文章编号:1001-9014(XXXX)XX-0001-09

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. XXXX. XX. 001

空间暗弱目标单光子激光三维探测技术

赵思思¹, 张景豪¹, 李 同¹, 郑国宪^{1,2}, 郑永超¹ (1. 北京空间机电研究所,北京市海淀区104号,100094; 2. 激光与红外系统重点实验室,山东大学,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 发展的重要基础。其中,空间目标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。本文提出具有时 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。本文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

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

Zhao Sisi¹, Zhang Jinghao¹, Li Tong¹, Zheng Guoxian^{1,2}, Zheng Yongchao¹

(1. Beijing Institute of space mechanics and Electricity, Youyilu 104, Haidian District, 100094 Beijing, China;
 2. Key Laboratory of Laser & Infrared System (Shandong University), Ministry of Education, Shangdong University, Qingdao 266237, China)

Abstract: Optical detection of space target is the premise for debris collision avoidance, early warning and active removal, which is considered as the basis to safety protection of spacecraft and 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-dimension 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 detected at the condition of the target to provide reference for high sensitive detection of the dim fast target.

作者简介(Biography):赵思思(1985-),女,北京人,研究员,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

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

1 引言

太空时代的到来已致使满天星辰,美国空间监视网SSN(United States Space Surveillance Network) 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ESA(European Space Agency)给出的信息[1],尺寸大于10cm的目标数量预估为40,500个,尺寸介于1~10cm的碎片约1,100,000个,小于

1cm的1.3亿。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。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[2-3]、加拿大的Sapphire[4-5]和我国的"仰望一号" [6],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)[7]、美国 MIT 林肯实 验室和斯坦福大学[8]、英国 Heriot-Watt 大学[9-10]等相关研究机构为主,国内包括中国科学技术 大学[11-12]、华东师范大学[13]、北京航空航天大 学[14]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25Hz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10km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13.4km和20km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)下实现了微弱 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。

2 原理方法

2.1 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。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。

2.2 数据获取

探测系统选择具有较高时间分辨率、同时能记



图1 单光子激光三维探测系统框图

Fig. 1 Block diagram of single photon lased 3D imaging system

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 Δt ,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,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。

2.3 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 Ω ,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 ρ 和 θ 的一些值,满足 ρ = $x_i \cos\theta + y_i \sin\theta$ 的所有线都通过该点, ρ 为从原点到 直线的距离, θ 为坡度。图 3(b)所示的二维参数空 间 Θ 的点(ρ, θ)即与二维图像空间 Ω 的点(x, y)形成 了映射关系。

Hough 变换将图像空间 Ω 的一点 $P(x_i, y_i)$ 变换 为参数空间 Θ 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 Θ 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 Ω 中对应的点簇 $\{P(x_i, y_i)\}$ 具有同参数特征 (ρ_q, θ_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



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)



图3 Hough变换直线检测原理

Fig.3 Line examination based on Hough transform

累积程度代表图像空间 Ω 过该直线($\rho_q = x_i \cos \theta_q + y_i \sin \theta_a$)的点数(光子数)。

由此可见Hough变换的基本思想是"点一线"或 "点一面"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



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

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Δt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。

其中,*X*-*Y*空间到*T*-*L*空间转换方程为:

$$L = x \sin\theta - y \cos\theta \tag{1}$$

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

(ρ , θ)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(ρ , θ),并选取与(ρ , θ)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。

2.4 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时间段内所有疑似目标点m个进行第一 次子空间Hough变换。将X-Y转换为ρ-θ空间,第 一次剔除疑似目标点,形成若干可能直线(l₀, l₁, …, l_{k1});

5)对直线(*l*₀,*l*₁,…,*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,…,*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。

3 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2mm,探测距 离为5m;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532nm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,试验装置至于 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。

试验装置器件参数如下:①单光子探测器,谱 段 200nm~800nm,计数率 5×10⁴photons/s,光敏面Φ 25mm,分辨率5 lp/mm,规模 250×250,等效像元尺 寸 100μm,量子效率 10%。②光学系统,谱段 400nm~900nm,F数 30,焦距 50mm,口径 1.667mm, 视场 40~50°,透过率 80%。③激光源,中心波长 532nm。试验装置实物图如图6所示。

4 试验结果与讨论

基于第2部分的原理方法和第3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0.99V,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8s。由于计数率5×10⁴photons/ s,可以认为时间采样间隔为0.02ms。根据上述试 验设置参数,观测时间8s内所收集到的总光子数为 1104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[15],根据计数率5×10⁴photons/s和规模 250×250,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。





Fig. 5 Experiment principal scheme



图 6 试验装置 Fig. 6 Experiment setup

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

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~ 4s,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 9~5s,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、6, 进而进行目标检测。其中,针对空间目标探测应方 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,对着6种 情况,均实现了目标轨迹的检出,等效信噪比如表1



Fig. 8 First time Hough transform (Parameter plane)



Fig. 9 Suspicious Targets(X-Y plane)

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大于5。

(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



图10 第二次Hough变换(参数空间)



图11 检测出目标(X-Y平面)

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,

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

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。得对 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。



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

5 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

序号	目标运动速度(/s)	采集时间(s)	总光子数	目标光子数	是否检测出目标	投影到二维平面 等效信噪比
1	0.5	9	1104	16	Yes	3. 3
2	0.6	7	1061	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	1765	10	Yes	2.2
6	1	5	1024	6	Yes	1.4



图 13 第一次 Hough 变换 Fig. 13 First time Hough transform



图 14 疑似目标 Fig. 14 Suspicious Targets



图 15 第二次 Hough 变换 Fig. 15 Second time Hough transform

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大于5相比,该技术在灵敏度



图 16 检出三个目标 Fig. 16 Targets were determined

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10cm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。

参考文献

- [1] https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/ Space_debris_by_the_numbers, (2025).
- [2] "SBSS监视卫星的卫星",太空探索,10 (2010).
- [3] 刘佳,张恒,何漫,王晓路."美国天基空间监视系统概述 与分析", 航天电子对抗, 35(4), 60-64 (2019).
- [4] A Scott, J Hackett, K Man. "On-Orbit Results for Canada's Sapphire Optical Payload", Conference: Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies ConferenceAt: Maui(2013).
- [5] Robert Leitch, Ian Hemphill. "Sapphire: A Small Satellite System for the Surveillance of Space", 24th Annual AIAA/ USU Conference on Small Staellites (2013).
- [6] "仰望一号"太空望远镜在轨综合应用 https:// wap.cnki. net/touch/web/Journal/Article/SDIR202302002.html, 2023.
- [7] Matthew Mcgill, Thorsten Markus, V. Stanley Scott, and Thomas Neumann. "The Multiple Altimeter Beam Experimental Lidar (MABEL): An Airborne Simulator for the IC-ESat-2 Mission", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 30, No. 2, 345 - 352 (2013).
- [8] David B. Lindell, Matthew O' Toole, Gordon Wetzstein.
 "Towards Transient Imaging at Interactive Rates with Single-Photon Detectors", 978-1-5386-2526 (2018).
- [9] Aongus McCarthy, Gregor G. Taylor, Jorge Garcia-Armenta, Boris Korzh, Dmitry V. Morozov, Andrew D. Beyer, Ryan M. Briggs, Jason P. Allmaras, Bruce Bumble, Marco Colangelo, Di Zhu, Karl K. Berggren, Matthew D. Shaw, Robert H. Hadfield, and Gerald S. Buller. "High-resolution long-distance depth imaging LiDAR with ultra-low timing jitter superconducting nanowire single-photon detec-

tors", Optica Vol. 12, No. 2, 168-1177(2025).

- [10] Rachael Tobin1, Abderrahim Halimi, Aongus McCarthy, Philip J. Soan, and Gerald S. Buller. "Robust real-time 3D imaging of moving scenes through atmospheric obscurant using single-photon LiDAR". Scientific Reports, 90587-8 (2021.
- [11] Peng-Yu Jing, Zheng-Ping Li, Wen-Long Ye, Yu Hong Chen Dai, Xin Huang, Shui-Qing Xi, Jie Lu, Da-Jian Cui, Yuan Cao, Fei-Hu Xu, and Jian-Wei Pan. "Long range 3D imaging through atmospheric obscurants using array-based single-photon LiDAR", Optics Express, Vol. 31, No. 10, 10605-16055 (2023).
- [12] Zheng-Ping Li, Jun-Tian Ye, Xin Huang, Peng-Yu Jiang, Yuan Cao, Yu Hong, Chao Yu, Jun Zhang, Qiang Zhang, Cheng-Zhi Peng, Feihu Xu, and Jian-Wei Pan. "Single-photon imaging over 200 km", Optica, Vol. 8,

No. 3, 344-349 (2021).

- [13] Zhaohui Li, E Wu, Chengkai Pang, Bingcheng Du, Yuliang Tao, Huan Peng, Heping Zeng and Guang Wu, "Multi-beam single-photon counting three-dimensional imaging Lidar", Optics Express 25, 10189-10195 (2017).
- [14] 张汉熠, 赵新宇, 张益成, 张蜡宝, 孙鸣捷."单光子激 光雷达研究进展", 中国激光, 49 (19), 1910003-1~18 (2022).
- [15] Mike Gruntman. "Passive optical detection of submillimeter and millimeter size space debris in low Earth orbit". Acta Astronautica, 105, 156–170(2014).
- [16] Li Yanjie1, Jin Guang, Zhong Xing. "Modeling and Simulation of visible Light Scattering Properties of Spatial Object Using STK". Chinese Journal of Space Science, 33 (2): 188-193(2013.