

单光子测距雷达系统的强光感生噪声影响探究

涂云波^{1,2}, 刘夏林¹, 强佳¹, 舒嵘^{1,2*}¹中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;²上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210

摘要 对于单光子测距雷达系统而言,发射激光脉冲瞬间和近场强后向散射带来的强背景光噪声信号均会导致光电倍增管产生强光感生噪声(SIN),严重影响后续目标的探测。为精确标定单光子量级的SIN,基于自主研制的单光子测距回波模拟器和固定脉宽为10 ns的脉冲激光器搭建了一套完备的SIN检测与评估平台。测量了不同能量的强背景光条件下的SIN,并使用相关经验公式对噪声进行了拟合。结合实际测距雷达系统,为满足百公里级测距目标反演的信噪比要求,应控制到达探测器处近场强背景光能量小于100 pJ。该研究为单光子测距激光雷达系统的性能评估提供了重要参考。

关键词 遥感与传感器; 单光子测距; 强光感生噪声; 光电倍增管; 回波模拟器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230433

Study of Signal-Induced Noise in Single-Photon Ranging Lidar Systems

Tu Yunbo^{1,2}, Liu Xialin¹, Qiang Jia¹, Shu Rong^{1,2*}¹Key Laboratory of Space Active Optical-Electro Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;²School of Information Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China

Abstract For the single-photon ranging lidar system, the strong background light from both the emitted laser instantaneously and the backscattering of the near field will cause the photomultiplier to generate signal-induced noise (SIN), which seriously affects the detection of subsequent targets. In order to accurately calibrate the SIN at the single-photon level, a complete SIN detection and evaluation platform is built based on a self-developed single-photon ranging echo simulator and a pulsed laser with a fixed width of 10 ns. The induced noise under strong background light of different energy has been measured, and is also fitted using the relevant empirical formulas. According to the actual ranging system, the background light energy received at the detector should be less than 100 pJ in order to meet the signal-to-noise ratio requirement of 100 km-level ranging target inversion. This research provides an important reference for the performance evaluation of the single-photon ranging lidar system.

Key words remote sensing and sensors; single-photon ranging; signal-induced noise; photomultiplier tube; echo simulator

1 引言

激光雷达是光电信息领域用于目标探测、识别以及自由空间光通信的一种强有力技术,它充分结合了传统的雷达技术与现代激光技术的优点,在各类高科技行业具有广泛的应用场景^[1]。近年来随着远距离高空探测技术的发展,光子计数测距技术也受到广泛的关注,它将线性体制下包含大量光子的回波探测转变为单个回波光子的事件计数,充分利用了回波信号中

的能量^[2-4]。其中,用于微弱回波识别的单光子探测器是影响光子计数激光雷达探测性能的关键因素,光电倍增管(PMT)凭借其响应快、增益高、噪声低以及可见光波段较高的量子效率等优点被大量应用于单光子计数激光雷达系统中^[5-6]。

对于收发光路同轴的激光测距系统而言,发射激光瞬间的散射光和来自近场的大气后向散射均会带来强背景光信号,而光电倍增管的线性探测范围有限,这就导致探测结果出现非线性失真^[7]。20世纪70年

收稿日期: 2023-01-03; 修回日期: 2023-01-14; 录用日期: 2023-02-06; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 基础研究特区计划(JCYJ-SHFY-2021-04)

通信作者: *shurong@mail.sitp.ac.cn

代, Hunt 等^[8]发现当光电倍增管接收到强光短脉冲信号后, 输出会伴随一个“拖尾”噪声信号, 其被称为强光感生噪声(SIN)。SIN 逐渐衰减的尾部信号通常会持续数百微秒, 它会叠加在后续有效回波信号之中降低信噪比, 尤其是较为微弱的高空回波信号, 严重影响真实探测目标的反演结果^[9]。SIN 的主要来源普遍被认为是由于光电倍增管内部电极之间的充电效应和光阴极上亚稳态电子的退激化过程^[10]。1999 年, Zhao 等^[11]发现 SIN 也有可能来源于倍增极靠近阳极附近的离子撞击倍增管内壁引发的荧光效应。目前国内外已有诸多 SIN 消除方法: 2002 年, Bristow 等^[12]通过电子门控的方式动态控制光电倍增管中光阴极和倍增极之间的高压, 使光阴极激发的电子无法进入倍增极, 从而抑制对强回波信号的探测, 但是门控无法避免光阴极始终受到强光照易疲劳的问题且存在较大的电磁干扰; 2013 年, 林鑫等^[13]将机械斩波器应用于激光雷达, 从光学上切断来自低空的强背景光, 从而保留高空回波光, 但是斩波器受到转速的制约且无法消除来自高空金属层的 SIN 影响; 同年, Guan 等^[14]通过建立 SIN 数值模型的方法, 在激光雷达数据的后处理之中计算 SIN 并扣除从而得到真实的回波信号解决系统非线性失真问题, 但是不同的系统 SIN 特性存在差异, 不具备普适性。综上所述, 这些已有的 SIN 消除方案都存在一定的局限性, 而且光电倍增管的物理结构决定了 SIN 不可能被完全消除^[15], 所以针对单光子雷达系统量化 SIN 所引入的相对误差大小和对探测目标反演的实际影响程度是非常必要的, 目前国内外关于这方面的研究也比较匮乏。

本文设计并搭建了一套完备的 SIN 检测与评估平台。首先, 针对光电倍增管的 SIN 进行了详细的测量与分析, 并结合相关经验公式对不同强背景光能量下诱发的 SIN 输出分布曲线进行拟合计算, 得到拟合系数与探测输入信号之间的具体关系。然后, 借助自主研发的单光子测距回波模拟器, 模拟不同测距目标处的回波光, 得到存在强光干扰条件下的光子测距实验数据, 并进一步探究不同背景光能量下产生的 SIN 对于单光子测距目标反演的具体影响。本研究为光子测距激光雷达系统的性能评估提供了重要参考。

2 理论分析

2.1 光电倍增管的工作原理

光电倍增管的结构如图 1 所示, 其主要由光阴极、聚焦极、若干倍增极以及阳极构成。当光子从接收窗口入射后首先到达光阴极, 光电效应会激发出对应的光电子, 这些光电子在电场作用下被加速, 通过聚焦极依次进入多级倍增极进行多次倍增激发出更多的电子, 这些电子最终在阳极处会聚形成可观的宏观电流脉冲^[16]。

采用光电倍增管进行光子探测时, 相比雪崩光电

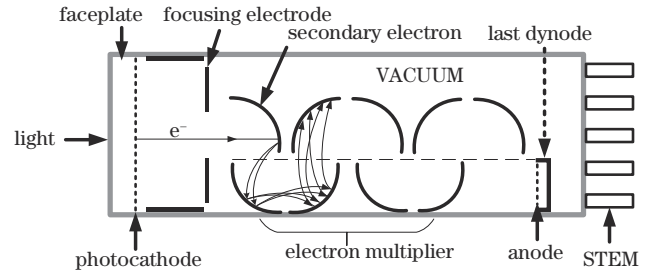


图 1 光电倍增管原理图

Fig. 1 Schematic diagram of photomultiplier tube

二极管, 它不需要进行淬灭, 不存在物理意义上的死时间^[17]。当过强的光信号进入光电倍增管时, 会使得它工作在非线性状态, 即使强光信号消失, 探测输出也会伴随一个逐渐衰减的“拖尾”, 也就是 SIN。SIN 来源于光电倍增管内部电极之间的空间电荷效应以及光阴极上亚稳态电子的退激化过程, 这些电子具有很长的衰变时间, 它们会影响后续目标回波光信号测量, 导致非线性失真。相关研究表明, SIN 的衰减变化可以采用两个指数衰减函数的线性组合^[9]来表征:

$$N_{\text{SIN}} = I_1 \times \exp[-T_1(t-t_0)] + I_2 \times \exp[-T_2(t-t_0)], \quad (1)$$

式中: t 代表以强光输入为零点的观测时刻; t_0 代表强光输入信号脉宽; T 代表 SIN 变化的时间常数; I 为常数。 T 和 I 两者随信号脉宽和输入信号能量的变化而变化。对于确定能量和脉宽的强光输入信号, 可以基于最小二乘法计算得到对应的 I_1 、 I_2 、 T_1 、 T_2 , 从而实现对 SIN 输出的拟合。

2.2 单光子雷达测距回波模拟原理

远距离激光测距场景中, 多采用微脉冲单光子测距技术, 其具有单色性好、作用距离远、系统可靠性高的优点^[18]。微脉冲激光测距系统的发射能量较小, 目标返回回波能量极为微弱, 尤其对于远距离目标而言, 可达到单光子量级。故工程中常采用光子计数统计的方式对接收回波进行计数, 同时也需要考虑所使用单光子探测器的量子效率^[19]。为建立单光子测距回波模拟的理论模型, 需要使用激光雷达方程来表征系统透过率、大气传输衰减影响、目标表面反射率以及发射激光束散角等参数对于探测器接收光子数的影响。

激光雷达发射单次脉冲, 首先经过发射光学系统和大气层传输, 探测目标一般可视作朗伯散射表面, 再经由探测目标反射和二次大气层传输回到接收光学系统, 那么单光子探测器处可接收到的回波能量^[18]为

$$E_R = \frac{E_T \eta_T \eta_R A_S A_R \rho \cos \theta}{\pi A R^2} \times T_a^2, \quad (2)$$

式中: E_R 为接收到的回波能量; E_T 为激光发射单次脉冲能量; η_T 为发射光学系统透过率; η_R 为接收光学系统透过率; A_S 为探测目标反射面积; A_R 为接收光学系统有效接收面积; ρ 为目标处的反射率; θ 为目标反射

面的法线与发射光学系统光轴的夹角; T_a 为激光脉冲在大气传输中的单程透过率; A 为激光在目标距离处的光斑面积; R 为探测目标与激光雷达之间的距离。在实际的激光雷达测距场景中, 根据激光目标截面光斑与目标实际大小的相对关系, 可将探测目标分为扩展目标与点目标。发射激光目标截面光斑大小需要结合激光发射角与作用距离共同考虑, 计算方式为

$$A = \frac{\pi \theta_r^2}{4} R^2. \quad (3)$$

对于扩展目标, 激光光斑完全落在目标范围内, 并且位于接收视场之内, 所以光斑面积就等于探测目标面积, 即 $A = A_s$; 对于点目标, 激光光斑部分落在目标之上, 部分落在目标之外不会被反射。根据式(2)和式(3)将单次脉冲接收返回的回波能量除以单个光子的能量 $h\nu$ 即可得到单次脉冲发射探测到目标对应的回波光子数:

$$N_{ss} = \frac{4E_T \eta_T \eta_R A_R A_s \rho \cos \theta}{\pi^2 h\nu \theta_r^2 R^4} T_a^2, \quad (4)$$

式中: N_{ss} 代表测距目标反射回波光子数。

基于统计光学理论, 激光雷达接收的回波光子数符合泊松分布, 在单次脉冲间隔内探测到 K 个信号光子数的概率为

$$P(K) = \frac{1}{K!} \exp(-N_s) N_s^K, \quad (5)$$

式中: N_s 为式(4)得到的平均回波信号光子数。

3 实验系统

为分析强光感生噪声的具体影响, 搭建了一套完备的检测与评估平台, 如图 2 所示。该平台主要包含两个部分: 激光脉冲与回波信号产生系统以及探测数据采集系统。采用高稳定性的信号发生器产生三路同频且同相的周期脉冲信号。其中, 前两路脉冲信号输入激光脉冲与回波信号产生系统, 分别作为激光器的触发信号和回波模拟器的主波触发信号, 第三路信号输入时间数字转换器(TDC)作为探测回波处理的主波基准信号, 除激光器触发信号需高阻态输入外均为 50Ω 负载输出。实验中激光器输出信号波长为 532 nm , 频率为 50 Hz , 脉宽为 10 ns , 可作为光电倍增管 SIN 的诱发强光信号光源。同时为探究不同强回波能量条件下 SIN 的变化情况, 输出脉冲光信号通过光纤接入一个可调衰减器, 实现对强光信号能量的动态调节。回波模拟器接收主波触发信号, 可模拟输出一个主波周期内不同时刻返回的回波光子信号, 该回波信号输出波长也为 532 nm 。收发光路同轴的单光子测距系统中, 回波光子和来自背景辐射的强光干扰信号会经过同一个接收光路, 为模拟更加真实的测距回波情况, 将两路信号耦合后输出并通过扩束装置射入光电倍增管的探测光敏面。实验中使用的光电倍增管器件型号为 Hamamatsu H7421-40, 光阴极材料为

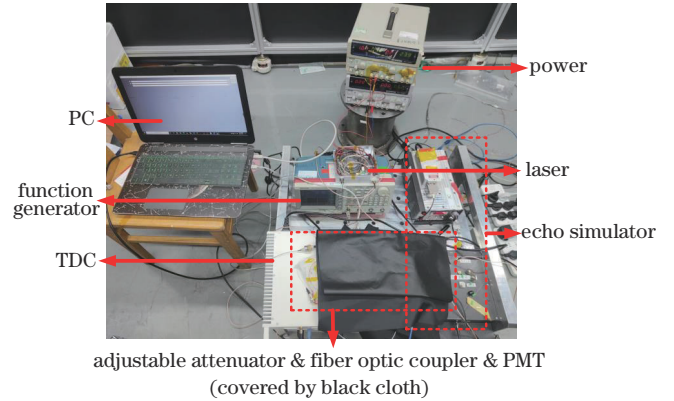
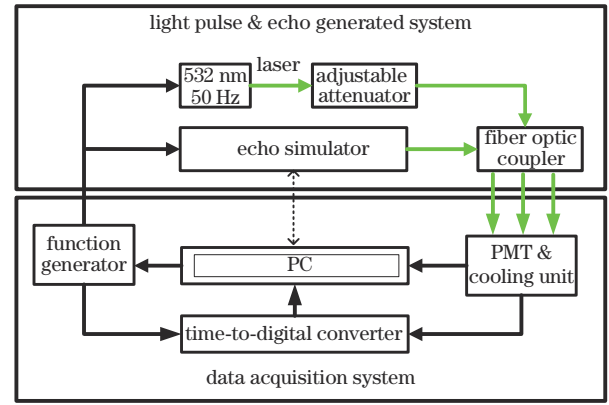


图 2 SIN 检测与评估平台原理图和实际系统图

Fig. 2 Schematic and actual diagrams of the experimental setup for SIN measurement

GaAsP, 其响应波段集中在 $300 \sim 720 \text{ nm}$ 。该型号的光电倍增管工作在光子计数模式, 峰值量子效率可达 40% , 对于 532 nm 波段具有较好的探测灵敏度, 且自带 TEC 温控装置, 整体模块集成了放大器、鉴别器和整形器。TDC 采集光电倍增管探测输出的脉冲信号, 以主波基准信号为计时零点, 不断记录单次脉冲期间返回的回波光子时间直至下一次发射脉冲事件, TDC 记录的数据最后会上传到 PC 进行解算。

为探究实际激光雷达测距中强光感生噪声与目标回波光子信号之间的关系, 自主研制并搭建了一套基于声光调制器(AOM)的单光子测距回波模拟器, 如图 3 所示。模拟器支持两种外部主波触发模式, 可以采用信号发生器产生同步触发电信号输入, 或是直接接入发射脉冲激光器的光信号再通过光电二极管转变为同步电信号, 两种触发模式产生的电信号均能输入给内部的可编程逻辑控制模块(FPGA)。同时配套开发了可用于 PC 端的上位机软件, 可通过上位机设置产生对应距离的模拟目标回波参数。上位机软件内部的控制原理基于前面所建立的单光子回波测距模拟原理部分, 根据设置的目标距离和回波光子数目可计算得到一组不同的衰减率、脉宽与延时, 将参数输入之后可自动进行转换并输出对应的控制信号, 然后通过网口传输的方式传递到模拟器内部。模拟器内部基于

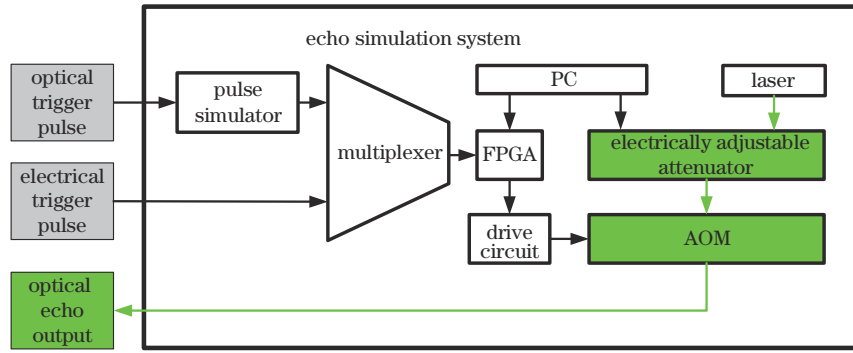


图 3 回波模拟器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of echo simulator

FPGA 驱动控制 AOM 和电可调衰减器, AOM 通过对应的光栅结构实现对延时和脉宽的调整, 从而对连续激光光源进行时间和强度上的调制, 最终输出可被单光子探测器识别的光子量级回波信号输出。该回波模拟器各项实测性能指标均稳定, 输出信号波长为 532 nm, 模拟回波信号脉宽分辨率设置为 4 ns, 最大范围可达 4000 km, 延时精度为 20 ns, 正常工作温度为 10 °C~40 °C, 模拟回波信号输出端口采用 FC/PC 接口的单模光纤输出。综合来说, 本系统所使用的回波模拟器能够较好地对不同距离不同目标特性的测距光子回波进行模拟, 为后续探究 SIN 对于单光子测距目标反演的具体影响提供了一个可靠的模拟回波信号输出。

本实验全程在暗室条件下进行, 并使用黑色遮挡布对探测器进行二次遮光处理, 故可忽略环境光和大气湍流对于单光子探测结果的影响。

4 实验结果与讨论

4.1 SIN 输出特性分析与讨论

基于已搭建的系统平台, 首先在关闭回波模拟器的情况下, 调节激光信号输出脉冲能量为 200 pJ, 输出 50 Hz 脉宽为 10 ns 的周期脉冲信号, 该信号发光时刻与 TDC 的主波触发信号重合, 采集并测量了此时 PMT 的探测输出数据。数据处理结果如图 4 所示。

从图中可以看到, PMT 在探测到该强光信号后, SIN 输出迅速增大至峰值点, 该发光信号结束之后 SIN 输出却并没有立即减小至零附近, 而是呈现指数衰减形式的降低, 形成一个长长的“拖尾”影响后续回波信号的探测。图 4(a) 中“拖尾”曲线为输入强光信号之后的 PMT 探测输出, 下方为 PMT 自身暗计数情况。可以看到, 该噪声影响在探测到强光信号之后的 1 ms 均明显存在。采取两个指数衰减函数的线性组合对该系统的 SIN 进行量化拟合, 多次优化计算拟合结果如图 4(b) 所示。可以看到, 拟合曲线与实际 PMT 的 SIN 输出几乎重合, 这也证明该经验公式能够较好地拟合 PMT 的 SIN 输出变化分布。

图 5 为改变输入强光信号能量测得的 4 组 SIN 分布曲线对比图, 分别对应 20 pJ、80 pJ、140 pJ、200 pJ 的能量。可以看到, 随着输入能量的增加, SIN 也在随之不断增加, 拖尾带来的影响也进一步扩大。结合式 (1) 的拟合公式, 已知信号能量与脉宽的情况下, 可利用最小二乘法计算得到对应的拟合系数值, 进一步探讨信号能量与 SIN 分布的关系。实验中改变信号能量进行 10 组采集测量实验, 并对采集得到的数据进行拟合计算得到对应的 4 个参数值 I_1 、 T_1 、 I_2 、 T_2 , 最终处理得到的 10 组参数值如表 1 所示。由表中结果可以发现, I_1 、 I_2 值随能量的增大而增大, 而 T_1 、 T_2 值则随能量的增大而减小。不同的系统由于采用的 PMT 型号、输

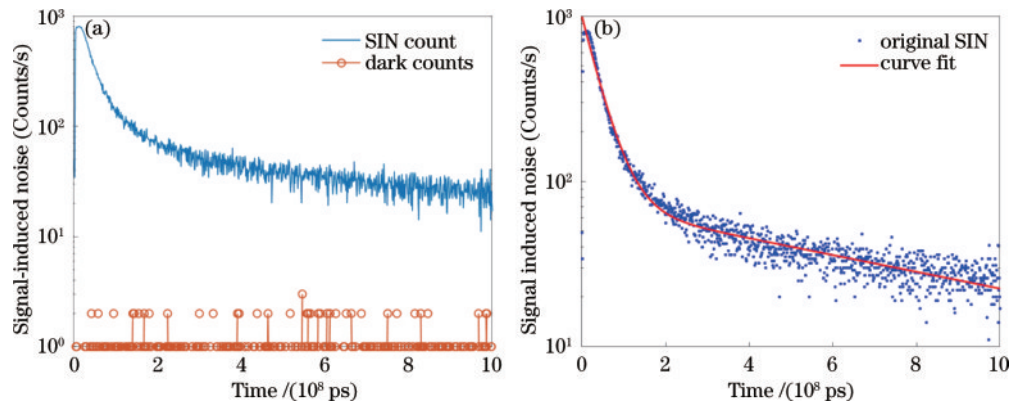


图 4 SIN 测量实验结果。(a) PMT 自身暗计数与 SIN 输出; (b) 曲线拟合结果图

Fig. 4 Results of SIN experiments. (a) The SIN count and Dark count of PMT; (b) the curve fitting results

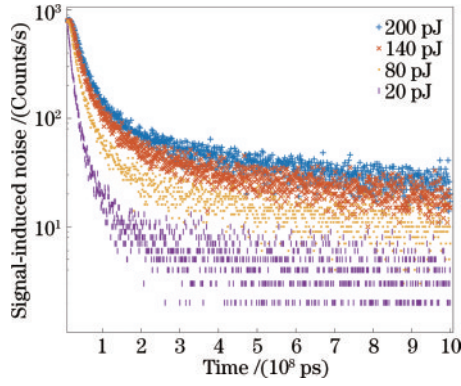


图 5 不同强度的诱导信号条件下采集得到的 SIN 分布对比图
Fig. 5 Comparison of SIN under different intensities of induced signal conditions

入诱发信号光源、接收光路等均存在差异,故测量得到的 SIN 拟合系数也存在一定的不同,但是整体 SIN 输出的变化趋势是一致的。

4.2 SIN 对测距目标的反演影响探究

为进一步探究强光感生噪声对于测距激光雷达

主波脉冲之后回波目标反演的影响,需利用回波模拟器生成对应目标距离处的模拟回波光子信号。首先需要确定测距激光雷达系统的参数,本系统设定激光发射单次脉冲能量为 1 mJ、波长为 532 nm、重复频率为 50 Hz、测距分辨率为 10 ns、激光束散角为 15 μ rad、发射光学系统透过率为 0.8、接收光学系统透过率为 0.6。根据激光雷达方程可以计算得到在当前系统参数下可到达探测器处的理论回波光子数目,结合雷达测距系统实测的数据,选择合适的目标和大气参数,可得到单次脉冲回波光子数理论值随距离变化的曲线,具体如图 6 所示。从图中可以看到,当目标距离大于 100 km 后,单次脉冲返回的目标光子数目小于单个光子,即不是每一次脉冲发出都能接收到有效回波,存在探测概率,需进行多次脉冲回波的累积才能探测到目标。对于 100 km 以上的测距目标的回波由于信号较弱,容易受到噪声信号的干扰,所搭建的测距系统适用于 100~200 km 范围内的回波模拟分析。

表 1 当脉宽为 10 ns、能量为 20~200 pJ 对应的 10 组 SIN 系数

Table 1 10 sets of SIN coefficients corresponding to pulse width of 10 ns and light intensity of 20~200 pJ

Serial No.	Optical energy / pJ	Coefficients			
		I_1	T_1	I_2	T_2
1	200	1.638×10^4	1.706×10^{-8}	851.7	1.617×10^{-10}
2	180	1.593×10^4	1.901×10^{-8}	797.2	5.458×10^{-10}
3	160	1.588×10^4	1.913×10^{-8}	702.7	6.613×10^{-10}
4	140	1.555×10^4	1.973×10^{-8}	587.4	7.982×10^{-10}
5	120	1.475×10^4	2.163×10^{-8}	447.3	8.439×10^{-10}
6	100	1.426×10^4	2.377×10^{-8}	401.2	8.452×10^{-10}
7	80	1.345×10^4	2.806×10^{-8}	399.1	9.915×10^{-10}
8	60	1.262×10^4	3.067×10^{-8}	368.7	1.052×10^{-10}
9	40	1.167×10^4	3.589×10^{-8}	177.7	1.616×10^{-10}
10	20	1.136×10^4	4.764×10^{-8}	107.1	2.043×10^{-10}

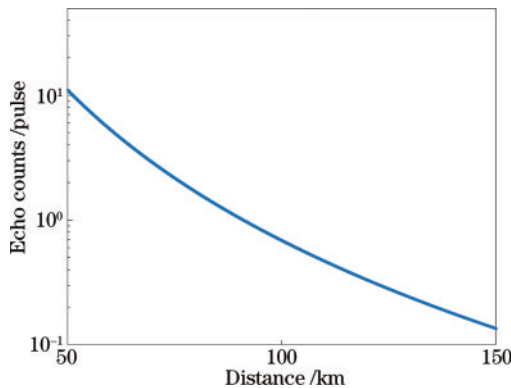


图 6 单次脉冲对应不同距离目标的回波光子数变化曲线
Fig. 6 Echo photon count curve of target at different distance corresponding to single pulse

结合当前系统下不同距离目标的回波光子数理论

值和探测概率分布公式,采用回波模拟器生成远距离回波信号(单光子量级)。不同距离处应产生的模拟信号能量大小可以使用一定观测时间内累积探测的回波光电子数目进行表征,并借助相关光子统计方法或解算算法对模拟效果进行验证。图 7 为模拟器生成的目标距离位于 100 km 处的二维回波点云示意图,横坐标对应观测时间,间隔 20 ms 对应单次脉冲发射周期,纵坐标对应回波光子对应的目标距离,由于噪声随机分布,而目标处回波具有很强的时间相关性,所以随时间的累积在 100 km 处可观测到回波光子呈现明显的线性分布。多次重复模拟回波光子实验结果表明,所搭建的测距回波模拟器在该实验条件下能够较为稳定工作,电光时延稳定性小于 2 ns,单色性低于 0.1 nm,其余各项性能指标均正常。

由前面 SIN 输出特性和理论回波光子的分布特

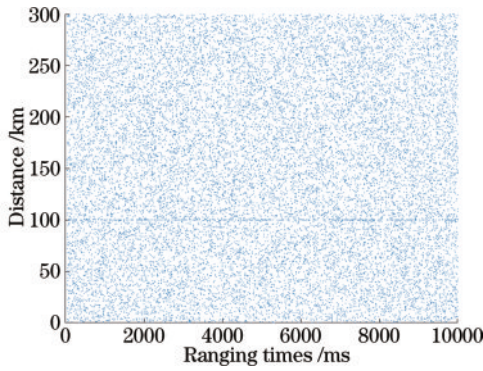


图 7 回波模拟器生成目标距离 100 km 处的回波点云图
Fig. 7 Point cloud map generated by the echo simulator at a target distance of 100 km

性,选取强光信号后 1 ms 附近、对应距离 150 km 处的目标回波信号作为实验观测对象,理论上单次脉冲回波探测概率约为 0.15,使用回波模拟器输出对应

回波信号,通过改变输入强光能量观察 SIN 对于目标处的影响。实验结果如图 8 所示,此处为方便展示共选取 6 组不同强光能量条件下的探测回波数据进行对比,采用直方图统计的方式直观展现 SIN 对于目标处回波的影响。图中横坐标代表回波对应的目标距离,范围为 0~3000 km,考虑到模拟器延时精度控制为 20 ns,设置区间间隔为 10 m,纵坐标对应每一个区间间隔内累积的回波光子数目。同时由于百公里范围回波光子信号较弱,为方便观察目标设置累积时间为 10 s。从这组对比图中可以看到:当能量不大于 100 pJ 时,目标附近计数均可以看到明显局部峰值,此时 SIN 对于目标反演影响较小;当能量大于 100 pJ 后,SIN 影响进一步加大,噪声光子计数与目标光子计数接近同一量级,甚至出现高于目标光子计数的情况,这就会给后续探测目标的反演带来极大的干扰。

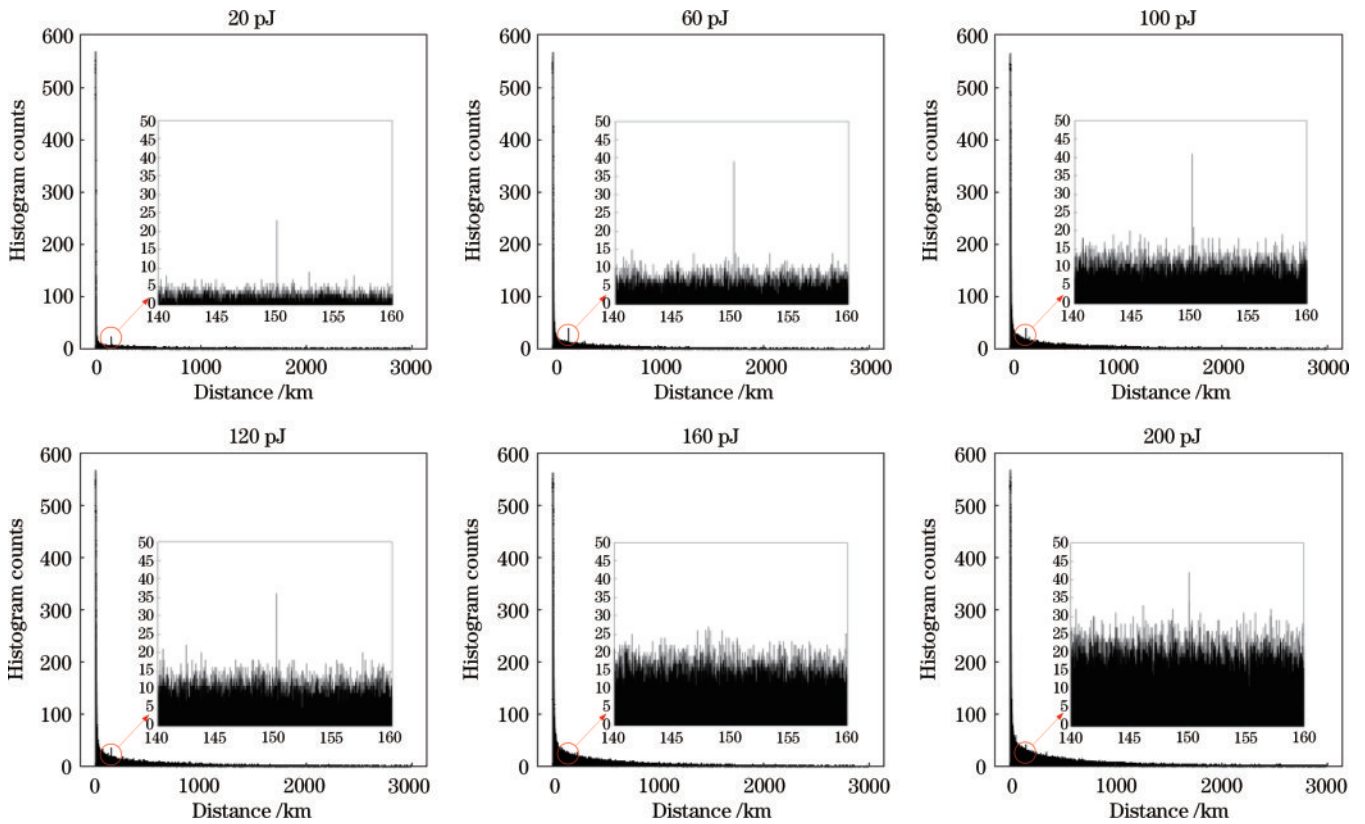


图 8 不同能量的背景光条件下 150 km 处目标回波统计直方图对比
Fig. 8 Comparison of statistical histograms of target echoes at 150 km under different energy background light conditions

对于光子测距激光雷达而言,测距精度由多次脉冲取得的测距平均值与实际目标距离值的相对误差分布所决定^[20-21],实验中发现 SIN 的拖尾会使得后续目标处噪声光子探测概率增加,造成信噪比的减小和相对误差的扩大,测距精度随之降低。当输入背景光能量大于 100 pJ 时,得到的测距误差统计值约为初始统计值的 3 倍。虽然理论上随着观测时间的累积延长,利用时间相关性关系总能提取得到测距目标,且测

距精度也能随之得到改善,但是存储的数据量和计算的复杂度会陡增,这无疑会加大系统的软硬件设计成本,并会降低正常工作时的实时解算效率。此外,从这组对比图也可以看出,当干扰光能量增加时,同样功率光子生成的信号光子计数并未发生明显变化,这表明在 SIN 作用下,光电倍增管本身的光子效率不受影响,同时施加干扰光+信号光与分别施加干扰光和信号光然后将信号结果叠加基本相同,因此后续分析仅考虑

噪声与信号相对强度关系。

为进一步评估 SIN 的影响,改变模拟目标距离进行多组对比实验,输入背景强光能量变化范围依然保持为 20~200 pJ。在实际激光测距系统的回波处理中,通常会根据目标的预报轨道数据和主波时刻给出回波的预计到达时刻,然后根据目标跟踪情况与测距精度给出一定宽度的时间门,时间门外的噪声被滤除,从而提高目标信号的信噪比^[22]。结合模拟测距系统指标,可选取目标处前后 10 μ s 的时间窗口作为回波观测区间,目标处单个模拟测距精度范围内的回波计数可看作有效目标光子计数,窗口内总的回波光子计数减去该值即为噪声光子计数。由于此时的 SIN 远大于 PMT 自身暗计数,可近似认为该噪声光子数等价于 SIN,计算有效目标光子计数和 SIN 计数单位化后二者的比值($R_{\text{echo/SIN}}$)作为一个量化指标,用以说明对比 SIN 在不同情况下的具体影响。

选取 5 组不同目标距离的数据进行展示,如图 9 所示。可以看到, $R_{\text{echo/SIN}}$ 基本与输入背景强光能量正相关,百公里范围内目标距离越远比值越低,且随着能量的进一步增加降低的幅度逐渐减缓。通过前面所提到的光子统计方法以及常用的回波目标提取算法,发现

相对比值降低至 5 附近时 SIN 对于目标反演的影响较大,常规方法目标提取存在较大困难。故可选取二者比值为 5 时作为 SIN 影响阈值,选取能量 100 pJ 以上的数据进行观察。可以看到,对于 150 km 附近的多组目标,当输入背景光能量大于 100 pJ 时,比值在 SIN 影响阈值附近波动且存在继续下降趋势,同时由于光子探测是概率事件,此处统计光子计数存在波动属于正常现象。图中仅展示部分结果,本实验后续详细测量了从 100~200 km 这一测距目标范围内 SIN 的具体影响,并基于同样步骤分析了到达影响阈值附近的输入背景光能量。实验结果表明,对于探测到强干扰回波之后 100~200 km 范围内的测距目标,输入背景光能量阈值随目标距离的增加有一定降低,为保证测距雷达系统对该范围内目标的有效探测与反演,需要控制到达探测器处的近场强背景光能量小于 100 pJ。以上结果可直接适用于与本研究采取相同 PMT 型号的单光子测距雷达系统,同时该 SIN 影响量化的方法与指标也广泛适用于各类基于 PMT 的光子测距系统的性能评估中,探讨强散射光信号对于系统测距目标反演的潜在影响,为后续完善系统的设计提供重要参考。

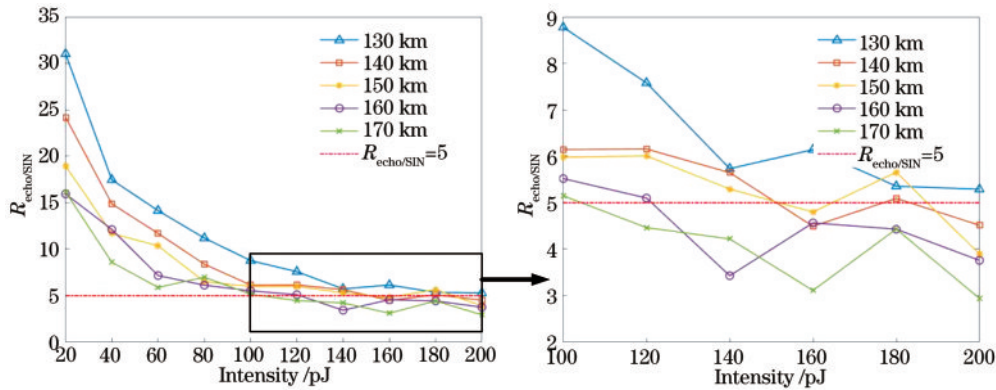


图 9 背景光能量 20~200 pJ 下 5 组不同距离目标的回波-SIN 比值曲线

Fig. 9 Echo-SIN ratio curves for five sets of targets at different distances under different background light energy

5 结 论

针对单光子测距雷达系统中光电倍增管的 SIN 问题进行深入分析,为精确标定单光子量级的 SIN,基于自主研发的回波模拟器搭建了一套完备的单光子量级 SIN 检测与评估平台。测量了不同能量的强背景光下 SIN 的输出特性,结果与理论经验公式的描述相吻合。同时结合实际测距雷达系统,为满足 100~200 km 范围内目标反演的信噪比要求,探究发现应控制经过接收光路到达光电倍增管处的近场强背景光能量小于 100 pJ。所提的 SIN 影响程度的量化方法与评估指标可广泛应用于各类基于光电倍增管的测距系统性能评估中,为分析强散射信号对于测距系统的潜在影响以及后续系统的完善设计提供了重要参考。

参 考 文 献

- [1] Xue W, Liu L, Dai X Y, et al. Moving target ranging method for a photon-counting system[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34161-34178.
- [2] 罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0514001.
Luo Y, He Y, Geng L M, et al. Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0514001.
- [3] 侯利冰, 黄庚华, 况耀武, 等. 光子计数激光测距技术研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(18): 5186-5190.
Hou L B, Huang G H, Kuang Y W, et al. Research of photon counting laser ranging technology[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(18): 5186-5190.
- [4] Hou A H, Hu Y H, Zhao N X, et al. Full-waveform fast

- correction method for photon counting Lidar[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(5): 052701.
- [5] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 260-273.
- [6] Huang K, Wang Y Q, Fang J N, et al. Mid-infrared photon counting and resolving via efficient frequency upconversion[J]. Photonics Research, 2021, 9(2): 259-265.
- [7] Hamamatsu Photonics K K Editorial Committee. Photomultiplier tubes basics and applications[M]. 3rd ed. Hamamatsu: Hamamatsu Photonics, 2006: 45-47.
- [8] Hunt W H, Poultney S K. Testing the linearity of response of gated photomultipliers in wide dynamic range laser radar systems[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1975, 22(1): 116-120.
- [9] Acharya Y B, Sharma S, Chandra H. Signal induced noise in PMT detection of lidar signals[J]. Measurement, 2004, 35(3): 269-276.
- [10] Cairo F, Congeduti F, Poli M, et al. A survey of the signal-induced noise in photomultiplier detection of wide dynamics luminous signals[J]. Review of Scientific Instruments, 1996, 67(9): 3274-3280.
- [11] Zhao Y. Signal-induced fluorescence in photomultipliers in differential absorption lidar systems[J]. Applied Optics, 1999, 38(21): 4639-4648.
- [12] Bristow M P. Suppression of afterpulsing in photomultipliers by gating the photocathode[J]. Applied Optics, 2002, 41(24): 4975-4987.
- [13] 林鑫, 杨勇, 程学武, 等. 机械斩波在大气探测激光雷达中的应用[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0814002.
Lin X, Yang Y, Cheng X W, et al. Application of mechanical chopper in atmospheric lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(8): 0814002.
- [14] Guan S, Yang G T, Chang Q H, et al. New methods of data calibration for high power-aperture lidar[J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7768-7785.
- [15] Zhang Y P, Yi F, Kong W. Analysis of relative error in detection caused by signal-induced noise in Na lidar system[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(1): 109-118.
- [16] 王璐. 光电倍增管信号诱导噪声的特性分析[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2019: 13-14.
Wang L. Characteristics analysis of signal-induced noise of photomultiplier[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2019: 13-14.
- [17] Helstrom C W, Rice S O. Computation of counting distributions arising from a single-stage multiplicative process[J]. Journal of Computational Physics, 1984, 54(2): 289-324.
- [18] 马鹏阁, 羊毅. 多脉冲激光雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 2-21.
Ma P G, Yang Y. Multi-pulse laser ranging radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 2-21.
- [19] 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.
Yuan S Y, Yang Y, Dong T, et al. Simulation of key technologies of single photon detection for airborne long-distance ranging[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(2): 80-84.
- [20] Wu D, Yang L, Chen X L, et al. Multi-channel pseudo-random coding single-photon ranging and imaging[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(2): 021202.
- [21] 姜海娇, 来建成, 王春勇, 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0514001.
Jiang H J, Lai J C, Wang C Y, et al. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0514001.
- [22] 赵鹏, 张艳, 张小亚, 等. 激光漫反射测距回波信号在线提取方法[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1028002.
Zhao P, Zhang Y, Zhang X Y, et al. Echo online extraction for diffuse reflection laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1028002.