光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023010301

基于单像素单光子探测的目标识别与跟踪方法

王 玲[1,2,3]，刘 博[1,2,3*]，李志康[1,2,3]，罗 兰[1,2]

（1. 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室，成都 610209；
2. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要： 为了实现弱回波信号下非合作目标识别跟踪，文章基于单像素光子计数激光雷达系统设计了目标识别跟踪策略，并且提出了一种目标识别跟踪方法。该方法首先将单像素光子计数激光雷达系统采集得到的三维点云经过插值处理得到直观的距离像，然后采用最大稳定极值区域算法分割目标和背景，根据目标轮廓特征识别并选择需要跟踪的目标。最后提取识别目标的质心，与激光雷达扫描中心的偏差作为误差信号，控制伺服系统在扫描的基础之上执行目标跟踪。实验结果表明，当激光发射能量为 625 pJ、回波光子数为 25 时，该系统能对距离为 5 m、角速度约为 2 mrad/s 的目标进行稳定的识别跟踪；验证了基于单像素光子计数激光雷达的策略及方法能够稳定的分割目标和背景，以及正确提取需要识别跟踪测距的目标质心，为弱回波信号下目标识别跟踪测距提供一种有效直观的探测方法，同时，弱信号探测作为远距离探测的必要条件，为远距离下的目标探测及识别跟踪提供了一个新的技术方向。

关键词： 单像素光子计数激光雷达；扫描成像；识别跟踪；极大值稳定区域

中图分类号： TN958.98 **文章编号：** 1001－5868(2023)02－0272－05

Target Recognition and Tracking Method Based on Single Pixel Single Photon Detection

WANG Ling[1,2,3], LIU Bo[1,2,3], LI Zhikang[1,2,3], LUO Lan[1,2]

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN; 2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: In order to realize non-cooperative target recognition and tracking under weak echo signal, a target recognition and tracking strategy based on single pixel photon counting lidar system was designed, and a target recognition and tracking method was proposed. In this method, first, the 3D point cloud collected by the single-pixel photon counting lidar system was interpolated to obtain the intuitive range image. Then the maximum stable extreme value region algorithm was used to segment the target and background, and the target to be tracked was identified and selected according to the target contour features. Finally, the centroid of the identified target was extracted, and the deviation between the centroid and the scanning center of lidar was used as the error signal, and the servo system was controlled to perform target tracking on the basis of scanning. The experimental results show that when the laser emission energy is 625 pJ and the number of echo photons is 25, the system can stably recognize and track the target with a distance of 5 m and an angular velocity of about 2 mrad/s. It is verified that the strategy and method based on single-pixel photon counting lidar can stably segment the target and background, and correctly extract the target centroid that needs to be recognized, tracked and

收稿日期：2023－01－03.

* 通信作者：刘 博 **E-mail：** boliu@ioe.ac.cn

ranged. It provides an effective and visual detection method for target recognition, tracking and ranging under weak echo signal. Meanwhile, weak signal detection is a necessary condition for long-distance detection. It provides a new technology direction for target detection and recognition tracking at long distance.

Key words: single pixel photon counting lidar; scanning imaging; detect and tracking; MSER

0　引言

利用激光主动照明的成像激光雷达，具有抗干扰性强、功耗低、可靠性高等优势，能够快速准确地获取目标表面等三维坐标信息[1-3]，并通过目标检测和目标识别，实现对目标高精度的识别跟踪，被广泛地应用于成像制导系统[4]、智能交通系统[5]、机器人视觉导航系统[6]等方面。然而，受到激光发射功率等影响，远距离、弱信号下的激光成像技术难以用传统基于线性探测器（如线性雪崩光电二极管 APD 或者光电二极管 PIN）的激光雷达来实现。近年来，为了提高弱信号条件下对自由空间目标的探测能力[7-8]，提出了单光子探测（SPD）技术，并结合时间相关单光子计数技术（TCSPC），相比于传统线性探测器件，它具有单光子级别的探测灵敏度和皮秒量级的时间分辨率，且所需的光子通量也更低，大大提升了弱光探测能力。采用单光子探测器的激光雷达，又被称为光子计数激光雷达，在无需提高激光发射功率的前提下，能实现弱信号下对目标的快速扫描成像和检测[9-10]。

然而，基于单光子探测的目标识别跟踪方面的研究及应用较少。张弛等[11-12]设计了包含 64×64 阵列盖格模式单光子探测器（Gm-APD）的成像激光雷达，在天气条件良好的情况下，在激光雷达动态扫描过程中实现了对无人机的识别与跟踪。但是，使用阵列探测器，需要将系统接收的回波功率平均分配到每个探测单元上，从而每个探测单元上的回波功率较低。而在回波功率相同的条件下，使用单像素探测器的回波功率更高，探测距离就更远。文献[13-14]提出了一种基于单光子探测的实时采集、指向、跟踪和测距的单光子激光雷达系统，具有较强的远距离目标跟踪检测能力，使用单像素单光子探测器就能实现弱信号下非合作目标跟踪探测，但是并未涉及到关于目标识别跟踪等技术的研究。为了研究单光子探测在目标识别跟踪等技术的应用，本文提出了基于单像素光子计数激光雷达的目标识别跟踪测距策略，并且提出了一种目标识别跟踪方法。该方法采取了由螺旋扫描采集得到的三维点云，经过插值处理得到直观的距离像，并采用最大稳定极值区域算法（Maximally Stable Extremal Regions，MSER）分割目标和背景。在复杂空域中（其他小目标的干扰下），根据目标轮廓等特征识别并选择需要跟踪的目标，最后提取识别目标的质心，与激光扫描中心的角度差作为误差信号，控制伺服系统在扫描的基础上执行目标跟踪。

实验结果表明，该策略方法能对距离激光雷达平台约 5 m 处，速度约为 2 mrad/s 的目标进行稳定的识别跟踪。该系统在只使用单像素单光子探测器的基础上，激光发射能量为 625 pJ，回波光子数为 25 时，实现了对目标的识别跟踪，这对研究弱信号下目标的识别跟踪具有重要的意义。同时，弱信号作为远距离探测的必要条件，实验结果为远距离下对目标的探测和识别跟踪垫下了重要基础。

1　系统结构

本系统主要采用扫描模块、发射/接收模块、信号处理模块等构成。

基于单像素单光子探测器的目标探测及识别跟踪激光雷达系统图如图 1 所示，波长为 1 064 nm 的脉冲激光器发出激光，经过分光器 BS(99∶1)之后，一部分光进入 PIN 探测器，作为 TCSPC 模块的同步信号，另一部分光经过光学发射系统 PL1，通过快反镜 FSM 螺旋扫描目标，被目标散射后的回波信号通过快反镜，并由窄带滤波片 NBF 进行简单滤波之后，经过光学接收系统 PL2，进入 SPD 探测器，作为 TCSPC 模块的回波信号；信号处理模块将通过 TCPSC 模块得到的目标飞行时间信息和控制 FSM 扫描得到的目标角度信息进行匹配，得到目标三维坐标信息。当完成一次扫描后，通过对得到的三维点云进行 MSER 算法处理，分割目标，并且依据目标大小特征提取要识别跟踪目标，最终将提取要跟踪目标的质心坐标作为 FSM 的扫描中心，进行下

一次扫描。

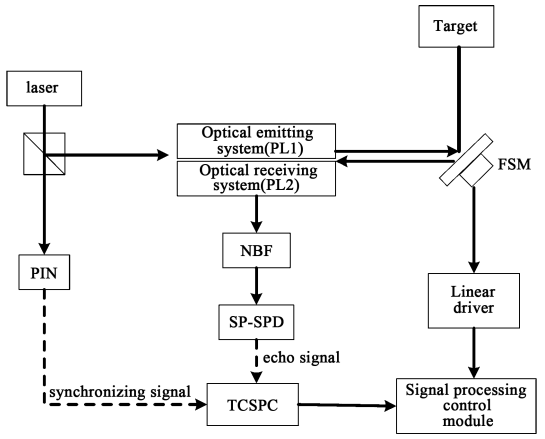


图 1 系统构成框图

2 跟踪策略

根据单光子检测和扫描模块的理论分析，对系统参数进行设置。信号处理模块同时控制 TCSPC 和扫描驱动单元。TCSPC 模块获取采用脉冲累计法和单滑动窗口峰值法提取的 TOF 和峰值，并收集从 DSP 反馈的 FSM 的角度信息。信号处理模块处理 TOF、峰值、角度数据，得到三维点云。将三维点云网格化得到的距离像采用极大值稳定区域算法进行目标与背景的分割，获取要识别跟踪目标的质心，并反演得到跟踪识别目标的角度、深度信息，将其与视场中心的角度差作为误差信号，并驱动伺服机构使目标质心处于扫描视场中心，从而可以实现对目标的追踪。

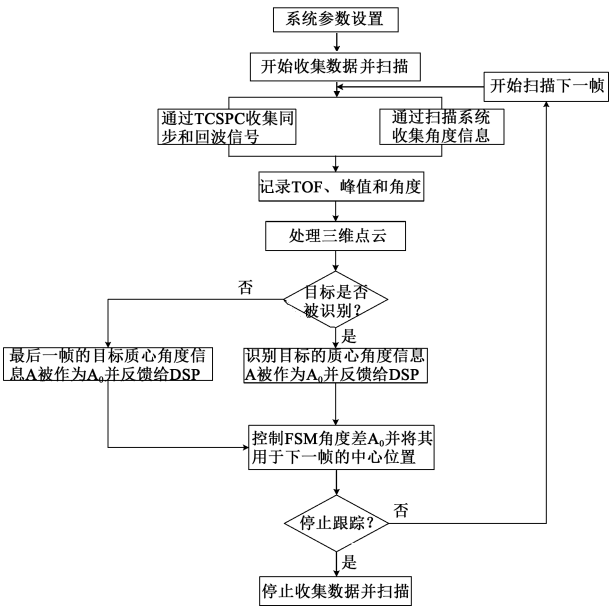


图 2 系统跟踪策略图

3 三维点云处理

本系统采用了螺旋扫描模式，能从目标高概率出现的中心区域向目标低概率出现的四周区域扩展扫描，具有中心目标捕获概率高，捕获时间短的优点，适用于捕获跟踪系统[15]。利用螺旋扫描获得目标相对激光雷达的角度信息，并结合 TCSPC 技术得到目标的深度信息，通过坐标变换得到激光雷达三维点云数据。

为了后续的识别处理，以及避免三维网格顶点之间的计算，降低计算复杂度，对三维点云数据网格处理得到直观的二维距离像，从而可以将成熟的二维图像相关处理的算法应用在单像素光子计数激光雷达系统中。

激光雷达跟踪的运动目标经常发生旋转、尺度缩放、光照变化和仿射变化，为了准确识别目标，希望提取出的特征区域对于变换的目标具有不变性。许多学者对仿射不变区域提取方法进行了研究，其中 Matas[16] 在分水岭算法的基础上提出了最大稳定极值区域算法，比其他算法对同质均匀区域有更好的检测性能。对于激光主动成像中的目标一般是同质均匀的，并且与背景具有较好的对比度。因此，本文首次提出将 MSER 算法应用在单像素光子计数激光雷达的目标识别中。

MSER 的原理如下：

定义 1：对灰度处理后的图像：$I: D \in Z^2 \rightarrow S$，$A \subset D \times D$ 表示像素间的领域关系（可能为四领域或者八领域连接关系）。假设 Q 是 D 的一块子区域，若对于 $\forall p, q \in D$ 若存在序列 $p, a_1, a_2, \cdots a_n, q$，满足 $pAa_1, a_1Aa_2, \cdots a_nAq$，则 Q 是 D 的一个连通子集；

定义 2：区域 Q 的外部边界定义为 $\partial Q = \{q \mid q \in D - Q, \exists p \in Q, qAp\}$。边界 ∂Q 中的像素不属于 Q，但是与 Q 中至少一个像素满足邻接关系。

定义 3：极值区域是指对于所有的任意 $p \in Q$，$q \in \partial Q$，如果 $I(p) > I(q)$，则称 Q 为极大值区域，如果 $I(p) < I(q)$，则称 Q 为极小值区域。

定义 4：最大稳定极值区域（MSER）的定义为：对使用不同阈值得到的嵌套极值区域 $\{Q_1, Q_2, \cdots, Q_i, \cdots\}$，当且仅当 $q_1 = |Q_{i+h} - Q_{i-h}|/Q_i$ 在 i^* 存在局部最小值时，则 Q_{i^*} 为最大稳定极值区域 MSER。式中 $|\cdot|$ 表示取区域的像素个数，h 表示阈值步长。

MSER 的提取方法为：对灰度后的图像，通过

阈值进行二值化运算，并逐渐增加阈值，最后形成一个二值化图像。在二值化图像中，可能有的区域变化较小或者没有变化，我们将这样的区域称为最大极值稳定区域。

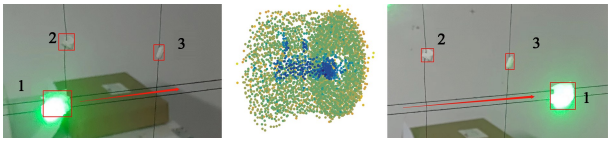
假设扫描目标具有区别性、不变性和稳定性等特征，利用 MSER 算法可以得到距离像中感兴趣的区域，然后根据目标大小等特征选择识别目标，并输出所选目标的质心。根据激光易获取目标轮廓等特征信息，在复杂空域条件下（有其他目标的干扰），选择扫描视场内大目标进行跟踪。

最后在识别目标的基础之上，提取跟踪目标质心，并且将其与视场中心的角度差作为误差信号，提供给驱动伺服机构，使目标质心一直处于扫描视场中心，从而实现对目标的识别追踪。

4　实验结果及分析

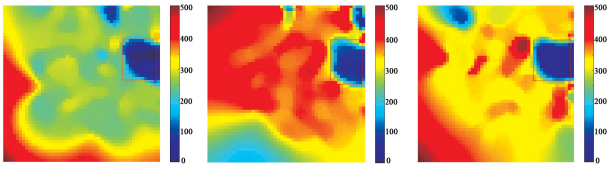
为了验证该策略及方法在本系统上的可行性，我们对距离光子计数激光雷达平台约 5 m 的目标进行了识别跟踪实验。在这里，系统发射的激光脉冲能量为 625 pJ，激光重频为 8 kHz，在目标没有激光照射的情况下，统计的噪声计数率约为 700 cps。同时统计分析了由 8 000 个发射脉冲产生的直方图，发现单次探测概率约为 50%，另外在系统的单光子探测器的量子效率为 2.8% 的情况下，根据文献[13]的公式计算得到回波光子数为 25。

在距离激光雷达平台约 5 m 处放置了三个目标，在目标 1 的上方放置两个目标 2 和 3，其中目标 1 的面积大约为目标 2 的 1.5 倍，目标 3 的 2 倍。目标 1 从左开始以 2 mrad/s 的速度向右运动。



（a）扫描开始　（b）目标运动轨迹　（c）扫描结束

图 3　扫描开始至结束位置



（a）第三帧　（b）第五帧　（c）第七帧

图 4　实时二维跟踪图

在有目标 2 和 3 的干扰下，激光扫描中心始终指着目标 1，如图 3 所示。从图 4 可以看出，在有其他目标的干扰下，系统扫描中心始终跟着目标 1 偏转。可以说明，该策略及方法应用在单像素光子计数激光雷达在目标识别跟踪上的可行性。

5　结论

为了实现弱信号下对目标的识别跟踪，本文提出了基于单像素光子计数激光雷达的目标识别跟踪策略及方法，并利用 MSER 算法分割目标与背景。实验结果表明，当激光发射能量为 625 pJ，回波光子数为 25 时，基于单像素探测器的光子计数激光雷达的目标识别跟踪的策略及方法在接收弱回波信号上的可行性，这为远距离目标识别跟踪提供了一个新的技术方向。

参考文献：

[1]　王盛杰，刘　博，李和平，等. 基于面阵三维成像激光雷达的目标点云分割技术[J]. 半导体光电，2020，41(5)：749-756.
Wang Shengjie，Liu Bo，Liu Heping，et al. Target point cloud segmentation technology based on surface array 3D imaging lidar[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(5)：749-756.

[2]　郭静菁，费晓燕，葛　鹏，等. 基于全光纤光子计数激光雷达的高分辨率三维成像[J]. 红外与激光工程，2021，50(7)：20210162.
Guo Jingjing，Fei Xiaoyan，Ge Peng，et al. High resolution 3D imaging based on all-fiber photon counting lidar[J]. Infrared and Laser Engineering，2021，50(7)：20210162.

[3]　陈　臻. 基于偏振调制的激光三维成像方法研究[D]. 北京：中国科学院大学，2017.
Chen Zhen. Research on laser 3D imaging method based on polarization modulation[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2017.

[4]　马超杰，孙晓泉，李晓霞. 基于激光成像雷达制导系统的仿真设计[J]. 红外与激光工程，2005，34(6)：655-659.
Ma Chaojie，Sun Xiaoquan，Li Xiaoxia. Simulation design of laser imaging radar guidance system[J]. Infrared and Laser Engineering，2005，34(6)：655-659.

[5]　杨思远. 城市交通场景下基于三维激光雷达的交通信息检测方法研究[D]. 苏州：苏州大学，2019.
Yang Siyuan. Research on traffic information detection method based on 3D lidar in urban traffic scene[D]. Soochow：Soochow University，2019.

[6]　李晨曦，张　军，靳欣宇，等. 激光雷达 SLAM 技术及其在无人车中的应用研究进展[J]. 北京联合大学学报，2017，31(4)：61-69.
Li Chenxi，Zhang Jun，Jin Xinyu，et al. Research progress of lidar SLAM technology and its application in unmanned vehicles[J]. J. of Beijing Union University，2017，31(4)：61-69.

[7] Du B, Pang C, Wu D, et al. High-speed photon-counting laser ranging for broad range of distances[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4198.

[8] 刘 博, 蒋 赟, 王 瑞, 等. 全天时单光子激光雷达技术进展与系统评价[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(1): 1-15.
Liu Bo, Jiang Yun, Wang Rui, et al. Technical progress and system evaluation of all-time single photon lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(1): 1-15.

[9] 鲍泽宇, 李召辉, 师亚帆, 等. 基于单光子探测器的符合时间光子计数激光测距法[C]// 第十六届全国量子光学学术报告会报告摘要集, 2014: 96-97.
Bao Zeyu, Li Zhaohui, Shi Yafan, et al. Time-consistent photon counting laser ranging based on single photon detector [C]// Proc. of the 16th National Symposium on Quantum Optics, 2014: 96-97.

[10] 李召辉, 申光跃, 庞程凯, 等. 日盲紫外单光子成像[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 292-296.
Li Zhaohui, Shen Guangyue, Pang Chengkai, et al. Solar blind ultraviolet single-photon imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 292-296.

[11] Ye Y, Chen H, Zhang C, et al. SARPNET: Shape attention regional proposal network for lidar-based 3D object detection [J]. Neurocomputing, 2020, 379: 53-63.

[12] Zhang C, Dong G, Qu H, et al. Realization of target recognition and tracking by single photon array imaging lidar [J]. Proc. SPIE, 2021, 12065: 891-896.

[13] Li Z, Liu B, Wang H, et al. Target tracking and ranging based on single photon detection[J]. Photonics, 2021, 8(7): 278.

[14] Li Z, Liu B, Wang H, et al. Advancement on target ranging and tracking by single-point photon counting lidar[J]. Opt. Express, 2022, 30(17): 29907-29922.

[15] 张 群, 刘 博, 华康健, 等. 基于单元探测器的激光跟踪技术研究[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(2): 105-112.
Zhang Qun, Liu Bo, Hua Kangjian, et al. Research on laser tracking technology based on unit detector [J]. Optics & Optoelectronics Technology, 2022, 20(2): 105-112.

[16] Matas J, Chum O, Urban M, et al. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions[J]. Image & Vision Computing, 2004, 22(10): 761-767.

作者简介:

王 玲(1998—),女,硕士研究生,主要从事光子计数激光雷达目标识别的研究;

刘 博(1979—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光雷达探测方面的研究。