

基于单光子雪崩二极管的激光雷达建模与仿真

何燃^{1,2*}, 朱亮^{1,2}, 董俊发^{1,2}, 肖振中², 董玉明¹¹中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518052;²奥比中光科技股份有限公司, 广东 深圳 518055

摘要 基于单光子雪崩二极管(SPAD)的激光雷达凭借其灵敏度高、探测距离远、集成度高等优点被广泛应用于三维感知领域。SPAD激光雷达系统中包含各种功能的子模块。研究这些子模块对激光雷达系统性能的影响有助于进一步优化系统方案,提高研发效率,降低研发成本。因此,从系统子模块的特性出发,利用时间相关单光子计数技术(TCSPC)和蒙特卡罗法建立了基于SPAD的激光雷达模型,得到了被动复位电路和主动复位电路、单事件首光子时间数字转换器(TDC)和多事件TDC对系统性能的影响。结果表明:在目标飞行时间为20 ns、环境光为 50×10^3 lx、目标反射率为10%的条件下,主动复位电路与被动复位电路的系统性能基本相当;当目标反射率增加到50%后,主动复位电路的系统性能优于被动复位电路;类似地,多事件TDC的系统性能优于单事件首光子TDC,主要表现在,与单事件首光子TDC相比,多事件TDC的噪声本底计数为均匀分布,其信号计数的峰值更易大于噪声本底计数的峰值,寻峰算法更简单,算力需求更少。仿真结果表明,为使系统性能最优化,SPAD集成芯片的后端子模块应采用主动复位电路和多事件TDC的组合架构。

关键词 激光雷达; 单光子雪崩二极管; 建模与仿真; 淬灭电路; 时间数字转换器

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232126

Modeling and Simulation of LiDAR Based on Single-Photon Avalanche Diode

He Ran^{1,2*}, Zhu Liang^{1,2}, Dong Junfa^{1,2}, Xiao Zhenzhong², Dong Yuming¹¹Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518052, Guangdong, China;²Orbbec Technology Group Co., Ltd., Shenzhen 518055, Guangdong, China

Abstract The LiDAR based on single-photon avalanche diode (SPAD) is widely used in 3D perception due to its advantages of high sensitivity, long detection distance and high integration level. The LiDAR system based on SPAD contains various sub-modules, and studying the influence of different types of sub-modules on the performance of LiDAR system can help optimizing the system scheme, improving R&D (research and development) efficiency, and reducing R&D cost. Therefore, according to the feature of sub-modules, we use the time-correlated single-photon counting technology (TCSPC) and the Monte Carlo method to establish the LiDAR model based on SPAD. The effects on system performance of passive reset circuit and active reset circuit, single-event first-photon TDC (time to digital converter) and multi-event TDC are obtained. The results show that the system performance of the active reset circuit and the passive reset circuit is basically the same under the conditions of the time of flight of 20 ns, the ambient light of 50×10^3 lx, and the target reflectivity of 10%. After the target reflectivity increases to 50%, the system performance of the active reset circuit is better than that of the passive reset circuit. Similarly, the system performance of multi-event TDC is better than that of single-event first-photon TDC, mainly because the noise of multi-event TDC is uniformly distributed, and compared with single-event first-photon TDC, the peak value of signal count of multi-event TDC is more likely to be greater than the peak value of noise floor count, and the corresponding solution range algorithm is simpler and requires less computing power. The simulation results show that in order to optimize the system performance, the sub-module of the SPAD integrated chip should adopt the architecture of active reset circuit and multi-event TDC.

Key words LiDAR; single-photon avalanche diode; modeling and simulation; quenching circuit; time to digital converter

收稿日期: 2023-09-14; 修回日期: 2023-09-25; 录用日期: 2023-10-20; 网络首发日期: 2023-10-23

通信作者: heran_2013@126.com

0 引言

近年来,随着人工智能、大数据和云计算的飞速发展,市场对智能化的需求日益旺盛。激光雷达凭借其使用环境范围广(无论白天还是夜晚均可正常工作)、感知精度高、响应速度快等优点被广泛应用于手机、扫地机器人、服务机器人、无人驾驶等方面^[1]。目前激光雷达接收器件主要有普通光电二极管(PIN)、雪崩光电二极管(APD)、硅光电倍增器(SiPM)以及单光子雪崩二极管(SPAD)。PIN无增益,仅对强光响应,探测距离近;APD增益为几十至几百,对中强光有响应,探测距离中等;SiPM工作在盖革模式下,增益高达 $10^5 \sim 10^6$,对极微弱光甚至单个光子有响应,探测距离远;SPAD与SiPM类似,也工作在盖革模式下,灵敏度高,对极微弱光有响应。不同的是, SiPM属于分立器件,在系统中, SiPM需要结合跨阻放大器(TIA)、模数转换器(ADC)等模拟器件使用,功耗和成本不占优势。而SPAD可与互补金属氧化物半导体(CMOS)、BCD[bipolar、CMOS、双扩散金属氧化物半导体(DMOS)]、CIS(CMOS image sensor)等工艺兼容,易集成时间数字转换器(TDC)、直方图、数字信号处理器(DSP)等数字模块,具有功耗低、成本低、空间大等优势。因此,激光雷达从分立器件走向集成芯片逐渐成为一种趋势,将SPAD应用于激光雷达也成为当前的研究热点^[2-3]。

国内葛鹏等^[4]研究了光子累计次数对激光雷达测量精度的影响;刘骋昊等^[5]研究了回波强度、脉冲

宽度和探测器时间抖动对激光雷达测量精度的影响。国外Beer等^[6]研究了符合检测电路对背景光的抑制效果。SPAD作为一种新型的半导体光电芯片,在集成化过程中,其后端主要连接集成淬灭电路、TDC、直方图和DSP等子模块^[7-8]。这些子模块存在不同类型,例如:淬灭电路有被动复位和主动复位两种类型;TDC可分为单事件首光子TDC和多事件TDC。不同类型子模块的特性有差异,呈现出来的系统性能也会有所不同。而上述研究并未考虑子模块的特性差异对系统性能的影响。为此,本文从系统子模块的特性出发,利用时间相关单光子计数技术(TCSPC)和蒙特卡罗法^[9]建立基于SPAD的激光雷达模型,并在此基础上仿真对比研究被动复位电路和主动复位电路、单事件首光子TDC和多事件TDC对系统性能的影响。

1 基于SPAD的激光雷达测距原理

基于SPAD的激光雷达测距原理如图1所示。发射端向目标发射脉冲型激光,接收端SPAD接收从目标反射回来的信号,信号经过淬灭电路和前端电路后转换为数字信号,数字信号进入TDC获得接收信号时间戳,将接收信号时间戳与发射信号时间戳相减,得到的时间差 Δt 即为目标飞行时间(TOF)。单次发射脉冲信号的信噪比较低,因此需要重复发射脉冲信号,利用TCSPC技术多次累计提升信噪比,并统计生成直方图。最后将直方图数据输入DSP进行解距,获得目标距离、速度、反射率等信息。

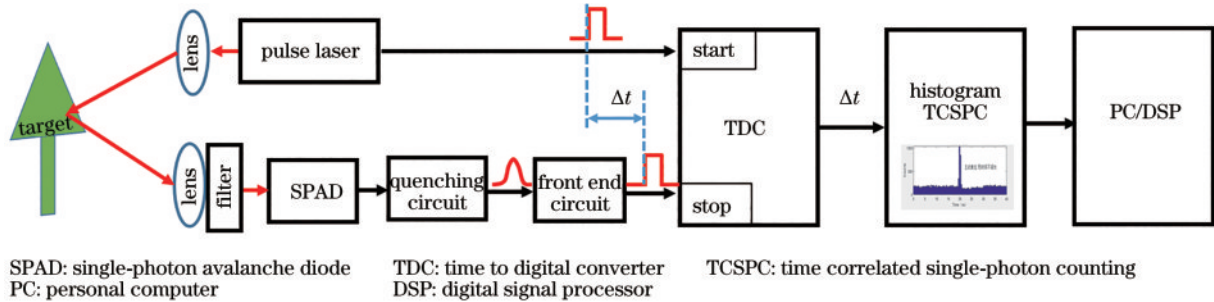


图1 基于SPAD的激光雷达测距原理图

Fig. 1 Schematic diagram of LiDAR ranging based on SPAD

2 基于SPAD的激光雷达模型

2.1 光子计数模型

2.1.1 信号光子数

激光雷达收发模型如图2所示,包含发射和接收两部分。图2上方为发射部分,从右往左依次为发射器件、发射镜头和发射器件;下方为接收部分,从左往右依次为接收器件、接收镜头和接收器件。

假设发射器件为垂直腔面发射激光器(VCSEL),发光尺寸为 V_{OA} ,发射透镜焦距为 f_{TX} 。根据针孔成像

模型,VCSEL出射光斑全角 $\theta_{emitter}$ 为

$$\theta_{emitter} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{V_{OA}}{2 \cdot f_{TX}}\right). \quad (1)$$

假设发射光斑的形状是正方形,忽略传播过程中的大气衰减,则单次脉冲在目标距离为 z 的靶面上的单位面积信号强度 P_{signal} 为

$$P_{signal} = \frac{P_{TX} \cdot W \cdot T_{TX}}{4 \left[z \cdot \tan\left(\frac{\theta_{emitter}}{2}\right) \right]^2} = \frac{P_{TX} \cdot W \cdot T_{TX} \cdot f_{TX}^2}{(z \cdot V_{OA})^2}, \quad (2)$$

式中: P_{TX} 为发射脉冲峰值光功率; W 为脉冲宽度; T_{TX} 为发射透镜透射率。

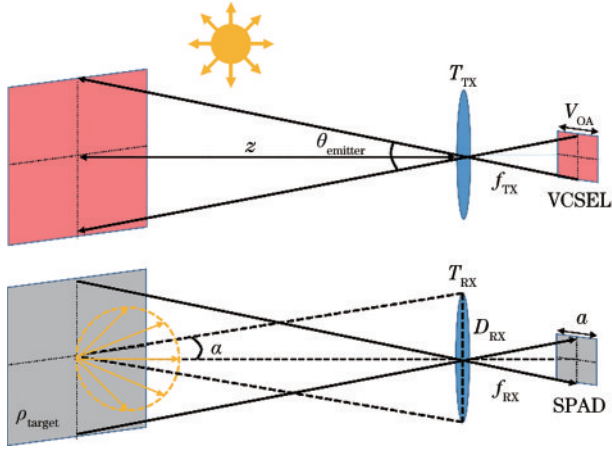


图2 激光雷达的收发模型

Fig. 2 Receiving and emitting model for LiDAR

假设目标为朗伯体反射,则目标的朗伯反射系数 $\eta_{\text{Lambert}}^{[10]}$ 表示为

$$\eta_{\text{Lambert}} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha} \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \cdot \sin \theta d\theta d\varphi} = (\sin \alpha)^2 = \frac{D_{\text{RX}}^2}{4z^2 + D_{\text{RX}}^2}, \quad (3)$$

式中: D_{RX} 为接收透镜口径; α 为从目标物观察接收透镜时的半角。当 z 远大于 D_{RX} 时,朗伯反射系数可近似为

$$\eta_{\text{Lambert}} = \frac{D_{\text{RX}}^2}{4z^2}. \quad (4)$$

对于边长为 a 的SPAD像素,其能接收到目标靶面的信号光面积 A_{scene} 为

$$A_{\text{scene}} = a^2 \cdot \frac{z^2}{f_{\text{RX}}^2}, \quad (5)$$

式中, f_{RX} 为接收透镜焦距。假设墙面光斑面积大于 A_{scene} ,则单个SPAD像素接收到的信号光强 R_{signal} 可表示为

$$R_{\text{signal}} = P_{\text{signal}} \cdot A_{\text{scene}} \cdot \eta_{\text{Lambert}} \cdot \rho_{\text{target}} \cdot T_{\text{RX}} = \frac{P_{\text{TX}} \cdot W \cdot T_{\text{TX}} \cdot f_{\text{TX}}^2}{(z \cdot V_{\text{OA}})^2} \cdot a^2 \cdot \frac{z^2}{f_{\text{RX}}^2} \cdot \frac{D_{\text{RX}}^2}{4z^2} \cdot \rho_{\text{target}} \cdot T_{\text{RX}} = \frac{P_{\text{TX}} \cdot W \cdot T_{\text{TX}} \cdot f_{\text{TX}}^2 \cdot a^2 \cdot \rho_{\text{target}} \cdot T_{\text{RX}}}{4(z \cdot V_{\text{OA}})^2 \cdot \frac{f_{\text{RX}}^2}{D_{\text{RX}}^2}}, \quad (6)$$

式中: ρ_{target} 为目标反射率; T_{RX} 为接收透镜透过率。式(6)表明,SPAD像素上接收到的信号强度与距离呈平方反比关系。

单个SPAD像素接收到的信号平均光子数为

$$N_{\text{signal}} = \frac{R_{\text{signal}}}{hc/\lambda}, \quad (7)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为光速; λ 为发射中心波长。

2.1.2 噪声光子数

激光雷达除了接收信号光,还会受到噪声的干扰。

对于SPAD而言,其噪声主要为环境噪声和像素噪声。环境噪声来自灯光和太阳光,其中太阳光是环境噪声的主要来源。太阳光谱分布较广,为限制其产生的干扰,需要配置与发射波长相对应的滤光片。若选定发射中心波长与滤光片带宽,则 $100 \times 10^3 \text{ lx}$ 环境光下目标靶面单位面积的环境光强度 $P_{\text{background}}^{[11]}$ 可表示为

$$P_{\text{background}} = \int_{\lambda - \Delta\lambda/2}^{\lambda + \Delta\lambda/2} E_{\lambda'} \cdot W d\lambda', \quad (8)$$

式中: $E_{\lambda'}$ 为太阳光的光谱能量分布; $\Delta\lambda$ 为滤光片带宽。

与信号光一样,尺寸为 a 的单个SPAD像素接收到的环境光强度 $R_{\text{background}}$ 表示为

$$R_{\text{background}} = M_{\text{BG}} \cdot P_{\text{background}} \cdot A_{\text{scene}} \cdot \eta_{\text{Lambert}} \cdot \rho_{\text{target}} \cdot T_{\text{RX}} = M_{\text{BG}} \cdot \int_{\lambda - \Delta\lambda/2}^{\lambda + \Delta\lambda/2} E_{\lambda'} \cdot W d\lambda' \cdot a^2 \cdot \frac{z^2}{f_{\text{RX}}^2} \cdot \frac{D_{\text{RX}}^2}{4z^2} \cdot \rho_{\text{target}} \cdot T_{\text{RX}} = \frac{M_{\text{BG}} \cdot \int_{\lambda - \Delta\lambda/2}^{\lambda + \Delta\lambda/2} E_{\lambda'} d\lambda' \cdot W \cdot a^2 \cdot \rho_{\text{target}} \cdot T_{\text{RX}}}{4 \frac{f_{\text{RX}}^2}{D_{\text{RX}}^2}}, \quad (9)$$

式中, M_{BG} 为环境光强度。式(9)表明,接收到的环境光强度 $R_{\text{background}}$ 与距离无关。假设环境光的平均波长为 λ_e ,相应的环境光平均光子数 $N_{\text{background}}$ 为

$$N_{\text{background}} = \frac{R_{\text{background}}}{hc/\lambda_e}. \quad (10)$$

像素噪声主要来自暗计数率(DCR)、光学串话(CT)以及后脉冲率(AP)。暗计数是像素噪声的主要来源,其产生机理为:半导体材料中存在缺陷,这些缺陷在热扰动下会随机地产生电子-空穴对,从而触发雪崩。这样的噪声信号与真实光子产生的信号没有区别,因此被视为误计数。SPAD像素单位面积内产生暗计数的速率即为DCR,用 R_{DCR} 表示。暗计数为像素自身产生的信号,为便于建模时将其与环境光噪声归类处理,可利用像素的探测效率(PDE,用 η_{PDE} 表示)反向推算出其等效的光子数,由此得到单个SPAD像素脉宽时间内的暗计数等效光子数 N_{DCR} ,表示为

$$N_{\text{DCR}} = \frac{R_{\text{DCR}} \cdot W \cdot a^2}{\eta_{\text{PDE}}}. \quad (11)$$

因此,脉宽时间内的环境光平均光子数与暗计数等效光子数之和即为单个SPAD像素的总噪声平均光子数 N_{noise} ,表示为

$$N_{\text{noise}} = N_{\text{background}} + N_{\text{DCR}}. \quad (12)$$

2.1.3 信噪比

利用光子计数模型可得到SPAD像素表面的信号光子数和噪声光子数,这些光子首先被SPAD吸收探测,然后经过淬灭电路、符合检测电路、TDC等子模块响应,进行多次统计后生成直方图,最后根据直方图可以得到系统的信噪比。信噪比大小为直方图中的信号计数除以信号计数与噪声本底计数和的均方根^[12],表示为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{n_p}{\sqrt{n_p + n_b}}, \quad (13)$$

式中： n_p 为直方图信号计数； n_b 为直方图噪声本底计数。由于不同类型子模块的特性有差异，光子经模块响应产生的直方图也会有所不同，最终解出的结果也会有差异。因此，需要研究不同类型子模块（如淬灭电路和 TDC）对系统性能的影响。

2.2 子模块特性

2.2.1 淬灭电路

淬灭电路是连接在 SPAD 像素后端的子模块，其作用是抑制雪崩。它的具体过程为：SPAD 像素吸收光子，产生一对电子-空穴对，在强电场作用下碰撞电离出新的电子-空穴对。原电子-空穴对与新电子-空穴对再产生两对新的电子-空穴对。这个过程不断持续下去，使得电子-空穴对的数量呈指数倍增加，从而形成雪崩效应。一方面，该效应持续下去会产生大电流，进而烧毁器件；另一方面，长时间的雪崩不利于下一次信号的探测。因此，有必要引入淬灭电路来终止雪崩效应。当大电流流经串联大电阻的淬灭电路时，电源电压会产生分压，使得 SPAD 像素两端的电压被拉到击穿电压以下，内部场强减弱，不再产生新的电子-空穴对，雪崩效应结束。淬灭过程结束后，电源开始对 SPAD 像素进行充电复位，使其两端电压恢复到击穿

电压以上，为下一次光子探测作好准备^[13]。从雪崩效应开始到充电复位结束的时间称为死时间，记作 T_{dead} 。根据充电复位过程的不同可将电路分为被动复位和主动复位两种类型。被动复位电路一般为串联大电阻的电路，其特点是充电复位时间较长，且在复位过程中，若 SPAD 像素吸收到新的光子，会有一定概率再次触发雪崩，从而导致像素死时间延长，不利于后续信号的探测。而主动复位电路则不同，SPAD 像素两端的电压被拉到击穿电压以下后，主动复位电路经过一定的时延，会再给 SPAD 像素快速充电复位，使两端电压迅速恢复到击穿电压以上。在主动复位前，SPAD 像素两端的电压一直维持在击穿电压以下，因此该过程中被 SPAD 像素吸收的光子不能触发雪崩，死时间也就不会被延长，可以维持为一固定值。两种复位电路对光子响应的区别如图 3 所示。可以看到：对于弱信号的稀疏光子，两者的光响应无区别。随着光信号增强且相邻信号时间间隔小于死时间，两种电路均无法对死时间内的光信号响应。若光信号进一步加强，在死时间外跟随着一个紧邻的光子，被动复位电路由于死时间延长，无法响应该紧邻的光信号；而主动复位电路由于死时间固定，因此可以探测到跨过死时间后的紧邻信号。由此可见，随着光信号增强，主动复位电路的计数将比被动复位电路更多。

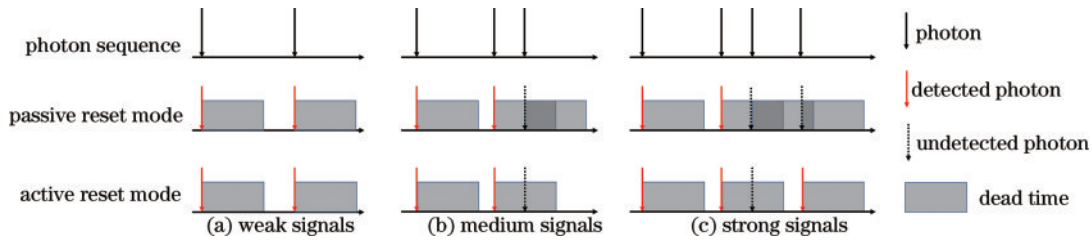


图 3 被动复位电路和主动复位电路的光信号响应示意图
Fig. 3 Photon response diagram in passive reset circuit and active reset circuit

2.2.2 TDC

TDC 是一种将时间信息转化为数字信号的仪器，用于记录信号的时间戳。根据 TDC 记录信号的行为，可将其分为单事件首光子 TDC 和多事件 TDC。顾名思义，单事件首光子 TDC 指的是在单次测距周期内

TDC 最多可记录一次 SPAD 输出的事件信号，且为第一个事件信号；多事件 TDC 指的是在单次测距周期内 TDC 可多次记录 SPAD 输出的事件信号。两种类型 TDC 的事件记录行为区别如图 4 所示。可以看出：当单次测量周期内仅有一个 SPAD 输出的事件信号时，

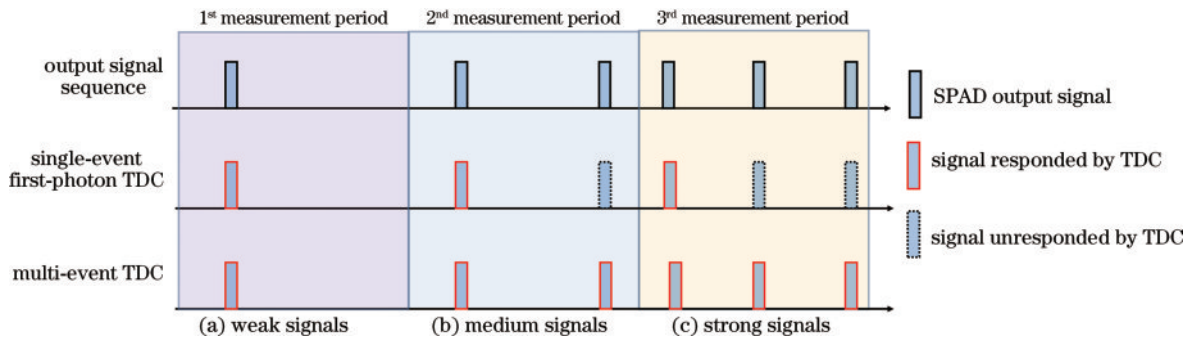


图 4 单事件首光子 TDC 和多事件 TDC 的信号响应图
Fig. 4 Signal response diagram of single-event first-photon TDC and multi-event TDC

单事件首光子 TDC 与多事件 TDC 均能记录下该事件;随着测量周期内 SPAD 输出的事件信号的增加,单事件首光子 TDC 仅可以记录下第一个事件信号,余下的事件信号被忽略,而多事件 TDC 则可记录下测量周

期内的多个事件信号。

2.3 系统建模

基于 SPAD 的激光雷达系统建模过程如图 5 所示。首先,输入激光雷达的发射器件、发射光学镜头、

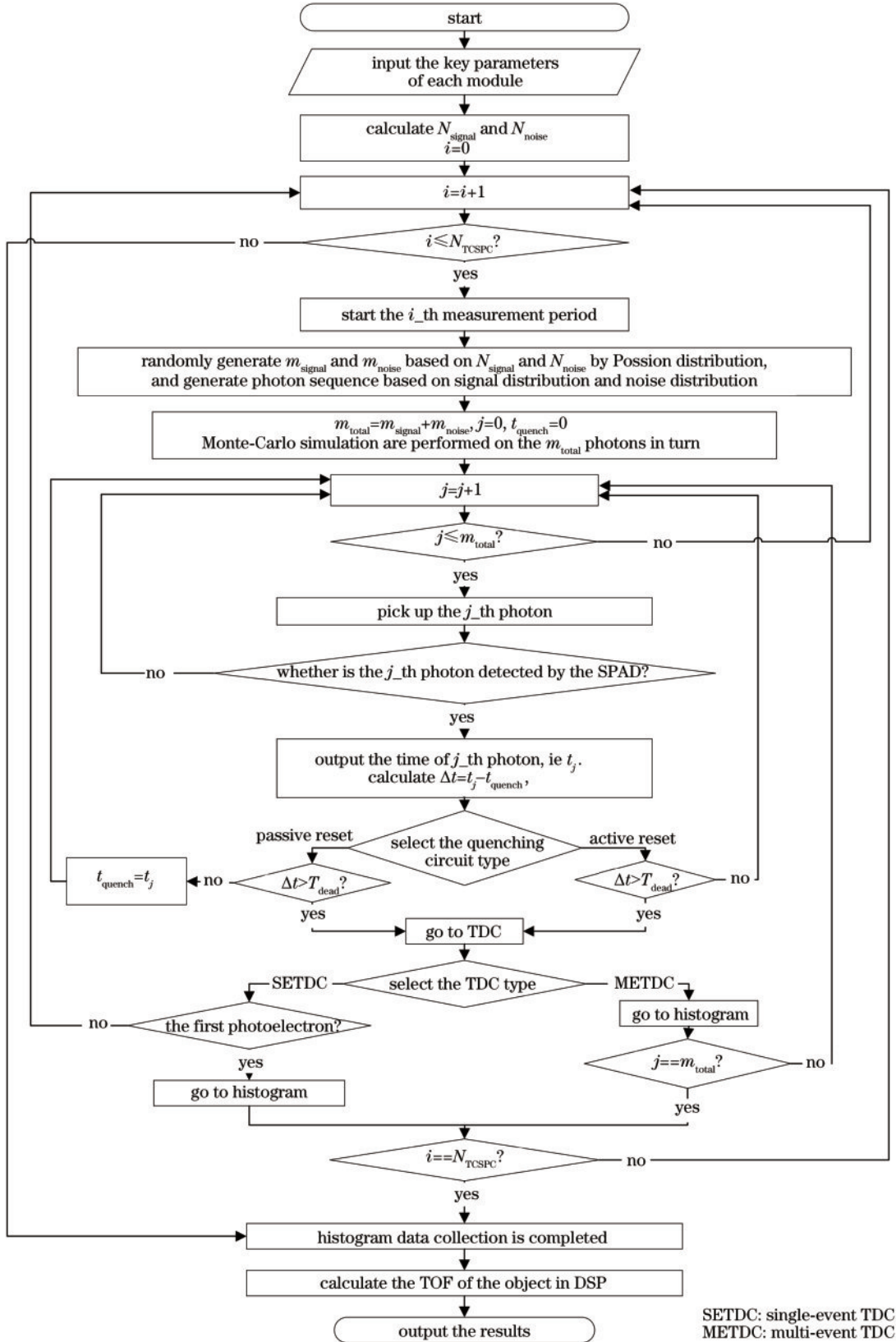


图 5 基于 SPAD 的激光雷达测距建模过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram for LiDAR modeling process based on SPAD

接收器件、接收光学镜头以及环境光、目标距离和反射率等参数,基于光子计数模型计算出信号平均光子数 N_{signal} 和噪声平均光子数 N_{noise} 。然后开始周期地测量,根据平均光子数和泊松分布随机产生单次测量信号光子数 m_{signal} 和噪声光子数 m_{noise} (两者之和为 m_{total}),并结合信号和噪声的分布在时间维度上生成光子序列。图 5 中: i 为当前测量次数; j 为当前被探测的光子排序。

当光子被有效探测后,淬灭电路的响应时刻 t_{quench} 为该光子在时间维度上的时刻 t_j 。利用蒙特卡罗法依次对每个光子进行探测,对淬灭电路、TDC 等子模块行为进行仿真,经过 N_{TCSPC} 次周期测量后,统计生成直方图。最后,将直方图输入上位机或 DSP 进行处理,得到 TOF 值。

激光雷达系统中各模块的具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达系统各模块的主要参数
Table 1 Key parameters of each module of the LiDAR system

Part	Parameter	Symbol	Value	Unit
VCSEL	Central wavelength	λ	940	nm
	Peak power	P_{TX}	30	mW
	Pulse width	W	1	ns
	Oxide aperture	V_{OA}	50	μm
	Repetition rate	—	2	MHz
SPAD	Pixel size	a	50	μm
	PDE	η_{PDE}	15	%
	DCR	N_{DCR}	5	$\text{Hz}/\mu\text{m}^2$
TX optical element	Focal length	f_{TX}	2	mm
	Transmittance	T_{TX}	96	%
RX optical element	Focal length	f_{RX}	2	mm
	Diameter	D_{RX}	1	mm
	Transmittance	T_{RX}	96	%
	Filter bandwidth	$\Delta\lambda$	40	nm
Quenching circuit	Dead time	T_{dead}	10	ns
TDC	LSB/bin size	—	400	ps
	TOF	—	20	ns
Others	Sunlight	M_{BG}	50, 100	10^3 lx
	Target reflectivity	ρ_{target}	10, 50	%
	Number of measurement period	N_{TCSPC}	10^5	—

3 仿真结果与分析

3.1 淬灭电路对系统性能的影响

图 6 为被动复位和主动复位两种淬灭电路类型仿真输出的直方图。可以看到:直方图的噪声本底计数呈均匀分布,将其均值记为 n_b ;信号计数叠加在噪声本底计数上,其数值记为 n_p ;直方图的峰值计数为信号计数和噪声本底计数之和,即 $n_p + n_b$ 。图 6(a)、(b) 分别是目标飞行时间为 20 ns、环境光为 $50 \times 10^3 \text{ lx}$ 、目标反射率为 10% 时,被动复位和主动复位淬灭电路的直方图。可以看到,两种模式直方图的峰值计数和噪声本底计数相近,峰值计数约为 1200,噪声本底计数约为 650,信噪比为 15.8。将目标反射率从 10% 增加到 50%,两种电路的直方图如图 6(c)、(d) 所示。可以看到:目标反射率增加后,两种电路呈现出不同的结果。

被动复位电路直方图的峰值计数和噪声本底计数分别为 2800 和 1600,主动复位电路直方图的峰值计数和噪声本底计数分别为 3430 和 2000。两者的信噪比分别为 22.7 和 24.4,主动复位电路的信噪比大于被动复位电路。由此可见,当目标反射率较小时,两种电路的性能基本相当;当目标反射率增大后,主动复位电路的系统性能优于被动复位电路。

为进一步对比两种类型淬灭电路的区别,图 7 给出了不同飞行时间下,两种电路的成功率(相应飞行时间乘光速除以二可转换为目标距离 z)。图 7(a) 是环境光为 $50 \times 10^3 \text{ lx}$ 、目标反射率为 10% 条件下得到的结果。可以看到,低反射率时,被动复位和主动复位淬灭电路在不同飞行时间下的成功率基本一致。将目标反射率从 10% 增加到 50%,结果如图 7(b) 所示。可以看到:当飞行时间小于 50 ns 时,两种电路的成功率一

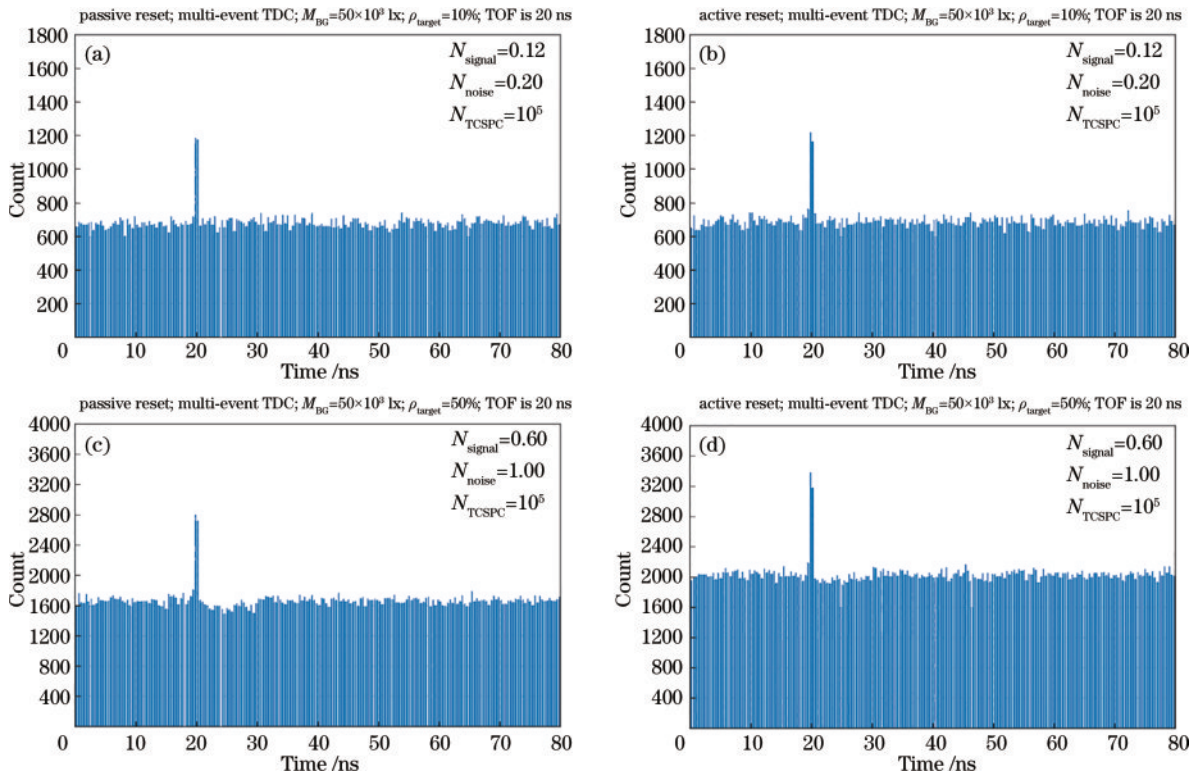


图 6 在目标飞行时间为 20 ns、环境光为 50×10^3 lx 条件下,被动复位和主动复位淬灭电路的仿真输出直方图。(a)目标反射率为 10% 时的被动复位电路直方图;(b)目标反射率为 10% 时的主动复位电路直方图;(c)目标反射率为 50% 时的被动复位电路直方图;(d)目标反射率为 50% 时的主动复位电路直方图

Fig. 6 Simulation histograms of passive reset mode and active reset mode quenching circuits under the condition of the time of flight of 20 ns and the ambient light of 50×10^3 lx. (a) Passive reset circuit histogram with target reflectivity of 10%; (b) active reset circuit histogram with target reflectivity of 10%; (c) passive reset circuit histogram with target reflectivity of 50%; (d) active reset circuit histogram with target reflectivity of 50%

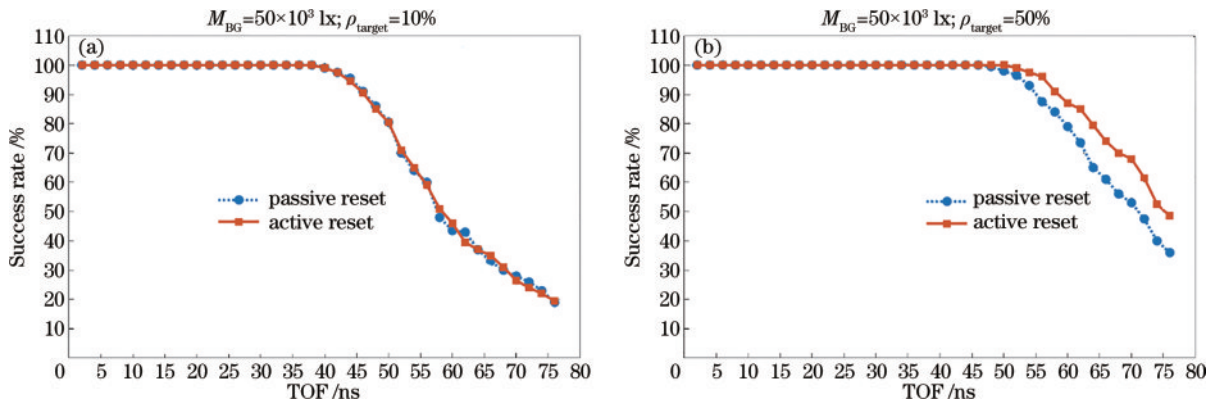


图 7 环境光为 50×10^3 lx 时两种类型电路在不同飞行时间下的成功率。(a)目标反射率为 10%;(b)目标反射率为 50%
Fig. 7 Success rates of different TOFs for two types of circuits under ambient light of 50×10^3 lx. (a) Target reflectivity is 10%; (b) target reflectivity is 50%

致,均为 100%;当飞行时间大于 50 ns 时,主动复位电路的成功率高于被动复位电路。由此进一步验证了在反射率较高、距离较远时,主动复位电路的系统性能优于被动复位电路。

3.2 TDC 对系统性能的影响

为了研究不同类型 TDC 对系统性能的影响,仿真了不同条件下单事件首光子和多事件两种类型 TDC 的直方图,结果如图 8 所示。可以看到:单事件首光子

TDC 和多事件 TDC 直方图的噪声本底计数分布不同。对于单事件首光子 TDC,由于其仅响应第一个事件,因此排在前面的事件具有优先响应权,噪声本底计数呈逐渐衰减的趋势。而多事件 TDC 对每个事件都能响应,因此噪声本底计数呈均匀分布。图 8(a)、(b)是目标飞行时间为 20 ns、环境光为 50×10^3 lx、目标反射率为 10% 时两种类型 TDC 的直方图。可以看到:目标信号计数叠加在噪声本底计数上;虽然两种 TDC

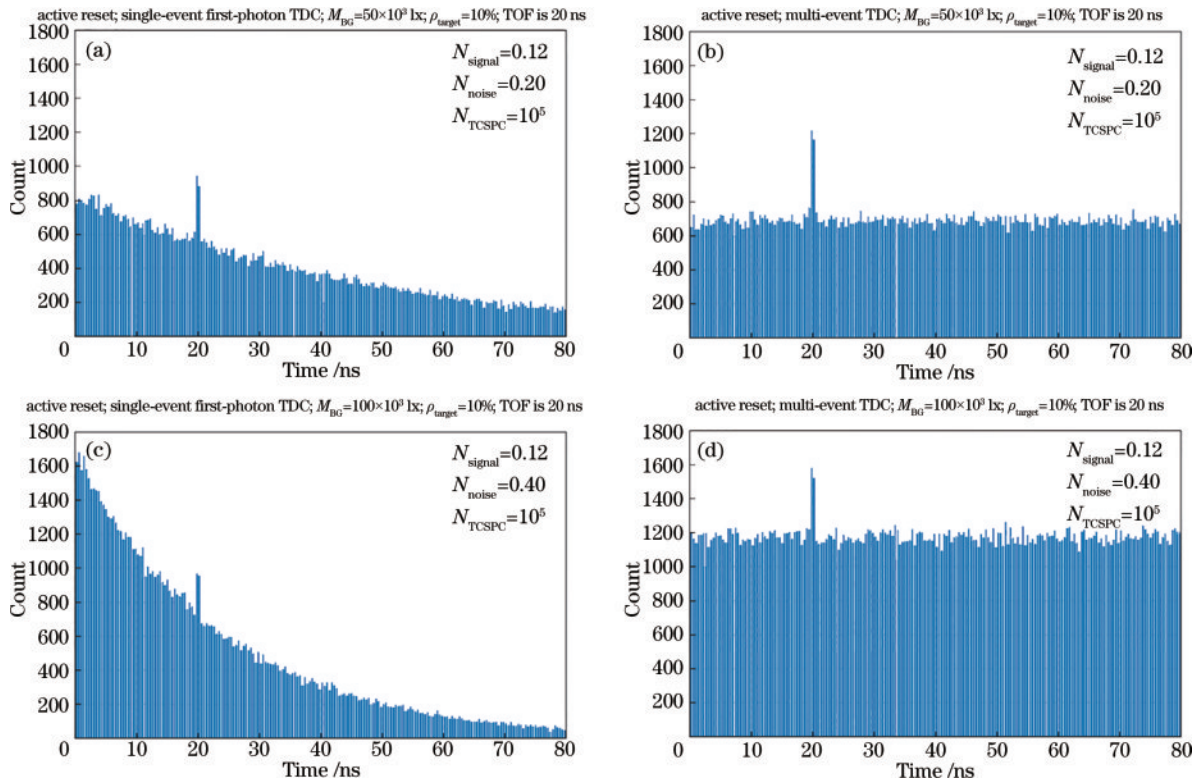


图 8 不同条件下单事件首光子 TDC 和多事件 TDC 的直方图。(a)环境光为 50×10^3 lx 时的单事件首光子 TDC 直方图;(b)环境光为 50×10^3 lx 时的多事件 TDC 直方图;(c)环境光为 100×10^3 lx 时的单事件首光子 TDC 直方图;(d)环境光为 100×10^3 lx 时的多事件 TDC 直方图

Fig. 8 Histograms of single-event first-photon TDC and multi-event TDC under different conditions. (a) Histogram of single-event first-photon TDC under the ambient light of 50×10^3 lx; (b) histogram of multi-event TDC under the ambient light of 50×10^3 lx; (c) histogram of single-event first-photon TDC under the ambient light of 100×10^3 lx; (d) histogram of multi-event TDC under the ambient light of 100×10^3 lx

目标信号处的计数峰值均能超过噪声本底计数峰值,但多事件 TDC 的目标信号计数更高。维持目标飞行时间 20 ns 不变,将环境光从 50×10^3 lx 增加到 100×10^3 lx,仿真结果如图 8(c)、(d)所示。可以看到:虽然单事件首光子 TDC 目标信号处的计数峰值比较明显,但却小于噪声本底计数的峰值。因此,若要将目标信号的位置从噪声中提取出来,需要采用特殊算

法,这会消耗较多的算力资源。而多事件 TDC 的目标信号处的计数峰值受噪声影响小,采用简单的寻峰算法即可快速找到目标信号的位置,因此所需的算力资源更少。

图 9 给出了不同飞行时间下,单事件首光子 TDC 和多事件 TDC 的成功率。图 9(a)是环境光为 50×10^3 lx、目标反射率为 10% 时得到的结果。可以看到:

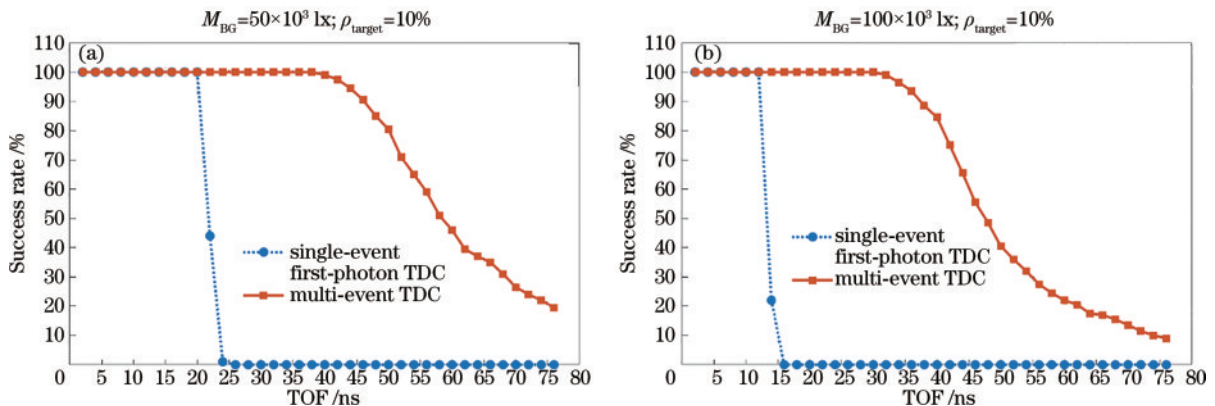


图 9 目标反射率为 10% 时,单事件首光子 TDC 和多事件 TDC 的成功率。(a)环境光为 50×10^3 lx;(b)环境光为 100×10^3 lx
Fig. 9 Success rates of single-event first-photon TDC and multi-event TDC under the target reflectivity of 10%. (a) Ambient light of 50×10^3 lx; (b) ambient light of 100×10^3 lx

当飞行时间小于 20 ns 时,单事件首光子 TDC 和多事件 TDC 的成功率均为 100%。随着飞行时间增加,单事件首光子 TDC 的成功率在 20 ns 处出现了拐点,在飞行时间为 24 ns 时成功率已降到 0。这是因为单事件首光子 TDC 的噪声本底计数为前高后低的非均匀分布,同时其采用了简单的寻峰算法。而多事件 TDC 的成功率在 40 ns 处才开始缓慢下降,在飞行时间为 76 ns 时仍维持了 20% 的成功率。将环境光从 50×10^3 lx 增加到 100×10^3 lx,结果如图 9(b) 所示。该结果与图 9(a) 的结果类似,区别是两者成功率的拐点均前移了,这是由环境光增加、信噪比下降所致。由此可见,多事件 TDC 的系统性能优于单事件首光子 TDC。

3.3 淬灭电路与 TDC 组合电路对系统性能的影响

为寻找系统子模块组合电路的最优解,在环境光

为 50×10^3 lx、目标反射率为 50%、目标飞行时间为 20 ns 条件下,对比了被动复位电路+单事件首光子 TDC、主动复位电路+单事件首光子 TDC、被动复位电路+多事件 TDC、主动复位电路+多事件 TDC 等 4 种组合电路对系统性能的影响。图 10 为仿真的 4 种组合电路的直方图。可以看到,图 10(a) 被动复位电路+单事件首光子 TDC 和图 10(b) 主动复位电路+单事件首光子 TDC 两种组合电路的直方图基本相同。这是由于单事件首光子 TDC 在一个测量周期内仅记录一个事件,限制了主动复位、被动复位电路多次记录事件的能力,使得这两种组合电路的性能相当。但多事件 TDC 并不存在这样的约束,因此图 10(c) 被动复位电路+多事件 TDC 和图 10(d) 主动复位电路+多事件 TDC 两种组合电路的信号计数能力较包含单事件首光子 TDC 的组合电路显著提升。

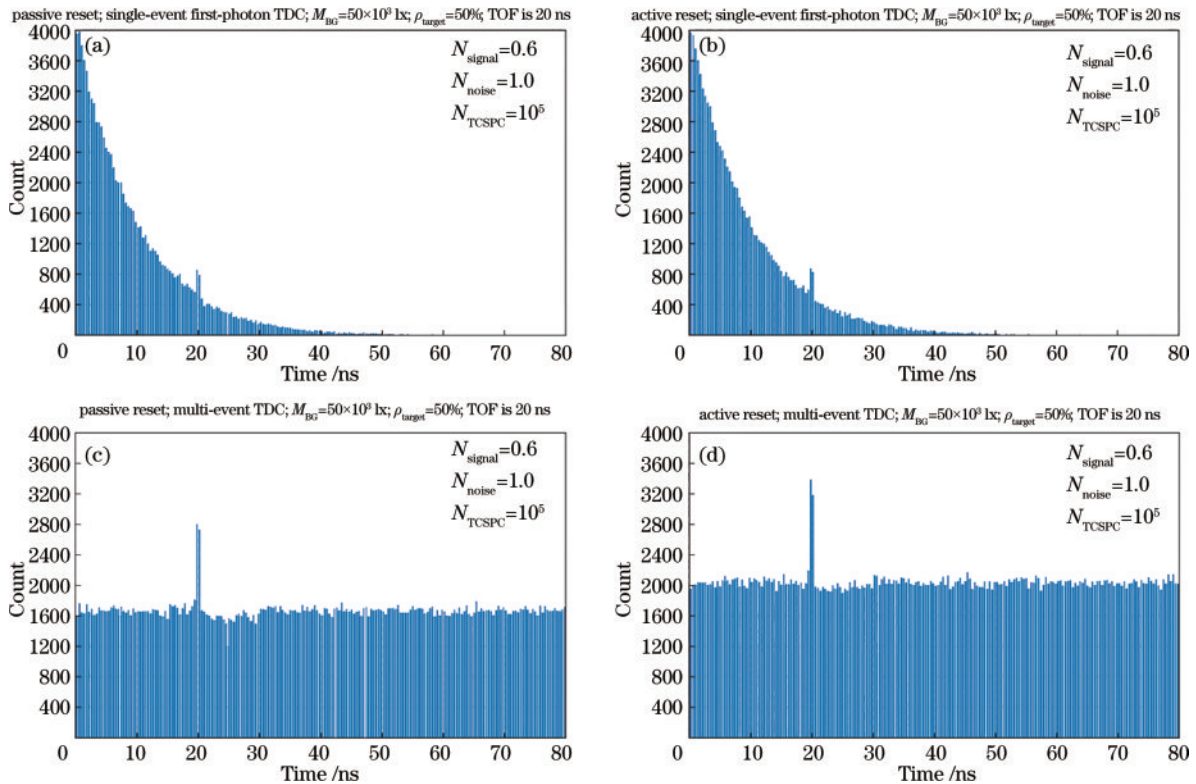


图 10 4 种组合电路架构的直方图。(a) 被动复位电路+单事件首光子 TDC; (b) 主动复位电路+单事件首光子 TDC; (c) 被动复位电路+多事件 TDC; (d) 主动复位电路+多事件 TDC

Fig. 10 Histograms of four combined circuit architectures. (a) Passive reset circuit+single-event first-photon TDC; (b) active reset circuit+single-event first-photon TDC; (c) passive reset circuit+multi-event TDC; (d) active reset circuit+multi-event TDC

为进一步对比 4 种组合电路的性能,仿真了环境光为 50×10^3 lx、目标反射率为 50% 时,不同飞行时间对应的成功率,结果如图 11 所示。可以看到:被动复位电路+单事件首光子 TDC、主动复位电路+单

事件首光子 TDC 两种组合电路的成功率基本一致;被动复位电路+多事件 TDC 组合电路的成功率较优;主动复位电路+多事件 TDC 组合电路的成功率最优。

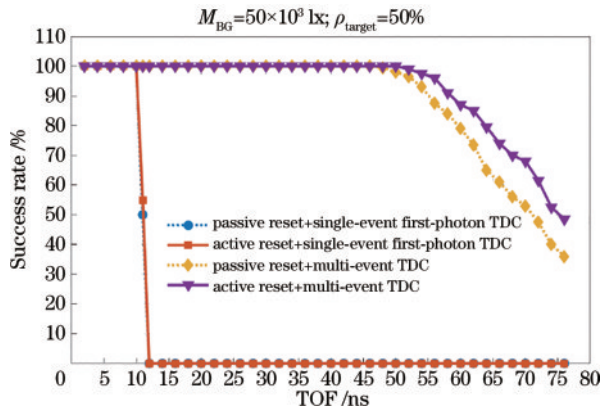


图 11 4 种组合电路在环境光为 50×10^3 lx、目标反射率为 50% 时的成功率

Fig. 11 Success rates of four combination circuits under the ambient light of 50×10^3 lx and the target reflectivity of 50%

4 结 论

根据激光雷达系统中子模块的特性,进一步完善了基于 SPAD 的激光雷达模型。该模型能够仿真不同子模块特性差异对系统性能的影响。仿真结果表明:整体上,主动复位电路的系统性能优于被动复位电路,多事件 TDC 的系统性能优于单事件首光子 TDC;4 种组合电路中主动复位电路+多事件 TDC 的系统性能最优。仿真结果为 SPAD 集成化芯片的设计指明了方向,避免了在芯片层面验证各子模块组合对系统性能的影响,提升了研发效率,降低了流片成本。后续将会基于主动复位电路和多事件 TDC 架构开展 SPAD 集成芯片的设计与验证工作。

参 考 文 献

- [1] 张辉, 薛松. 激光雷达在无人驾驶汽车中的应用及专利分析[J]. 中国发明与专利, 2018, 15(S1): 35-44.
Zhang H, Xue S. LiDAR application and patent analysis in pilotless vehicles[J]. China Invention & Patent, 2018, 15(S1): 35-44.
- [2] Villa F, Conca E, Madonini F, et al. SPAD 3D LiDAR sensors for automotive, industrial automation and surveillance[C]//Computational Optical Sensing and Imaging 2021, July 19-23, 2021, Washington, DC. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2021: CTh4E.1.
- [3] 张汉熠, 赵新宇, 张益成, 等. 单光子激光雷达研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1910003.

Zhang H Y, Zhao X Y, Zhang Y C, et al. Review of advances in single-photon LiDAR[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1910003.

- [4] 葛鹏, 郭静菁, 陈丛, 等. 基于盖革 APD 阵列的光子计数三维成像[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0305007.
Ge P, Guo J J, Chen C, et al. Photon-counting 3D imaging based on Geiger-mode APD array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0305007.
- [5] 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.
Liu C H, Chen Y F, He W J, et al. Simulation and accuracy analysis of single photon ranging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 382-387.
- [6] Beer M, Haase J, Ruskowski J, et al. Background light rejection in SPAD-based LiDAR sensors by adaptive photon coincidence detection[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4338.
- [7] Kumagai O, Ohmachi J, Matsumura M, et al. 7.3 A 189×600 back-illuminated stacked SPAD direct time-of-flight depth sensor for automotive LiDAR systems[C]//2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), February 13-22, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021: 110-112.
- [8] Sesta V, Severini F, Villa F, et al. Spot tracking and TDC sharing in SPAD arrays for TOF LiDAR[J]. Sensors, 2021, 21(9): 2936.
- [9] 陈金令, 谢德林, 陈洪斌, 等. 激光雷达系统建模与仿真设计[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(12): 1748-1749, 1755.
Chen J L, Xie D L, Chen H B, et al. Design of simulation software for lidar system[J]. Computer Measurement & Control, 2007, 15(12): 1748-1749, 1755.
- [10] Tontini A, Gasparini L, Perenzoni M. Numerical model of SPAD-based direct time-of-flight flash LIDAR CMOS image sensors[J]. Sensors, 2020, 20(18): 5203.
- [11] Xu Y, Wu Z, Li D. Behavioral modeling of photon arrival time for time-of-flight measurement circuit simulation [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 6800509.
- [12] Krichel N J, McCarthy A, Rech I, et al. Cumulative data acquisition in comparative photon-counting three-dimensional imaging[J]. Journal of Modern Optics, 2011, 58(3/4): 244-256.
- [13] 孙鸣捷, 王知冠. 基于单光子雪崩二极管阵列的成像技术研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(8): 0851510.
Sun M J, Wang Z G. Research progress of imaging technology based on single photon avalanche diode array (invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(8): 0851510.