

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.03.02

高通量高重频单光子激光雷达及其波形校正方法

吕林杰^{1,2}, 李端^{1*}, 米庆改², 杨扬², 张磊², 武腾飞^{2,3}, 徐立军¹

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 3. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 为了实现单光子激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)的快速高精度探测, 设计了一种高通量高重频单光子LiDAR系统, 并提出了一种适用于该系统的波形校正方法。该系统通过提高光子计数率, 显著减少了单像素采集时间; 同时, 利用波形校正方法有效解决了在高通量高重频条件下, 因单光子探测器死区时间导致的多周期耦合和波形畸变问题, 从而有效提升了系统对目标信号强度和深度的反演精度。系统采用近红外波段自由运行单光子探测器(死区时间1 200 ns), 激光重复频率为3 MHz, 单像素采集时间为1 ms。仿真和实验结果表明: 该方法的距离反演精度可达4.9 mm, 信号通量反演精度为0.16个光子。在三维成像实验中, 采用50×50的点对点扫描方式, 成像平面拟合精度达到8 mm, 能够实现近距离小型无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)的高精度三维成像。为单光子LiDAR在目标探测和资源测绘等快速成像领域的应用提供了新的技术手段。

关键词: 激光雷达; 单光子探测; 三维成像; 高通量; 高重频; 行走误差

中图分类号: TB96; TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2025) 03-0028-09

High-flux and high-repetition-rate single-photon LiDAR and its waveform correction method

LYU Linjie^{1,2}, LI Duan^{1*}, MI Qinggai², YANG Yang², ZHANG Lei², WU Tengfei^{2,3}, XU Lijun¹

(1. School of instrumentation science and opto-electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

3. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To achieve fast and high-accuracy detection with single-photon light detection and ranging (LiDAR), this paper designs a high-flux and high-repetition-rate single-photon LiDAR system and proposes a waveform correction method tailored for this system. By increasing the photon counting rate, the system significantly reduces the single-pixel acquisition time. Meanwhile, the waveform correction method effectively addresses the issues of waveform distortion caused by the dead time of single-photon detectors under high-flux and high-repetition-rate conditions, thereby enhancing the inversion accuracy of target signal strength and depth. The system employs a free-running single-photon detector in the near-infrared band with a dead time of 1 200 ns and a laser repetition rate of 3 MHz, and the single-pixel acquisition time is set to 1 ms. Simulation and experimental results demonstrate that the proposed method achieves a distance inver-

收稿日期: 2025-04-07; 修回日期: 2025-05-21

基金项目: 航空科学基金项目(20230022051002); 国家自然科学基金面上项目(62371028); 航空科学基金项目(202300560Y1001); 国家“十四五”计量技术基础科研项目(JSJL2023210XXXX)

引用格式: 吕林杰, 李端, 米庆改, 等. 高通量高重频单光子激光雷达及其波形校正方法[J]. 计测技术, 2025, 45(3): 28-36.

Citation: LYU L J, LI D, MI Q G, et al. High-flux and high-repetition-rate single-photon LiDAR and its waveform correction method[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(3): 28-36.



sion accuracy of 4.9 mm and a photon flux inversion accuracy of 0.16 photons. In the 3D imaging experiment, using a 50×50 point-to-point scanning pattern, the imaging plane fitting accuracy reaches 8 mm, enabling high-precision 3D imaging of small UAVs at close range. This study provides a new technical approach for the application of single-photon LiDAR in fast imaging fields such as target detection and resource mapping.

Key words: LiDAR; single-photon detection; 3D imaging; high-flux; high-repetition-rate; walk error

0 引言

单光子探测器(Single-photon avalanche diodes, SPAD)作为单光子LiDAR的核心组件之一,能够响应单个光子,已达到探测技术的理论极限,其性能直接影响单光子LiDAR的探测能力和应用效果。单光子LiDAR凭借其优异的弱光探测能力,被应用于目标探测^[1]、地球资源测绘^[2]和自动驾驶^[3]等多个领域^[4]。在单光子LiDAR快速三维成像研究领域,国内外研究机构主要沿着两个方向展开探索:其一,通过开发高光子效率算法,实现低信号通量条件下的三维成像^[5-6];其二,借助高时间效率的高通量LiDAR实现快速探测^[7-9]。低信号通量单光子LiDAR回波信息少,能够应用于极其微弱回波光子的探测场景,比如远距离成像^[10]以及高散射介质中的成像^[11]等。而高信号通量单光子LiDAR能够在短时间内获得更多的光子信息,具有低虚警率的优势,并且不需要复杂的后处理算法即可实现准确成像。

死区时间会导致单光子探测器信号波形发生畸变。畸变的程度与信号通量直接相关,信号通量越高,畸变程度越高。为此,O'CONNOR D V^[12]提出了经典的“5%准则”,即把信号探测概率衰减到5%以下的极低水平。这意味着需要更长的采集时间才能获取足够的光子信息,限制了系统测量的实时性。自2000年以来,国内外研究人员提出了多种方法,旨在消除波形畸变带来的“行走误差”^[13-16]。2016年,ISBANER S等人^[17]建立了自由运转模式下的递归模型,成功实现了自由运转模式下波形畸变的复原。2019年,RAPP J等人^[18]提出了马尔可夫链波形校正方法,并首次引入了高通量单光子LiDAR的概念^[9],突破了单光子探测的“5%准则”,有效提升了单光子LiDAR的测量速度,将单点采集时间缩短至100 ms。2022年,南京理工大学建成团队对高通量光子计数

LiDAR进行了深入的理论研究,建立了全波形快速复原的理论模型^[19],并提出了基于正向模型的波形优化方法^[20]。然而,上述探测方法并未充分利用单光子探测器的探测性能,在单个脉冲周期内,仍存在部分非死区状态的无信号时间区间。

高通量高重频探测方法针对单光子探测器死区时间大于激光重复周期的情况,通过充分利用探测器的非死区状态时间,使探测器接近饱和计数率运行,进一步提升单光子LiDAR系统获取回波光子的速度。然而,在高通量高重频的单光子LiDAR信号探测过程中,相邻多个周期内的光子相互影响,导致探测波形的畸变更加复杂且难以补偿。尤其在近红外波段,由于InGaAs/InP探测材料本身缺陷的影响,需要更长的死区时间才能保证有更低的暗计数率和后脉冲概率^[21]。这种死区时间的长度会达到微秒量级,接近或超过高重频激光器脉冲周期,使得该波段的波形探测对波形校正方法提出了更为精细的要求。

针对上述挑战,本文设计了一种高通量高重频的单光子LiDAR,并提出了一种适用于高通量高重频单光子探测波形的校正方法。该方法能在有效提升采集速度的同时,确保系统的测量精度。

1 高通量高重频单光子LiDAR系统

基于单光子探测的脉冲式LiDAR的计数率会受到信号通量和激光重频2个参数的共同影响。当激光重频小于单光子探测器饱和计数率,且每个光脉冲的探测概率接近1时,系统计数率将受到激光重复频率的限制,此时仅增加信号通量已无法显著提升光子计数率。针对这一问题,本文设计了一套高通量高重频单光子LiDAR成像系统,并用于快速三维成像探测实验。该系统采用纳秒激光器作为光源,其脉冲半高全宽为0.92 ns,激光重复频率可在1~5 MHz范围内调节,单脉冲能量可在0~20 nJ内调节。单光子探测器在自由运行模

式下,除死区时间外始终处于工作状态,可对任意位置的目标进行探测。在该系统中,单光子探测器为基于InGaAs/InP的国盾量子QCD600B-S近红外自由运行单光子探测器,其波长范围为900~1700 nm,死区时间被调节为1200 ns。

该系统通过长时间的光子信号累积采集和时间相关单光子计数(Time-Correlated Single-Photon Counting, TCSPC)技术构建直方图。随后,将该直方图转换为表征光子事件的概率分布,即光子探测波形。通过校正方法,进一步得到光子信号经目标反射后到达探测端的光子通量分布,即光子回波波形。最终,通过对回波波形信号进行解析处理,实现目标特征参数(深度和反射率)的反演与提取。激光器出射信号分为两路:一路作为探测光,另一路作为参考光。系统结构图如图1所示,计算机通过数据采集器控制二维振镜的偏转角度,并同时采集时间数字转换器(Time-to-Digital Converter, TDC)记录的光子飞行时间信号;探测光

透过穿孔反射镜到达二维振镜,振镜根据数据采集器输出的电压信号调整激光出射方向,实现点对点二维扫描;发射端采用25.4 mm口径的准直镜头,以确保光束准直性;参考光通过线性光电探测器转换为电信号后,输入TDC的同步通道,作为光子飞行时间测量的起始参考点;二维振镜的重复定位精度小于8 μ rad;光电探测器带宽为200 MHz;数据采集器输出分辨力为16 bits,输出采样率为2 MSa/s,时间分辨力为10 ns;目标反射的回波光经振镜和穿孔反射镜返回后,由接收镜头耦合至接收多模光纤;单光子探测器将光子信号转换为电脉冲,并由高精度时间数字转换器(型号为Picoquant HydraHarp 400)进行时间标记,该器件的时间分辨力达8 ps;最终,光子时间数据上传至计算机进行后续处理与分析。通过结合精密光学控制与单光子时间相关测量技术,该系统实现了高精度、高灵敏度的激光测距与三维成像功能。



图1 单光子探测系统结构图

Fig.1 Single photon detection system structure diagram

2 高通量高重频光子探测波形校正方法

信号通量是用于表征单个周期信号幅值的积分^[22]。典型的LiDAR回波模型可以通过时间-幅值的方式进行描述。单个脉冲周期 t_r 时间内,接收的总光通量 Λ 包括回波光信号通量 Λ_s 和噪声通量 Λ_b 两部分,可以表示为

$$\Lambda = \Lambda_s + \Lambda_b = \int_0^{t_r} (\lambda_s(t - \frac{2D}{c}) + b) dt \quad (1)$$

式中: $\lambda_s(t - 2D/c)$ 为信号强度随时间 t 变化的波形函数, D 为目标距离, c 为光在空气中的速度; b 为背景噪声率,是指每秒噪声光子的个数。

通过回波光信号通量 Λ_s 与发射信号通量 Λ_l 的比值,可以实现对目标反射率 α 的反演。 α 与激

光入射目标的角度 θ 、目标本身的材质吸收率 ρ 、由于距离 D 导致的衰减有关,其表达式为

$$\alpha = \frac{\Lambda_s}{\Lambda_i} = f(\theta, D, \rho) \quad (2)$$

通常认为,发射信号通量 Λ_i 是不变的,回波光子的信号通量 Λ_s 与目标反射率 α 成正比关系。因此,可以采用回波光子信号通量 Λ_s 来表示目标反射率的强弱。

在单光子探测过程中,每个时间间隔bin内记录的光子事件数均服从泊松分布,且各时间间隔bin之间的光子计数事件相互独立。在不考虑相邻bin死区时间影响条件下,假设第 j 个时间间隔bin内的光子期望值为 $\Lambda(j)$,则时间间隔bin内探测到至少一个光子的概率表示为 $P(j) = 1 - \exp(-\Lambda(j))$ 。

单光子探测器在响应完成一个光子后,需要经过一段时间才能恢复其探测能力。在这段恢复期间,探测器无法对新的光子信号做出响应,这段恢复时间即为死区时间 t_d 。若前面的时间间隔bin探测到光子信号,那么后续时间间隔bin的探测概率会降低。假设在第 j 个时间间隔bin前一个死区时间内不响应光子的概率为 P_n , P_n 也是在第 j 个时间间隔bin响应光子的条件概率,该条件概率可通过光子探测概率波形 $P_M(i)$ 来计算, $P_M(i)$ 也可通过测量的光子计数反演得到,即

$$P_M(i) = \frac{N(i)}{f_r \cdot T_a} \quad (3)$$

式中: $N(i)$ 为第 i 个时间间隔bin实际探测到的光子数, f_r 为激光重复频率, T_a 为系统单点测量时间。

若在第 j 个时间间隔bin前面响应了 $\sum_{i=j-d}^{j-1} N(i)$ 个光子,那么条件概率 $P_n(j)$ 可以通过式(4)表示。

$$P_n(j) = 1 - \sum_{i=j-d}^{j-1} P_M(j) = 1 - \sum_{i=j-d}^{j-1} \frac{N(i)}{f_r \cdot T_a} \quad (4)$$

式中: i 和 j 为时间间隔bin的次序; d 为死区时间 t_d 等效的时间间隔bin数量, $d = \text{ceil}(t_d / \Delta t)$,其中 $\text{ceil}()$ 为向上取整函数, Δt 为每个时间间隔bin时间窗口的长度(通常为皮秒量级), Δt 远小于仪器响应函数的时间宽度(该宽度受到激光脉冲形状、SPAD与TDC时间抖动的影); P_M 为累积探测概率波形。

假设第 j 个时间间隔bin内信号光子数期望值为 $\Lambda(j)$,即信号光子通量。实际探测概率 $P_M(j)$ 可以表示为

$$P_M(j) = P_n(j) P(j) = \left(1 - \sum_{i=j-d}^{j-1} P_M(j)\right) \left(1 - \exp(-\Lambda(j))\right) \quad (5)$$

信号光子通量越强, $P_n(j)$ 越小,这将导致通过时间相关累积得到的光子探测波形发生畸变的程度越高。因此,需要通过单光子探测的正向模型恢复信号原本的回波波形形状信息。通过式(5)进行反向推导,可以得到第 j 个时间间隔bin内的信号通量 $\Lambda(j)$ 表达式为

$$\Lambda(j) = -\ln \left[1 - \frac{P_M(j)}{1 - \sum_{i=j-d}^{j-1} P_M(j)} \right] \quad (6)$$

$\Lambda(j)$ 可以作为恢复后的回波波形的点幅值。通过循环回波波形的每个时间间隔bin点,所得到的恢复后的回波波形即为目标回波信号通量的期望值。

光子的探测概率序列在短时间内即可达到稳态。在稳态中,可以认为每个周期的光子探测概率分布是相同的,并且可以通过最终的稳态探测分布来表示^[20]。传统探测方式通常采用较低的激光重复频率,使得脉冲周期大于死区时间($t_r > t_d$),并且需要考虑光子事件是否会对相邻周

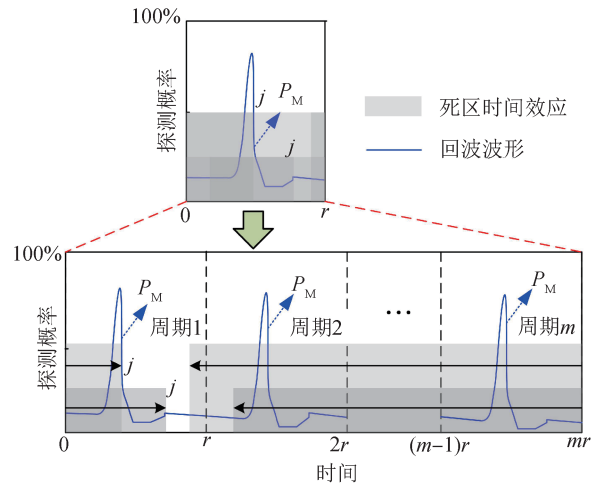


图2 高通量高重复单光子探测波形死区时间效应
Fig.2 The dead time effect of detection waveform by high-flux high-repetition single-photon detection

期产生影响。因此,需要对每个周期的光子信号进行分段处理,并考虑周期的前后影响部分。而在高重频探测中,脉冲周期小于死区时间($t_r < t_d$),信号的死区时间影响将会扩展到后面的多个周期。假设每个周期都会受到前面 m 个周期的影响,其中 $m = \text{ceil}(t_d/t_r)$ 。从脉冲时间序列探测结果的角

度来看,单脉冲(单重复周期脉冲数为1)重复 n 次与多脉冲(单重复周期脉冲数为 m)重复 n/m 次本质上是相同的。如果将激光器等效为激光脉冲周期为 $m \cdot t_r$ 的多脉冲激光器,脉冲个数为 m ,如图2所示,第 j 个时间间隔 bin 的探测光子概率的条件概率 $P_n(j)$ 可通过式(7)计算。

$$P_n(j) = \begin{cases} 1 - \left(\sum_{i=1}^{mr} P_M(i) - \sum_{i=j}^{mr-(d-j)} P_M(i) \right), & j < d - (m-1)r \\ 1 - \left(\sum_{i=1}^{mr} P_M(i) - \sum_{i=j}^r P_M(i) - \sum_{i=r}^{mr-(d-j)} P_M(i) \right), & j \geq d - (m-1)r \end{cases} \quad (7)$$

式中: d 为死区时间等效时间间隔 bin 的个数, r 为一个激光重复周期等效时间间隔 bin 的个数。第 j 个时间间隔 bin 恢复回波波形幅度 $\Lambda(j)$ 可以通过公式(8)得到。

$$\Lambda(j) = -\ln \left(1 - \frac{P_M(j)}{P_n(j)} \right) \quad (8)$$

本文采用逐 bin 循环计算的方法对探测波形进行处理,以消除系统噪声和探测器响应引入的畸变,从而获得无畸变的回波探测波形。然后,在恢复波形峰值位置的前后3倍均方根脉冲宽度范围内,利用质心法计算波形的质量重心。具体而言,将各 bin 的时间坐标与其对应的光子计数进行加权平均,得到波形的质心位置,进而精确反演光子到达目标的飞行时间(Time of Flight, TOF),精度

可达皮秒级。此外,在回波波形峰值位置的前后3倍均方根脉冲宽度内,对时间维度进行数值积分,可以计算目标反射的单周期内回波信号光子通量,该参数能够直接反映目标的反射率特性。

3 蒙特卡洛仿真

系统实验往往受到条件的限制,难以获得真实值。而仿真能够设置真实值,从而准确验证算法的精度。本文设计了蒙特卡洛仿真实验,用于验证高通量高重频信号恢复方法的性能。数据生成过程如下:

1) 设置系统参数

设置参数如重复频率 f_r 、背景噪声率 b 、系统采集时间 T 、死区时间 t_d 、时间分辨力 Δt 、目标位置 D 。具体参数设置如表1所示。

表1 仿真参数设置

Tab.1 The parameters settings of simulation

参数	单周期信号通量 $\Lambda_s/\text{photons}$	噪声率 b/kHz	脉冲频率 f_r/MHz	死区时间 t_d/ns	系统采集时间 T/ms	时间分辨力 $\Delta t/\text{ps}$	目标位置 D/m	脉冲宽度 $/\text{ns}$
数值	0.017:0.017:6.7	20	3	1 200	1	8	31.5	0.92

2) 生成光子数

按照泊松分布生成信号光子数 N_s 和噪声光子数 N_b ; 信号光子的期望值为信号通量 Λ_s ; 噪声光子的期望值为噪声通量 $\Lambda_b = b \cdot \Delta t$ 。

3) 生成光子到达时间

生成信号光子到达时间概率分布通常与仪器响应函数(激光脉冲形状、SPAD与TDC时间抖动)有关,因此,假设信号光子的到达时间遵循期望

值为 $2D/c$ 的高斯分布。噪声光子到达时间的生成概率分布与噪声光强有关(探测器暗计数、环境噪声),噪声光强在时域上呈均匀分布,因此,噪声光子的到达时间在脉冲周期内也遵循均匀分布。最终,生成 N_s 个信号光子时间值 t_s 和 N_b 个噪声光子时间 t_n 值。

4) 数据排序与滤除

将光子到达时间数据按照升序进行排序,最

终得到的时间序列为 $Q = \text{sort}\{t_s, t_n\}$ ，其中 $\text{sort}()$ 为排序函数。然后，对排序数据按照死区条件进行数据滤除，将第1个光子数据作为起点。如果 $Q_{i+1} < Q_i + t_d$ ，则滤除；反之，则保留，作为有效光子数据。

5) 循环生成数据

记循环次数为 $N = N + 1$ ，当满足 $N < T/t_i$ 时，循环至步骤2)继续运行，直至满足既定条件，完成所有数据生成，即终止循环。

基于这些数据，直接采用质心法计算目标的飞行时间，并通过对回波波形进行积分以获取信号通量，此阶段得到的结果为未校正结果。随后，利用式(7)对探测波形进行恢复处理，再基于恢复后的回波波形重新进行质心计算与波形积分，最终得到的参数为校正后的结果。如图3(a)和图3(b)所示，当信号通量从0个增加至4个信号光子时，由于死区时间的影响，回波脉冲前侧探测概率大于后侧探测概率，导致光子探测波形发生畸变，从而引起较大的行走误差。本文提出的方法能够有效校正畸变的回波探测波形，抑制行走误差的产生。另外，本文提出的方法在信号通量和距离值的估计精度方面表现出显著优势，其估计值更接近于真值，精度明显优于未校正算法。具体而言，在信号通量为[0, 4]个光子时，未校正算法的信号通量精度为2.1个光子，距离精度为34.3 mm。而经过本文方法校正后，信号通量精度显著提升至0.16个光子，距离精度大幅提高至4.9 mm。与未校正算法相比，信号通量估计精度提高了92.4%，距离精度提高了85.7%。

然而，当信号计数率接近饱和时，泊松噪声的影响会被显著放大。具体而言，当信号通量大于4个光子时，脉冲后端bin的探测波形校正放大倍数大于50。此时，泊松噪声对光子探测波形的影响显著增强，从而对信号通量的估计产生较大干扰。从图3(b)中可以看出，当信号通量真值为4.8个光子时，估计的信号通量达到35个光子，完全偏离了信号通量真值。因此，在采集时间为1 ms的条件下，本文提出的方法更适用于信号通量小于4个光子的情况。

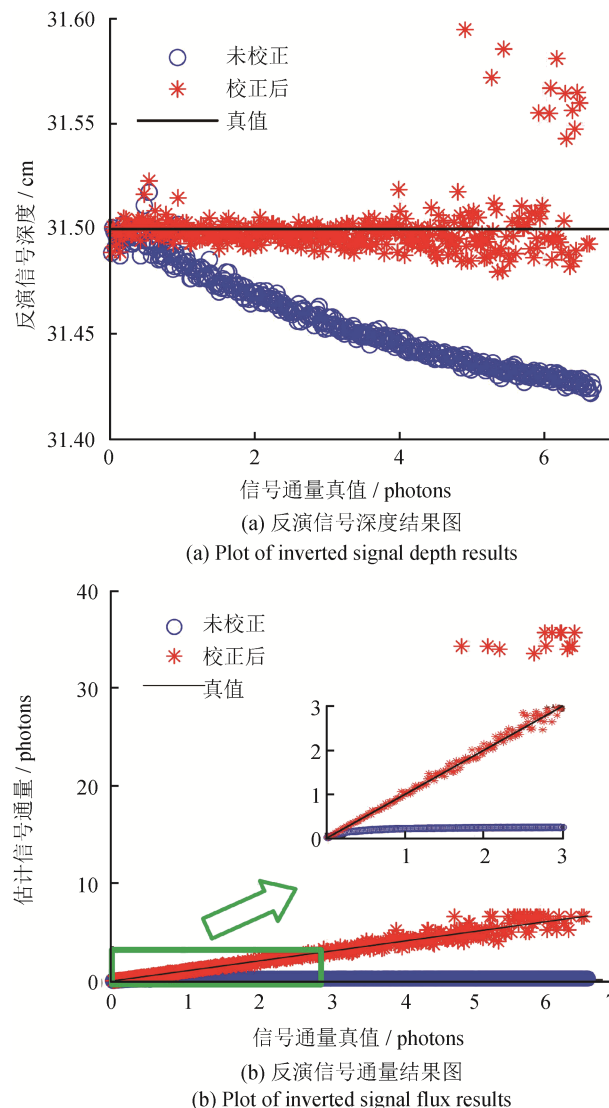


图3 仿真数据校正前后结果对比

Fig.3 Comparison of simulation data before and after correction

4 三维成像场景实验

在本实验中，为了探究不同信号通量条件下的成像效果，将不同灰度图案作为目标，并通过调节灰度来控制目标的反射率。实验中设置了6种不同反射率的矩形区域，灰度从白色到黑色分为6个灰度阶梯，反射率的动态范围约为10倍，扫描点数为 50×50 ，每个点的扫描时间为1 ms，因此整个实验的实际采集时间仅为2.5 s。实验在夜晚进行，因环境噪声产生的被探测光子数约为20 kHz。

从图4(a)可以看出，在未进行校正的情况下，成像平面在反射率较高区域出现了明显的质心偏移现象，平面左下角明显“凸起”。这是因为随着

目标反射率的增大,信号光子回波通量增大,此时,由于死区时间导致光子探测波形发生畸变,引起了较大的行走误差,导致目标平面在反射率较大位置明显“凸起”。然而,经过光子探测波形校正后的回波探测波形更接近于原始激光回波波形,质心偏移现象得到了显著改善。最终结果表明:未经过光子探测波形校正的扫描图形经过平面拟合后,拟合平面精度仅为35.2 mm;而经过光子探测波形校正后扫描图形,信号通量较强位置的行走误差被有效抑制,凸起的平面得以恢复为

平整的平面,扫描后的图形经过平面拟合,拟合精度达到8 mm,测距精度提升了77.3%。从图4(b)和图4(c)中可以看出,经过校正后,成像强度的动态范围显著提升,从 $[0, 0.25]$ 个光子增加至 $[0, 2.5]$ 个光子。这一提升主要是因为:在未校正的情况下,光子探测概率受到死区时间的影响,导致后续光子在多周期期间出现抑制效应耦合,而造成信号通量被严重低估;而经过光子探测波形校正后,这种低估得到了有效修正,显著拓展了成像强度的动态范围。

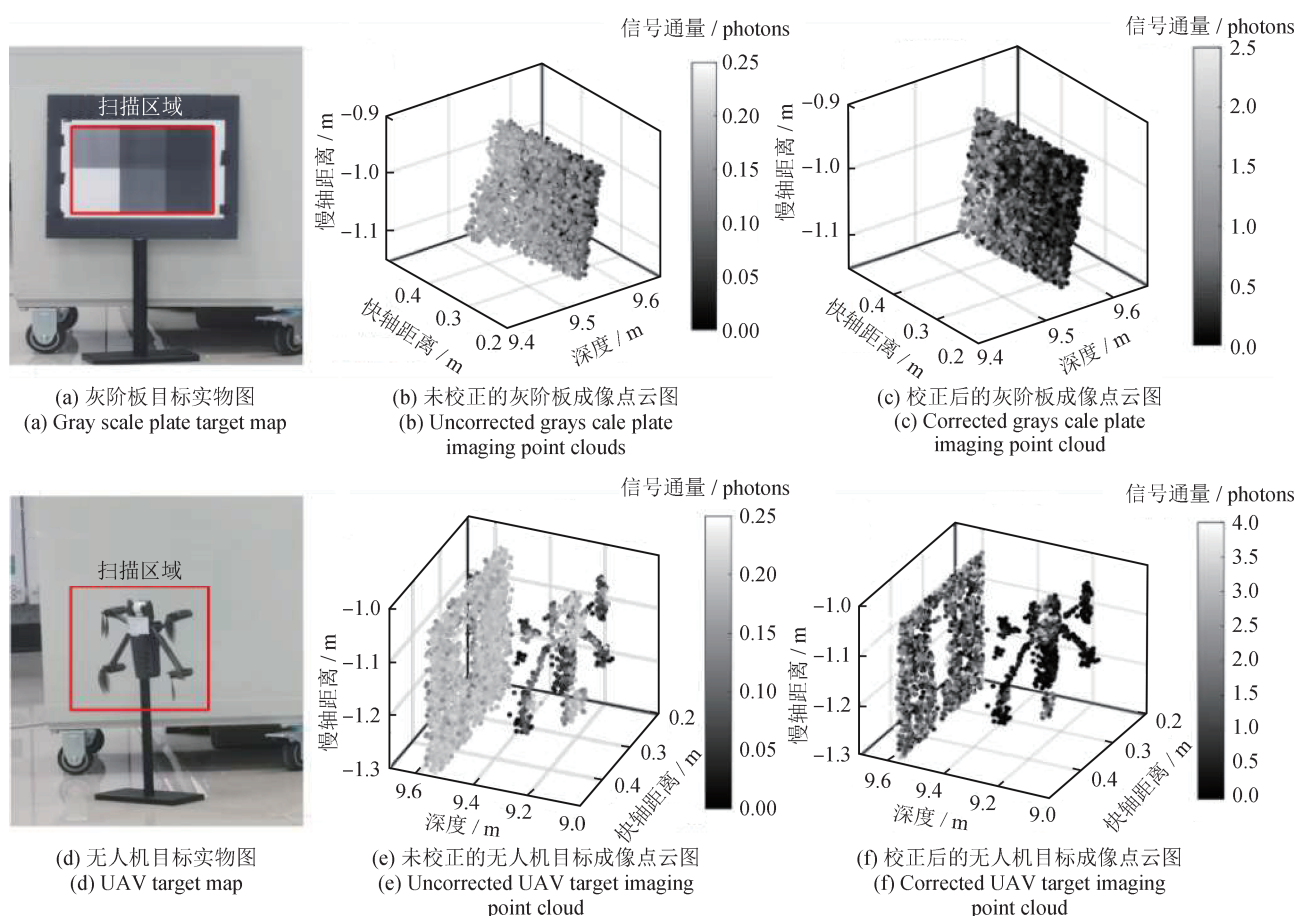


图4 三维扫描实验结果图

Fig.4 3D scanning experiment results

此外,本文进一步采用相同的扫描方式(扫描点数为 50×50)对UAV探测应用场景进行了实验验证,以评估该方法的实际应用效果。实验中所使用的UAV型号为Parrot Skycontroller3,其尺寸为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$,该实验场景的UAV目标实物图如图4(d)所示。由于UAV场景中缺乏可供对比的真值,本文通过对场景中的背景板进行精度

分析,评估校正效果。从图4(e)和图4(f)中可以看出,校正后的背景板深度精度得到了显著提升,校正前的精度为17.52 mm,而校正后的精度为7.9 mm,深度精度提升了55%。从UAV的成像结果来看,经过校正后的成像结果更接近真实值,进一步验证了该方法在实际应用场景中的有效性和可靠性。

5 结论

单光子探测 LiDAR 通常需长时间的信号累积才能实现准确反演目标信号的强度和深度。目前,高通量单光子探测在近红外波段通常需要几十毫秒的累计时间才能达到毫米级精度,针对这一问题,本文设计了一种近红外波段高通量高重频单光子 LiDAR 系统(死区时间 1 200 ns,激光重复频率 3 MHz),并提出了一种适用于高通量高重频单光子 LiDAR 的光子探测波形校正方法,该方法在保证毫米级测量精度的前提下,将探测速度提高到 1 ms。本文围绕所设计的高通量高重频单光子 LiDAR 系统参数进行了仿真和实验验证。仿真结果表明:该方法的距离反演准确度能够达到 4.9 mm,信号通量的反演准确度达到 0.16 个信号光子;三维成像实验结果表明:在采用 50 × 50 的点扫描方式且目标反射率动态范围约为 10 倍条件下,目标深度反演精度达到 8 mm;而对于小型 UAV 静态成像场景中的平板目标,深度反演的精度能够达到 7.9 mm,实现了近距离静态小型 UAV 的清晰高精度探测。然而,受限于当前扫描方式和探测器通道数量,该系统仍难以应对 UAV 等目标的动态运动场景。未来,面阵单光子探测器的引入有望进一步突破成像速度的瓶颈,从而满足 UAV 动态场景的高精度成像需求。

另外,本文提出的波形校正方法是一种非参数估计方法,不需要考虑冲击响应函数形状和目标参数等因素的影响,具有适用性广的特点。然而,该方法需要对计数器的每个 bin 进行计算,该计算过程会耗费大量时间,难以满足高速实时成像的需求。但是该方法的每个 bin 的恢复过程只和死区时间范围内的数据有关,并不会受到其他 bin 的影响。因此,该方法可以通过对每个 bin 进行独立并行计算的方式来校正原始光子探测波形,通过图形处理单元(Graphics Processing Unit, GPU)加速或现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)并行计算的硬件方法,可进一步提高算法的实时性。该波形校正方法不仅可用于单光子探测三维成像场景中,而且可以将信号回波强度扩展到光的偏振和光谱维度,因此该校正方法

在基于单光子探测的三维成像、偏振成像和气象成像等场景中具有很大的应用潜力。

参考文献

- [1] STEINDORFER M A, KIRCHNER G, KOIDL F, et al. Daylight space debris laser ranging[J]. Nature Communication, 2020, 11 (3735). DOI: 10.1038/s41467-020-17332-z.
- [2] THOMAS A N, ANTHONY J M, THORSTEN M, et al. The ice, cloud, and land elevation satellite-2 mission: a global geolocated photon product derived from the advanced topographic laser altimeter system [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111325.
- [3] KUMAGAI O, OHMACHI J, MATSUMURA M, et al. A 189 × 600 back-illuminated stacked SPAD Direct time-of-flight depth sensor for automotive LiDAR systems [C]// IEEE International Solid - State Circuits Conference (ISSCC), 2021: 110-112.
- [4] 杨扬, 王梓凝, 米庆改, 等. 单光子激光雷达技术研究现状及展望[J]. 计测技术, 2024, 44(6): 20-31.
YANG Y, WANG Z N, MI Q G, et al. Research status and prospects of single photon LiDAR technology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(6): 20-31. (in Chinese)
- [5] KIRMANI A, VENKATRAMAN D, SHIN D, et al. First-photon imaging [J]. Science, 2014, 343 (6166): 58-61.
- [6] SHIN D, KIRMANI A, GOYAL V K, Photon-efficient computational 3-D and reflectivity imaging with single-photon detectors[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2015, 1(2): 112-125.
- [7] 胡以华, 侯阿慧. 基于光子波形恢复的高通量面阵激光成像[J/OL]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(20). DOI: 10.3788/LOP241288.
HU Y H, HOU A H. High-flux single-photon three-dimensional imaging based on photon waveform recovery [J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(20). DOI: 10.3788/LOP241288. (in Chinese)
- [8] WANG X, ZHANG T, KANG Y, et al. High-flux fast photon-counting 3D imaging based on empirical depth error correction [J]. Photonics, 2023, 10(12). DOI: 10.3390/photonics10121304.
- [9] RAPP J, MA Y, DAWSON R M A, et al. High-flux single-photon lidar [J]. Optica, 2021, 8(1): 30-39.

- [10] LI Z, YE J, HUANG X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344–349.
- [11] LI Z, HUANG X, CAO Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km[J]. *Photonic Research*, 2020, 8(9): 1532–1540.
- [12] O'CONNOR D V. Time-correlated single photon counting [M]. Orlando: Academic Press, 1984: 37–39.
- [13] HE W, SIMA B, CHEN Y, et al. A correction method for range walk error in photon counting 3D imaging LiDAR [J]. *Optics Communications*, 2013, 308(1): 211–217.
- [14] XU L, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Restraint of range walk error in a geiger-mode avalanche photodiode lidar to acquire high-precision depth and intensity information [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1683–1687.
- [15] MA Y, LI S, ZHANG W, et al. Theoretical ranging performance model and range walk error correction for photon-counting lidars with multiple detectors [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15924–15934.
- [16] XU L, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Signal restoration method for restraining the range walk error of geiger mode avalanche photodiode lidar in acquiring a merged three-dimensional image [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(11): 3059–3063.
- [17] ISBANER S, KAREDLA N, RUHLANDT D, et al. Dead-time correction of fluorescence lifetime measurements and fluorescence lifetime imaging [J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9429–9445.
- [18] RAPP J, MA Y, DAWSON R M A, et al. Dead time compensation for high-flux ranging[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(13): 3471–3486.
- [19] 李志健. 高通量光子计数激光雷达的理论建模与信息获取方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- LI Z J. Theoretical modeling and information acquisition method of high-flux photon-counting LiDAR [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2022. (in Chinese)
- [20] 李杰楷. 光子计数激光雷达的波形畸变及恢复方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- LI J K. Research on waveform distortion and recovery-methods of photon-counting LiDAR [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2023. (in Chinese)
- [21] BORETTI A. A perspective on single-photon LiDAR systems [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2023, 66(1). DOI: 10.1002/mop.33918.
- [22] KITICHOTKUL R, RAPP J, GOYAL V K. The role of detection times in reflectivity estimation with single-photon lidar [J]. *IEEE Quantum Electronics*, 2024, 30(1): 1–14.

(本文编辑: 李成成)



第一作者: 吕林杰(1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为单光子激光雷达系统设计及其信号处理。



通信作者: 李端(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为新体制激光雷达系统设计与回波处理。