

# 空间暗弱目标单光子激光三维探测技术

赵思思<sup>1\*</sup>, 张景豪<sup>1</sup>, 李 同<sup>1</sup>, 郑国宪<sup>1,2,3</sup>, 郑永超<sup>1</sup>

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;

2. 山东大学 激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237;

3. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237)

**摘要:** 空间目标光学探测是实施碎片规避、预警、清除的前提, 是维护在轨运行航天器安全、维持外太空活动可持续发展的基础。其中, 激光雷达能够实现全天时探测, 是被动光学载荷的重要补充。文章提出具有时间位置信息记录功能的空间暗弱目标单光子激光三维探测技术, 获取穿过视场的动目标时空三维信息, 并利用双 Hough 变换实现低信噪比下目标轨迹的检测。实验结果表明, 该方法对不同运动速度的目标, 在信噪比小于 2 时能够检出目标, 对于强背景强目标, 可以提升轨迹检测精度。文章的研究可为高速微弱目标高灵敏度监测提供参考。

**关键词:** 单光子探测; 激光探测; 高灵敏度; 空间目标

中图分类号: V19

文献标识码: A

## Laser three-dimensional detection for space dim targets based on single photon detectors

ZHAO Si-Si<sup>1\*</sup>, ZHANG Jing-Hao<sup>1</sup>, LI Tong<sup>1</sup>, ZHENG Guo-Xian<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Yong-Chao<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory of Laser & Infrared System, Ministry of Education, Shandong University, Qingdao 266237, China;

3. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** Optical detection of space targets is the premise for debris collision avoidance, early warning and active removal, which is considered the basis for the safety protection of spacecraft and the sustainable development of outer space activities. And LIDAR can achieve all-day detection and is an important supplement to passive optical payloads. This paper used detection system based on single photon detector, which had the time and position record function for the arrival signal, to measure the time-position three-dimensional information of the target crossing the field-of-view of the detection system. And the twice Hough transforms were applied to determine the trajectory of the target at low SNR. The experiment results showed that the moved targets could be detected at the condition of SNR<2, and the trajectory could be determined accurately under the condition of bright background and target. This work hopes to provide reference for high sensitive detection of the dim fast target.

**Key words:** single photon detector, laser detection, high sensitivity, space target

## 引言

太空时代的到来已致使满天星辰, 美国空间监视网(United States Space Surveillance Network, SSN)维持编目的空间目标数目已达到 39,230 个。随着各国空间技术的发展和空间任务的增多, 太空已极度拥挤, 空间解体、爆炸、碰撞或产生碎片的异常事

件高达 650 次, 空间环境极度恶化。根据 2025 年 3 月 21 日欧空局(European Space Agency, ESA)给出的信息<sup>[1]</sup>, 尺寸大于 10 cm 的目标数量预估为 40,500 个, 尺寸介于 1~10 cm 的碎片约 1 100 000 个, 小于 1 cm 的约 1.3 亿个。这些空间碎片的存在对空间高价值资产构成随处、随域、随时的致命毁伤, 而当空间碎片密度高于临界点时, 会引发连锁反应。

收稿日期: 2025-03-28, 修回日期: 2025-07-22

Received date: 2025-03-28, Revised date: 2025-07-22

作者简介(Biography): 赵思思(1985—), 女, 北京人, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电探测、激光成像、高灵敏度探测、空间目标特性测定。  
E-mail: ellan\_627@126.com

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: ellan\_627@126.com

为了确保航天器的安全,最有效的办法就是进行碎片规避和碎片清除。而空间目标探测,是碎片规避和碎片清除的前提,是维持外太空活动可持续发展的重要基础。

空间目标地基探测设备探测能力有限,同时由于我国地基布站受限,数据更新周期长,并且存在较大监测盲区。因此,地基观测不能满足飞行器以及应急事件对空间碎片应急规避与预警的需求。天基空间碎片监测能够与地基优势互补,解决地基探测盲区的问题,提高弱小目标的探测能力、扩大目标覆盖率、提高探测时效性,对飞行器的在轨安全具有重要意义。

天基探测以被动相机为主,如美国的SBSS<sup>[2-3]</sup>、加拿大的Sapphire<sup>[4-5]</sup>和我国的“仰望一号”<sup>[6]</sup>,被动相机最大的优势是探测距离远、体积小、重量轻、功耗低,但受光照条件限制,阴影区无法工作,无法实现全天时空间目标探测。激光雷达是激光技术与雷达技术相结合的产物,属于主动光学探测,可以解决传统天基光学监测无法实现全天时工作的问题,同时在频域、空域、时域具有较高的分辨率,能够在测距、角跟踪、目标测速及动目标指示方面发挥重要作用。此外,由于具有较高的隐蔽性和较强的抗有源干扰能力,特别适于工作在日益复杂环境中。其中,单光子激光三维成像技术是一种基于单光子探测和飞行时间(ToF)测量的高灵敏度成像技术,同时具有皮秒级的时间分辨率,近年来在自动驾驶、遥感测绘、生物医学和工业检测等领域展现出巨大潜力。国外公开集中报道的光子计数激光雷达以美国宇航局(NASA)<sup>[7]</sup>、美国MIT林肯实验室和斯坦福大学<sup>[8]</sup>、英国Heriot-Watt大学<sup>[9-10]</sup>等相关研究机构为主,国内包括中国科学技术大学<sup>[11-12]</sup>、华东师范大学<sup>[13]</sup>、北京航空航天大学<sup>[14]</sup>等研究机构。其中,美国斯坦福大学的Lindell等人采用256×1的SPAD阵列以及配套扫描振镜的成像系统,可记录25 Hz瞬变图像,适用于无人驾驶的实时采样;Heriot-Watt大学报到的基于超导纳米线光子探测器(SNSPD)并结合单像素扫描收发系统和时间相关单光子计数技术,获取数百米距离场景的毫米级深度图像,具备在中等程度大气湍流中识别10 km远处的车辆类型;中科大团队采用了单像素单光子成像将成像距离突破到了百公里级,随后采用64×64的SPAD阵列系统在一定浓度雾环境下,对13.4 km和20 km距离目标进行重构。上述研究主要应用于对

地测绘、无人驾驶、地面复杂恶劣环境成像等,目前尚无针对空间暗弱目标的单光子激光三维探测技术的报道。

本文面向空间态势感知应用,提出了空间暗弱目标单光子激光三维探测技术,研制了单光子激光三维探测系统原理装置,其采用激光辐照作为主动光源,以及具有时间和位置记录功能的单光子探测器,获取到达信号的时空信息,利用动目标信号的时间关联性,在较低信噪比( $SNR < 2$ )下实现了暗弱目标轨迹的检测,并针对多目标情况,研究技术适用性及轨迹检测能力。

## 1 原理方法

### 1.1 探测系统

单光子激光三维探测系统框图如图1所示,由激光发射单元、激光接收单元、综合控制与信息处理单元三部分组成。激光源发射的激光,经采样模块提取少量的反射光作为参考时间信号,透射光经发射光学系统投射到空间背景下暗弱目标场景。激光回波信号经接收光学系统到接收光路,为了抑制噪声、提高信噪比,回波信号经过滤波装置,被单光子阵列探测器接收。探测器将光信号转换为电信号,经过综合控制与信息处理单元的数据传输后进行信号处理,获取目标场景的时空三维信息。

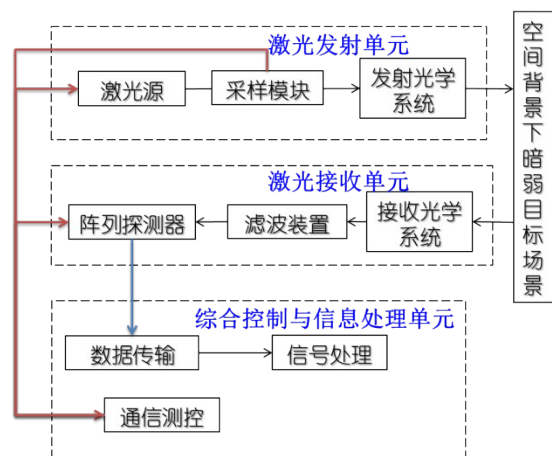


图1 单光子激光三维探测系统框图

Fig. 1 Block diagram of single photon laser 3D detection system

### 1.2 数据获取

探测系统选择具有较高时间分辨率、同时能记录信号位置的单光子探测器,探测器能够精确记录光子到达的位置和到达时间,记录在某个时刻、某

个位置到达探测器的光子。当目标划过视场,以速度  $v_0$  从位置 A 运动到位置 B 时,对应时刻  $t_1$  和  $t_n$ ,如果探测器的时间分辨率为  $\Delta t$ ,则像面上每一时间片段  $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n)$  ( $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ ) 的光子信号分布如图 2(a) 所示,其中,实心圆点为目标信号光子,空心圆点为噪声光子。对于目标穿过视场的一段时间  $T$ ,根据探测器在每个时间片段记录的光子位置信息,会形成三维数据立方体,如图 2(b) 所示。

对于目标,是服从直线分布,而噪声随机分布。利用目标与噪声在时间和空间维度的光子统计分布差异,实现对微弱高速目标的检测定位。

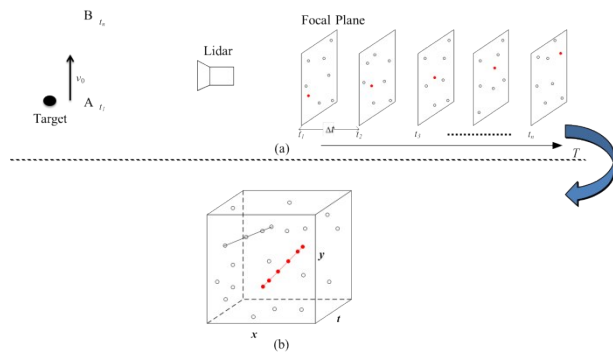


图2 一段时间内的数据(时空信号获取)

Fig. 2 Three dimensional data during a period of time (Time and position acquisition of the recorded photons)

### 1.3 数据处理策略

远距离观测的近空轨道运动目标在短时间内像面映射轨迹可以近似匀速直线运动。Hough 变换是利用参数空间的聚类问题检测图像空间直线的重要方法。本文选择两次 Hough 变换进行匀速直线运动的轨迹关联,主要思想是:第一次是利用直线检出可疑目标轨迹,第二次基于匀速运动的假设剔除疑似目标和噪声。

#### (1) 第一次 Hough 变换

动目标在短时间内在像面映射轨迹可以认为是直线运动。因此第一步先将单光子探测系统获取的三维数据  $(X, Y, T)$ , 投影到二维图像空间  $(X, Y)$ 。再在二维图像空间中识别直线,该直线可认为疑似目标形成的直线,采用 Hough 变换方法检测。Hough 变换方法实现了从二值图像空间到参数空间的映射关系,将图像空间的形状识别问题(本文是直线识别)转换为参数空间的聚类问题。为了在二维图像中识别直线,Hough 变换的第一步是在参数空间内将与直线可能通过的每一个点  $(x, y)$  相关的

计数器进行累加,第二步是搜索最大的计数器单元。算法的两个步骤可以被描述为直线参数化和簇检测标准。

如下图 3(a) 所示,在二维图像空间  $\Omega$ ,考虑点  $(x_i, y_i)$  以及所有通过这个点的直线,有无穷多的线通过点  $(x_i, y_i)$ 。其中,针对  $\rho$  和  $\theta$  的一些值,满足  $\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta$  的所有线都通过该点, $\rho$  为从原点到直线的距离, $\theta$  为坡度。图 3(b) 所示的二维参数空间  $\Theta$  的点  $(\rho, \theta)$  即与二维图像空间  $\Omega$  的点  $(x, y)$  形成了映射关系。

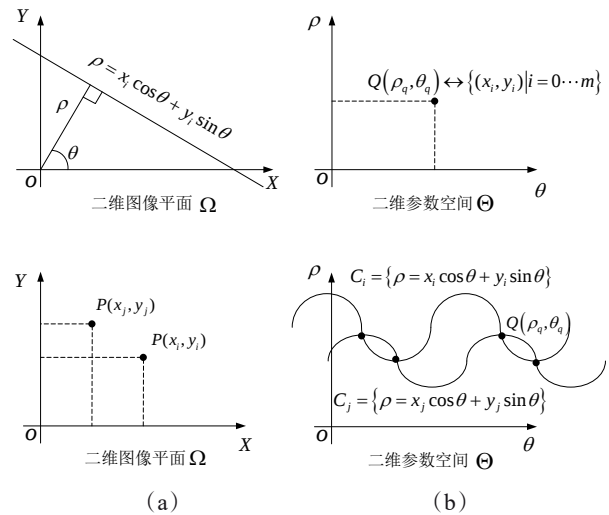


图3 Hough 变换直线检测原理

Fig. 3 Line examination based on Hough transform

Hough 变换将图像空间  $\Omega$  的一点  $P(x_i, y_i)$  变换为参数空间  $\Theta$  的一条曲线  $C_i = \{\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta\}$ 。在一系列的点转换为曲线簇后,这些曲线簇在参数空间  $\Theta$  中相交,交点  $Q(\rho_q, \theta_q)$  表示过该点的所有曲线  $\{C_i | Q \in C_i\}$  在图像空间  $\Omega$  中对应的点簇  $\{P(x_i, y_i)\}$  具有同参数特征  $(\rho_q, \theta_q)$ ,这些点簇的联合满足直线方程  $\rho_q = x_i \cos \theta_q + y_i \sin \theta_q$ ,可以通过判断交点处的累积程度完成特征曲线的检测。对于本文,交点处的累积程度代表图像空间  $\Omega$  过该直线  $(\rho_q = x_i \cos \theta_q + y_i \sin \theta_q)$  的点数(光子数)。

由此可见,Hough 变换的基本思想是“点—线”或“点—面”的对偶性,即检测空间中的点对应参数空间里的线或面,反之,参数空间中的点也对应检测空间里的线或面;因此,在参数空间中相交于同一点的曲线簇在检测空间中都有共线或共面的点簇与之对应。

#### (2) 第二次 Hough 变换

将第一次 Hough 变换检测到的图像平面点迹再

一次放置到三维空间( $X, Y, T$ )中,下面介绍如何将 $X-Y-T$ 空间里目标的时空连续性提取出来。首先,构建 $X-Y$ 平面,将连续的多个间隔 $\Delta t$ 的数据向 $X-Y$ 平面投影。之后,构建二维参数子空间 $T-L$ ,该空间由时间轴 $T$ 和距离轴 $L$ 构成。这里 $L$ 是指图像平面 $X-Y$ 中原点在直线上的投影点与直线上某点之间的距离,这样将图像平面上该条直线上的点转换到 $T-L$ 空间,如图4所示。

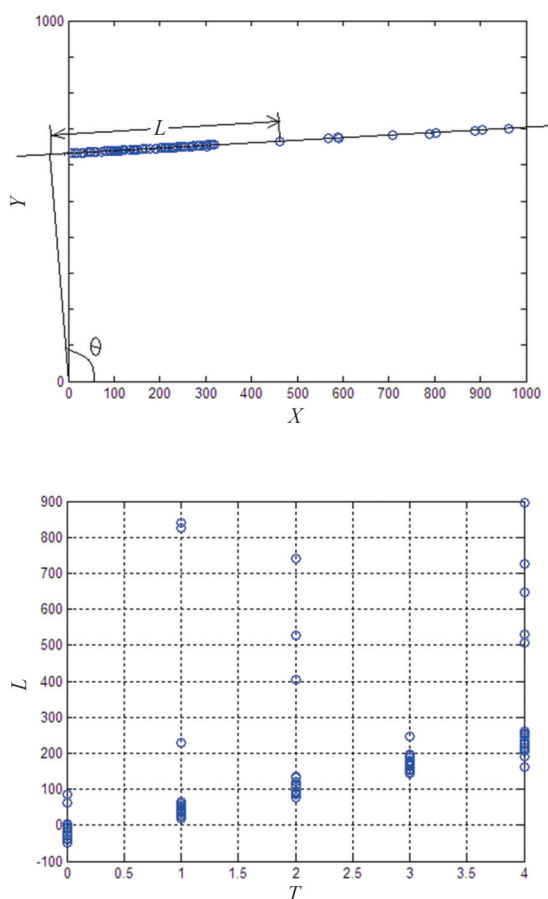


图4 平面直线点迹在 $T-L$ 空间中的投影

Fig. 4 Projection of point in line from  $X-Y$  plane into  $T-L$  space

其中, $X-Y$ 空间到 $T-L$ 空间转换方程为:

$$L = x \sin \theta - y \cos \theta. \quad (1)$$

假设目标近似为匀速直线运动,因此可以通过将第一次Hough变换得到的备选目标点转换到 $T-L$ 空间,其在 $T-L$ 空间可以表示为一条直线。可将变换后的备选目标点进行第二次Hough变换,把备选点中非直线上的点二次排除。将备选目标点二次投影在 $(\rho, \theta)$ 空间后,多条曲线相交,统计每个交点处相交次数即累积次数,选择累积次数超过一定阈

值的Hough空间目标点 $(\rho, \theta)$ ,并选取与 $(\rho, \theta)$ 对应的在 $X-Y$ 空间的点的集合作为这个疑似目标运动轨迹的目标点。

#### 1.4 检测算法流程

根据上述的空间运动目标轨迹检测算法分析,具体算法流程如下:

- 1) 读取每个时间片段 $t_i$ 像面图上的所有像素点 $p_i$ ;
- 2) 提取每个时间片段像面的疑似目标点,每个时间片段像面上大于0的像素点假定为疑似目标点,并保存所有疑似目标点数 $n_i$ ;
- 3) 存满时间段 $T$ 的疑似目标点后,此时疑似目标点总数为 $m$ 个;
- 4) 对 $T$ 时间段内所有 $m$ 个疑似目标点进行第一次子空间Hough变换。将 $X-Y$ 转换为 $\rho-\theta$ 空间,第一次剔除疑似目标点,形成若干可能直线 $(l_0, l_1, \dots, l_{k1})$ ;
- 5) 对直线 $(l_0, l_1, \dots, l_{k1})$ 上的点,进行第二次子空间Hough变换。将这些点从 $X-Y$ 转换到 $T-L$ 空间,第二次剔除疑似目标点,形成若干直线 $(l_0, l_1, \dots, l_{k2})$ ,其中 $k1 > k2$ ;
- 6) 利用待检测目标的运动特性和目标光子最少个数剔除虚假目标轨迹。

## 2 试验系统搭建

试验原理如图5所示,由运动点目标模拟装置和Lidar探测系统组成。①对于运动点目标模拟装置,固定于电动位移平台1上(Electric displacement platform 1),电动位移平台1具有横向位置和速度调节功能,当设置电动位移平台1的控制参数,即实现了运动点目标(Target)模拟,目标尺寸2 mm,探测距离为5 m;②对于Lidar探测系统,光学镜头(Lens)、衰减片(Attenuator)、单光子探测器(Detector)依次连接,与532 nm激光源(Laser),置于电动位移平台2上(Electric displacement platform 2)。其中,光学镜头为变焦镜头,F数可调,探测器为PMT-WSA单光子探测器。电动位移平台2具有径向位置调节功能,本试验主要用于试验中物距的调节。

为了模拟深空背景,试验过程采取如下处理:①暗室环境,封闭屋子;②遮光处理,试验装置置于暗箱中。在多目标试验中,揭掉暗箱,人为加大背景噪声,研究背景增强下目标检测能力;③支撑件发黑处理。其中,多目标试验中,目标为三个,分别放置于三个电动位移平台位移台上。

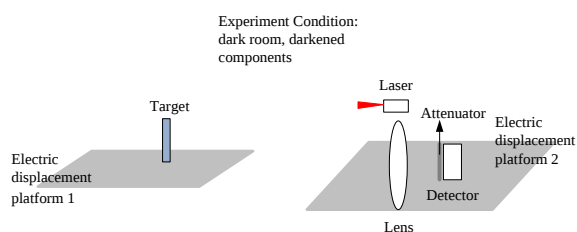


图5 原理图

Fig. 5 Experimental principle scheme

试验装置器件参数如下:①单光子探测器,谱段 200~800 nm,计数率  $5 \times 10^4$  photons/s,光敏面 25 mm,分辨率 5 lp/mm,规模 250×250,等效像元尺寸 100  $\mu\text{m}$ ,量子效率 10%。②光学系统,谱段 400~900 nm,F 数 30,焦距 50 mm,口径 1.667 mm,视场 40~50°,透过率 80%。③激光源,中心波长 532 nm。试验装置实物图如图 6 所示。

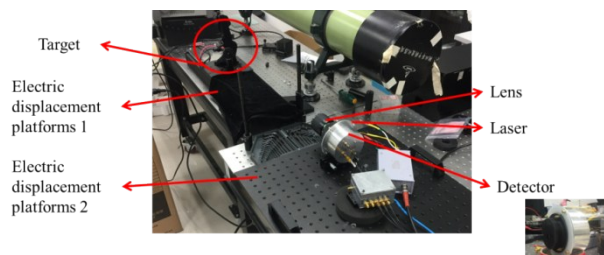


图6 试验装置

Fig. 6 Experimental setup

### 3 试验结果与讨论

基于第 1 部分的原理方法和第 2 部分的试验装置。设置两种场景,一种是对单个动目标的探测检测,另一种是对三个动目标的探测检测,目的是研究这种探测检测方法的灵敏度和轨迹检测能力。

#### (1) 单个动目标的探测检测

设置光子探测器电压为 0.99 V,目标相对探测系统横向运动速度 0.5°/s,目标划过视场角度范围为 4°,则观测时间为 8 s。由于计数率  $5 \times 10^4$  photons/s,可以认为时间采样间隔为 0.02 ms。根据上述试验设置参数,观测时间 8 s 内所收集到的总光子数为 1 104 个,形成  $(X, Y, T)$  三维原始数据。

首先,将  $(X, Y, T)$  三维原始数据投影到  $(X, Y)$  平面并进行二值处理,如图 7 所示。之后,进行第一次 Hough 变换,如图 8 所示,设置阈值为 16,得到的疑似目标如图 9 所示。其中,疑似目标检测标准以一年时间为准<sup>[15]</sup>,根据计数率  $5 \times 10^4$  photons/s 和规模 250×250,以及探测的总光子数,为了保证 95% 以上

探测概率,16 个光子以上形成的事件为疑似目标。

从图 9 可以看出,疑似目标轨迹 3 个。进行如图 10 第二次 Hough 变换,设置阈值为 16,剔除虚假目标轨迹,得到目标轨迹,如图 11 所示。此时,按照传统图像信噪比计算方法,图像局部区域的最大方差比上最小方差,原始图像等效信噪比为 3.3。

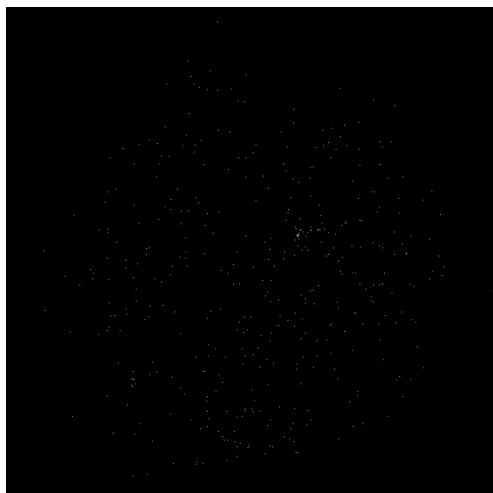


图7 原始数据投影到 X-Y 平面

Fig. 7 Original data projecting onto X-Y plane

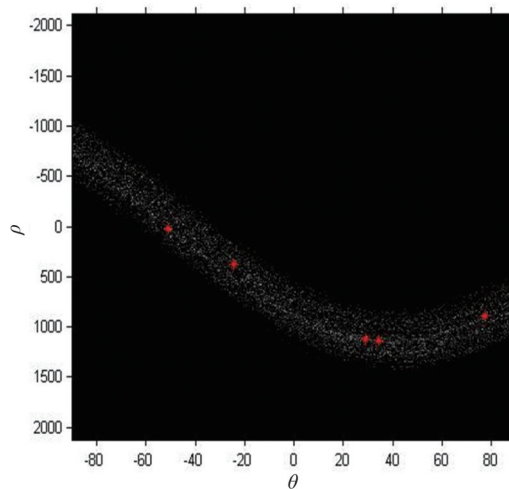


图8 第一次Hough变换(参数空间)

Fig. 8 The first Hough transform (Parameter plane)

设置 6 种情况,目标相对于探测系统横向运动速度 0.5~1°/s,如表 1 所示。由于电机参数限制,目标划过视场角度范围最大角度 4°,对应观测时间 8~4 s,由于目标运动和探测器没有时序同步控制,为了保证目标运动过程完整探测,探测器采集时间设为 9~5 s,如表 1 所示。针对这 6 种情况,实际所得的总光子数目如表 1 所示,同时根据计数率和探测器像元规模,设置 Hough 阈值分别为 16、15、9、15、10、

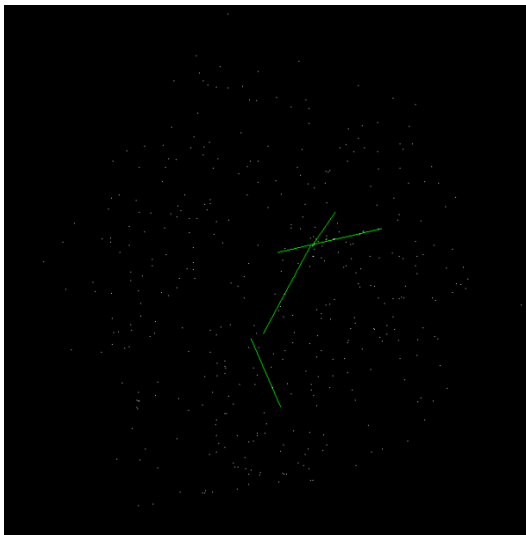


图9 疑似目标(X-Y平面)  
Fig. 9 Suspicious targets (X-Y plane)

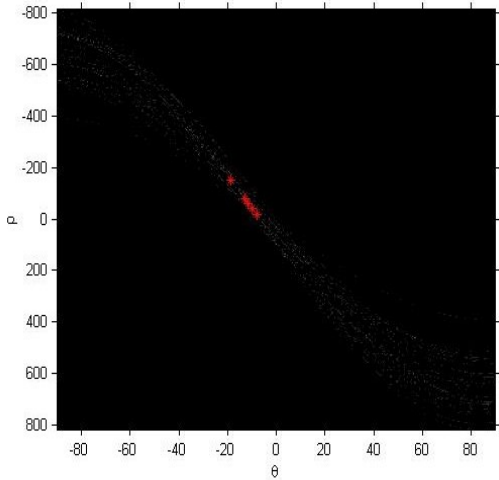


图10 第二次Hough变换(参数空间)  
Fig. 10 The second Hough transform (Parameter plane)

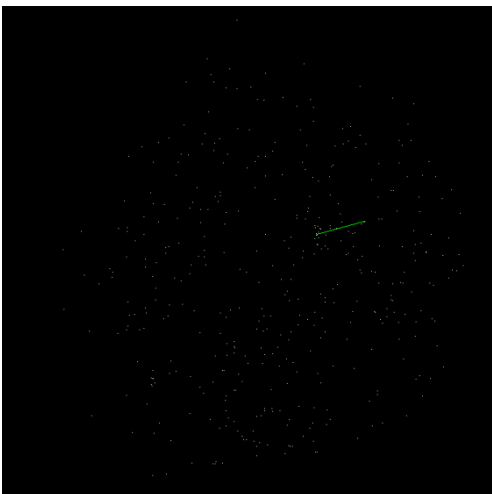


图11 检测出目标(X-Y平面)  
Fig. 11 Targets were determined (X-Y plane)

6, 进而进行目标检测。其中, 针对空间目标探测方向, Hough 阈值不一致, Hough 阈值的设置可以增加一个判据, 对应可疑目标不再增加。其中, 对这 6 种情况, 均实现了目标轨迹的检出, 等效信噪比如表 1 所示, 实现了  $SNR < 2$  的目标检测, 优于传统方法通常要求的信噪比大于 5。

表1 不同相对运动速度下目标探测  
Table 1 Target Detection at different relative velocities

| 序号 | 目标运动速度<br>(°/s) | 采集时间(s) | 总光子数  | 目标光子数 | 是否检出目标 | 投影到二维平面<br>等效信噪比 |
|----|-----------------|---------|-------|-------|--------|------------------|
| 1  | 0.5             | 9       | 1 104 | 16    | Yes    | 3.3              |
| 2  | 0.6             | 7       | 1 061 | 15    | Yes    | 2.4              |
| 3  | 0.7             | 6       | 885   | 9     | Yes    | 1.6              |
| 4  | 0.8             | 5       | 954   | 15    | Yes    | 4.0              |
| 5  | 0.9             | 5       | 1 765 | 10    | Yes    | 2.2              |
| 6  | 1               | 5       | 1 024 | 6     | Yes    | 1.4              |

(2)多个动目标的探测检测

试验对 3 个以不同速度运动的目标进行轨迹探测, 同时揭开暗箱, 引入一定噪声。图 12 为原始三维数据投影到 (X, Y) 空间的图像轨迹, 可以大致看出三条轨迹, 即三个目标。但是, 相比较单目标的试验, 由于人为噪声的存在, 以及试验时设置的目标强度大导致轨迹周围噪声显著增加, 从该图像中无法进行轨迹高精度识别。其中, 当增加目标时, 场景内的信号总光子数增加, 本文的目标强度和人为噪声按照探测器有最大计数率进行设计。图 13 为第 1 次 Hough 变换, 根据阈值要求, 得到疑似目标轨迹, 如图 14 所示, 可以看出, 精确的目标轨迹很难判断。图 15 为第 2 次 Hough 变换, 利用时间关联信息, 得到真实目标的轨迹信息, 如图 16 所示。对比图 14 和图 16, 可以看出, 在背景、目标强度均增加的情况下, 利用时空信息, 可以提升目标轨迹检测精度。多目标探测检测中的三个目标运动方向、起止位置、速度不同, 均能检测出目标, 但未来需要进一步在外场开展试验, 证明技术应用的鲁棒性。

4 总结

文章研究了空间暗弱目标单光子激光三维探测技术, 研制了一套单光子激光三维探测系统原理装置, 基于单光子探测器的微弱动目标时间空间信息获取及轨迹检测, 利用了目标和噪声的光子统计分布差异实现了低信噪比目标检测。在单目标试

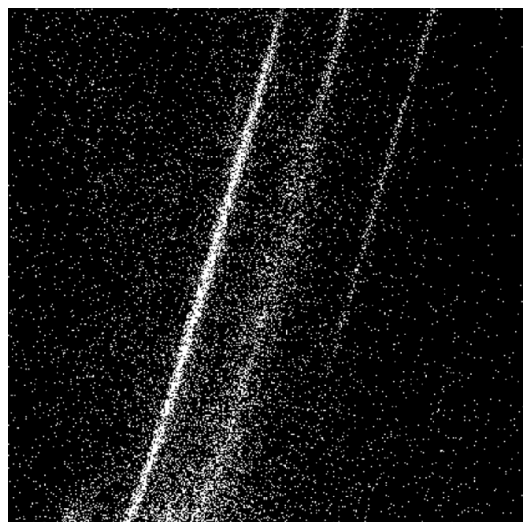


图 12 投影到X-Y平面上的原始数据  
Fig. 12 Original data projecting onto X-Y plane

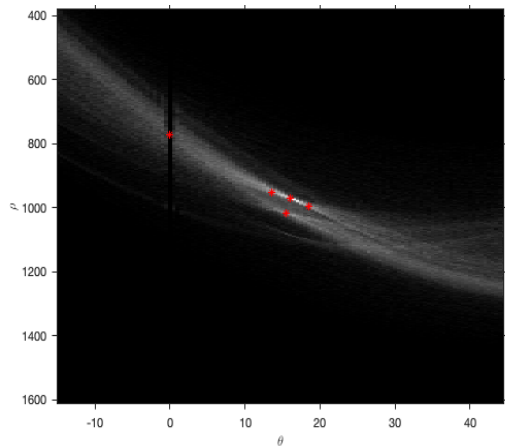


图 13 第一次 Hough 变换  
Fig. 13 The first Hough transform

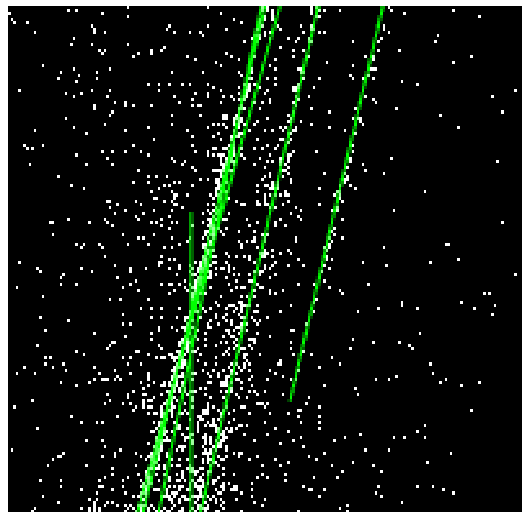


图 14 疑似目标  
Fig. 14 Suspicious targets

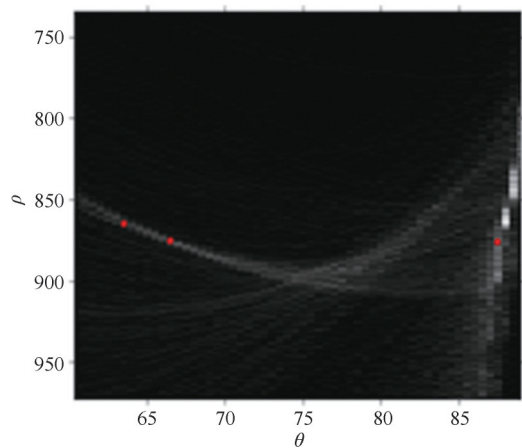


图 15 第二次 Hough 变换  
Fig. 15 The second Hough transform

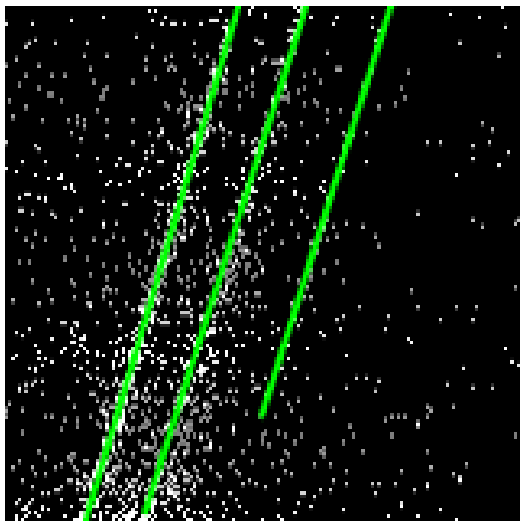


图 16 检出的三个目标  
Fig. 16 Three detected targets

验中,实现了信噪比小于2的目标轨迹检测,与传统方法通常要求的信噪比大于5相比,该技术在高灵敏度探测方面具有优势,同时,在对多目标进行的试验研究中,该方法有助于提升目标轨迹检测的精度。本文提出的技术途径能够为10 cm以下空间暗弱目标以及非理想光照条件下的远距离高灵敏度探测提供技术途径。

References

[1] European Space Agency. Space debris by the numbers[EB/OL]. (2025) [2025-07-22]. [https://www.esa.int/Safety\\_Security/Space\\_Debris/Space\\_debris\\_by\\_the\\_numbers](https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers).  
[2] SBSS Satellites for monitoring satellites[J]. Space Exploration, 2010, (10): 32-33.  
SBSS 监视卫星的卫星[J]. 太空探索, 2010, (10): 32-33.

- [3] Liu J, Zhang H, He M, et al. Overview and analysis of space-based space surveillance system[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2019, 35(4): 60–64.  
刘佳,张恒,何漫,等. 美国天基空间监视系统概述与分析[J], *航天电子对抗*, 2019, 35(4): 60–64.
- [4] Scott A, Hackett J, Man K. On-orbit results for Canada's Sapphire optical payload[C]. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. Maui, 2013.
- [5] Leitch R, Hemphill I. Sapphire: A small satellite system for the surveillance of space[C]. *24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2013.
- [6] "仰望一号"太空望远镜在轨综合应用[EB/OL]. (2023-03-01). <https://wap.cnki.net/touch/web/Journal/Article/SDIR202302002.html>.
- [7] McGill M, Markus T, Scott V S, et al. The Multiple Altimeter Beam Experimental Lidar (MABEL): an airborne simulator for the ICESat-2 mission[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(2): 345–352.
- [8] Lindell D B, O'Toole, Wetzstein G. Towards transient imaging at interactive rates with single-photon detectors[C]. *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. 2018: 978–1–5386–2526–9.
- [9] McCarthy A, Taylor G G, Garcia-Armenta J, et al. High-resolution long-distance depth imaging LiDAR with ultra-low timing jitter superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Optica*, 2025, 12(2): 168–1177.
- [10] Tobin R, Halimi A, McCarthy A, et al. Robust real time 3D imaging of moving scenes through atmospheric obscurant using single photon LiDAR [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 11236.
- [11] Jing P Y, Li Z P, Ye W L, et al. Long range 3D imaging through atmospheric obscurants using array-based single-photon LiDAR [J]. *Optics Express*, 2023, 31 (10) : 10605–16055.
- [12] Li Z P, Ye J T, Huang X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344–349.
- [13] Li Z H, Wu E, Pang C K, et al. Multi-beam single-photon counting three-dimensional imaging Lidar [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10189–10195.  
李朝辉, 吴易, 庞承凯, 等. 多光束单光子计数三维成像激光雷达[J]. *光学快报*, 2017, 25(9): 10189–10195.
- [14] Zhang H Y, Zhao X Y, Zhang Y C, et al. Review of advances in single-photon Lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1910003–1–1910003–18.  
张汉熠, 赵新宇, 张益成, 等. 单光子激光雷达研究进展 [J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1910003–1–1910003–18.
- [15] Gruntman M. Passive optical detection of submillimeter and millimeter size space debris in low Earth orbit[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105(1): 156–170.
- [16] Li Y J, Jin G, Zhong X. Modeling and simulation of visible light scattering properties of spatial object using STK [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, 33(2): 188–193.