD9762)和放大器(AD8067)可产生从-13~13 V的电压,两个电压通过电阻网络叠加产生一个梯形变化的电压波形。FPGA对DAC进行控制,实现不同电压的输出。

正弦门脉冲产生电路采用美国Crystek公司的正弦波时钟振荡器,产生125 MHz的正弦时钟作为PLL芯片(HMC821LP6CE)的参考时钟输入端。PLL芯片输出1040 MHz的正弦波信号,经过高速开关和功率放大器放大后,通过中心频率为1040 MHz的带通滤波器,滤波后的信号通过电容耦合到APD的反向偏置端,构成正弦门控信号。

3.2 前置放大电路设计

如图7所示,APD的阳极信号通过低通滤波器(LF-CN-575+)滤除1040 MHz的正弦门脉冲信号,再用两级高频宽带放大器(ADA4960-1)对雪崩信号进行放大,两个放大器级联后的放大倍数为30~60。对放大后的信号再进行低通滤波,将高频段的噪声进一步滤除,两级低通滤波器分别在1 GHz,2 GHz,3 GHz频率处的衰减倍数大于40 dB。后续整形电路将滤波放大后的信号整形为LVTTTL电平,通过高速比较器将雪崩信号检出。

3.3 实验测试

在实验室中,选用美国Princeton Lightwave公司的型号为PGA-080U-1064TOT的InGaAs/InP APD,采用1064 nm的激光器作为光源进行测试。所选APD的雪崩击穿电压 $V_{br} = 84.1 \text{ V}$,正弦门幅度过大时,若不降低直流偏置电压,暗计数率会显著增大;若降低直流偏置电压,探测门宽过短探测效率会降低。正弦门幅度过小时,反偏电压最大值超过雪崩电压的幅度也小,探测效率较低。综合探测效率和暗计数率对测距应用的影响,正弦峰峰值7 V时,探测效率为9%,暗计数率仅为 $1.64 \times 10^{-6}/\text{ns}$,后脉冲概率为3%。电路死时间为9.3 ns,饱和计数率为58 MHz。加入数据处理电路后,在光路中加入衰减片进行实际测距,采用消光比法折

算出的测程可达百公里以上,能够满足机载远程单光子测距的应用需求。

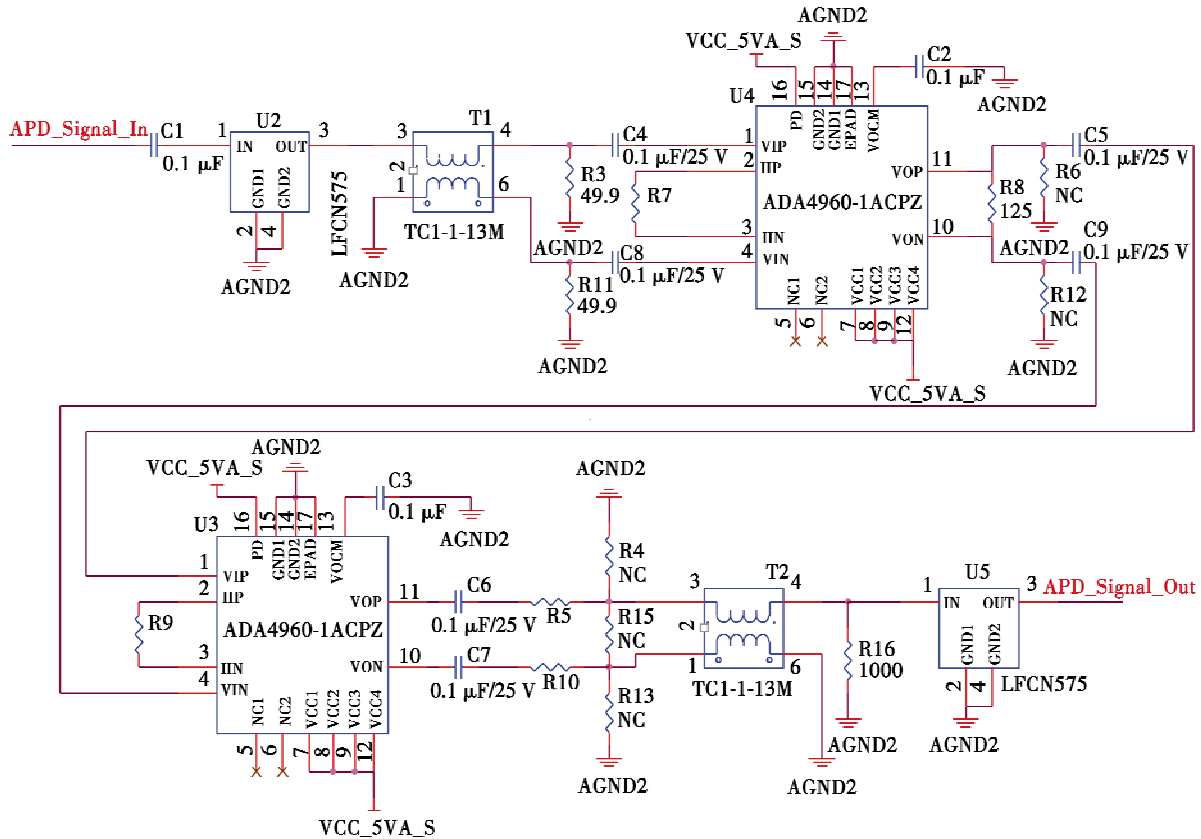


图 7 前置放大电路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the pre-amplifier circuit

4 结论

本文对比了 3 种单光子淬灭电路的优点和缺点,其中,高速门控淬灭电路以最小的死时间、对暗计数率和后脉冲概率有很好的抑制效果等优势适用于高速单光子探测的相关应用。又针对门控淬灭中尖峰噪声造成雪崩信号难以提取的问题,对 4 种雪崩信号提取方案进行研究对比。其中:正弦门控滤波法电路相对简单,但是雪崩信号会被展宽,时间抖动较大;自差分法的两条支路需要精确的相位和衰减匹配,且高计数率下存在两次雪崩信号相减导致计数为零的情况;双 APD 平衡法的成本较高,不适用于一般民用;电容平衡法难以用于吉赫兹及以上频率的门控驱动,后脉冲概率相对较高。本文根据机载远程单光子测距的应用场景,选取了正弦门控滤波法设计了一套单光子探测电路,探测死时间为 9.3 ns,在 9% 的探测效率下,暗计数率为 $1.64 \times 10^{-6}/\text{ns}$,后脉冲概率为 3%,能够满足机载远程单光子测距的应用需求。

参考文献

[1] 袁帅映,羊毅,董涛,等. 用于机载远程测距的单光子

探测关键技术仿真研究[J]. 电光与控制, 2015, 22 (2): 80-84.
 [2] 张庭发. 自由运转式近红外单光子探测器及其激光测距应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
 [3] 黄振, 蒋远大, 孙志斌, 等. 近红外单光子读取电路[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 464-468.
 [4] 刘凯宝, 杨晓红, 何婷婷, 等. InP 基近红外单光子雪崩光电探测器阵列[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56 (10): 22-41.
 [5] 白鹏, 张月蓓, 沈文忠. 半导体上转换单光子探测技术研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(22): 63-78.
 [6] 刘骋昊, 陈云飞, 何伟基, 等. 单光子测距系统仿真及精度分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 382-387.
 [7] YU Y, WANG C Y, SHI H W, et al. A review of quenching circuit design based on Geiger-mode APD[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), IEEE, 2018: 28-33.
 [8] 甘琳巧, 高家利. 半导体单光子探测器信号提取技术研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(5): 15-17.
 [9] 黄建华. 基于 InGaAs/InP APD 的单光子激光测距研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.

- [10] YUAN Z L, SHARPE A W, DYNES J F, et al. Multi-gigahertz operation of photon counting InGaAs avalanche photodiodes[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(7): 71101-1-71101-3.
- [11] ZHANG J, THEW R, BARREIRO C, et al. Practical fast gate rate InGaAs/InP single-photon avalanche photodiodes[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(9): 091103-1-091103-5.
- [12] LU Z W. Advanced devices and circuits for near infrared single photon detection[D]. Virginia: University of Virginia, 2013.
- [13] 刘宏敏, 陈杰, 梁焰, 等. 基于噪声平衡抑制的近红外单光子高速探测方法[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(5): 564-568.
- [14] 黄梓楠, 梁焰. 超短脉冲门控高速 InGaAs/InP APD 单光子探测[J]. 光学仪器, 2018, 40(4): 15-19.
- (上接第 98 页)
- [7] PAN J S, SUN D Q, PFISTER H, et al. Blind image deblurring using dark channel prior[C]//Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2016:1628-1636.
- [8] 徐宗琦, 高璐. 一种盲复原图像振铃效应的后处理与质量评价方法[J]. 计算机应用, 2007, 27(4): 986-988.
- [9] 茅天治, 王敬东, 孙震, 等. 天空区域分割的暗原色先验去雾视觉优化技术[J]. 半导体光电, 2017, 38(6): 902-907, 915.
- [10] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2009:1956-1963.
- [11] CAI J F, CANDÈS E J, SHEN Z W. A singular value thresholding algorithm for matrix completion[J]. SIAM Journal on Optimization, 2008, 20(4): 1956-1982.
- [12] LI X, DONG W S, SHI G M. Nonlocal image restoration with bilateral variance estimation; a low-rank approach [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(2): 700-711.
- [13] GU S H, ZHANG L, ZUO W M, et al. Weighted nuclear norm minimization with application to image denoising [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2014:2862-2869.
- [14] KRISHNAN D, FERGUS R. Fast image deconvolution using Hyper-Laplacian priors [C]//International Conference on Neural Information Processing Systems, 2009:1033-1041.

下 期 要 目

IMA2G 技术研究与实现

处理系统设计与实现

调制阵列多波束优化形成

基于双柱的无人机城市环境信道建模

基于区间变权灰色关联法的集群目标威胁评估

激光角度欺骗干扰系统作战效能研究

某舰载火箭炮交流伺服系统复合控制研究

数字图像识别的代价函数选择和性能评价

COTS IP 适航审定技术研究

改进粒子群优化算法的四旋翼 ADRC 姿态控制

无人直升机着舰甲板运动预估与补偿方法

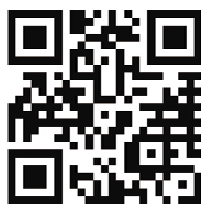
基于模型降阶的分数阶鲁棒控制器

最大控制律的多面体不变集鲁棒模型预测控制

统运动分析及建模仿真

基于支持度和记忆加权的陀螺阵列融合方法

基于包络前沿特性的干扰源个体识别研究



请扫描二维码关注我刊