

## 基于单光子计数激光雷达的恒虚警检测研究

刘卓伟<sup>1</sup>, 李自芹<sup>2\*</sup>, 苏志刚<sup>1,3</sup><sup>1</sup>中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300;<sup>2</sup>新疆农垦科学院, 新疆 石河子 832000;<sup>3</sup>中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津 300300

**摘要** 本文围绕光子计数激光雷达在噪声背景下的目标检测问题,利用其回波雷达信号的特点,设计了一种降噪预处理方法,继而提出了一种改进的恒虚警检测方法。该方法能在目标回波较弱时自适应地对不同宽度的回波进行检测,同时能够保持较高的检测概率。仿真结果显示:相比传统的信号检测方法,本文所提方法的检测性能更优。实验结果表明,在噪声较强或回波信号较弱的情况下,所提检测方法依然可以以较高的检测概率检测到目标。相比当前的检测方法,在相同信噪比环境下,所提检测方法可使目标的平均检测概率提高 40%。

**关键词** 量子光学; 激光雷达; 单光子计数; 目标检测; 恒虚警检测

中图分类号 TN201 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220837

## 1 引言

近年来,单光子激光雷达以其高分辨率和精准计时的特性<sup>[1]</sup>被广泛应用于诸多领域,如三维成像、大气探测、测距测高等。单光子激光雷达类型众多,其配备盖革模式的雪崩光电二极管<sup>[2]</sup>(GM-APD)是最为常见的一种应用形式,其工作原理为:GM-APD 探测到光电事件后产生一个数字逻辑的电流脉冲,同时其内部的高分辨率计时器记录脉冲时刻并重复进行计数<sup>[3]</sup>。计数能够改善探测性能,当前的技术已经大大提高了计数的频次,即便如此,计数的频次终归有限,再加上噪声光子的干扰,最终将导致信号回波失真并淹没在噪声中,所以对单光子激光雷达进行目标检测是必不可少的<sup>[4-5]</sup>。

目前,针对单光子计数雷达的检测主要可以分为固定阈值检测和可变阈值检测两大类。固定阈值检测最常见,其中最具有代表性的是半阈值法检测<sup>[6]</sup>,其优点是计算比较简单,但对先验信息的一致性要求较高且阈值无法根据噪声变化实时调整,在实际工程中难以直接使用。可变阈值检测<sup>[7]</sup>一般基于似然比检测理论展开,以恒虚警检测<sup>[8]</sup>(CFAR)最为典型。其中 CFAR 检测还可以细分为直接恒虚警检测<sup>[9]</sup>(D-CFAR)和群恒虚警检测<sup>[10]</sup>(BG-CFAR)。BG-CFAR 基于 D-CFAR 的理论,先依次将降噪后信号上某一段区间内的数值累加,然后对其进行 CFAR 检测。累加区间的长度称为“群长度”。BG-CFAR 方法相比 D-

CFAR 方法的检测概率更大,但 BG-CFAR 并没有给出群长度的合理计算方法,因而检测性能不稳定。总之,当前的检测方法都侧重于从工作原理出发,而且只关心累加数值的高低,忽略了整体信号本身及其携带的信息,因此在低信噪比情况下都会造成检测概率降低。另外,单光子激光雷达在复杂目标检测时可能存在回波波形展宽的情况<sup>[11]</sup>,这都会进一步降低检测概率。当前的 CFAR 检测同样也无法解决这些问题。

针对这些问题,本课题组提出了一种针对光子计数激光雷达的信号降噪处理方法,并在此基础上进行了自适应群恒虚警检测方法(ABG-CFAR)。另外,本课题组还通过增加参数估计算法解决了 BG-CFAR 的累加区间群长度无法确定的问题,该算法能够自适应地根据回波信号的宽度调整估计参数。仿真与实验均验证了所提 ABG-CFAR 方法相比 D-CFAR 和 BG-CFAR 具有更高的检测概率和更好的抗噪声性能。

## 2 问题阐述

## 2.1 信号降噪预处理

单光子雷达具有多种工作模式,本文仅讨论短死时间模式。此模式下单光子雷达的回波数据通过短间隔计数形成,数据间相互独立、离散且为整数形式,其概率服从二项分布。假设回波信号为  $S$ ,预处理是依次比较  $S$  中每隔  $l$  的两个数值( $l$  大于信号宽度),将较大的数值直接保留,而将较小的数值取相反数,最后将结果进行高斯滤波处理。流程框图如图 1 所示。

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-05-27; 录用日期: 2022-07-15; 网络首发日期: 2022-07-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(ZXH2009C007)

通信作者: \*1402546333@qq.com

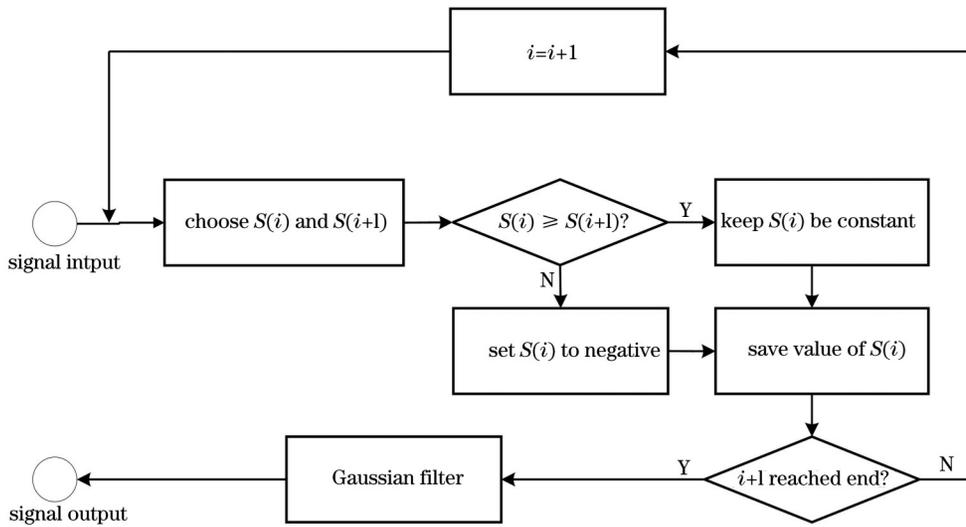


图 1 降噪预处理流程图

Fig. 1 Flow diagram of noise reduction pretreatment

降噪预处理首先通过“取反”将噪声信号变为在零值附近“振荡”的信号,再通过高斯滤波减小噪声的振荡

幅度,最终降低噪声强度。图 2 以强度为 20000 counts/s 的噪声为例,进一步展示了降噪预处理前后的结果。

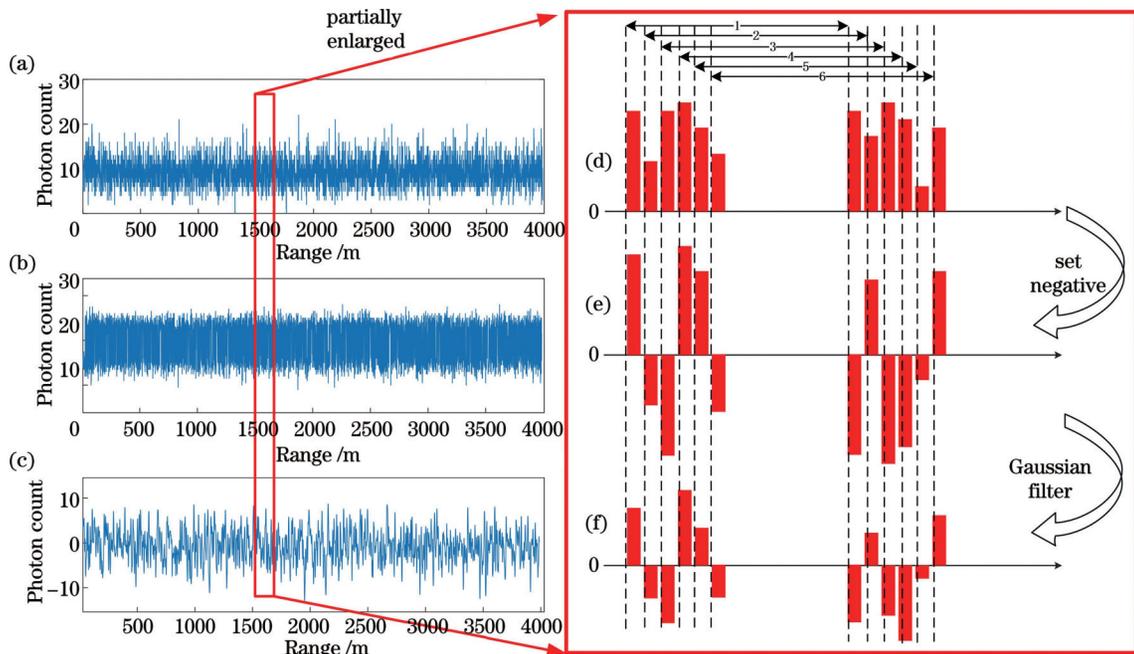


图 2 降噪预处理效果对比。(a)原始信号;(b)信号取反;(c)高斯滤波后;(d)~(f)信号的局部放大

Fig. 2 Comparison of noise reduction pretreatment effects. (a) Original signal; (b) signal set negative; (c) after Gaussian filter; (d)-(f) partially enlarged signal

图 2(a)为原始回波信号,图 2(b)为原始信号取负操作后的效果,图 2(c)为取负信号经高斯滤波后的结果,图 2(d)~(f)分别为图 2(a)~(c)的局部放大效果。显然,预处理能直接有效降低时区上的噪声强度,使其均值落在零附近。但处理后的信号的数据格式不再保持整数形式,因此其概率模型需要重新计算。单光子激光雷达的原始计数数据用二项分布<sup>[11]</sup>描述,在某个时区上,其光子计数值  $y$  服从

$$P(y) = C_M^y p^y (1-p)^{M-y}, 0 \leq y \leq M, \quad (1)$$

式中: $M$ 为计数次数; $p$ 为区间上发生光电子事件的概率。式(1)既适用于噪声,也适用于目标信号,两者唯一的不同在于  $p$  值,其大小依赖于平均光子数。将噪声激发概率用  $p_n$  表示,则其表达式<sup>[12]</sup>为

$$p_n = \exp(-d\lambda_n) [1 - \exp(-\lambda_n)], \quad (2)$$

式中: $d$ 为死时间长度; $\lambda_n$ 为噪声平均光子数。式(1)是由未经预处理的数据推导得到的,而经过预处理后,噪声光子计数值的概率密度函数将发生改变。用  $Y$  表示光子计数事件,经计算,高斯滤波前信号的概率密度函数变为

$$P(Y=y)=\begin{cases} \sum_{i=0}^{y-1} C_M^i p_n^i (1-p_n)^{M-i} \cdot C_M^y p_n^y (1-p_n)^{M-y}, & y \geq 0 \\ \sum_{i=-y}^M C_M^i p_n^i (1-p_n)^{M-i} \cdot C_M^{-y} p_n^{-y} (1-p_n)^{M+y}, & y < 0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)的均值和标准差分别记为  $\mu_n$  和  $\sigma_n$ , 则有

$$\begin{cases} \mu_n = y \cdot P(Y=y) = y \sum_{i=0}^{y-1} C_M^i p_n^i (1-p_n)^{M-i} \cdot C_M^y p_n^y (1-p_n)^{M-y} - y \sum_{i=-y}^M C_M^i p_n^i (1-p_n)^{M-i} \cdot C_M^{-y} p_n^{-y} (1-p_n)^{M+y} \\ \sigma_n = \sqrt{[y - \mu_n] \cdot P(Y=y)} = \sqrt{\mu_n - \mu_n^2 / y} \end{cases} \quad (4)$$

通过式(3)可以看到,原始信号的概率密度函数被分成了两部分( $y \geq 0$ 和 $y < 0$ ),每部分都服从加权二项分布的形式,其概率中心分别位于零位置的左边和右边,噪声强度和累计次数决定着两部分的形式和间隔。

高斯滤波在数学上是数据的邻域加权平均,假设高斯滤波器的窗口长度为  $\hbar$ , 方差为  $\epsilon$ , 其概率密度函数依据  $\hbar$  的长度而不同, 概率形式也有所不同。图 3 展示了固定  $\epsilon$  时不同滤波器窗口长度  $\hbar$  下概率密度函数的变化情况。

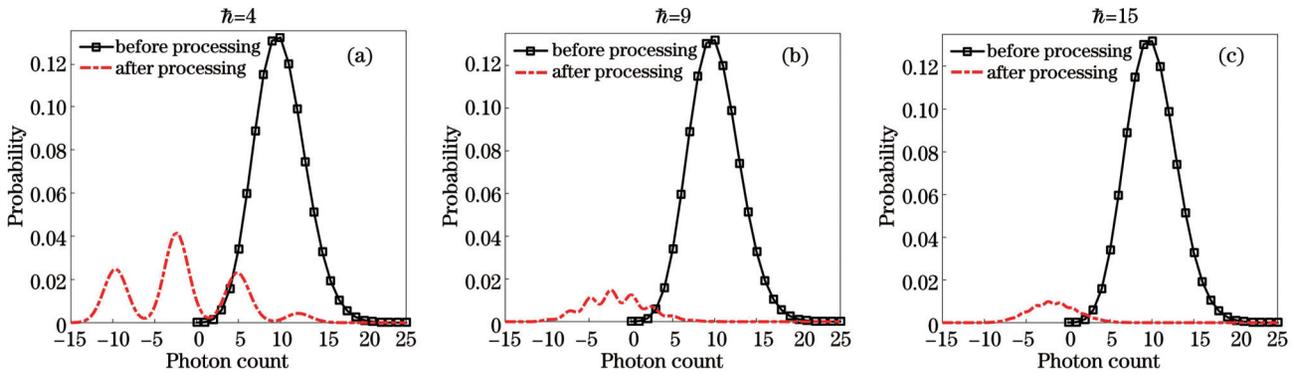


图 3 不同滤波器窗口长度下的噪声概率密度函数。(a) $\hbar=4$ ;(b) $\hbar=9$ ;(c) $\hbar=15$

Fig. 3 Probability density function (PDF) of noise under different filter window lengths. (a)  $\hbar=4$ ; (b)  $\hbar=9$ ; (c)  $\hbar=15$

由图 3 可以看出,对信号进行高斯滤波后,随着滤波器窗口长度增加,概率分布愈加接近于高斯分布。滤波器窗口长度实际上是式(3)的加权卷积次数。根据中心极限定理,只要保证  $\hbar \cdot \epsilon \geq 20$ , 结果就可以用高斯分布近似等效,即将式(4)的结果代入高斯分布<sup>[13]</sup>后

$$P(y) = \left( \frac{2\pi\sigma_n^2}{\sqrt{\hbar}\epsilon} \right)^{-1/2} \exp \left[ -\frac{(y - \mu_n)^2}{2\sigma_n^2 / (\sqrt{\hbar}\epsilon)} \right] \quad (5)$$

### 2.2 信号检测模型

假设单光子雷达的发射信号为高斯型发射脉冲,回波信号的平均光子数小于等于 1, 则可以将预处理后的信号视为标准高斯脉冲与噪声之和的离散采样结果。将累计单时区长度视为采样精度, 记作  $\tau$ 。将预处理后的信号表示为  $\mathbf{y}$ , 其数据样本量为  $L$ , 即

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_L] \quad (6)$$

将检测问题数学化, 即判断  $\mathbf{y}$  是否能够超过某个检测阈值, 进而确定该信号是否包含目标。用二元假设检验函数式<sup>[14]</sup>, 则有

$$\phi(\mathbf{y}) = \begin{cases} H_0: \mathbf{y} = \mathbf{N} \\ H_1: \mathbf{y} = \mathbf{s} + \mathbf{N} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中的第一个公式表示在假设条件  $H_0$  下, 信号  $\mathbf{y}$  中仅包含噪声, 其中  $\mathbf{N}$  是维度为  $1 \times L$  的噪声序列; 式(7)中的第二个公式表示在假设条件  $H_1$  下, 信号  $\mathbf{y}$  包含目标, 其中  $\mathbf{s}$  是高斯脉冲函数的离散采样序列模型, 即

$$s_i = A \exp \left[ -(i - t)^2 / (\sqrt{2}\sigma) \right], i = \tau, 2\tau, \dots, L\tau, \quad (8)$$

式中:  $t$  由雷达回波飞行时间决定;  $A$  是高斯回波脉冲的峰值;  $\sigma$  决定着回波脉冲的宽度;  $\mathbf{s} = [s_\tau, s_{2\tau}, \dots, s_{L\tau}]$ 。可借用统计学中“ $3\sigma$  准则”的思想来定义高斯脉冲的宽度, 即

$$\omega = \lfloor 6\sigma / \tau \rfloor \quad (9)$$

在目标假设检验问题中<sup>[15]</sup>, 测量值不含回波目标时可将对应的概率密度函数(PDF)表示为  $p(\mathbf{y} | H_0)$ , 测量值包含目标时可将对应的 PDF 记为  $p(\mathbf{y} | H_1)$ 。根据奈曼皮尔逊(NP)准则, CFAR 检测器可以通过似然比检验获得<sup>[16]</sup>, 即有

$$\frac{p(\mathbf{y} | H_1)}{p(\mathbf{y} | H_0)} \underset{H_1}{\overset{H_0}{\leq}} \eta_0 \quad (10)$$

由于相邻区间独立不相关, 因此可以得到

$$p(\mathbf{y}|H_0) = \prod_{i=1}^L \left( \frac{2\pi\sigma_n^2}{\sqrt{h}\epsilon} \right)^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{(y_i - \mu_n)^2}{\left( \frac{2\sigma_n^2}{\sqrt{h}\epsilon} \right)} \right\}. \quad (11)$$

预处理中取相反数的过程对目标的回波脉冲波形没有影响,但是经过均值滤波后回波脉冲将略微变宽,且数值亦不再遵守整数特性。因此,二项分布不再适用。此时可采用高斯分布描述回波脉冲的概率特性。由于检测过程只是对目标反射信号峰值位置处的光子数进行检测,因此  $H_1$  条件下的二项分布表达式可以改写为

$$p(\mathbf{y}|H_1) = [2\pi\sigma_s^2]^{-\frac{1}{2}} \exp \left[ -\frac{(y - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2} \right], \quad (12)$$

式中:  $\mu_s, \sigma_s$  分别为二项分布的均值和方差,即

$$\begin{cases} \mu_s = Mp \\ \sigma_s^2 = Mp(1-p) \end{cases} \quad (13)$$

根据式(8)所示的模型,  $\mu_s$  正好等同于其变量  $A$ , 此时的  $\mu_s$  表示累计次数为  $M$  时目标回波的“非整数”计数值。此时  $Mp = A$ , 从而可得  $\sigma_s^2 = A(1 - A/M)$ 。分别将  $\mu_s$  和  $\sigma_s$  代入式(12), 可得

$$p(\mathbf{y}|H_1) = [2\pi A(1 - A/M)]^{-\frac{1}{2}} \exp \left[ -\frac{(y - A)^2}{2A(1 - A/M)} \right]. \quad (14)$$

由于相邻区间独立不相关, 因此对于  $\mathbf{y}$  来说, 其结果仍然服从高斯分布, 则  $p(\mathbf{y}|H_1)$  为

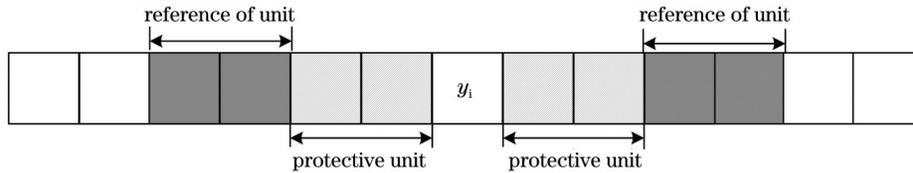


图4 保护单元估计示意图

Fig. 4 Estimating schematic of protective unit

$$\hat{A} = \arg \min_{\sigma} [y - \sqrt{2\pi} A\sigma]^2. \quad (17)$$

式(17)中存在两个未知数  $A$  和  $\sigma$ , 单光子激光雷达系统无法得知回波的具体返回时间, 同时由于回波脉冲的宽度也跟随目标特性而变化, 因此也难以直接获得  $\sigma$  的大小。单光子激光雷达在时区上表现为离散和整数特性, 因此单目标的回波位置将落在某个整数时区。将此位置用  $j$  表示, 可以利用这一特点, 从初始值开始不断增加  $\sigma$ , 直至  $\mathbf{y} - \mathbf{s}$  的最小方差达到最小, 此时求解的  $A$  就是所需的最佳估计值。估计算法的步骤如下:

1) 设置一个整数初始值, 并将其表示为  $Z (Z < L)$ , 令  $\sigma = Z \cdot \tau/6$ , 在  $\mathbf{y}$  上截取  $Z$  长度  $\mathbf{y}_c = [y_i, y_{i+1}, \dots, y_{i+Z}]$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, L - Z$ , 此时  $\mathbf{y}_c$  的

$$p(\mathbf{y}|H_1) = \prod_{i=1}^L p(y_i|H_1) =$$

$$\prod_{i=1}^L [2\pi A(1 - A/M)]^{-\frac{1}{2}} \exp \left[ -\frac{(y_i - A)^2}{2A(1 - A/M)} \right]. \quad (15)$$

显然,  $p(\mathbf{y}|H_0), p(\mathbf{y}|H_1)$  分别涉及未知数  $\mu_n, \sigma_n$  和  $A$ , 因此需要对其进行估计。

### 2.3 参数估计及概率计算

首先, 式(11)中的  $\mu_n, \sigma_n$  可以直接通过计算均值得到。为了消除目标区域对估计值的影响, 估计时采用左右宽度各为  $u$  ( $u$  为整数) 的保护单元, 且估计时只选取参考单元内的数据, 示意图如图4所示

在保护单元下,  $\mu_n, \sigma_n$  的最大似然估计结果<sup>[17]</sup>为

$$\begin{cases} \hat{\mu}_n = \frac{1}{L - 2u} \left( \sum_{i=1}^{\frac{L}{2}-u} y_{i-u} + \sum_{i=\frac{L}{2}+u}^L y_{i-u} \right) \\ \hat{\sigma}_n = \sqrt{\frac{1}{L - 2u} \left[ \sum_{i=1}^{\frac{L}{2}-u} (y_i - \hat{\mu}_n)^2 + \sum_{i=\frac{L}{2}+u}^L (y_i - \hat{\mu}_n)^2 \right]} \end{cases}, \quad (16)$$

同时, 假设条件  $H_1$  下的  $A$  的估计值可以通过最小二乘估计得到, 则只需求解

维度为  $1 \times (L - Z)$ 。

2) 将  $\sigma$  代入式(8)得到  $\mathbf{s}$ , 并将  $\mathbf{y}_c - \mathbf{s}$  的方差记作  $V(\mathbf{y}_c - \mathbf{s})$ , 令  $b(i) = V(\mathbf{y}_c - \mathbf{s})$ , 其中  $i = Z, Z + 1, \dots, L$ 。此时, 在有目标回波的情况下,  $b(i)$  的数据为离散数据, 其连线如同一座山谷, 呈“M”形, 如图5所示。

3) 通过查找最值的方法确定方差的“谷”值并将其记作  $b_k(j)$ , 其中  $j$  表示“谷”值所处的位置,  $k$  是指步骤1)和步骤2)执行的次数, 首次计算时取  $k = 1$ 。

4) 判断是否满足条件  $b_{k+1}(j) \geq b_k(j)$ , 如果满足, 将  $\sigma = k \cdot Z \cdot \tau/6$  代入式(17)计算  $A$  的估计值, 否则, 将初始值  $Z$  加1并再次执行以上步骤。

将式(11)、(15)、(16)及  $\hat{A}$  代入式(10), 并对两边求对数, 拆分移位后求解一元二次方程, 有

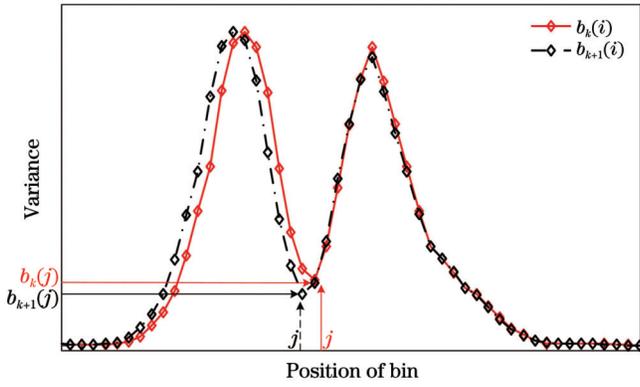


图 5 方差曲线

Fig. 5 Curve of variance

$$\gamma(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^L \left( y_i + \frac{b}{2a} \right) \stackrel{H_0}{\leq} \ln(\eta) / a - \frac{L}{2a} \ln \left[ \frac{M\sigma_n^2}{A\sqrt{\hbar}\epsilon(M-\hat{A})} \right] + \frac{Lb^2}{4a^2} - c/a = T, \quad (18)$$

式中各参数的表达式分别为

$$a = \frac{\sqrt{\hbar}\epsilon}{2\hat{\sigma}_n^2} - \frac{M}{2\hat{A}(M-\hat{A})}, \quad (19)$$

$$b = \frac{\sqrt{\hbar}\epsilon}{2\sigma_n^2} \hat{A} - \frac{M}{2\hat{A}(M-\hat{A})} \hat{\mu}_n, \quad (20)$$

$$c = \frac{M}{2\hat{A}(M-\hat{A})} \hat{\mu}_n^2 - \frac{\sqrt{\hbar}\epsilon}{2\hat{\sigma}_n^2} \hat{A}^2. \quad (21)$$

式(18)中的  $\gamma(\mathbf{y})$  通常被称为“充分统计量”，其中的  $\eta$  可以根据所需的虚警概率确定。由抽样分布概率理论可知， $\gamma(\mathbf{y})$  的分布符合自由度为  $L$  的非中心卡方

分布<sup>[18]</sup>，因此虚警概率计算公式为

$$p_{FA} = \int_{\gamma=T}^{\infty} p(\gamma|H_0) d\gamma = \int_T^{\infty} \frac{1}{2\sigma_n^2} \left( \frac{\gamma}{\beta} \right)^{\frac{L-2}{4}} \exp \left[ -\frac{(\gamma+\beta)}{2\sigma_n^2} \right] I_a \left( \frac{\sqrt{\gamma\beta}}{\sigma_n^2} \right) d\gamma, \quad (22)$$

式中： $\beta = L \left( \mu_n + \frac{b}{2a} \right)^2$ ； $a = \frac{L}{2} - 1$ ； $I_a(\cdot)$  为第一类修正贝塞尔函数。

### 3 实验及性能分析

#### 3.1 仿真分析

为了比较直观地展现检测结果，进行了仿真实验。令发射光学系统的透过率为 90%，接收光学系统的透过率为 80%，激光脉冲在大气中的透射率为 65%。假设发射系统光轴与目标法线方向的夹角为 77°，探测器死时间长度  $d = 50$ ，单目标距离  $R = 5000$  m，对应的信号总回波光子数约为 0.6 个，时间分辨率为 0.5 ns。令噪声强度为  $E_n$ ，信号强度为  $E_s$ ，将信噪比定义为信号强度与噪声强度的比值。将信噪比变化范围设置在 0 dB~30 dB 之间，绘制雷达目标检测概率  $P_d$  随干扰强度 SNR 变化的曲线。图 6(a) 为预处理前后 ABG-CFAR 方法的检测性能曲线。显然，预处理对于提升检测性能有极大帮助，经计算可知预处理能使检测概率提升 6~8 倍。图 6(b) 展示了 D-CFAR、BG-CFAR 以及本文所提 ABG-CFAR 的检测性能曲线，其中 D-CFAR 和 BG-CFAR 均对原始信号进行检测，BG-CFAR 的群长度设置为 10。

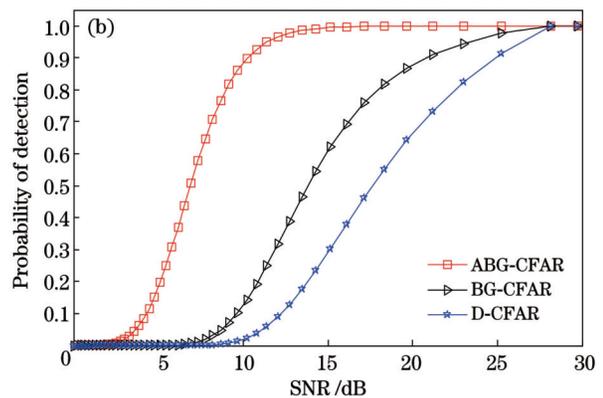
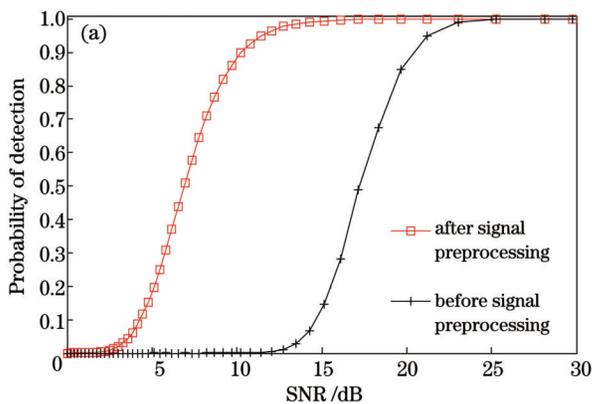


图 6 检测性能曲线。(a) 预处理前后 ABG-CFAR 方法的检测性能曲线；(b) 三种方法的检测性能曲线

Fig. 6 Detection performance curves. (a) Detection performance curves of ABG-CFAR method before and after preprocessing; (b) detection performance curves of three methods

通过对比可知 ABG-CFAR 检测能够极大地提升检测概率，在低信噪比时的提升概率尤为显著。在相同的虚警概率水平下，ABG-CFAR 的检测概率相比 BG-CFAR 提升了 4~6 倍，相比 D-CFAR 提升了 6~8 倍。对蒙特卡罗 2000 次的仿真模拟数据进行统

计，结果显示，所提方法相比当前检测方法可使目标的平均检测概率提高 40%。

#### 3.2 实验结果

在实际的单光子激光雷达测试场景中，如果目标因为体积小或反射率低而导致回波的计数值特别低，

则将这种目标称为弱目标。为了验证 ABG-CFAR 对弱目标的检测性能,采用多通道单光子激光雷达设备对路灯(高杆灯)进行探测实验。单光子激光雷达设备采用  $1 \times 64$  的线阵 APD 探测器进行信号的接收,每 12 个像元数据归为一个通道,因此总共有 5 个通道。设备架设在高处,以  $30.5^\circ$  的俯角对目标进行探测,目标场景包含两个路灯,样式如图 5 所示(用数字 2、3 标记)。图 7(a) 右侧图是实验场地的实景图(红外相机于 21:00 拍摄),其中的白色光束为激光雷达设备的扫描光束,数字 1、4 标记了激光雷达光束扫描开始和结

束的大致位置。扫描周期为 60 s,即每隔 1 min 从左到右完整扫描一次,每隔 0.04 s 获取一个点位,每次扫描为单目标探测过程,累计次数为 100,最终获得了 585 组数据。由于回波信号的强度较弱,目标探测结果通常呈点状效果,如图 7(b) 所示。图 7(b) 展示了某个通道上从 21:15 至第二天 9:50 时间段内的目标探测结果,可以看到 4 个点目标的探测结果(用红色椭圆圈标记)。因为除了两个路灯目标之外,扫描时还会遇到鸟类以及高大树木等目标,所以每个时段的扫描结果都不尽相同。

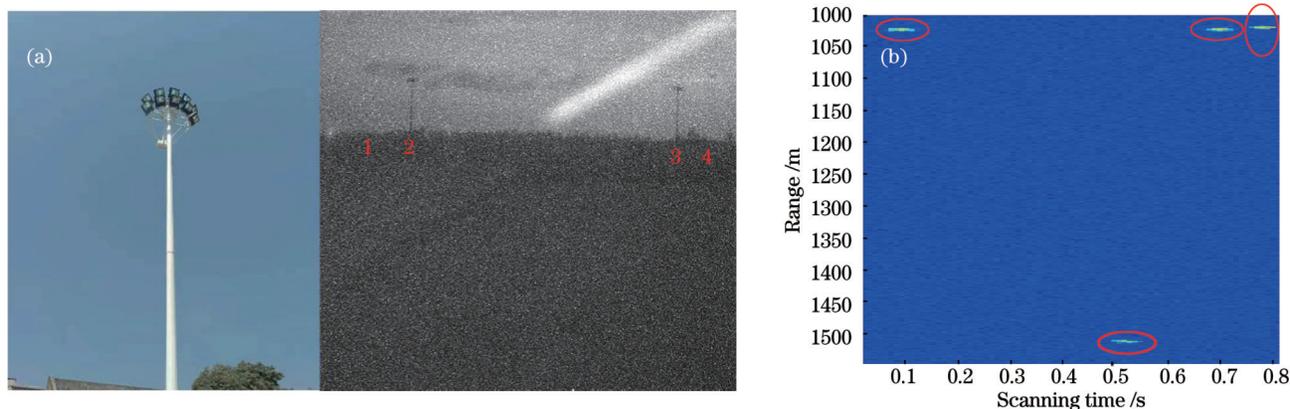


图 7 实验场景以及目标探测效果。(a) 实验场地实景图; (b) 某数据通道的探测结果

Fig. 7 Experimental scene and target detection effect. (a) Experimental scene; (b) target detection effect in a channel

实验装置的发射脉冲为调 Q 高斯红外光脉冲,其峰值功率为 5 W,脉冲宽度约为 15 ns。首先对原始数据进行预处理,图 8(a) 展示了二维原始点云数据。

图 8(b) 是对原始点云数据进行预处理后的结果,横坐标表示扫描次数,纵坐标表示探测目标距离。显然,预处理后,噪声点数有所下降。

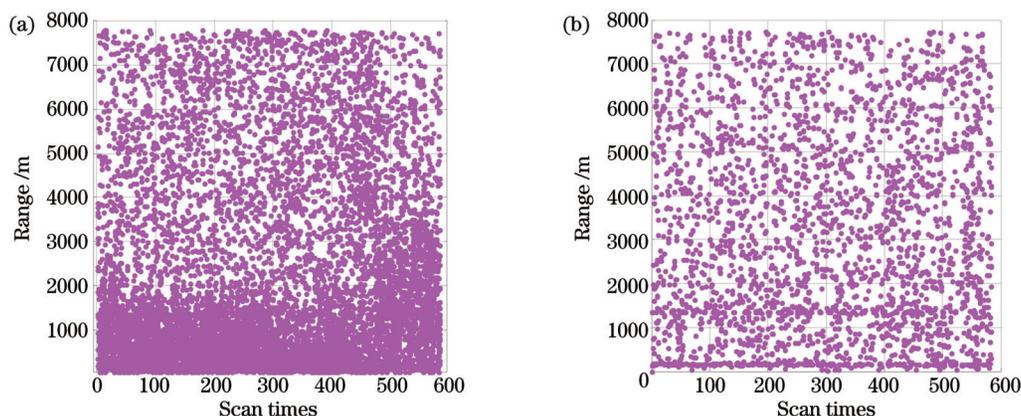


图 8 实验数据的二维点云图。(a) 预处理之前的数据; (b) 预处理之后的数据

Fig. 8 Two-dimensional point cloud image of experimental data. (a) Before preprocessing; (b) after preprocessing

通常来说,白天的噪声干扰较强,目标回波都比较弱。因此,将实验时间选择在 12:30 到 13:55 之间,此时的噪声强度约为 30000 counts/s。设备共探测到了 6 个目标,将 25 min 内探测到的数据进行预处理并叠加,然后对其进行 CFAR 检测。图 9 展示了三种 CFAR 方法(D-CFAR、BG-CFAR 及 ABG-CFAR)的检测结果,虚警概率均设置为  $1 \times 10^{-3}$ 。

由图 9(a) 可以看到,对于目标信号的弱回波(虚线方框内标记),BG-CFAR 的检测概率相对于 D-

CFAR 有所提高,但仍漏掉了 3 个弱目标回波(虚线框 1 和 2)。采用 ABG-CFAR 对预处理后的信号进行检测,检测结果如图 9(b) 所示,此时未发生漏检,说明预处理能够增加弱信号的信噪比,同时明显提高了检测概率。计算了 3 种方法的检测概率,结果如图 10(a) 所示,图中横坐标表示 6 个目标。为便于分析,将离散点用线条连接。显然,ABG-CFAR 的检测概率胜于另外两种方法。

当然,用一次实验得到的良好结果验证检测性能

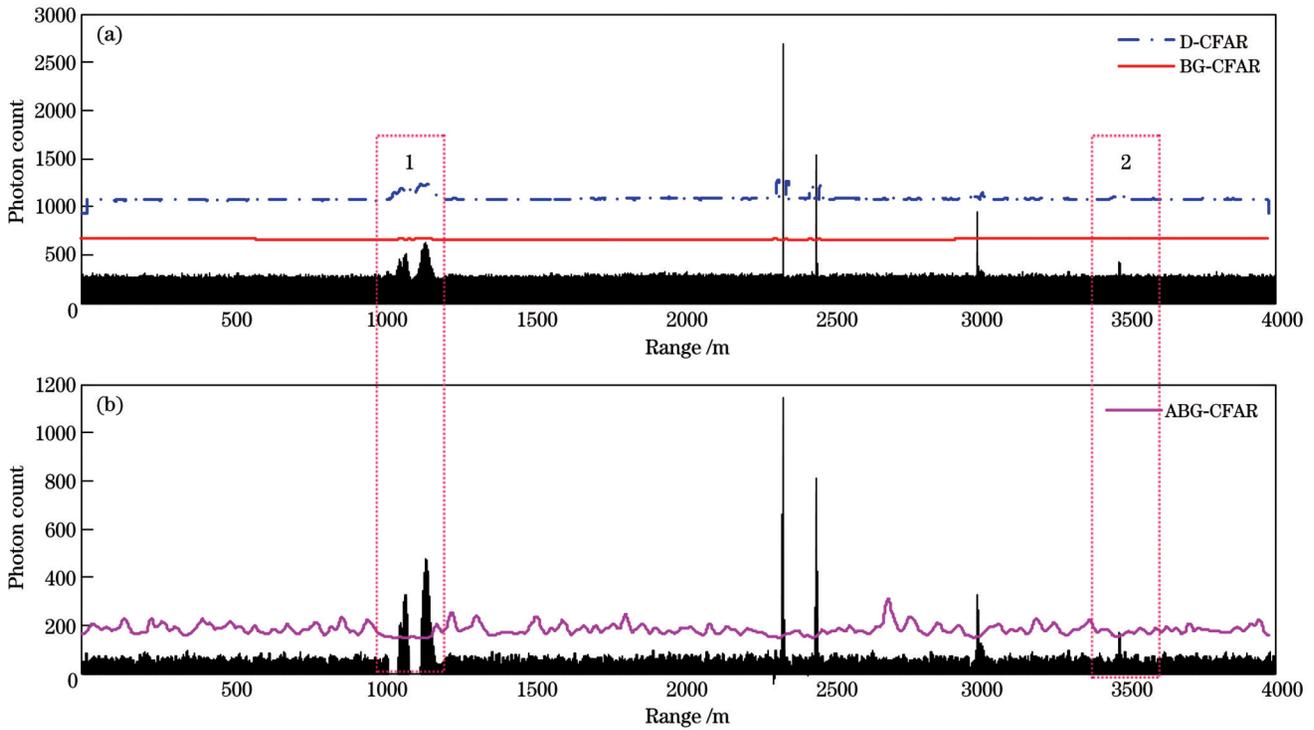


图 9 探测结果。(a)D-CFAR和BG-CFAR;(b)ABG-CFAR  
Fig. 9 Detection results. (a) D-CFAR and BG-CFAR; (b) ABG-CFAR

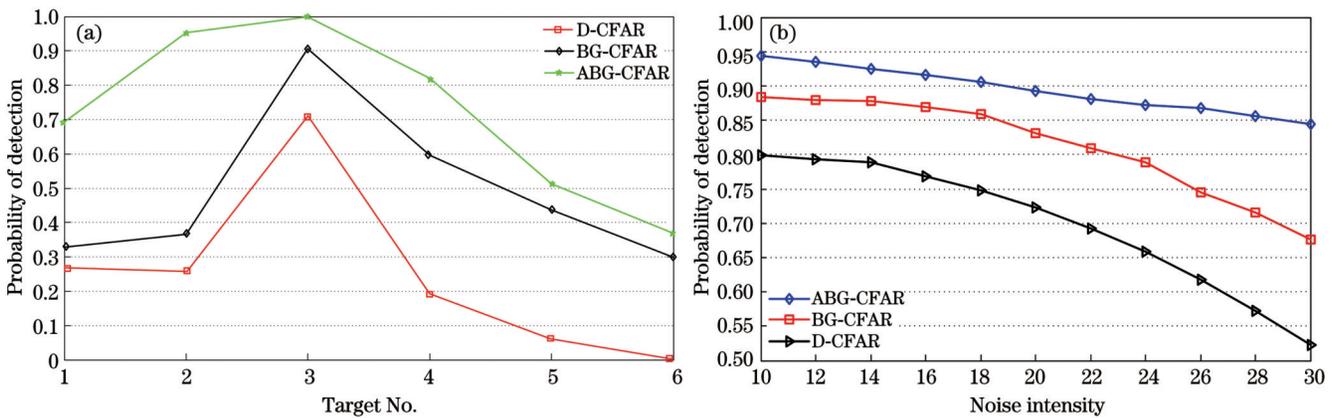


图 10 目标检测概率及蒙特卡罗统计结果。(a)目标检测概率;(b)蒙特卡罗统计结果

Fig. 10 Target detection probability and Monte Carlo statistical results. (a) Target detection probability; (b) Monte Carlo statistical results

是远远不够的,因此通过更换单光子雷达装置的镜头来改变入射的噪声强度,并在噪声逐渐增加的情况下对探测数据进行了 5000 次蒙特卡罗重复实验,统计平均检测概率,得到了图 10(b)。可以看到,随着噪声强度增加,ABG-CFAR 的检测概率可以保持更加稳定的下降速率。总之,所提 ABG-CFAR 具有非常优异的检测性能,尤其是针对弱目标回波信号,同时 ABG-CFAR 还具有良好的抗噪声效果。

## 4 结 论

针对当前恒虚警检测概率较低的问题,本课题组设计了一种简单的信号降噪预处理方法,并在当前 CFAR 检测理论的基础上提出了新的检测方法——

ABG-CFAR。该检测方法具有良好的检测能力。仿真与实验结果显示,相比于其他 CFAR 检测方法,所提检测方法能够大大提高目标的检测概率。当然,此检测方法也有不足之处,如:该算法估计过程的鲁棒性有待提高,且仅适用于高累计计数的回波信号;在回波脉冲极窄或者发生严重测距漂移时,该算法的检测概率会下降。这都是未来需要改进的地方。

## 参 考 文 献

[1] 汪琳莉, 吴琛怡, 祁慧宇, 等. 多波束单光子雷达的多通道计时测量[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0204001.  
Wang L L, Wu C Y, Qi H Y, et al. Multi-channel timing measurement for multi-beam single-photon radar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0204001.  
[2] 刘俊良, 许伊宁, 董亚魁, 等. 集成型快速主动淬灭 InGaAsP 近

- 红外单光子探测器[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1212002.
- Liu J L, Xu Y N, Dong Y K, et al. Integrated InGaAsP near-infrared single-photon detector with fast active quenching[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1212002.
- [3] 周鑫, 杨坚, 李松. 星载单光子激光雷达海面回波信号模型[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1928002.
- Zhou X, Yang J, Li S. Model of sea surface echos from spaceborne single photon lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1928002.
- [4] 黄科, 李松, 马跃, 等. 单光子模式激光测高探测概率模型与精度分析[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1110001.
- Huang K, Li S, Ma Y, et al. Detection probability model of single-photon laser altimetry and its range accuracy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1110001.
- [5] 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.
- [6] Fouché D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors[J]. Applied Optics, 2003, 42(27): 5388-5398.
- [7] Chen Z, Liu B, Guo G M. Adaptive single photon detection under fluctuating background noise[J]. Optics Express, 2020, 28(20): 30199-30209.
- [8] Jiang Z M, Gong C, Xu Z Y. Achievable rates and signal detection for photon-level photomultiplier receiver based on statistical non-linear model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(12): 6015-6029.
- [9] 平庆伟, 何佩琨. 激光信号处理器的检测和虚警概率分析[J]. 激光技术, 2004, 28(5): 527-530.
- Ping Q W, He P K. Detecting probability and false alarming rate study of digital signal processor of laser ranger[J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 527-530.
- [10] Johnson S E. Target detection with randomized thresholds for lidar applications[J]. Applied Optics, 2012, 51(18): 4139-4150.
- [11] Milstein A B, Jiang L A, Luu J X, et al. Acquisition algorithm for direct-detection ladars with Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. Applied Optics, 2008, 47(2): 296-311.
- [12] Wu L, Zhao Y, Liu L P, et al. Varied threshold with laser flight time in scanner less range-gated lidar[J]. Applied Optics, 2010, 49(34): H20-H26.
- [13] Li S, Zhang Z Y, Ma Y, et al. Ranging performance models based on negative-binomial (NB) distribution for photon-counting ladars[J]. Optics Express, 2019, 27(12): A861-A877.
- [14] Xu X B. Single pulse threshold detection method with lifting wavelet denoising based on modified particle swarm optimization[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 88: 174-183.
- [15] 许述文, 王喆祥, 水鹏朗. 海杂波背景下雷达目标贝叶斯检测算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(2): 15-26.
- Xu S W, Wang Z X, Shui P L. Knowledge-based adaptive detection of radar targets in sea clutter background[J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(2): 15-26.
- [16] 徐璐, 张宇, 张勇, 等. 盖革模式雪崩光电二极管激光雷达累积探测性能的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0414003.
- Xu L, Zhang Y, Zhang Y, et al. Research on the detection performance of Geiger-mode APD laser radar with accumulated detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 0414003.
- [17] Youmans D G. Receiver-operating characteristic for several multiple hypothesis range-rate filter algorithms[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7684: 768412.
- [18] Maširević D J. On new formulas for the cumulative distribution function of the noncentral Chi-square distribution[J]. Mediterranean Journal of Mathematics, 2017, 14(2): 66.

## Detection of Constant False Alarms Based on Single-Photon Counting LiDAR

Liu Zhuowei<sup>1</sup>, Li Ziqin<sup>2\*</sup>, Su Zhigang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

<sup>2</sup>*Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, Xinjiang, China;*

<sup>3</sup>*Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*

### Abstract

**Objective** Since the development of single-photon radars, humans can detect more distant targets. However, the echo signals weaken, and the target detection technology requires urgent improvement. The target detection theory of single-photon LiDAR has been adopted from classical microwave radar. Many detection theories in classical radar have been transferred to quantum LiDAR and achieved good results, but research on single-photon LiDAR detection theory is not as advanced as that of classical radar. Current quantum laser detection methods still have limitations, such as the inability to precisely detect targets when the cumulative number of times is few; thus, it is difficult to detect echo targets with low signal-to-noise ratios. In addition, the current methods used to improve the detection probability are applied through signal-noise reduction, which in turn, complicates the detection process. Therefore, it is essential to improve the target detection performance at different accumulation times and noise intensities to overcome the shortcomings of the current detection methods.

**Methods** This study focused on the target detection of photon-counting LiDAR in a noisy background. First, according to the echo characteristics of the single-photon LiDAR, noise reduction was processed using numerical comparison and a Gaussian filter, which significantly decreased the noise intensity while maintaining the echo target information. Next, based on the processed signal which has obeyed a Gaussian distribution, we applied CFAR to determine the target. In CFAR process, we proposed an algorithm to estimate parameters of target and noise more accurately, thus further improving the detection ability. Finally, the detection performance was verified through experiments and simulation comparisons.

**Results and Discussions** When the noise intensity is 20000 counts/s, the signals after 200 counts are subjected to noise reduction

processing. Compared with original data, the noise intensity and variance of preprocessed data decrease, and the noise distribution is transformed from a binomial distribution to a Gaussian distribution (Fig. 2). After noise reduction processing, the Gaussian filter distribution is determined using the Gaussian filter parameters. As the Gaussian filter width increases, its distribution becomes closer to the Gaussian distribution (Fig. 3). We further verify the effect of noise reduction on the detection performance using the Monte Carlo experiment, the results show that the detection probability of proposed method is 4–6 times higher than that of bin-grouping constant false alarm detection method [Fig. 6(a)]. Compared with current constant false alarm detection methods, the detection probability of proposed method increased by approximately seven times [Fig. 6(b)]. Based on actual experimental point cloud data, the noise reduction process can filter out many interference points (Fig. 8). Therefore, the weak target detection results with linear array radar data can be improved compared with the conventional method (Fig. 9). The detection results show that the highest detection probability increases by 7.4 times compared with D-CFAR [Fig. 10(a)]; moreover, the rate of change in the false alarm probability decreases [Fig. 10(b)].

**Conclusions** This study demonstrates that the target can still be detected with a high detection probability in the case of strong noise or weak echo signal. Compared with the conventional methods, the proposed method improves the average detection probability of the target by 40% in the same signal-to-noise ratio environment, and the noise intensity is decreased.

**Key words** quantum optics; LiDAR; single-photon counting; target detection; constant false alarm detection