

# 一种对高速运动目标的单光子测距方法

刘祖迪<sup>1</sup>, 崔国栋<sup>1</sup>, 潘康立<sup>1</sup>, 罗辉<sup>2</sup>, 韩隆<sup>1</sup>

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100854)

**摘要:**作为一种前沿的激光探测技术,单光子激光测距技术已成功应用于月球测距、卫星测距和地面测高等领域。然而,单光子测距在机载空对空、地对空平台上对高速运动目标进行跟踪测距时,回波光子落在不同的时间窗,导致直接计数无法有效提取信号的问题仍需解决。针对空对空条件下单光子激光测距的应用需求,基于时间相关光子计数技术设计一种适用于全天时、宽时域、多噪声条件下对高速运动目标的单光子测距方法。该方法采用阵列单光子探测器和相邻时间窗相关统计多帧处理算法提取激光回波光子信号,并在 Matlab 平台上对算法进行仿真实验,使用多元阵列单光子探测器实现最大测程百公里以上、背景噪声计数率约为 5 MHz、单脉冲回波光子计数平均值为 1 条件下的回波光子信号提取。该方法能够克服传统单光子探测只能对准静态目标测距,只能在小接收视场和小波门范围等弱背景噪声及目标轨迹可预测条件下应用的限制,将单光子探测由只能固定平台夜晚对准静态目标测距推广至通用平台全天时对高速运动目标测距。

**关键词:**单光子激光测距;时间相关光子计数技术;高速运动目标;相关统计

**中图分类号:**TH74;TN820.5 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.03.007

## A single photon ranging method for high-speed moving targets

LIU Zu-di<sup>1</sup>, CUI Guo-dong<sup>1</sup>, PAN Kang-li<sup>1</sup>, LUO Hui<sup>2</sup>, HAN Long<sup>1</sup>

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100854, China)

**Abstract:** As a cutting-edge laser detection technology, single photon laser ranging technology has been successfully applied in the fields of lunar ranging, satellite ranging, and ground measurement. However, single photon ranging still needs to be solved when tracking and ranging high-speed moving targets on airborne air-to-air and ground-to-air platforms, where the echo photons fall in different time windows, resulting in direct counting that cannot effectively extract the signals. Aiming at the application requirements of single photon laser ranging under air-to-air conditions, a single photon ranging method is designed based on time-dependent photon counting technology for high-speed moving targets under full-time, wide-time domain, and multi-noise conditions. The laser echo photon signals are extracted using arrayed single photon detectors and the adjacent time window correlation statistical multi frame processing algorithm, and simulation experiments are carried out on the Matlab platform. The echo photon signals are extracted under the conditions that the maximum range is more than 100 km, the background noise count rate is about 5 MHz, and the average value of the single pulse echo photon count is 1 using the multivariate array single-photon detector. This method can overcome the limitations of traditional single-photon detection, which can only be aligned to static target ranging, and can only be applied in weak background noise and predictable target trajectory conditions such as small receiving field of view and wavelet gate range. The single photon detection can be extended from the range finding of static targets at night on a fixed platform to the range finding of high-speed moving targets all day on a general platform.

**Keywords:** single photon laser ranging; time-dependent photon counting technique; high-speed moving target; correlation statistics

## 1 引言

目前,机载远程激光测距主要采用单脉冲激光测距或多脉冲累加<sup>[1]</sup>激光测距技术,发射低重复频率、高峰值功率的激光脉冲,使回波激光脉冲的峰值功率和能量足够大,通常需要数百个光子的能量。多脉冲累加激光测距利用回波信号累加提高回波信噪比,使回波信号幅度大于探测阈值,实现激光回波提取。然而,由于机载平台的空间有限,增加激光发射能量需要更大的激光器与电源的体积与重量,这使得单脉冲激光测距系统难以通过增加激光发射能量来增加最大测程。由于需要对高速运动目标进行测距,且飞行过程中飞机振动以及光电雷达转镜的伺服误差,为保证激光照射到目标,激光的发散角和接收视场存在下限,分别导致回波能量弱和背景噪声强。

对于信噪比小于1的微弱激光回波信号,低重复频率、高峰值功率激光脉冲测距系统很难从背景噪声中提取微弱的激光回波信号。1998年, J. S. Massa、G. S. Buller 等人首次开发了一种基于时间相关单光子计数的激光测距机<sup>[2]</sup>。作为一种前沿的激光探测技术,其探测体制是飞行时间法(TOF)<sup>[3]</sup>和时间相关单光子计数(TCSPC)<sup>[4-5]</sup>,并使用具有单光子灵敏度的光电倍增管(PMT)、盖革模式雪崩光电二极管(GM-APD)、超导纳米线单光子探测器(SNSPD)等光电探测器作为探测器件<sup>[6]</sup>,能够探测极微弱的回波信号,从而获得更远的探测距离。目前单光子激光测距技术已成功应用于目标角速度较小且轨迹可预测的月球测距<sup>[11]</sup>、卫星测距<sup>[12-13]</sup>和地面测高<sup>[14-15]</sup>等领域。

在机载通用平台的单光子测距相比上述平台存在两个核心难点,即背景噪声强和目标高速运动。

背景噪声强是由于以下因素:对高速运动目标跟踪测距需要足够大的激光发散角和接收视场保证激光跟踪照射目标和接收回波,大的接收视场导致接收的背景噪声光子更多;白天测距的背景噪声远强于夜间;目标无轨迹预测,需要在宽时域、长距离范围测距,无法使用距离选通减小噪声。过强的背景噪声容易使单光子探测器饱和。除了使用带宽更窄的滤光片,还使用阵列探测器降低单像元的噪声

计数率。

目标高速运动的切向分量导致更大的接收视场,径向分量导致回波光子落入不同的时间窗,使用直接时间相关光子计数无法有效累加全部的回波光子提取回波信号。本文通过相邻时间窗相关统计多帧处理算法实现不同时间窗回波光子的累加,克服目标径向高速运动的影响实现回波提取。

## 2 单光子激光测距原理

### 2.1 飞行时间法

飞行时间法是雷达和激光测距等主动探测的基本方法之一,其过程如下<sup>[3]</sup>。以机载光电雷达为例,红外探测系统在空中搜索目标后伺服控制转镜对准目标。发射激光时主波取样探测器在扩束镜前端接收发射的激光并将其转换为启动计数器的主波信号。时钟振荡器用于向计数器输入时标脉冲。激光经过双程大气传输和目标反射进入接收光学系统。回波光子作用在光电探测器上被转换为电流脉冲信号,通过放大器放大并整形为回波脉冲,控制计数器停止计数。根据计数器从开始到结束记录的时标脉冲计数,可以计算激光脉冲飞行时间 $t$ 和目标距离 $R$ ,最后,距离数据被传输到上位机进行处理,距离方程如下,其中 $c$ 是光速:

$$R = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

其中,激光发射频率为 $f$ 时,最大无模糊测距距离 $R_{\max}$ 为:

$$R_{\max} = \frac{c}{2f} \quad (2)$$

若使用重复频率为1 kHz的激光测距机,最大无模糊测距距离 $R_{\max}$ 为150 km。

对于点目标,目标完全位于发射光斑内,目标截面积小于发射光斑面积,此时激光接收功率 $P_r$ 为:

$$P_r = \frac{4P_t \eta_t \eta_r \rho A_t A_r \cos\theta}{\pi^2 \theta_t^2 R^4} T^2 \quad (3)$$

上式为激光雷达方程, $P_t$ 为激光发射脉冲功率; $\eta_t$ 为发射光学系统透过率; $\eta_r$ 为接收光学系统透过率; $\rho$ 为目标反射率; $A_t$ 为目标反射有效面积; $A_r$ 为接收光学系统有效面积; $\theta$ 为目标反射面法线与发射光轴夹角; $\theta_t$ 为激光发射光束的发散角; $R$ 为目

标距离;  $T$  为激光大气传输单程透过率:

$$T = e^{-(\sigma_m + \sigma_a + k_m + k_a)R} \quad (4)$$

其中,  $\sigma_m$  为大气分子散射系数;  $\sigma_a$  为气溶胶散射系数;  $k_m$  为大气分子吸收系数;  $k_a$  为气溶胶吸收系数。

单光子激光测距采用光子计数, 基于激光雷达方程, 将脉冲测距激光回波功率的计算转化为回波光子数的计算, 回波光子数  $N_s$  为:

$$N_s = \frac{4 E_i \eta_i \eta_r \rho A_i A_r \cos \theta}{\pi^2 h \nu \theta_i^2 R^4} T^2 \quad (5)$$

其中,  $E_i$  为发射激光单脉冲能量;  $h\nu$  为发射激光中单个光子的能量。

## 2.2 时间相关单光子计数

单光子激光测距使用高重复频率和低脉冲能量的激光器, 回波光子数只有几个甚至小于一个, 因此使用具有单光子灵敏度的光电探测器, 如光电倍增管(PMT)、盖革模式雪崩光电二极管(GM APD)和超导纳米线单光子探测器(SNSPD)<sup>[6-10]</sup>。主要性能指标包括光谱响应范围、光子探测效率(PDE)、死时间、暗计数率(DCR)和脉冲后概率(APP)。具有单光子灵敏度的光电探测器对弱激光回波信号响应的同时也对背景噪声响应。对于单次脉冲测距, 探测概率低且虚警率高。雪崩光电二极管以盖革模式工作时, APD 输出脉冲的高度与进入探测像元的光子数量无关, APD 仅反应接收到或未接收到的光子。单光子激光测距无法通过单次脉冲的结果从噪声中提取回波信号。

根据测距精度要求, 将设计最大测程对应的时间长度划分为多个时间窗(Time bin)。发射  $N$  次激光脉冲并累加  $N$  次距离测量的光子计数结果。对静止目标进行测距时回波光子都落入同一 bin, 而噪声光子随机且较为均匀落入每个 bin。将测距结果累加  $N$  次后, 落入回波信号所在 bin 的总光子计数的期望将大于其他 bin 的计数。阈值方法可用于确定回波光子的 bin, 并将其转换为距离值。

$N_{se}$  为一个脉冲的平均回波光子计数,  $N_{be}$  为平均每个 bin 的背景噪声光子计数, 回波光子计数与分布分别为:

$$N_{se} = \eta_q N_s \quad (6)$$

$$P_{se}(k) = \frac{e^{-N_{se}} N_{se}^k}{k!} \quad (7)$$

其中,  $\eta_q$  为单光子探测器的探测效率(PDE), 一个脉冲周期在回波光子对应的 bin 的探测概率为:

$$P_d = e^{-N_{be} n} (1 - e^{-(N_{se} + N_{be})}) \quad (8)$$

其中,  $n$  为探测器死时间与 bin 的时间长度之比。

经过  $N$  次累加为  $N$  重伯努利实验, 回波光子数结果仍为泊松分布, 检测阈值为  $K$ , 累加后的探测概率为:

$$P_D = 1 - e^{-(N_{se} + N_{be})} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{(N_{se} + N_{be})^k}{k!} \quad (9)$$

累加后一个 bin 的虚警率为:

$$P_f = 1 - e^{-N_{be}} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{N_{be}^k}{k!} \quad (10)$$

整个时间范围的虚警率为:

$$P_F = 1 - (1 - P_f)^{N_{bin}} \quad (11)$$

$N_{bin}$  为整个时间范围的 bin 的个数。

## 2.3 单光子测距噪声抑制

单光子测距在白天具有强背景噪声, 有必要抑制背景噪声以提高信噪比。在单光子测距中抑制背景噪声的主要方法包括设置距离选通、光谱滤波和空间滤波。

距离选通是一种时间滤波方法。在月球测距、卫星测距和地面测高领域, 已知目标距离的范围, 单光子探测器仅在与该范围对应的的时间使能。单光子探测器不会对距离范围外的背景噪声做出响应, 可以大大降低虚警率。

光谱滤波是在接收光学系统中使用窄带滤光片, 其中心波长与发射的激光的波长相同并且具有高透射率。窄带滤光片的带宽远小于单光子探测器的光谱响应范围, 可以有效抑制背景噪声并确保对回波光子的响应。窄带滤光片的半峰全宽(FWHM)小于 1 nm。使用恒温槽保证窄带滤光片的中心波长不会偏移。

空间滤波尽量减小接收光学系统的接收视场, 减少进入接收系统的背景噪声光子的数量。机载光电雷达跟踪运动目标存在伺服控制误差, 导致激光束散角存在下限, 无法实现很小的束散角。接收视场也需要略大于或等于激光束散角, 因此接收视场也存在下限。

由于单光子探测器的死时间  $\tau_d$ , 如果使用光谱滤波和空间滤波方法后背景噪声计数率大于  $1/\tau_d$ , 背景噪声将导致单光子探测器输出饱和, 使其无法响应回波光子。使用阵列单光子探测器并将接收到的光子离焦和匀化, 使背景噪声光子均匀分布在阵列的每个像素上, 从而降低单个像素的背景噪声计

数率。使用阵列单光子探测器可以在单脉冲接收多个回波光子计数,降低累加帧数,提高信噪比和使用更大孔径接收<sup>[14]</sup>。

### 3 高速运动目标单光子测距方法

#### 3.1 运动对时间相关单光子计数的影响

时间相关单光子计数中设置的 bin 是固定的,对静止目标进行测距时每次发射的激光脉冲的飞行时间和测距距离都是相同的,目标反射的回波光子落在同一个 bin 内,这将增加该 bin 的计数概率。当回波光子对应的 bin 中的回波光子和噪声光子的总计数概率大于其他 bin 中噪声光子的计数概率时,经过  $N$  次测距累加后,回波光子对应 bin 的光子计数将显著大于其他 bin 的光子计数,这就可以鉴别该 bin 并计算目标距离。示例如图 1 所示,图中最大计数值对应的时间为 0.50 ms。

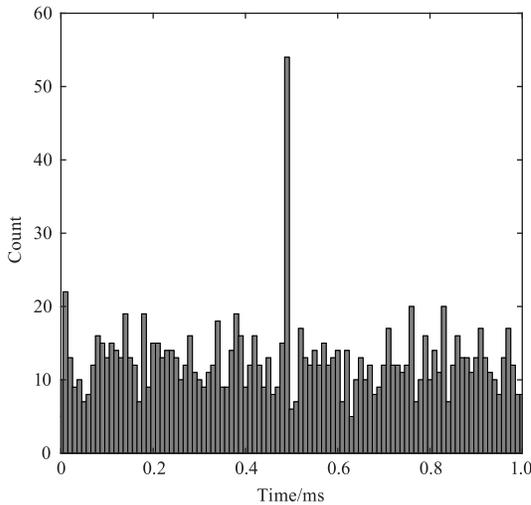


图 1 时间相关单光子计数结果

Fig. 1 Time dependent single photon counting results

如果目标相对单光子测距机具有较大的径向运动速度,导致每次发射激光脉冲的测距距离不同,并且回波光子将落在几个相邻的 bin 内。假设目标近似匀速运动的平均径向速度为  $v$ ,激光发射频率为  $f$ ,每个 bin 的时间宽度为  $\Delta t$ ,则每个 bin 接收的回波光子计数次数  $n$  为:

$$n = \frac{c\Delta t f}{2v} \quad (12)$$

测距精度  $\Delta R$  的设置可以参考目标的机身长度和测距精度要求设置为 7.5 m。当  $\Delta t = 50$  ns 时,对应  $\Delta R = 7.5$  m。 $f = 1$  kHz, $v = 1500$  m/s 时, $n = 5$ , $n$  是直接累加的时间相关光子计数法的有效累加次数, $n$  太小就无法鉴别回波对应的 bin 并计算目标

距离。

对于  $v$  较小  $n$  较大的低速运动目标,可以根据需要增大  $\Delta t$  或  $f$ ,使  $n$  满足时间相关单光子计数的累加次数。如果目标运动速度已知或可以实时测量,可以通过时间平移将回波光子移动到同一个 bin 并使用时间相关单光子计数方法测距。但该方法不适用于运动速度未知的高速运动目标。

上述方法的时间相关基础是回波光子落在相同的 bin。如果对高速运动目标测距,例如第  $a \sim b$  帧的回波信号在第  $i$  个 bin,第  $b+1 \sim c$  帧的回波信号在第  $i+1$  个 bin,在直接累加的时间相关单光子计数方法中第  $b$  和  $b+1$  帧的回波信号的时间相关信息未被利用,导致了上述的问题。

#### 3.2 高速运动目标单光子测距方法

尽管运动速度未知的运动目标的熵较大,但相邻帧的回波之间也存在时间相关性。假设目标的相对最大速度为  $V_{\max}$ ,激光发射频率为  $f$ ,则在相邻两个激光脉冲的时间间隔  $1/f$  内目标与单光子测距机距离变化最大值为  $V_{\max}/f$ ,时间变化最大值为  $2V_{\max}/(cf)$ 。

如果两个相邻帧存在两个响应的响应时间差小于  $2V_{\max}/(cf)$ ,则有可能是运动目标的回波光子响应,该时间差是由目标的运动引起的。bin 的时间宽度参数设置应大于  $2V_{\max}/(cf)$ 。除了回波光子响应,也有许多背景噪声响应满足上述的时间相关性条件,因此需要进行多帧处理。

回波光子和噪声光子在进入接收光学系统时是独立的,但在探测器上产生响应时,由于探测器的死时间,噪声光子产生的死时间可能会阻止回波光子产生响应,实际总计数值略小于回波光子计数加背景噪声计数,但回波光子对应的 bin 的计数值期望大于仅有噪声光子计数的 bin 的。根据大数定律,经过多帧的计算处理后可以明显区分两个概率。

综合考虑算法的准确性和实时性,可以使用如下处理方法:

1) 根据要求的测距精度对最大测程对应的时间划分 bin。

2) 将第 1 帧的计数结果作为第 1 帧的累加结果数组(bin 下标和累加计数值)

3) 遍历第  $k$  帧( $k = 2, 3, \dots, N$ )的每一个 bin <sub>$i$</sub> ,在第  $k-1$  帧得到的累加结果数组中第  $i-1$ 、 $i+1$

个 bin 内取最大的累加计数值和其他两个计数值并分配权重,将它们与第  $k$  帧第  $i$  个 bin 的计数值相加并分配给第  $k$  帧的累加结果数组中第  $k$  帧第  $i$  个 bin 的累加计数值。

4) 循环直到  $k$  达到设置的最大帧数  $N$ 。

#### 4 实验与结果分析

##### 4.1 实验参数设置

激光测距机的激光发射频率设置为 1 kHz,激光发射时间间隔 1 ms,最大无模糊测距距离为 150 km。

空对空距离测量的常见情况是两架飞机相对飞行,飞机的机头、机翼和尾部会反射激光,导致回波脉冲变宽。测距精度的设置参考目标的机身长度及测距精度要求设置为 7.5 m。根据测距方程得到对应的 bin 时间长度为 50 ns。

设置应用场景为载机与目标相对运动速度为 1500 m/s。时间间隔 1 ms 内最大位移 1.5 m,对应 0.2 个 bin 的距离精度。

单光子探测器死时间设置为 200 ns。光子计数累加帧数设置为 50 帧。

##### 4.2 实验结果

使用随机数种子和泊松分布随机数函数生成噪声计数,在 0.5 ms 处加入相对飞行运动目标的信号计数,并做死时间处理。调整泊松分布背景噪声计数的速率参数控制背景噪声计数率。N 为累加次数,在第 50 帧目标飞行到 0.4995 ms 处。

设置每个 bin 的噪声速率  $N_{be}$  为 0.25,信号速率  $N_{se}$  为 1,使用单像元单光子探测器的实验仿真结果如图 2 所示。

该次实验中平均噪声计数率为 5 MHz,处理后的 bin 平均噪声计数均方根值  $rms\_n$  为 19.2087,标准差  $std\_n$  为 1.3733,最大噪声计数值  $max\_n$  为 25.4039,最大信号计数  $max\_s$  值为 32.7602,对应 bin 为 0.4995 ms。50 次累加后信号计数明显高于噪声计数,可以实现对高速运动目标的单光子测距信号提取。处理后的信噪比和对比特度为:

$$SNR = max\_s / rms\_n = 1.7055$$

$$C = (max\_s - rms\_n) / std\_n = 9.8678$$

设置每个 bin 的噪声速率  $N_{be}$  为 0.5,信号速率  $N_{se}$  为 1,使用单像元单光子探测器的实验仿真结果如图 3 所示。

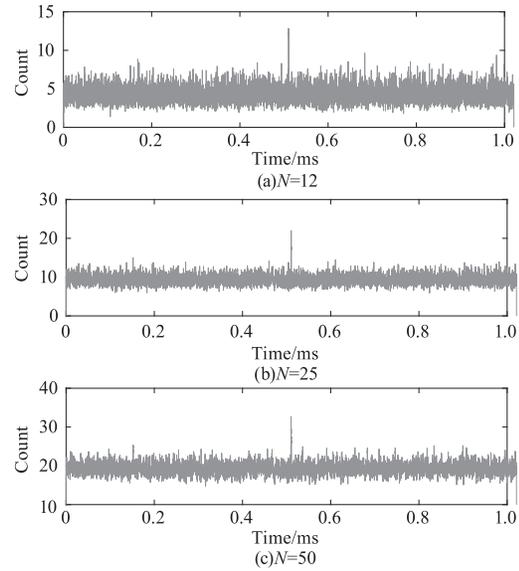


图 2 运动目标单像元单光子探测器测距实验仿真结果

Fig. 2 Simulation results of single pixel single photon detector ranging experiment for the moving target

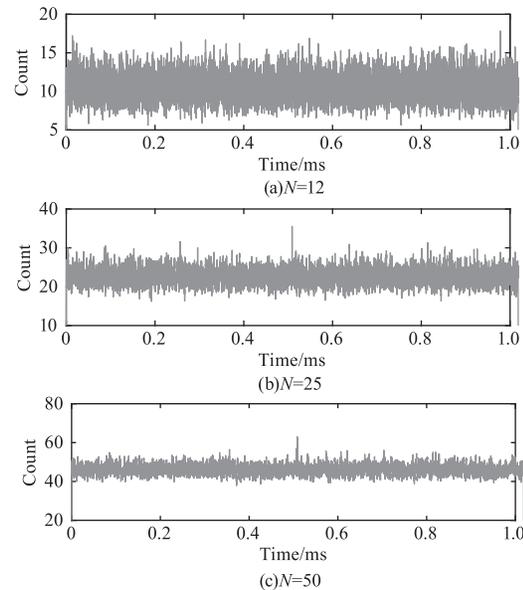


图 3 运动目标阵列单光子探测器测距实验仿真结果

Fig. 3 Simulation results of array single photon detector ranging experiment for the moving target

该次实验中平均噪声计数率为 10 MHz,处理后的 bin 平均噪声计数均方根值  $rms\_n$  为 46.1181,标准差  $std\_n$  为 2.3743,最大噪声计数值  $max\_n$  为 57.0611,最大信号计数  $max\_s$  值为 62.9594,对应 bin 为 0.4995 ms。50 次累加后信号计数明显高于噪声计数,可以实现对高速运动目标的单光子测距信号提取。处理后的信噪比和对比特度为:

$$SNR = max\_s / rms\_n = 1.3652$$

$$C = (max\_s - rms\_n) / std\_n = 7.0930$$

保持实验参数不变,图4是直接时间相关单光子计数的结果,根据2.1节的分析,每个信号 bin 有效累加次数只有5次,无法通过增加累加帧数提取回波信号。

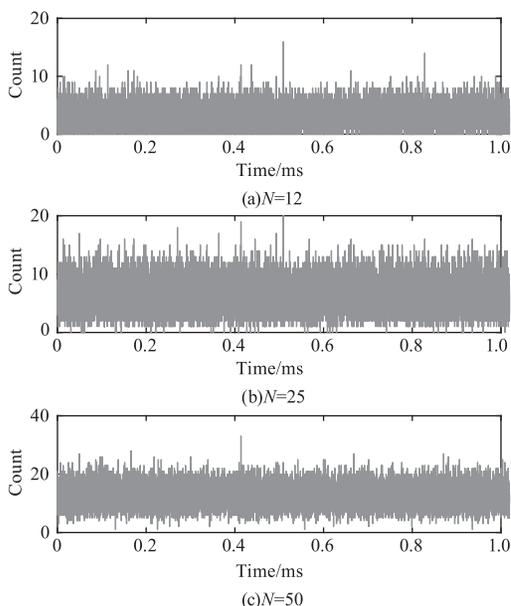


图4 直接时间相关单光子计数的运动目标阵列单光子探测器测距实验仿真结果

Fig. 4 Simulation results of single photon detector ranging experiment for the moving target array with direct time dependent single photon counting

$cnt_1$  为最大计数值对应的 bin 为目标所在 bin 的次数,  $cnt_3$  为最大计数值对应的 bin 为目标所在 bin 和前后两个相邻 bin 的次数。分别使用无权重和最大值权重为 0.7 的算法在几种条件进行 100 次实验,使用相同的控制随机数生成器。无权重的方法在  $N_{se} = 1$  和  $N_{be} = 0.5$  时,  $cnt_1$  和  $cnt_3$  为 52 和 75,在  $N_{se} = 2$  和  $N_{be} = 1$  时,  $cnt_1$  和  $cnt_3$  为 69 和 88。

改进后的方法在  $N_{se} = 1$  和  $N_{be} = 0.5$  时,  $cnt_1$  和  $cnt_3$  为 75 和 95,在  $N_{se} = 2$  和  $N_{be} = 1$  时,  $cnt_1$  和  $cnt_3$  为 82 和 99。在  $N_{se}$  和  $N_{be}$  比值不变但绝对值减小小时测距准确率会降低。改进后的算法准确率提高了大约 20%。在  $N_{se}/N_{be}$  不变的条件下增大  $N_{se}$  和  $N_{be}$ ,由于使用阵列探测器的优势,测距精度将得到提高。

算法在  $N_{se} = 1$  不同噪声计数率下的性能如表 1, NCR 为噪声计数率, SNR 为信噪比, RMS 为处理后的噪声均方根, STD 为噪声标准差, SNR 为信号计数最大值  $\max_s$  与噪声均方根之比,  $C = (\max_s - rms_n) / std_n$ 。

表 1 算法在  $N_{se} = 1$  不同噪声计数率下的性能

Tab. 1 Algorithm performance under different noise count rates ( $N_{se} = 1$ )

NCR/MHz	10	7.5	5	2.5
SNR	1.34	1.45	1.66	2.25
RMS	46.16	37.18	27.64	16.96
STD	2.25	2.16	1.87	1.48
$cnt_1$	53	61	76	85
$cnt_3$	76	91	96	99
C	6.48	7.76	9.81	14.29

## 5 结论

单光子激光测距的核心难点在于全天时、宽时域、大接收视场导致的高背景噪声计数率,以及目标运动导致的回波光子落在不同 bin 中。大接收视场是由于光电雷达跟踪精度和冲击振动下发射和接收的双轴一致性问题,这在工程应用推进中需要解决。

通过改进的时间相关光子计数累加方法和使用阵列探测器,单光子激光测距能够克服只能对准静态目标测距,只能在小接收视场和弱背景噪声条件如月球测距、卫星测距、地面测高等应用的限制,推广至通用平台全天时工作,实现飞机相对飞行场景下对高速运动目标的空对空测距。窄带滤光片等单光子测距噪声抑制技术与单光子探测器的探测效率、死时间、暗计数率、后脉冲概率等性能参数都与单光子测距能力密切相关,还需要在上述领域进行进一步的研究以提高单光子测距的能力。阵列单光子探测器相比单像元单光子探测器在强背景噪声环境有更优的性能,但是实际的背景噪声环境更为复杂,且在通用平台上有很大的变化,与天气、时间、太阳夹角、系统瞄准方向和背景等因素相关,需要以实际系统参数设计和实验为准。

## 参考文献:

- [1] Ni X X, Hu K. Multi-pulse train cross-correlation method in remote laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 128 - 133. (in Chinese)  
倪旭翔, 胡凯. 脉冲串互相关方法在远程激光测距中的应用[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 128 - 133.
- [2] John S. Massa, Gerald S. Buller, Andrew C. Walker, et al. Time-of-flight optical ranging system based on time-correlated single-photon counting[J]. Appl. Opt, 1998, (37):

- 7298 - 7304.
- [3] Chen Q S, Yang C W, Pan Z W, et al. A brief introduction on the development of laser time-of flight distance measurement technology [J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(1): 7 - 10. (in Chinese)  
陈千颂, 杨成伟, 潘志文, 等. 激光飞行时间测距关键技术进展 [J]. *激光与红外*, 2002, 32(1): 7 - 10.
- [4] 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): 245 - 252. (in Chinese)  
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): 245 - 252.
- [5] Luo H J. Research on key technique of the single photon imaging and detection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)  
罗韩君. 单光子成像探测关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [6] Dong Y K, Liu J L, Sun L S, et al. Integrated low-noise near-infrared single-photon detector based on InGaAs NFAD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 88 - 95. (in Chinese)  
董亚魁, 刘俊良, 孙林山, 等. 基于 InGaAs NFAD 的集成型低噪声近红外单光子探测器 [J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 88 - 95.
- [7] Long Y Q, Shan X, Wu W, et al. Low-noise GHz InGaAs/InP single-photon detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 72 - 79. (in Chinese)  
龙耀强, 单晓, 武文, 等. 基于 InGaAs/InP 低噪声 GHz 单光子探测器研究 (特邀) [J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 72 - 79.
- [8] Jiang L J, Fang Y Q, Yu C, et al. Miniaturized free-running InGaAs/InP single-photon detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 80 - 87. (in Chinese)  
蒋连军, 方余强, 余超, 等. 微型化自由运行 InGaAs/InP 单光子探测器 (特邀) [J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 80 - 87.
- [9] Shi Y L, Li Y X, Bai R, et al. Advancement of shortwave infrared single-photon detectors (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 35 - 50. (in Chinese)  
史衍丽, 李云雪, 白容, 等. 短波红外单光子探测器的发展 (特邀) [J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 35 - 50.
- [10] You L X. Status and prospect of superconducting nanowire single photon detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 9 - 14. (in Chinese)  
尤立星. 超导纳米线单光子探测现状与展望 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 9 - 14.
- [11] Li Y Q, Fu H L, Li R W, et al. Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan observatories [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 188 - 195. (in Chinese)  
李语强, 伏红林, 李荣旺, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 188 - 195.
- [12] Zhang H F, Deng H R, Wu Z B, et al. Observations of space debris by ground-based laser ranging system [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2016, 33(5): 457 - 462. (in Chinese)  
张海峰, 邓华荣, 吴志波, 等. 地基激光测距系统观测空间碎片进展 [J]. *航天器环境工程*, 2016, 33(5): 457 - 462.
- [13] Deng H R, Zhang H F, Long M L, et al. 4 kHz repetition rate satellite laser ranging system and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 233 - 239. (in Chinese)  
邓华荣, 张海峰, 龙明亮, 等. 4 kHz 重复频率卫星激光测距系统及其应用 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 233 - 239.
- [14] John J. Degnan, Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements, [J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 34(3/4): 503 - 549.
- [15] Thorsten Markus, Tom Neumann, Anthony Martino, 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.