

基于改进高速单光子探测器的复合跟踪 控制系统设计

徐乐凤, 孙 彬, 徐鲁波, 黄 劲, 王和欣

(泰山科学技术研究院, 山东 泰安 271000)

摘要: 由于半导体红外、光电倍增管单光子探测器受到噪声数据的影响, 使得光子计数统计结果不精准, 导致应用跟踪系统后, 存在控制效果差的问题; 利用雪崩光电二极管探测入射光和雪崩现象, 改进高速单光子探测器; 通过反馈控制环节实现猝灭, 终止雪崩, 将电压恢复到偏置电压; 利用改进后的探测器设计单光子探测信号检测电路, 获得所需要的基准电平, 完成复合跟踪控制系统的硬件结构设计; 设计信号传输计数控制流程, 并结合判别公式确定高速单光子探测器与单个因素跟踪度; 调节单光子探测器发射触发信号, 根据所得到的信号确定组合跟踪脉冲光子数, 以此为依据调整跟踪方案, 完成系统软件结构设计; 实验结果表明, 改进后的高速单光子探测器在复合跟踪控制系统应用中, 在 38.5 ns 时计数达到 220 个, 与实际结果一致, 具有较好的跟踪控制效果。

关键词: 高速单光子探测器; 复合跟踪; 雪崩光电二极管; 偏置电压; 噪声数据; 触发信号; 反馈控制

Design of Compound Tracking Control System based on Improved High Speed Single Photon Detector

XU Lefeng, SUN Bin, XU Lubo, HUANG Jin, WANG Hexin

(Taishan Institute of Science and Technology, Tai'an 271000, China)

Abstract: Because of the influence of noise data on semiconductor infrared and photomultiplier tube single photon detectors, the statistical results of photon counting are not accurate. As a result, the control effect is poor after the tracking system is applied. The avalanche photodiode is used to detect the incident light and avalanche phenomena, and the high-speed single-photon detector is improved. The feedback control is used to realize the quenching, the avalanche is terminated and the voltage is restored to offset voltage. The improved detector is used to design the single photon detection circuit and obtain the required reference level, and the hardware structure of the compound tracking control system is designed. The counting control flow of signal transmission is designed, and the high speed single photon detector and single factor tracking degree are determined by the discriminant formula. According to the obtained signal, the number of combined tracking pulses is determined by adjusting the trigger signal emitted by the single photon detector, and the software structure of the system is finished by the modified tracking scheme. The experimental results show that the number of the improved single photon detector reaches 220 at 38.5 ns in the compound tracking control system, which is consistent with the actual result and has good tracking control effect.

Keywords: high speed single photon detector; compound tracking; avalanche photodiode; bias voltage; noise data; trigger signal; feedback control

0 引言

单光子探测器作为复合跟踪控制系统的重要核心部分, 其性能参数直接影响系统的工作稳定性^[1]。单光子探测器作为系统信道接收端探测的重要核心器件, 可以稳定工作于各种环境。半导体单光子探测器因其体积小、可靠性高的优

点, 在实用化复合跟踪控制技术中占有重要地位^[2-3]。所以, 设计出高集成度、高性能半导体单光子探测器非常重要。

针对这一问题, 目前国内外已有大量的研究开发项目, 已经广泛应用到日常跟踪探测项目之中。文献 [4] 设计了火星探测器进入段姿态容错控制算法。该算法可以保证探

收稿日期: 2022-07-19; 修回日期: 2022-08-25。

基金项目: 山东省 2019 年度中央引导地方科技发展专项资金项目 (YDZX20193700002940); 依托于创新创业平台的中试基地建设运营探索——以“泰山创新谷”中试基地为例 (20-YB-167)。

作者简介: 徐乐凤 (1989-), 女, 山东泰安人, 助理研究员, 硕士, 主要从事控制科学与技术领域技术开发与推广、科技创新服务与管理方向的研究。

通讯作者: 孙 彬 (1987-), 男, 山东泰安人, 助理研究员, 大学本科, 主要从事非金属材料领域技术开发与推广、科技创新服务与管理方向的研究。

引用格式: 徐乐凤, 孙 彬, 徐鲁波, 等. 基于改进高速单光子探测器的复合跟踪控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(3): 155-161.

测器姿态的稳定性,且具有较高的姿态跟踪精度。然而,该装置容易受到高速脉冲影响,无法正常工作。文献 [5] 基于滑模控制提出了探测器进入段轨迹跟踪控制方法,并缓解了滑模控制产生的抖振。然而,该设备受噪声数据的干扰,导致控制效果较差。文献 [6] 构建了核电厂棒位检测系统中的单相逆变器输出电压环比比例一谐振控制数学模型,保证了输出电压的稳定。然而,该系统采集信号时出现延迟,导致控制不精确。文献 [7] 分析了单探测器复合跟踪方式的选择以及控制流程,并通过激光跟踪实验验证了其具有较好的跟踪效果。但是该方法受环境影响,导致跟踪控制精度有待进一步提升。文献 [8] 构建了不同光斑分布的四象限探测器捕获牵引模型,解算了光斑位置的解算,并标定了跟踪机构位置。但是该方法受高速脉冲影响,导致捕获数据存在一定的延时。文献 [9] 从硬件和软件两个方面,结合多种装置的模拟完成了深空探测器真空热环境模拟测试系统设计。但是该系统未针对光子探测器跟踪控制具体分析,其跟踪效果有待进一步分析。

本文设计了一个基于改进高速单光子探测器的复合跟踪控制系统。硬件部分,利用 4 个动作电位时程 (action potential duration, APD) 蓄电池构成单光子探测线路;设计 APD 装置来抑制雪崩,采用主动淬灭方式接收 APD 蓄电池的光子后,通过反射波获取雪崩信号,将信号放大器置于比较器的后端,确保光子信号盖过噪声信号,并建立探测属性信息库。软件部分设计了单光子信号传输计数控制流程和控制方案。经测试可知,设计系统不仅能够满足多条线路光子探测,还能分别统计光子数量。方便了用户信息查询,优化了信号传输计数控制效果。

1 单光子探测器

单光子探测器是一种极微弱光探测法^[10-11],可以对可见光和红外线段的单光子进行探测,可以实现噪声抑制和弱信号处理。如图 1 所示为单光子探测器结构。

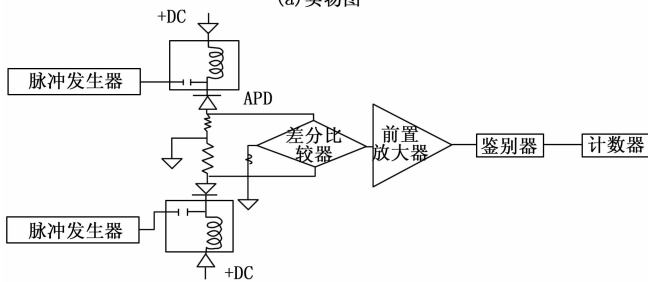
图 1 (a) 所示的单光子探测器为 NIR 单光子探测器模块。该探测器支持门控模式和自由运转模式,触发频率高达 100 MHz,且有低暗计数和时间抖动功能。单光子探测器原理为放大单光子激发的单个光电子信号,通过脉冲甄别和数字计数等技术识别提取极弱光电子信号,达到光电探测的超灵敏极限。但由于工作环境的不同,单光子探测器存在一定的局限性,为此需要多个 APD 蓄电池共同工作。

本文改进设计的高速单光子探测器:是由多个 APD 蓄电池构成,根据光子成像原理,设计相关硬件结构时,需将 APD 蓄电池组合成线列或阵列结构形式,增加高速单光子探测面积^[12]。由于单一 APD 构成的单光子探测器只能探测到一路光子,因此不适合于光子成像领域^[13]。比如量子雷达系统,可以从远距离探测到微弱信号,模拟目标。要对物体进行成像,必须使用多个 APD。改进后的探测器硬件结构,如图 2 所示。

对比图 1 和图 2 可知,改进后的探测器硬件结构是由 4



(a) 实物图



(b) 探测原理

图 1 单光子探测器

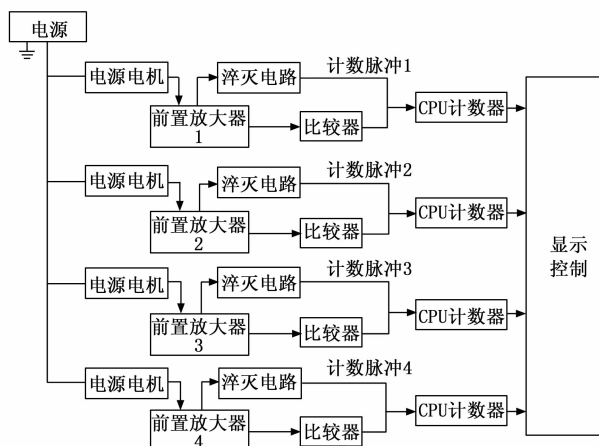


图 2 改进后的探测器硬件结构

个 APD 蓄电池构成的单光子探测线路。在其应用过程中,当雪崩来临时,由 4 个 APD 蓄电池共同分担电源电压,从而使流经 APD 的电流低于 APD 的雪崩熄灭阈值,直至雪崩终止。改进后的探测器具有下述优点:能够满足多条线路光子探测,还能分别统计光子数量。

2 系统改进设计

2.1 系统总体架构

基于图 2 所示的改进后探测器硬件结构,优化设计高速单光子探测器复合跟踪控制系统,具体优化过程如图 3 所示。

对图 3 分析可知,硬件设计包括雪崩光电二极管的设计、反馈控制电路图的设计以及单光子探测信号检测电路设计。软件设计包括信号传输计数控制流程分析和控制方案设计。基于图 3 所示的高速单光子探测器复合跟踪控制系统优化设计流程,设计基于改进高速单光子探测器的复合跟踪控制系统。

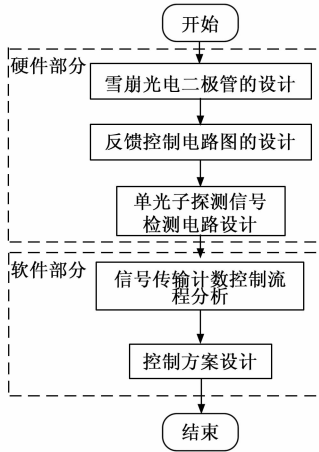


图 3 系统优化设计流程

2.2 硬件系统改进设计

2.2.1 雪崩效应的终止

雪崩光电二极管被应用于很多领域, 常使用硅或锗为材料制造而成, 其拥有 P-N 结, 可以将射入光转化为光电流, 由于单光子探测系统容易出现雪崩效应^[14], 使用雪崩光电二极管探测入射光线。在 APD 作用于 APD 后, APD 作用于盖革模式。入射光能产生一定的载波, 载波光流在强电场作用下, 将加速向晶格冲刷, 从而产生大量的光载流子。当光载流子高效增加到一定程度后, 立刻爆发出来, 与雪崩效果一样, 由此也产生了大量电流^[15]。APD 利用雪崩效应来实现光电倍增的功能, 然而, 对于雪崩效应来说, APD 本身也无法阻止雪崩^[16-17], 因此会降低探测效率, 而且可能破坏 APD, 因此需要设计一个外部电路来抑制雪崩。雪崩光电二极管的结构如图 4 所示。

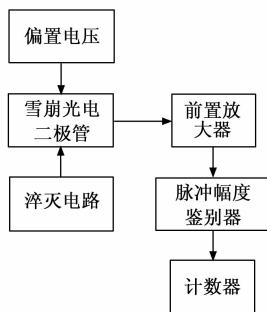


图 4 雪崩光电二极管工作框图

APD 单光子探测系统不仅要提供 APD 反向偏压实现探测, 还要对雪崩现象有效控制。因为 APD 装置必须在尽可能低的温度下工作, 雪崩效应会使单光子探测系统中 APD 装置的温度和噪声增大。

2.2.2 基于反馈控制实现淬灭

反馈控制环节是主动淬灭方式核心的一部分, 其反馈控制电路如图 5 所示。

由图 5 可知, 采用主动淬灭方式接收 APD 蓄电池的光子后, 通过反射波获取雪崩信号。在获取雪崩信号的同时,

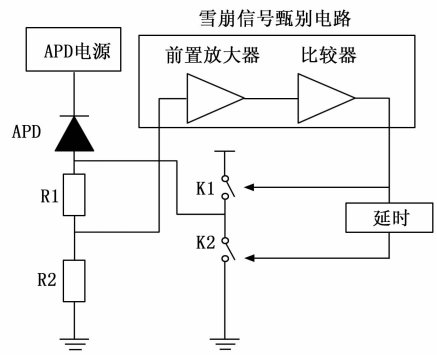


图 5 反馈控制电路

触发脉冲信号, 由此控制 K1 开关闭合, 并将电压迅速施加到蓄电池阳极, 从而实现淬灭。选择适当的电源, 分担电源压力, 防止达到崩溃电压, 从而解决雪崩效应带来的问题。当雪崩停止后, 切断 K1, 控制 K2 关闭, 迅速降低 APD 阳极电压, 将 APD 两端电压恢复到偏置电压。

2.2.3 单光子探测信号检测电路改进设计

单光子探测信号检测电路需直接从噪声信号中提取单光子信号, 该过程难免出现一定误差, 所以, 提取过程中, 为确保光子信号盖过噪声信号, 需要将信号放大器置于比较器的后端, 并设定基准电平。当基准电平固定时^[18], 弱噪声信号不影响比较器的工作精度, 因此不会产生单光子信号。当单光子信号不再高于参考电平时, 比较器工作状态就会发生改变, 此时利用计数器统计单光子信号。单光子探测信号检测电路如图 6 所示。

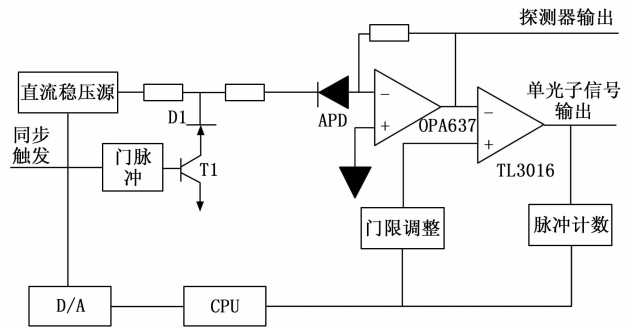


图 6 单光子探测信号检测电路图

图 6 所示的单光子探测信号检测电路参考电压为 0 V 至 5 V, 其大小为从外输入, 经中央处理器 (central processing unit, CPU) 处理、数字信号采集、数模转换器 (digital to analog converter, D/A) 转换, 经 TLE2072 运算放大器放大, 最终得到所需的基准电平, 至此关键硬件设计完成。其中 TLE2072 运算放大器每个通道的输出电流为 48 mA, 输入偏流为 175 pA, 输入偏置电压为 3.5 mV。

2.3 系统软件设计

系统软件需要将空间分布数据进行采集、处理、分析, 对单光子信号传输进行预判, 确保了单光子信号的完整性和准确性, 处理信息保证单光子信号运行的逻辑完整性。

2.3.1 单光子信号传输

以上文的单光子信号传输硬件平台为基础，可以加载、显示具有一定格式的数字地图，并具有缩放、自动移动等功能。建立了探测属性信息库，方便了用户的信息查询。单光子信号传输计数控制流程如图 7 所示。

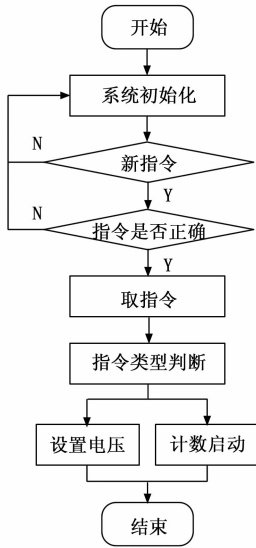


图 7 信号传输计数控制流程

由图 7 可知，该流程主要包括：“定电压”程序、“启动计数”程序、“暂停计数”程序、“发送当前电压”程序和“发送当前计数”程序。根据指令类型，进行电压设定，计数启动。

单光子信号的传输计数精度是影响复合跟踪控制效果的关键因素，结合判别公式，确定了高速单光子探测器的复合跟踪程度与单个因素跟踪程度关系式：

$$y = ax + R^2 \tag{1}$$

式中， y 为复合跟踪程度； x 为单个因素跟踪程度； a 为智能跟踪程度； R 为拟合度，是判定复合跟踪程度的重要指标。

2.3.2 控制方案设计

步骤一：调试单光子探测器。

调试单光子探测器时，要求采用高速单光子源作为发射器^[19]，产生 200 MHz 正弦信号，经过功率分配器后，将信号转化为电压形式，加载到 APD 蓄电池上，此时电压略高于雪崩时的电压；

步骤二：传输触发信号。

正弦信号经过分频处理后，形成窄脉冲信号，经过二极管调节延时定时器，由此触发传输信号，保证每个脉冲的光子信号衰减到 0.1 左右，通过单模光纤向 APD 传输；

步骤三：设计高速单光子源。

通过预测单光子信号传输路径，结合单光子信号传输特性，可以预测其中的高速单光子源，并结合预测结果对高速单光子源进行设计，保证每一个光脉冲约有 0.1 个光子，通过分光器进入一个可调衰减器^[20-21]中；

步骤四：确定探测器复合跟踪脉冲光子数。

探测器复合跟踪脉冲中包含光子的概率可表示为：

$$P_n = \frac{v^n}{n} \tag{2}$$

式中， n 为脉冲光子数量； v 为平均光子数。

每个脉冲都含有光子的概率可表示为：

$$P' = \frac{v^2}{2} \tag{3}$$

式 (3) 中，当含有 0.1 个光子脉冲经过单光子探测器后，脉冲^[22-23]会产生单光子源。

步骤五：控制因素确定与跟踪调节。

对单光子探测器复合跟踪控制而言，单光子探测波长稳定度指标是关键。假设单光子探测器偏振方向为 Z 方向，探测器在二维空间下的矩阵可表示为：

$$W_z = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{4}$$

单光子探测器激光在经过起偏器后，基于该矩阵在二维空间下的矩阵计算波长。波长^[24-25]指的是在一个高速单光子探测器复合跟踪控制周期内的传播距离。波长计算公式为：

$$\lambda = \frac{u}{f} \tag{5}$$

式中， u 为传播速度； f 为频率。

在脉冲信号传输过程中，光子波长稳定性取决于信号传输稳定性。在不同环境下，光子波长不一，这与脉宽调制有关，相干长度会受到脉宽影响，导致光子波长无法满足实际探测需求。因此要求单光子探测器要求中心波长摆动至峰值波长 $\ll 0.01$ nm，在该约束条件下，有效跟踪控制高速单光子探测器。

3 实验测试结果与分析

为了验证设计的高速单光子探测器复合跟踪控制系统的有效性，以图 8 所示的高速单光子芯片为测试对象，接入图 9 所示的模拟电路中完成测试。

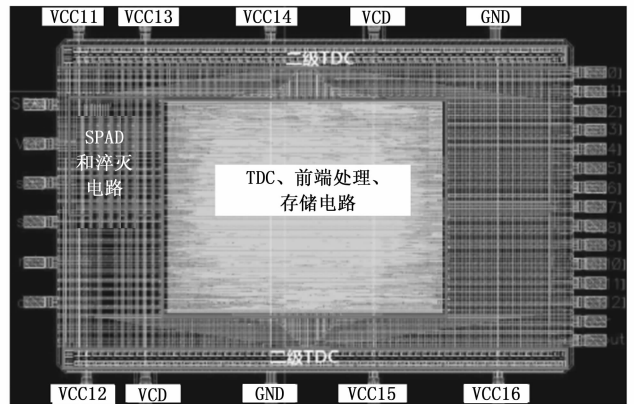


图 8 高速单光子芯片

图 8 所示的高速单光子芯片电压为 2.7~6 V，输出电压为 5.5 V，电流输出为 2 A，频率开关为 1 MHz。

图 9 所示的高速单光子芯片的版图面积是 $2\ 800 \times 1\ 900 \mu\text{m}$ ，搭建仿真环境对跟踪控制系统整体进行数模混合。

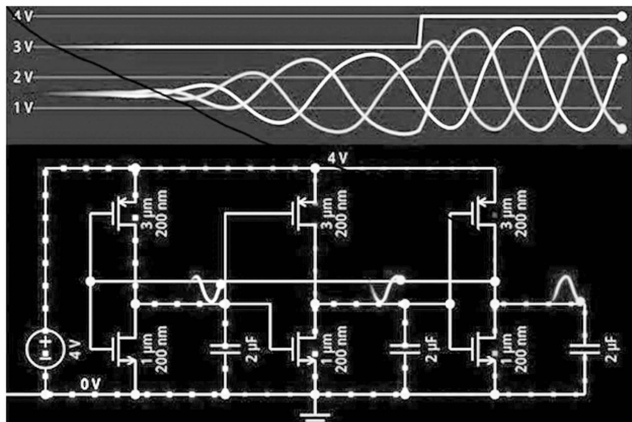


图 9 高速单光子探测器复合跟踪控制系统模拟电路

3.1 实验步骤及思路

步骤一: 由高速光子探测器发出的雪崩信号, 此时, 甄别电路如图 10 所示。

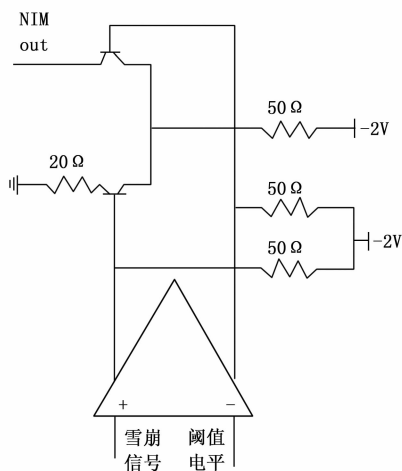


图 10 雪崩信号甄别电路

由图 10 可知, 当雪崩信号低于阈值电平时, 核仪器插件 (nuclear instrument module, NIM) out 处输出低电平信号, 即信号数量表示光子数量。当雪崩信号高于阈值电平时, NIM out 处输出高电平信号, 此时不会产生光子。

步骤二: 雪崩信号放大处理。

雪崩信号经过放大器处理后, 波动幅度在 200 mV 左右, 而影响雪崩信号的噪声信号波动幅度在 50 mV 左右, 产生这种现象的主要原因是屏蔽了 APD 蓄电池信号, 所以雪崩信号受到噪声干扰后出现了失真问题。雪崩信号波形图, 如图 11 所示。

由图 11 可知, 当比较器输出电平较低时, 需将噪声信号也视为雪崩信号的一部分, 这时统计的结果误差较小。当比较器输出电平较高时, 雪崩信号无法达到理想的信号采集结果, 漏掉大部分雪崩信号, 这时统计的误差较大。

步骤三: 获取光子计数结果。

针对该问题, 直接统计比较器的脉冲信号, 通过统计脉冲信号就可得到光子计数结果, 光子计数时间分布情况

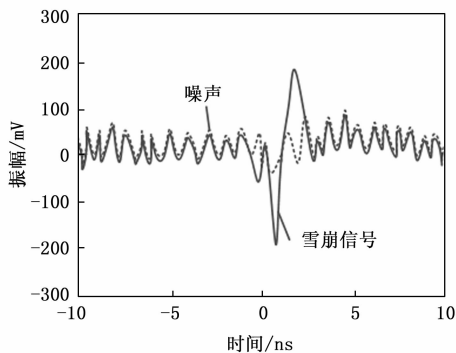


图 11 雪崩信号波形图

如图 12 所示。

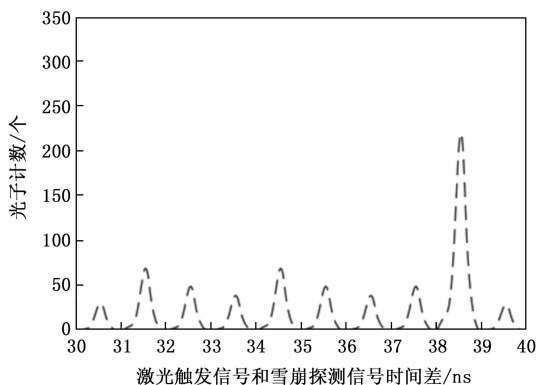


图 12 光子计数时间分布示意图

由图 12 可知, 时间在 38.5 ns 时, 计数达到最多, 说明该时间内有激光光子到达。

步骤四: 以跟踪精度、通信开销、跟踪时间为指标, 分别采用文献 [4] 容错控制系统、文献 [5] 分数阶滑模控制系统和本文的高速单光子探测器复合跟踪控制系统进行下述实验, 具体结果如下所示。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 光子计数结果

基于上述指标, 分别使用文献 [4] 容错控制系统、文献 [5] 分数阶滑模控制系统和本文的高速单光子探测器复合跟踪控制系统对比分析光子计数统计结果, 3 种系统光子计数统计结果如图 13 所示。

由图 13 可知, 使用文献 [4] 容错控制系统在 31.5 ns 时, 计数达到最多为 135 个; 使用文献 [5] 分数阶滑模控制系统在 30.5 ns 时, 计数达到最多为 155 个; 使用本文的高速单光子探测器复合跟踪控制系统在 38.5 ns 时, 计数达到最多为 220 个。由此可知, 使用本文的高速单光子探测器复合跟踪控制系统光子计数统计结果与实际结果一致, 说明跟踪控制效果较好。

3.2.2 跟踪控制精度结果

高速单光子探测器的复合跟踪控制精度测试指标为均方根误差 (RMSE), 为了更好地展示分析跟踪控制准确度, 通过 1 000 次迭代计算, 获取不同系统的均方根误差 RMSE, 计

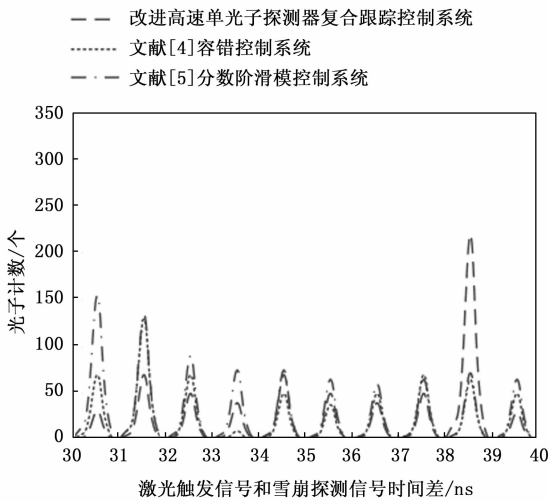


图 13 3 种系统光子计数统计结果

算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^N (k_1 - k)^2} \quad (6)$$

式中, N 为迭代次数, k_1 为观测值, k 为预测值。

根据式 (6) 的计算结果可知, 复合跟踪控制过程中均方根误差越低, 说明对应系统的跟踪精度越高, 反之则越差, 3 种系统的复合跟踪控制精度结果如图 14 所示。

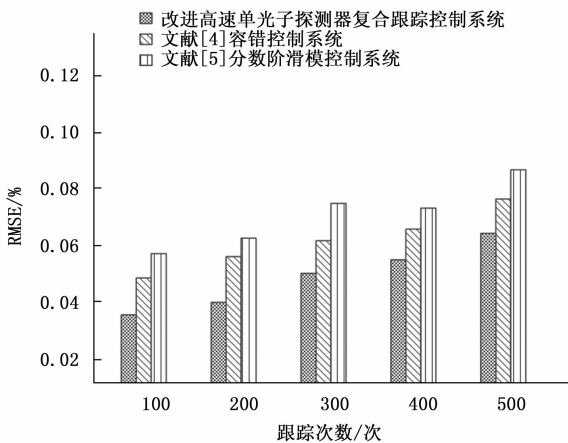


图 14 不同方法的跟踪精度测试结果

分析图 14 可知, 随着跟踪次数的上升, 3 种系统测试出的均方根误差均出现了不同程度的上升趋势。其中, 本文系统在跟踪时测试出的均方根误差是 3 种系统中最低的。这主要是因为所提方法在跟踪控制前, 通过 4 个 APD 蓄电池共同分担雪崩带来的高电流, 防止了电流突增对跟踪控制精度的影响, 所以该方法跟踪控制精度高。

3.2.3 通信开销结果

以量子雷达系统为应用场景, 以通信开销为测试指标, 分析 3 种系统对雷达探测目标的跟踪效果。结果如图 15 所示。

通信开销越大, 说明雷达探测目标跟踪时的跟踪效果越差, 开销越小, 说明跟踪效果越好。分析图 15 可知, 随

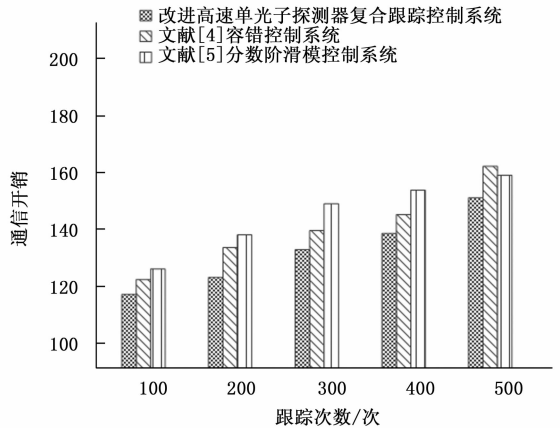


图 15 不同方法的通信开销测试结果

着跟踪次数的增加, 3 种系统在目标跟踪时测试出的通信开销都出现了增大趋势。但是, 本文系统在目标跟踪时测试出的通信开销低于对比系统的测试结果, 由此可证明, 本文系统在目标跟踪时, 该方法具备较好的有效性。

3.2.4 执行时间测试

同样以量子雷达系统为应用场景, 设置目标与雷达距离为 1 500 km, 目标为动态目标, 其运动范围为 $5^\circ \sim 30^\circ$ 。测试 3 种系统的目标跟踪时间, 测试结果如表 1 所示。

表 1 不同方法的目标跟踪时间测试结果

测试次数/次	执行时间测试结果/ms		
	本文系统	文献[4]系统	文献[5]系统
50	20	35	34
100	33	48	56
150	35	50	61
200	38	53	64
250	44	59	70
300	49	64	75
350	50	65	76
400	52	67	78
450	62	77	88
500	73	88	99
550	84	99	110

分析表 1 可知, 测试次数的增加会提升目标跟踪方法的跟踪时间。但是, 本文系统测试出的目标跟踪时间是 3 种系统中最低的, 最高时间为 84 ms, 其主要原因是本文系统优化了雪崩光电二极管的偏置源电路和信号检测电路, 提高了系统硬件性能, 进一步优化了目标跟踪时间。

4 结束语

设计改进的高速单光子探测器复合跟踪控制系统, 结合门控雪崩抑制方法, 对雪崩光电二极管的偏置源电路和信号检测电路进行了精确设计。通过分析研究表明, 单稳态电路的瞬态可等效为“光子门”, 可以取代传统的直流电平叠加方式实现的脉冲。这种方法不仅简单方便, 而且还适用于各种 APD 系统, 有效控制高速单光子探测器。针对

单光子探测的进行了几个方面的分析与研究,定性的探测和实验都是在太阳的紫外照射下进行的,而单光子探测系统是一个非常复杂的系统,还需要进一步地完善和改进,才能定量分析单光子探测器的计数精度,并在其他波长下实现单光子探测,因此设计单光子探测器具有更广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 张群,刘博,华康健,等.基于单元探测器的激光跟踪技术研究[J].光学与光电技术,2022,20(2):105-112.

[2] 肖韶荣,刘博涵,石刘峰,等.光电探测器尺度效应对能见度测量不确定度的影响[J].中国激光,2021,48(12):182-192.

[3] 殷宗迪,高志远,朱猛,等.机载激光武器高精度跟踪控制技术[J].红外与激光工程,2021,50(8):220-228.

[4] 戴清,周洪刚,刘鹏轩,等.考虑失效性故障的火星探测器进入段姿态容错控制[J].中国空间科学技术,2022,42(1):73-82.

[5] 范存礼,戴娟,刘海涛,等.基于神经网络与分数阶滑模的行星进入段轨迹跟踪控制[J].系统仿真学报,2021,33(11):2697-2703.

[6] 王春蕾,陈帅君,黄可东,等.基于根轨迹法的核电厂棒位探测器电源PR控制的研究[J].核动力工程,2021,42(1):113-117.

[7] 张敏,佟首峰,滕云杰.空间激光通信单探测器复合跟踪控制技术研究[J].激光与红外,2019,49(8):983-986.

[8] 鲁倩,任斌,边晶莹.四象限探测器的信号光捕获与跟踪技术研究[J].光电工程,2020,47(3):155-160.

[9] 李君.基于GIS的深空探测器真空热环境模拟测试系统设计[J].计算机测量与控制,2021,29(10):7-11.

[10] 刘东旭,于笑楠,佟首峰,等.基于单光子探测及脉冲位置调制的激光通信关键技术研究[J].光子学报,2021,50(3):40-49.

[11] 刘煦,李云铎,叶联华,等.单光子探测InGaAs雪崩焦平面像素级高分辨率低误码时间数字转换电路[J].红外与激光工程,2021,50(11):103-111.

[12] 刘斌,徐晖.某轿车空气悬架PID控制系统仿真研究[J].农业装备与车辆工程,2022(4):152-156.

[13] 张裕晨,高坤明,路艳玲,等.基于正交试验法整定主动悬架PID控制器参数[J].山东理工大学学报(自然科学版),2021(1):63-68.

[14] 张宝玉.基于模糊PID的汽车巡航控制系统研究[J].汽车实用技术,2020(24):19-21.

[15] 陈哲明,马万力,白恒星,等.基于变论域模糊PID控制动力总成主动悬架分析[J].重庆理工大学学报(自然科学),2021(6):50-55.

[16] 张向清.基于YOLO算法的无人机视角下行人小目标检测[J].信息与电脑(理论版),2021(15):76-78.

[17] 程旭,宋晨,史金钢,等.基于深度学习的通用目标检测研究综述[J].电子学报,2021(7):1428-1438.

[18] 于波,刘畅.基于改进SSD算法的行人检测方法[J].

[12] 向凯跃,孙佳男,刘旺,等.单光子探测器阵列级读出电路与接口显示系统[J].传感器与微系统,2020,39(9):80-83.

[13] 董婧雯,李若明,李王哲.微波光子雷达逆合成孔径成像[J].雷达科学与技术,2021,19(2):225-232.

[14] 章琪文,陈洪雷,丁瑞军.77K下碲镉汞APD探测器的高精度时间数字转换电路[J].红外与毫米波学报,2022,41(1):362-369.

[15] 刘盛,李焱,李天浩,等.广义S变换鉴别电力变压器励磁涌流特征量的仿真研究[J].自动化仪表,2021,42(8):23-26.

[16] 李再波,李云雪,马旭,等.雪崩光电二极管过剩噪声的测量和抑制方法[J].红外技术,2022,44(4):343-350.

[17] 沈川,杨辽,郭慧君,等.中波PIN结构碲镉汞雪崩器件变温特性的数值模拟研究[J].红外与毫米波学报,2021,40(5):576-581.

[18] 司可,吴玲玲,梁海锋.基于MPPC探测器的激光脉冲信号读出电路设计[J].自动化与仪表,2021,36(1):77-81.

[19] 马啸,孙铭烁,刘靖阳,等.一种基于标记单光子源的态制备误差容忍量子密钥分发协议[J].物理学报,2022,71(3):22-27.

[20] 贾建科,王新宽,郑春来,等.基于枝节加载多模谐振器的电调微波滤波器设计[J].计算机测量与控制,2022,30(6):296-301.

[21] 闫景涛,缪立军,毛建峰,等.高斯白噪声相位调制的激光光谱展宽[J].光谱学与光谱分析,2022,42(3):665-671.

[22] 刘剑,黄典,贺青,等.基于光子数可分辨探测器的单脉冲光子数检测[J].激光技术,2022,46(1):58-63.

[23] 王帅康,吴仲,董杰,等.一种用于单光子探测器的高速门控淬灭电路[J].半导体技术,2022,47(7):544-548.

[24] 李百宏,夏志广,项晓,等.基于波长到时间映射快速测量纠缠光子相位匹配波长的实验方法[J].中国激光,2021,48(3):148-155.

[25] 张文英,胡鹏,肖游,等.高效、偏振不敏感超导纳米线单光子探测器[J].物理学报,2021,70(18):346-352.

[26] 电子测量技术,2021(12):24-28.

[27] 武明虎,黄咏曦,王娟.基于改进YOLOv3的街道行人检测与跟踪方法[J].科学技术与工程,2021(17):7230-7236.

[28] 张宏群,班勇苗,郭玲玲,等.基于YOLOv5的遥感图像舰船的检测方法[J].电子测量技术,2021(8):87-92.

[29] 张俊凯.基于无人机图像的多尺度行人检测定位技术[J].电子技术与软件工程,2021(8):162-164.

[30] 徐斌,黎宁,朱含杉,等.无人机平台下的行人目标检测[J].计算机与数字工程,2019(8):1935-1940.

[31] 苟小珊.一种基于背景建模的目标检测算法[J].山东工业技术,2016(16):271-272.

[32] 余芳,岳冬利,王岁花.基于改进几何特征的三维人脸识别方法[J].计算机仿真,2011(4):291-294.

[33] 者昊,马若飞,马义德.基于高斯模型的人脸检测算法[J].微计算机信息,2010(32):191-192.

(上接第154页)