

基于单光子阵列相机的激光测速

付爽, 田小芮, 杨杰, 唐勳, 张思琦, 靳辰飞*

哈尔滨工业大学物理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 提出一种基于单光子阵列相机的激光测速方法,该方法可以在单光子量级的回波强度下,同时实现对目标横向速度和径向速度的测量。搭建了一套室内阵列测速激光雷达系统,验证了阵列时间相关单光子计数技术对运动目标进行横向和径向测速的可行性。通过信号预处理方法从空间和时间两个维度滤除背景噪声,利用质心检测和峰值检测确定目标的时变三维空间坐标,利用最小二乘法进行数据的线性拟合获得目标的横向和径向速度值。结果表明,帧积累数与最佳的测速性能有关。该方法可以在微弱的光照环境下实现对远距离运动目标的速度测量,未来还有望实现目标速度图像的获取,为远距离复杂运动目标的识别提供技术支撑。

关键词 成像系统; 激光测速; 时间相关单光子计数技术; 单光子阵列相机; 帧积累

中图分类号 0436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230430

Laser Velocimetry Based on Single-Photon Array Camera

Fu Shuang, Tian XiaoRui, Yang Jie, Tang Meng, Zhang Siqi, Jin Chenfei*

School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China

Abstract A laser velocimetry method based on a single-photon array camera is proposed here. This approach can measure the lateral and radial velocity of a target simultaneously under the single-photon echo intensity. A set of indoor array velocimetry lidar system is built to confirm the feasibility of array time-correlated single-photon counting technology for lateral and radial velocity measurement of moving targets. Background noise from the space and time dimensions is removed using signal preprocessing. The target's time-varying three-dimensional spatial coordinate is identified through centroid and peak detection and the target's lateral and radial velocity values are estimated using the least square method's linear fitting of the data. The result demonstrates that the frame accumulation number is associated with the best speed measurement performance. This method can measure the velocity of long-distance moving targets in poor light condition, and it is also expected to obtain a target velocity image in the future, giving technical support for the identification of long-distance complex moving targets.

Key words imaging systems; laser velocity measurement; time-correlated single-photon counting technology; single-photon array camera; frame accumulation

1 引言

激光雷达是一种可以远距离、无接触对目标实施探测的光学传感器。在一定的视场范围内,其能够逐点测量目标物体表面的三维坐标,从而获取到物体的位置和表面轮廓信息,为目标的精确定位和识别提供数据基础,在精密部件检查、自动化装配、无人驾驶、机器人导航和卫星遥感等领域都有广泛的应用^[1]。

传统的激光雷达通过飞行时间法测距。利用激光器发射的光脉冲对目标进行照明,被目标散射的部分

光信号沿着原来的光路返回并被接收,通过测量发射脉冲和接收信号的时间间隔可以直接计算出到目标的距离。接收信号的能量取决于发射功率、接收口径、路径衰减、作用距离等因素。在系统体积、质量、功耗受限的情况下,作用距离越远意味着回波能量越低。近年来,为了实现更远的作用距离和更高的测距精度,研究者们逐渐尝试使用皮秒激光器或飞秒激光器照明、采用单光子雪崩二极管(SPAD)^[2-4]接收目标回波,再利用时间相关单光子计数技术(TCSPC)对信号进行统计处理,提取光脉冲的飞行时间。这种新技术能够

收稿日期: 2023-01-01; 修回日期: 2023-02-20; 录用日期: 2023-03-06; 网络首发日期: 2023-03-16

通信作者: *jinchefei@hit.edu.cn

以较低的激光脉冲能量获得远距离目标的精确轮廓信息,同时也使 TCSPC 激光雷达具有更高的探测灵敏度和探测效率^[5-6],因而也成为当前的研究热点。

对于传统的激光雷达,除了获取距离信息以外,速度也是目标探测的重要信息源。一般利用多普勒效应来获取目标的速度值,而探测过程需要本振光和回波在探测器表面进行外差检测,这种功能难以在灵敏度极高的 SPAD 上实现。如何使 TCSPC 激光雷达同时具备测距和测速功能,也是该种体制雷达未来走向应用的关键之一^[7]。在这方面科研人员也进行了相关的探索工作,在一套单像素 TCSPC 激光测距系统上的实验结果表明,对于运动的目标,该系统可以通过连续测量运动目标的距离值从而获得目标的径向速度。但是当目标的运动轨迹比较复杂,同时存在横向移动和径向移动时,利用该系统就无法对目标的速度进行精确测量和描述。近年来,随着器件工艺水平的不断提高,SPAD 从早期的 4×4 小阵列^[8]发展到 32×32 的中等阵列^[9]甚至更大规模的阵列^[10],从可响应可见光的 Si 材料到可响应短波红外的 InGaAs 材料^[11],从近距离的室内实验到远距离的外场测试^[12-13],无论是器件规模、材料体系、还是工程应用都取得了飞速的发展。本文提出一种基于单光子阵列相机的激光测速方法,该方法可以在单光子量级的回波强度下,同时实现对目标横向速度和径向速度的测量。在室内搭建的 TCSPC 阵列测速激光雷达系统上的实验结果验证了该方法的可行性。

2 测速原理

2.1 SPAD 原理

SPAD 阵列相机由排列成阵列的多个 SPAD 组成,每个像素都有自己的光子计数和定时电子设备,是一个强大而独特的单光子敏感时间分辨成像器。结合 TCSPC 技术,其也可以作为单光子级别的高帧率相机,配合各种光源使用,可以进行时间分辨三维成像。

对于单元 SPAD 像素而言,单光子的检测由 SPAD 中的光敏区域-硅基 PN 结来执行。每个光敏区四周包含着复杂的电子元器件,用于偏置和抑制 SPAD 以及对探测到的光子进行计时和计数。在“盖革模式”下,单光子进入光敏区域后,初始的光生载流子在强电场中被加速而在半导体晶格内发生碰撞电离,引发雪崩而产生可检测的电流脉冲。雪崩开始后,通过将偏置电压降低到击穿电压以下来抑制 SPAD。然后经过一段“停滞时间”之后,SPAD 再次处于待命状态,这段时间称为死时间(也称“截止”时间),其主要作用是确保雪崩事件之后半导体晶格内的载流子均被复合。死时间太短会导致任何剩余的载流子均有可能触发另一次雪崩,称为后脉冲。后脉冲会增加 SPAD 的暗计数率,从而降低信噪比。由于这个原因,死时间一般设置为足够长的时间,以消除后脉冲

的有害影响。每一个 SPAD 像素也包含 TCSPC 电路,该电路相当于一个快速秒表:脉冲光发射,计时开始;检测到光子,计时结束。然而许多 TCSPC 电路执行反向启动-停止测量:检测到光子,时间-数字转换器(TDC)启动计时;下一个同步脉冲到来,停止计时。图 1 的时序图可以解释正向与反向启动-停止测量的原理。脉冲激光周期是 t_1 ,激光脉冲发出后,正向检测开始计时,在一段时间后,光子被检测到,正向停止,光子飞行时间为 t_f 。在反向启动-停止中,光子被检测到时,开始计时,等待下一个激光脉冲发出,计时结束,光子飞行时间为 $t_1 - t_r$ 。

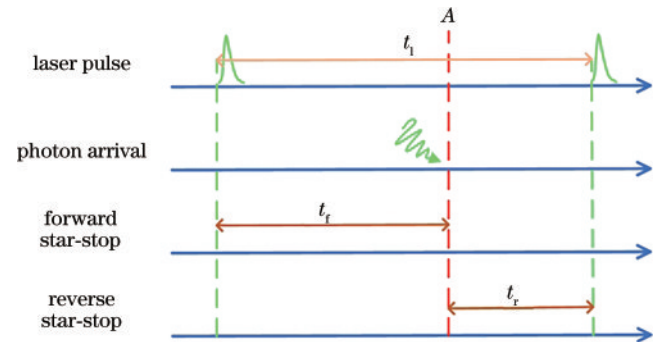


图 1 正向与反向启动-停止测量原理时序图

Fig. 1 Forward and reverse start-stop measurement principle timing diagram

在正向启动-停止中,同步信号启动时开始计时,检测到光子后停止计时。这意味着定时电子器件处于持续使用状态,每个同步周期都需要复位,可能增加读出死区时间、功耗和器件散热。反向起止测量是有利的,可确保计数电子器件仅在光子被检测到时才激活。

阵列 SPAD 相比于单点 SPAD,可以快速进行二维的时间测量,有助于对目标快速成像。在一些场景下,阵列相机可以利用各像素间的相关性等某些先验信息增强信噪比,这是单点 SPAD 相机所不能比拟的。

2.2 测速原理

基于阵列式 SPAD 相机测速的实验场景示意图如图 2 所示。其中,左侧为实验数据采集系统(C 为阵列式 SPAD 相机所处位置),右侧为速度发生器,A、B 两点分别表示速度发生器的目标处在最近点与最远点时的位置。根据实验场景设定坐标系,顺着相机视场光轴的方向为 z 轴正方向,平行于地面水平向右为 x 轴正方向,垂直于地面竖直向下为 y 轴正方向。其中,相机视场所在平面为垂直于 z 轴的 x - y 平面。运动物体在相机视场内移动时的速度称为横向速度,在 z 轴方向运动的速度称为径向速度。为了方便得到运动目标的速度,做了如下两个近似处理:1)认为运动目标从 A 点运动到 B 点过程中相机视场不变;2)通过 TCSPC 数据计算运动物体与相机的距离时,认为 $CA = CA'$ 、 $CB = CB'$ (A' 、 B' 为运动目标在 z 轴上的等效位置)。

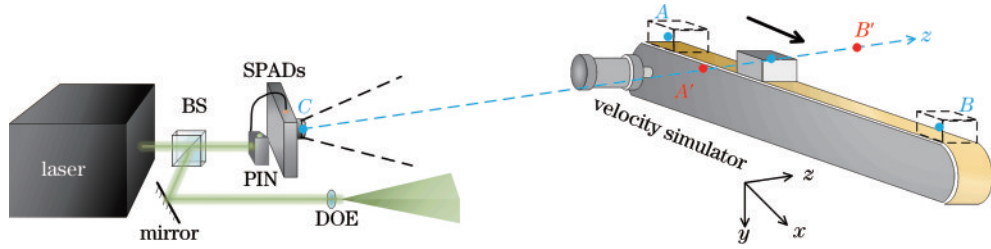


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

基于上述两个近似条件,给出所提方法的测速原理。根据运动目标所在的位置与对应的时刻,采用最小二乘法拟合位移-时间图像,得到的拟合直线为

$$x = vt + b, \quad (1)$$

式中:拟合直线的斜率 v 即为运动物体的速度;截距 b 为运动目标的初始位置。所提方法可分别测得运动物体的径向速度和横向速度,但确定的方法不同。

由阵列式 SPAD 相机采集的数据可分别得到运动物体在相机视场内的强度信息以及 TCSPC 信息。其中,横向速度的测量需要用到强度信息,不同时刻在强度信息上能看见物体在相机视场内的横向移动,根据质心法能够确定该时刻 t_i 下的位置 x_i (i 与物体运动过程的不同时刻对应),用最小二乘法拟合 $x_i - t_i$ 曲线,其斜率即为运动物体的横向速度。

物体的径向速度则通过 TCSPC 数据得到,基于 TCSPC 直方图的峰值能确定不同时刻下物体与相机的距离 $z_i = ct_{i, \text{bin}}/2$, c 为光速, $t_{i, \text{bin}}$ 为直方图峰值对应的光子飞行时间。用最小二乘法拟合 $z_i - t_{i, \text{bin}}$ 曲线,即可通过拟合直线的斜率确定运动物体的径向速度。

3 实验研究

3.1 实验系统搭建

基于以上分析可知,SPAD 相机的阵列像元数、系统的时间分辨率等因素会影响运动目标的测速准确性。SPAD 相机的阵列像元数会影响实验中运动目标横向速度的测量。目标距离一定时,像元数越大,单个像素所占的视场角越小,测出目标横向运动的距离信

息越精确。相同测速时间下,横向速度越接近真实速度。系统的时间分辨率由 SPAD 相机的时间抖动、激光脉冲的宽度、线路抖动等因素决定。时间分辨率会影响运动目标径向距离的判定,时间分辨率越高径向测距越精确,径向速度越精准。死时间的存在主要影响一帧时间内积累的光子数,如果死时间过长,单帧内积累的光子数会下降,信噪比也会下降,从而影响测距精度,进而影响测速精度。实验系统确定后,上述与实验装置相关的影响因素就确定了,本实验系统测速精度也随之确定。

基于实验室现有设备条件,搭建了基于单光子阵列相机的激光测速实验系统。实验测速系统如图 3(a) 所示。采用中心波长为 532 nm、重复频率为 12.5 MHz、脉冲宽度为 5 ps、平均光功率为 100 mW 的脉冲激光器作为发射照明光源。采用盖革型阵列 SPAD 作为接收探测器,该探测器的光子探测效率为 49%。时间分辨率为 200 ps、死时间为 50 ns、阵列数为 32×32 、暗计数率为 50 Hz。

激光器发射的激光经过光路的调制形成阵列光场向目标传播,一部分光沿原光路散射由 SPAD 相机接收,然后把接收到的光信号耦合至单元盖革雪崩光电二极管 (APD) 上。激光雷达的主波和回波信号输出至测时模块,将激光光子的飞行时间记录下来。控制和数据传输模块负责控制整个激光雷达实验系统的工作状态,并将采集到的数据传输至计算机。

图 3(b) 为模拟运动目标的速度模拟器。该速度模拟器使用交流伺服电机,通过同步齿形带带动大小

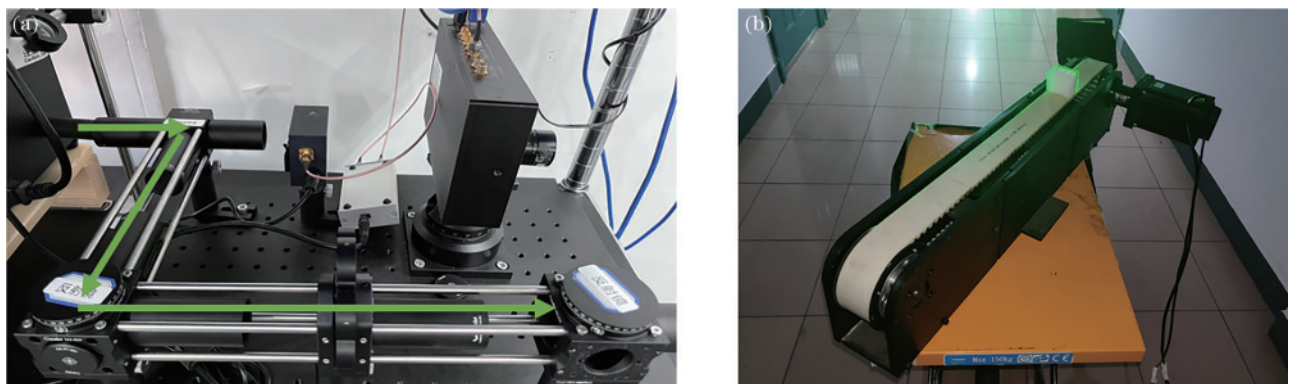


图 3 测速系统及速度模拟器。(a)测速系统;(b)速度模拟器

Fig. 3 Speed measurement system and speed simulator. (a) Speed measuring system; (b) speed simulator

为 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 的小白板平移,位移速度范围为 $0.5\sim 5\text{ m/s}$ 。实验过程中,速度模拟器距 TCSPC 测速系统 25 m 左右,在测速系统视场中的 40° 方向倾斜摆放。

3.2 实验数据获取

搭建好实验场景后,打开激光器对运动物体进行均匀光照明,设定相机的采集时间为 5 s ,采集不同速度下的运动物体数据。图 4 给出的是相机采集的原始强度图和 TCSPC 信号图。该数据中运动物体速度为 0.65 m/s ,3 个切片分别表示运动目标在相机视场左

侧(较远处)、中间、右侧(较远处)时强度图及 TCSPC 信号图的变化。从图 4(a)可明显看出运动目标在相机视场中的横向移动,从图 4(b)可看出运动目标在径向的距离变化。强度图中除了能看见的运动目标,也包含了一些背景信息,用质心法计算的目标横向位置不准确。TCSPC 信号图中目标信号峰展宽较严重,根据峰值确定目标径向位置的方法误差较大。因此,后续为获得更精确的横向速度与径向速度,需要对原始数据进行预处理。

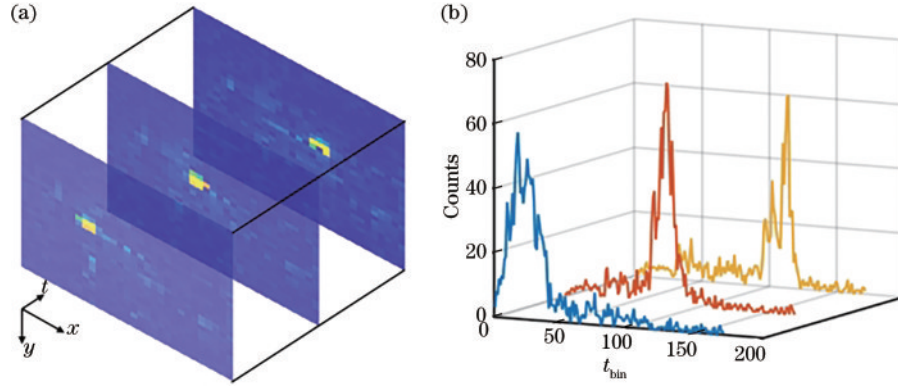


图 4 低速运动物体从近处向远处运动过程中强度图与 TCSPC 图。(a)强度图;(b)TCSPC 图

Fig. 4 Intensity diagram and TCSPC diagram of low-speed moving objects moving from near to far. (a) Intensity diagram; (b) TCSPC diagram

4 数据处理

4.1 目标提取

阵列式 SPAD 相机采集到运动目标原始强度图与 TCSPC 信号图后,为更精准地得到运动目标的横向速度与径向速度,应对原始数据进行预处理,即从背景噪声与信号的混叠信号中将目标提取出来。

首先,所用的阵列 32×32 相机最短的脉冲积累数为 1000,把这样的一组数据称为帧,假定一次采集信号中有 N 帧。在每一帧中,每个像元至多只会记录一个光子飞行的时间 t_{bin} ,无法确定该处时间所记录返回的光子携带的信息是目标信息还是背景噪声信息。因此,需要将每 n 帧积累数据进行统计得到强度图以及 TCSPC 信号图,则该采集信号中共有 M 组统计得到的 TCSPC 数据, $m = \lfloor N/n \rfloor$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。对每 n 帧积累数据进行合成统计,能很大程度上提高判定该信号是否为目标的概率。不同的 n 对目标的选取以及最终的测速结果也有一定的影响。

其次,根据目标距离实验系统的实际距离,推算出目标从 A 点运动到 B 点时,反映在 TCSPC 信号图中目标信号峰值所在时间(SPAD 存储时间的最小单位)的变化范围。根据该范围设定,对 M 组 TCSPC 统计数据进行处理,将一些光子飞行时间不在该时间范围

的背景噪声滤除。同时,考虑到有目标的地方统计的光子数相对较高,为避免在上述划定的时间内存在噪声干扰,还应对 M 组强度图通过设定光子数阈值的方法将噪声滤除。至此,能得到 M 组只包含目标信息的数据。

图 5 给出了预处理后只包含目标信息的强度图与 TCSPC 信号图。与图 4 相比:强度图只包含目标信息,背景非常干净,这样采用质心法算出的目标横向位置更精确;TCSPC 信号图噪声峰变少,通过峰值确定的光子飞行时间更具真实性。

4.2 数据分析

在实际数据处理中,只选取连续的 m ($m \leq M$) 组表征运动目标运动过程的数据计算运动目标的横向速度与径向速度。与以往单点探测器测径向速度不同,本实验采用 32×32 阵列探测器接收目标的回波,能够接收到回波信息的像素不只有一个,无法确定目标横向位置。采用质心法确定第 i ($i \leq m$) 组数据中目标的横向位置 \tilde{x}_i 。假定第 i 组数据的强度图中,目标所占的像素个数为 Q ,那么该组数据目标的质心坐标可表示为

$$\tilde{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^Q x_j P_j}{\sum_{j=1}^Q P_j}, \quad (2)$$

式中: x_j 为第 i 组数据中目标所占的第 j 个像素在相机

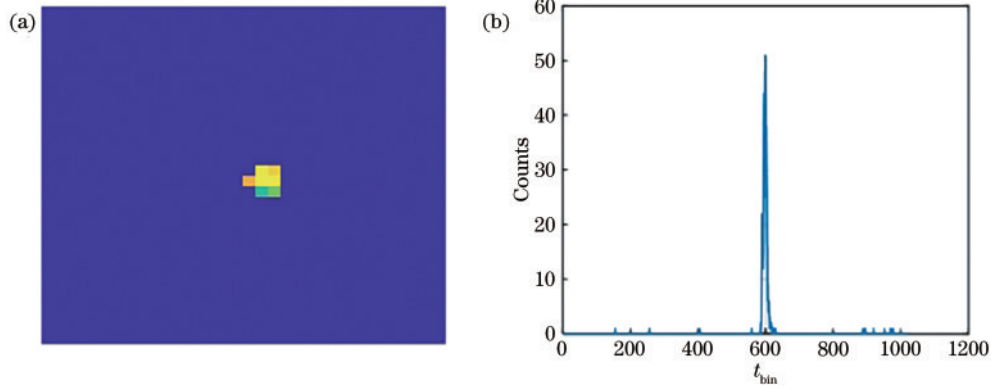


图 5 预处理后的强度图与 TCSPC 信号图。(a)强度图;(b)信号图

Fig. 5 Preprocessed intensity diagram and TCSPC signal diagram. (a) Intensity diagram; (b) signal diagram

视场中的实际横坐标; P_j 为第*i*组数据第*j*个目标像素采集到光子数; $\sum_{j=1}^Q P_j$ 为该组数据所有目标像素采集到的总光子数。用最小二乘法拟合目标的质心坐标 \tilde{x}_i (\tilde{y}_i)和对应采集时间 t_i 曲线,其斜率即为运动目标的横向(纵向)速度。

以一组运动目标的测速过程为例,依据前述测速

原理进行连续测距,再根据多个单次测距的结果进行数据拟合。根据数据的特征,采用最小二乘法进行相关数据处理。利用累计光子数得到目标径向距离,并利用不同像素累计的光子数作为权重计算质心坐标获得目标的横向位置,通过最小二乘法拟合出横向*x-t*图和径向*z-t*图,如图 6 所示,其斜率即为运动目标的横向(纵向)速度。

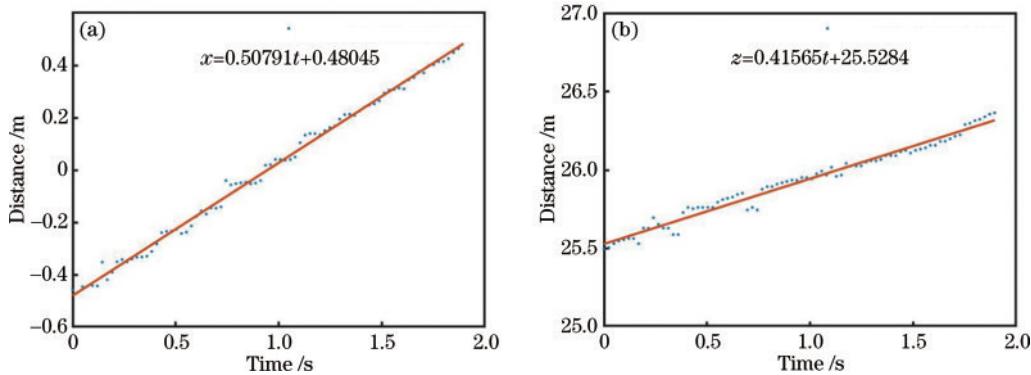


图 6 最小二乘拟合图。(a)横向距离与时间关系;(b)径向距离与时间关系

Fig. 6 Least-square fitting diagrams. (a) The relationship between lateral distance and time; (b) relationship between radial distance and time

当单次测量统计的帧积累数比较少时,会出现一段脉冲积累时间内相机检测到目标的横向位置不发生

变化的情况,目标的点就会呈现阶梯状分布,如图 7 所示。图 7(a)中,统计的帧积累数较小,目标横向位置

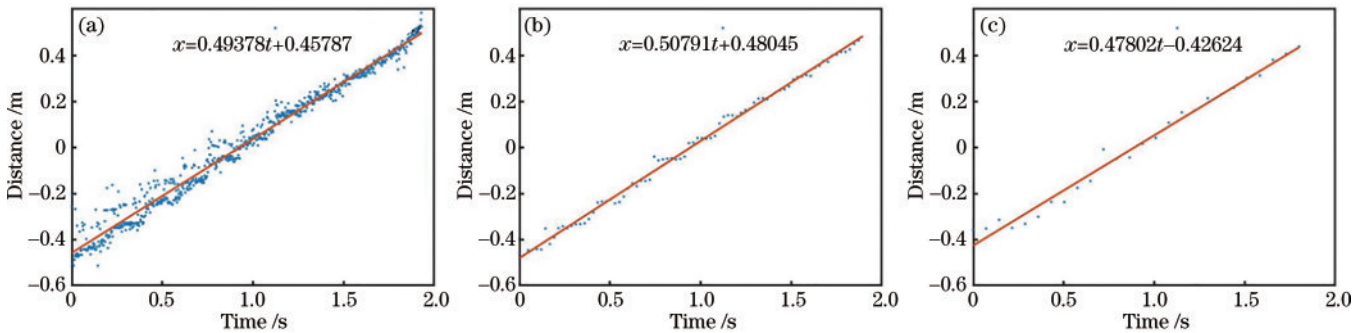


图 7 不同帧积累数下的*x-t*图。(a)~(c)30、300、1500 帧

Fig. 7 *x-t* diagrams under different frame accumulations. (a)~(c) 30, 300, 1500 frames

发生停滞,导致在拟合直线两侧形成的阶梯较宽,这会对直线拟合精度产生一定影响。图 7(b)中,由于统计的帧积累数减小,目标横向位置停滞时间变短,测距点也在拟合直线两侧形成比较小的起伏,直线的拟合精度变高。相较于图 7(b)拟合直线两侧宽度基本一致的情况,图 7(c)中拟合点的数量明显减少,这样也同样会降低拟合精度。

随着统计的帧积累数变大,拟合直线两侧形成的起伏变小、精度变高,但当统计的帧积累数数值增大到一定

值后,拟合直线两侧的点数量过少,拟合精度也会降低。

不同帧积累数下的 $z-t$ 图如图 8 所示。图 8(a)中,统计的帧积累数数值较大,因而单次测距误差较大,测距点在拟合直线两侧形成比较大的起伏,这对直线拟合的精度将产生明显的影响。统计的帧积累数减少时,单次测距误差变小,如图 8(b)所示,测距点在拟合直线两侧形成比较小的起伏,直线的拟合精度较高。图 8(c)中,测距点在拟合直线两侧明显减少,这样也会降低拟合精度。

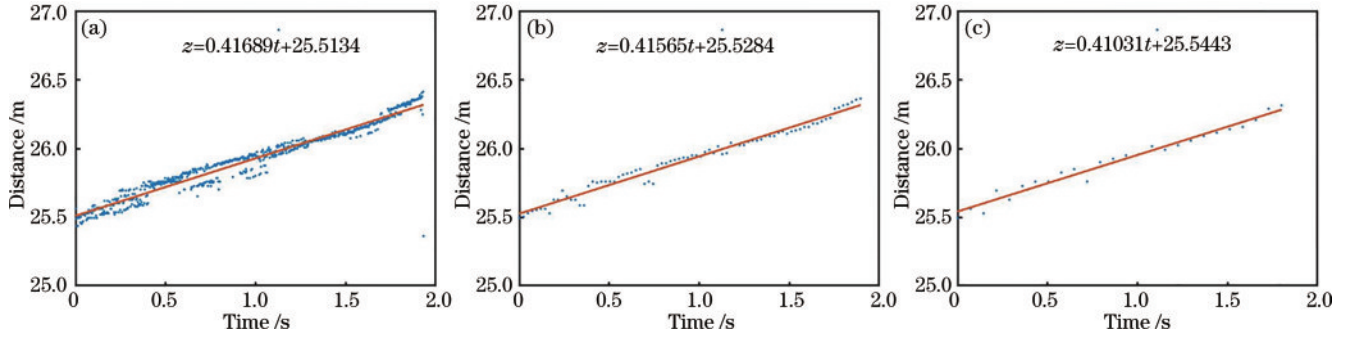


图 8 不同帧积累数下的 $z-t$ 图。(a)~(c) 30、300、1500 帧

Fig. 8 $z-t$ diagrams under different frame accumulations. (a)~(c) 30, 300, 1500 frames

测速准确度与统计的帧积累数直接相关,如表 1 所示。从表中可以看出,统计的帧积累数太小或太大均会对横向速度和径向速度的测量误差产生影响,统计的帧积累数较小时,相机检测到的目标回波信号在同一横向位置停滞时间过长、单次测量径向距离时信号的信噪比

太小、测得的径向距离误差太大,这种情况下的横向和径向速度的测量误差都比较大。当统计的帧积累数过大时,单次测得的两方向距离受目标运动影响较大,同时测量次数大幅降低,最终的测速误差也会增大,因而适当地选取帧积累数才能达到最佳的测速效果。

表 1 不同帧积累数下横向和径向速度以及绝对误差和相对误差

Table 1 Lateral and radial velocity, absolute error and relative error under different frame accumulations

Number of accumulated frames	$v_t / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Absolute error / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})(v_t)$	Relative error (v_t)	$v_r / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Absolute error / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})(v_r)$	Relative error (v_r)
1	0.393	0.107	0.214	0.336	0.084	0.200
3	0.494	0.006	0.012	0.417	0.003	0.007
5	0.502	0.002	0.004	0.422	0.002	0.005
8	0.504	0.004	0.008	0.421	0.001	0.002
10	0.504	0.004	0.008	0.425	0.005	0.012
300	0.508	0.008	0.016	0.416	0.004	0.010
500	0.511	0.011	0.022	0.408	0.012	0.029
700	0.497	0.003	0.006	0.406	0.001	0.002
1000	0.489	0.011	0.022	0.405	0.005	0.012

为了避免测量同一组速度下运动目标实验出现偶然性,在同一种实验系统条件下测量 3 组不同速度下的目标,3 组真实速度分别为: $v_1 = 0.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $v_2 = 1.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $v_3 = 3.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从图 9(a)、(b)可以看出,

3 个不同速度目标在相同实验条件下测量值与帧积累数的关系趋势大概一致。帧积累数过小及过大时测量出的速度与真实速度值偏差较大,从图 10 也可以观察到在适当范围的帧积累数下测量的速度更加接近真实值。

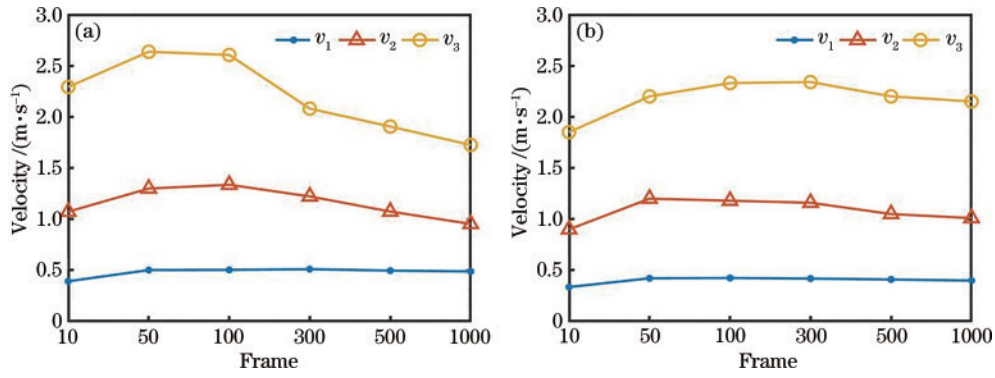


图 9 多组速度下测量速度与帧积累数关系。(a) 横向速度测量值与帧积累数关系图; (b) 径向速度测量值与帧积累数关系图
Fig. 9 Relationship between measured speed and frame accumulation under multiple sets of speeds: (a) Relationship between lateral velocity measurement and frame accumulation, (b) relationship between radial velocity measurement and frame accumulation

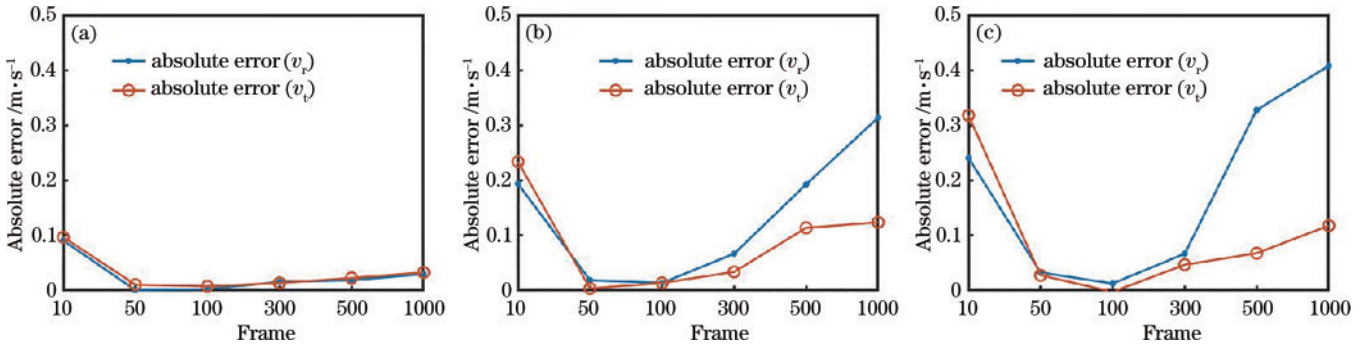


图 10 不同帧数下多组目标横向、径向速度的绝对误差。(a) $v_1 = 0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的速度绝对误差折线图; (b) $v_2 = 1.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的速度绝对误差折线图; (c) $v_3 = 3.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的速度绝对误差折线图
Fig. 10 The absolute error of the lateral and radial velocities of multiple groups of targets under different frame numbers. (a) The velocity absolute error line chart with $v_1 = 0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) the velocity absolute error line chart with $v_2 = 1.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) the velocity absolute error line chart with $v_3 = 3.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

5 结 论

为满足 TCSPC 激光雷达在测速方面的需求, 搭建了一套基于单光子阵列相机的激光测速实验系统, 验证了采用 TCSPC 技术对运动目标进行横向和径向测速的可行性。为了精确提取信号的速度信息: 首先通过信号预处理的方法从空间和时间两个维度滤除背景噪声; 然后利用质心检测和峰值检测方法来确定目标的时变三维位置; 最后通过最小二乘法进行数据的线性拟合, 从而准确获得目标的横向和径向速度值。实验结果表明, 由连续测量的运动目标横向位置和径向位置拟合出的速度值与单次测距误差以及测量次数有关, 而这两个因素均取决于单次测距的光子计数。本实验中光子计数对应帧积累数, 当帧积累数太小或太大时都会产生较大的影响。因而, 适当地选取帧积累数才能达到最佳的测速性能。在本实验条件下, 帧积累数在 50~100 时测速误差稳定并且较小, 对不同的速度均表现出类似的规律。所提方法可以在微弱的光照环境下实现对远距离运动目标的速度测量, 未来还有望实现目标速度图像的获取, 为远距离复杂运动目标的识别提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Massa J S, Buller G S, Walker A C, et al. Time-of-flight optical ranging system based on time-correlated single-photon counting[J]. Applied Optics, 1998, 37(31): 7298-7304.
- [2] Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, et al. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(6): 712.
- [3] Buller G, Wallace A. Ranging and three-dimensional imaging using time-correlated single-photon counting and point-by-point acquisition[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(4): 1006-1015.
- [4] Sjöqvist L, Henriksson M, Jonsson P, et al. Time-of-flight range profiling using time-correlated single-photon counting[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6738: 67380N.
- [5] Degnan J J. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements[J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34(3/4): 503-549.
- [6] Steinvall O, Sjöqvist L, Henriksson M, et al. High resolution lidar using time-correlated single-photon counting [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6950: .

- [7] 杨杰, 王才喜, 乔凯, 等. 基于时间相关单光子计数技术的测速研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 20220565.
Yang J, Wang C X, Qiao K, et al. Research on velocity measurement based on time-correlated single photon counting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 20220565.
- [8] Albota M A, Heinrichs R M, Kocher D G, et al. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. Applied Optics, 2002, 41(36): 7671-7678.
- [9] Marino R M, Stephens T, Hatch R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5086: 1-15.
- [10] Jonsson P, Tulldahl M, Hedborg J, et al. Experimental evaluation of penetration capabilities of a Geiger-mode APD array laser radar system[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10434: 1043405.
- [11] Entwistle M, Itzler M A, Chen J, et al. Geiger-mode APD camera system for single-photon 3D LADAR imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8375: 83750D.
- [12] Henriksson M, Allard L, Axelsson M, et al. Outdoor single-photon counting panoramic 3D imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10978: 1097807.
- [13] Jonsson P, Axelsson M, Allard L, et al. Photon counting 3D imaging from multiple positions[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11540: 115400P.