



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

———• 中国科技核心期刊

基于探测概率模型的天基激光探测空间碎片仿真与分析

李少宁 吴程 贺涛 黄缙 国爱燕 何畅勇

Simulation and analysis of spaceborne laser system for space debris measurement based on detection probability model

LI Shaoning, WU Cheng, HE Tao, HUANG Jin, GUO Aiyang, HE Changyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2024047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于激光PSD的空间载荷指向测量系统](#)

Space load pointing measurement system based on laser PSD

航天器环境工程. 2023, 40(2): 179–183 <https://doi.org/10.12126/see.2022115>

[天基激光对GEO卫星的毁伤效能分析与启示](#)

The damage effect of space-based laser on GEO satellites

航天器环境工程. 2022, 39(5): 545–551 <https://doi.org/10.12126/see.2022.05.015>

[半主动激光导引头光学系统设计及线性度分析](#)

Design of optical system for semi-active laser seeker and related linearity analysis

航天器环境工程. 2020, 37(3): 303–309 <https://doi.org/10.12126/see.2020.03.016>

[空间目标小型相控阵雷达探测技术](#)

Miniaturized phased array radar technology for detection of space target

航天器环境工程. 2021, 38(4): 446–452 <https://doi.org/10.12126/see.2021.04.011>

[基于WHU甚低频探测系统的大气噪声监测](#)

Monitoring of atmospheric noise based upon data obtained by WHU VLF detection system

航天器环境工程. 2020, 37(2): 107–114 <https://doi.org/10.12126/see.2020.02.001>

[一种基于红外图像的空间目标探测方法](#)

A detection method for space target based on infrared images

航天器环境工程. 2024, 41(1): 27–33 <https://doi.org/10.12126/see.2023103>

基于探测概率模型的天基激光探测 空间碎片仿真与分析

李少宁¹, 吴程¹, 贺涛^{2*}, 黄缙², 国爱燕², 何畅勇¹

(1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湘潭 411100;

2. 中国空间技术研究院 遥感卫星总体部, 北京 100094)

摘要: 为了提高在轨空间碎片的探测精度, 在已有天基红外探测与雷达探测空间碎片研究的基础上, 根据单光子激光探测原理构建了天基激光探测系统的仿真平台; 基于探测概率模型最优条件下, 对该系统探测空间碎片过程中的误差因素进行讨论, 并开展仿真实验和探测精度分析。结果表明: 在天基激光探测系统的辅助下, 空间碎片的探测精度可从 km 量级提升至百米以内。该研究可为未来我国实现空间碎片的天基激光探测提供参考。

关键词: 星载激光探测系统; 单光子激光; 空间碎片; 探测精度; 系统仿真; 误差分析

中图分类号: V520.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2024)06-0653-08

DOI: [10.12126/see.2024047](https://doi.org/10.12126/see.2024047)

Simulation and analysis of spaceborne laser system for space debris measurement based on detection probability model

LI Shaoning¹, WU Cheng¹, HE Tao^{2*}, HUANG Jin², GUO Aiyan², HE Changyong¹

(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411100, China;

2. Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To enhance the measurement precision of space debris in orbit, a simulation platform for a spaceborne laser detection system was developed, drawing on existing research in spaceborne infrared and radar detection techniques. The platform was based on the principle of single-photon detection. Under optimal conditions of the detection probability model, the error factors in detecting space debris with this system were examined. Simulation experiments and measurement precision analyses were conducted. The findings indicate that the spaceborne laser detection system can improve the measurement precision of space debris from the kilometer level to within 100 meters. The study may serve as a reference for future advancements in spaceborne laser detection of space debris in China.

Keywords: spaceborne laser detection system; single-photon laser; space debris; detection precision; system simulation; error analysis

收稿日期: 2024-04-22; 修回日期: 2024-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41901400); 湖南省自然科学基金项目(编号: 2023JJ30233); 智慧地球重点实验室开放基金项目(编号: KF2023YB02-03)

引用格式: 李少宁, 吴程, 贺涛, 等. 基于探测概率模型的天基激光探测空间碎片仿真与分析[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(6): 653-660

LI S N, WU C, HE T, et al. Simulation and analysis of spaceborne laser system for space debris measurement based on detection probability model[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(6): 653-660

0 引言

低地球轨道上数量不断增加的空间碎片严重威胁着在轨航天器的安全和寿命。目前空间碎片的探测系统主要有地基和天基两种。地基系统主要采用主动探测雷达和光学望远镜对空间碎片进行监测。美国最早建成空间监视网(SSN),实现了遍布全球的地基雷达和光学望远镜组网探测^[1];澳大利亚 EOS 公司和我国上海天文台分别利用激光测距站对距地 1000 km 外的空间碎片进行观测和跟踪^[2-3]。地基系统监测受天气、地域、观测时间窗口和大气折射等因素限制,在观测的时效性和覆盖性方面存在局限,因此国内外相继开展了天基空间目标探测系统的研究,包括用可见光、红外等探测手段对空间目标进行探测和跟踪。美国于 1996 年发射“中段空间试验”卫星(MSX)搭载可见光相机(SBV),实现了对空间碎片的探测;2022 年部署完成天基红外预警系统(SBIRS),实现了对全球范围内全天时的空间环境监测^[4]。我国在天基空间目标探测方面还处于初步研究阶段:北京宇航系统工程研究所开展了天基红外预警卫星的高精度目标跟踪探索^[5];西安卫星测控中心对非合作目标进行初轨确定,实现了 km 量级的轨道确定^[6]。为了提升天基探测系统对空间目标轨道的确定精度,国内外学者提出基于天基激光探测系统的监测技术,模拟实验结果表明其可实现对 100~500 km 轨道高度的微小空间碎片的有效探测^[7-8]。但是目前研究中没有针对天基激光平台和载荷误差对空间碎片探测精度的影响展开分析。

本文通过构建天基激光探测系统仿真平台,模拟单光子激光对空间碎片轨道位置的测量过程;基于探测概率模型最优的条件对不同工况下天基平台的轨道误差、姿态误差以及激光载荷误差对空间碎片位置测量精度的影响进行了定量分析,以期为天基激光系统在空间碎片探测中的应用提供参考。

1 天基激光探测系统

1.1 天基激光探测原理

根据激光测距原理,利用卫星搭载的激光探测器不间断地向目标发射脉冲信号,通过测定激光信号往返目标的渡越时间差,解算激光探测器到空间目标的单向传输距离 L ,即可实现空间目标的精准

定位,即

$$L = \frac{1}{2}c(t_r - t_s), \quad (1)$$

式中: c 为光速; t_r 和 t_s 分别为天基激光探测系统接收到信号和发射信号的时刻。

天基激光探测系统采用单光子体制激光雷达,每秒可以发射数千次激光脉冲,并记录目标后向散射光子事件的渡越时间^[9],结合卫星平台姿态、轨道等信息解算目标的空间位置信息,如图 1 所示,其中: $OX_{ICRF}Y_{ICRF}Z_{ICRF}$ 为天体参考框架坐标系; $OX_{Body}Y_{Body}Z_{Body}$ 为卫星本体坐标系。

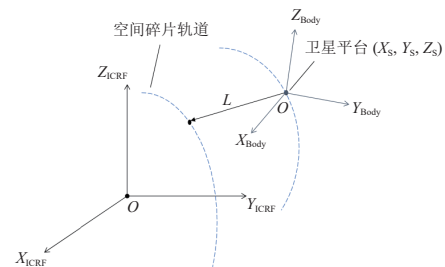


图 1 天基激光探测示意

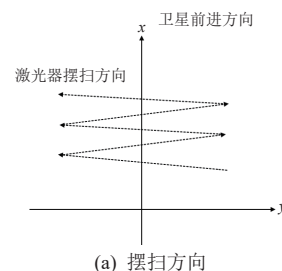
Fig. 1 Schematic of spaceborne laser detection

天基激光探测系统测量空间目标的定位模型为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + (L + dL) \mathbf{R}_{ICRF}^{ITRF} \mathbf{R}_{Body}^{ICRF}, \quad (2)$$

式中: $[X \ Y \ Z]^T$ 为空间目标在地心参考框架 ITRF 坐标系的三维坐标; $[X_S \ Y_S \ Z_S]^T$ 为卫星平台在地心参考框架 ITRF 坐标系的三维坐标; \mathbf{R}_{ICRF}^{ITRF} 为天体参考框架 ICRF 坐标系与地心参考框架 ITRF 坐标系之间的转换矩阵; \mathbf{R}_{Body}^{ICRF} 为卫星本体在天体参考框架 ICRF 坐标系的姿态信息; dL 为天基激光探测系统测量空间目标时的测距误差。

采用天基激光探测系统对空间碎片进行测量时,由于激光脉冲的聚束性较好,导致单束激光探测覆盖范围有限。故在仿真系统中增加了激光载荷的侧摆扫描测量模式(见图 2),凭借激光器的高重复频率探测可以实现更大的探测范围和更高的扫描效率^[10]。



(a) 摆扫方向

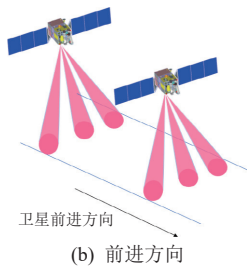


图 2 激光器摆扫测量示意
Fig. 2 Schematic of laser swing measurement

1.2 仿真软件平台

天基激光探测系统仿真软件平台以 Visual

Studio C++作为核心开发语言,运行环境为 Windows。这种设计方便系统的维护、扩展和更新,界面风格直观,如图 3 所示。

该仿真软件能够根据输入的空间碎片轨道六根数和天基平台的仿真参数,模拟空间碎片轨道位置的测量过程,输出卫星平台的轨道参数、姿态参数和光子返回事件等数据,从而能够定量分析天基激光探测平台的轨道误差、姿态误差和激光载荷误差对空间碎片位置测量精度的影响。

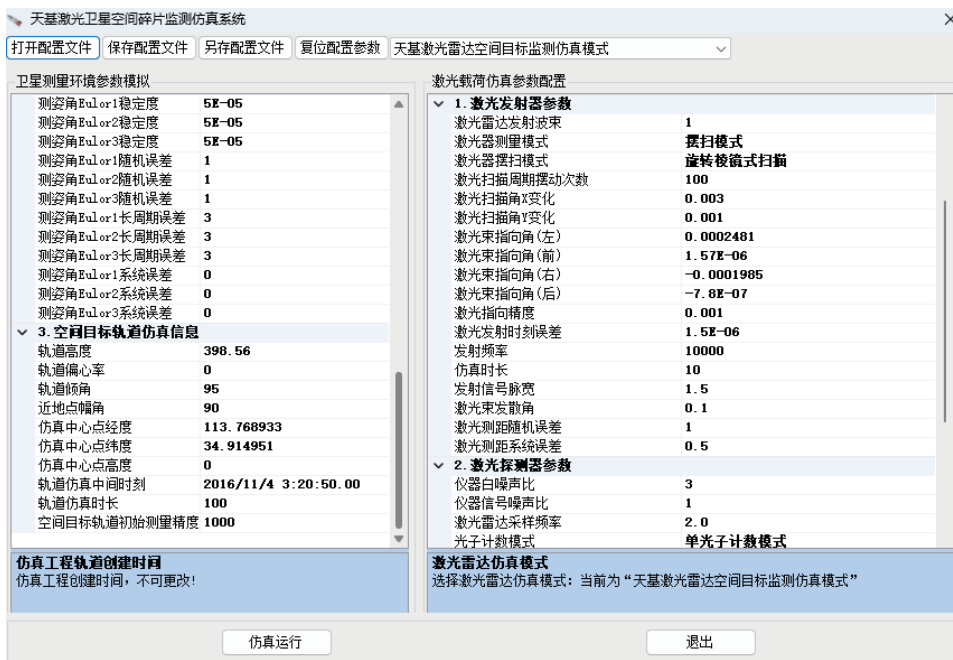


图 3 天基激光探测系统仿真软件平台界面

Fig. 3 Platform interface of simulation software of spaceborne laser detection system

2 空间碎片探测概率分析

2.1 探测概率

空间碎片通常体积较小,可被近似处理为球形的朗伯体点目标;对这类目标进行探测是一个复杂的过程。为了较全面地评估空间碎片探测概率,现从光斑能量空间分布和光子时间响应特性两个关键维度来综合考虑。

激光器发射光束在传播方向上的截面空间分布为旋转对称,光斑能量在空间维呈高斯分布^[11]。探测概率与光斑能量分布存在线性关系,而光斑能量由光斑中心向光斑边缘呈指数衰减^[12]。由此得到目标落在激光光斑内不同位置的探测概率 $P(l)$ 为

$$P(l) = \frac{P(0)}{2\pi w^2} e^{-\frac{l^2}{2w^2}}, \quad (3)$$

式中: $P(0)$ 为光斑中心点的探测概率; l 为激光光斑上点到光斑中心的距离; $w=L \cdot \tan \theta_r$, 其中 θ_r 为激光光斑中心能量衰减为 $e^{-1/2}$ 时的光束截面半径,即为光斑边缘至光斑中心的距离。

当激光光斑照射到朗伯目标后,单光子探测器能够对返回信号光子进行响应,则单束激光探测过程中探测器接收到的平均信号光子数 N_s 为^[8]

$$N_s = \frac{\eta_r \eta_q \sigma_s \rho_t A_t A_r \cos \alpha}{E \pi \theta L^4} P_t, \quad (4)$$

式中: η_r 为激光雷达系统接收效率; η_q 为探测器量子效率; σ_s 为输出激光脉宽; ρ_t 为目标反射率; A_t 为激光光束内目标横截面积; A_r 为目标处激光光斑面

积; α 为激光光轴与目标法向的夹角; E_0 为单束激光脉冲能量; θ 为激光光束的发散角; L 为探测距离; P_t 为探测器发射功率。

单光子探测器所能响应的信号除了目标信号光子外还有背景噪声, 而背景噪声主要包含探测器视场内的背景光噪声和探测器本身的暗计数。这两种噪声的产生是两个相互独立的随机过程, 故系统总的背景噪声光子数为两者的叠加^[13], 即

$$N_n = N_b + N_d, \quad (5)$$

式中: N_n 为总背景噪声的平均光子数; N_b 为背景光噪声的平均光子数; N_d 为探测器暗计数。

在基于单光子探测体制的激光测距中, 探测器接收到的信号通常处于单光子量级, 采用泊松分布来近似分析单光子探测器产生的信号光子能够较为精准地反映该系统的特性^[13-14]。由泊松分布的统计理论可得, Δt 时间间隔内 k 个光子事件被探测器探测到的概率为

$$P(k, \Delta t) = \frac{N_t^k e^{-N_t}}{k!}, \quad (6)$$

式中, $N_t = N_s + N_n$ 。

单光子探测器存在死时间效应, 该效应由探测器本身对于信号的响应时间决定^[15]。在综合考虑死时间效应后, 光子信号的探测概率为^[13,16]

$$P(\Delta t) = e^{-N_n t_{\text{dead}}} (1 - e^{-N_t}), \quad (7)$$

式中 t_{dead} 为探测器的死时间。

假定在单脉冲波束探测空间碎片过程中, 激光器发射的任意一束脉冲照射到空间碎片, 并且探测器接收到返回的信号光子为事件 A_i 。在综合考虑天基探测空间碎片过程中的物理分布和统计特性后, 得到空间碎片的探测概率模型为

$$P(A_i) = P(l) \cdot P(\Delta t). \quad (8)$$

在侧摆扫描模式探测空间碎片过程中, 短时间内激光器沿摆扫方向发射多束脉冲激光, 任意一束脉冲激光扫描到了空间碎片, 且探测器接收到了返回的光子信号, 即完成了对空间碎片的 1 次探测, 也就是计算连续独立事件至少发生 1 次的概率, 即

$$P(A_1 \cup \dots \cup A_n) = 1 - P(\bar{A}_1 \cap \dots \cap \bar{A}_n), \quad (9)$$

式中: A_1, \dots, A_n 是 n 个独立事件; \bar{A}_i 表示事件 A_i 的对立事件, 即事件 A_i 不发生; \cup 表示并集, 至少有

1 个事件发生, 即至少探测到 1 次空间碎片; \cap 表示交集, 所有事件都不发生, 即未探测到空间碎片。

2.2 光斑直径和探测距离的影响分析

位于轨道高度 300~500 km 的空间碎片威胁低轨卫星和空间站的安全运行, 确认卫星探测平台的轨道高度可以较好地观测该范围内的空间碎片。光子计数激光测距系统采用微脉冲信号进行探测, 发射能量仅需 0.1~0.2 mJ, 发射频率可以达到 10 kHz, 能够实现 1000 km 的有效探测距离。在激光发射脉冲能量固定的前提下, 激光器的发散角、测量距离与空间碎片截面积等直接影响激光光束的探测概率。根据激光测量距离和发散角大小可以计算出激光波束的光斑大小, 如图 4 所示。

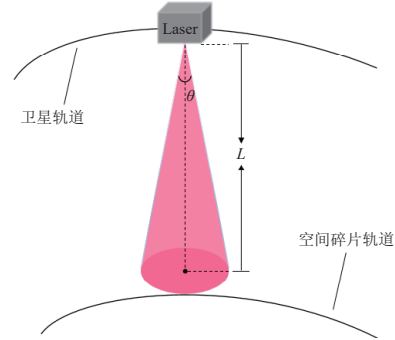


图4 激光探测距离、发散角与光斑大小示意
Fig. 4 Schematic of detection distance, divergence angle and spot size of laser

为了直观、定量分析空间碎片测量距离对探测概率和光斑大小的影响, 引入光斑单位面积能量 M , 将光斑中心的探测概率 $P(0)$ 作为以下讨论的探测概率。光斑单位面积能量提供了一个量化的指标来直接反映激光的作用强度, 从而能直观反映测量距离与探测概率和光斑大小的关系。根据单束脉冲激光能量 E 计算光斑单位面积能量的表达式为

$$M = \frac{E}{\pi L^2 \tan^2 \frac{\theta}{2}}. \quad (10)$$

由此得到激光测量距离与光斑单位面积能量之间的关系, 如图 5 所示。可以看到, 虽然测量距离越远, 光斑直径越大, 扫描覆盖到碎片的概率也就越大, 但是光斑单位面积能量也会减小, 从而导致探测概率降低。

通过对上述参数的设置, 仿真得到激光探测距离与探测概率、光斑直径的关系如图 6 所示。可以看到, 探测距离越远, 探测概率越小; 而在确定的波

束发散角下，探测距离越远光斑直径越大，虽然探测到目标的概率越大但光斑单位面积能量越小。故应在保证探测概率尽可能大的前提下，尽量增大光斑直径。将图 6 中两确定波束发散角下探测概率和光斑直径随探测距离变化曲线的交点连接，这条连线(图中黑色点线)上的点都为探测概率和光斑直径同时达到最大的点，此时既能保证空间碎片落在单个光斑内的可能性最大，又能保证激光接收器接收到单个光斑内碎片散射回来的有效信号光子的概率最大。

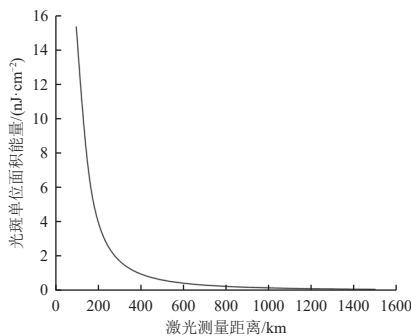


图 5 激光探测距离与光斑单位面积能量的关系

Fig. 5 Relationship between laser detection distance and spot energy per unit area

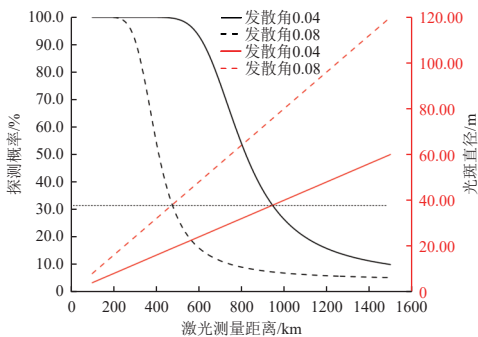


图 6 探测距离与探测概率与光斑直径的关系

Fig. 6 The relationship among detection distance, detection probability and spot diameter of laser

2.3 脉冲频率的影响分析

星载激光器在采用侧摆扫描测量空间碎片的过程当中，会短时间内发射出较多的脉冲激光束，而相邻两光斑的间隔距离对能否探测到碎片信号有较大的影响：如果间隔较大，就有较大的可能性碎片刚好处于间隔内而无法被光斑覆盖，导致探测概率变小。因此通过对激光脉冲频率的优化，可实现对相邻两光斑间隔距离的调整，从而能够有效提高探测概率。

可以理解为：如果空间碎片位于激光光斑内，那么激光探测器接收到回射光子信号的概率较大；如

果空间碎片位于光斑区域之外，那么探测器接收到回射光子信号的概率为 0。图 7 所示为相邻两光斑中心间距可能会存在的 4 种典型情况，确定出摆扫过程中相邻两光斑中心的间距 d ，以连续摆扫的激光束光斑构成一个摆扫矩形，可计算得到所有光斑面积的总和与所形成的摆扫矩形面积的比值，并认为该比值即为探测器能够探测到空间碎片的概率。

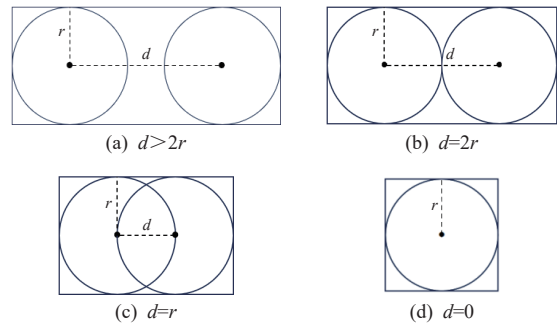


图 7 激光束相邻光斑中心间距的 4 种典型情况

Fig. 7 Four typical cases of distance between the centers of adjacent spots of laser beam

下面对图 7 所示的典型情况进行讨论。将相邻两光斑分为相交与不相交的 2 种情况，得出探测概率模型 $f(d)$ 为

$$f(d) = \begin{cases} \frac{\pi r}{2r + d}, & (d \geq 2r) \\ \frac{2\pi r^2 - \left(2r^2 \cos^{-1} \frac{d}{2r} - \frac{d}{2} \sqrt{4r^2 - d^2}\right)}{4r^2 + 2rd}, & (d < 2r) \end{cases}, \quad (11)$$

式中 r 为光斑半径。据此计算并绘制相邻两光斑中心间距与探测概率的关系曲线如图 8 所示。可以看到：两光斑相交的情况下，在相邻两光斑中心间距 d 从 0 增大至 r 的过程中，探测概率会逐渐增大；在 $r < d < 2r$ 区间，随着 d 增大，探测概率呈递减趋势；两光斑不相交 ($d \geq 2r$) 的情况下，随着 d 的增大，探测概率快速降低。

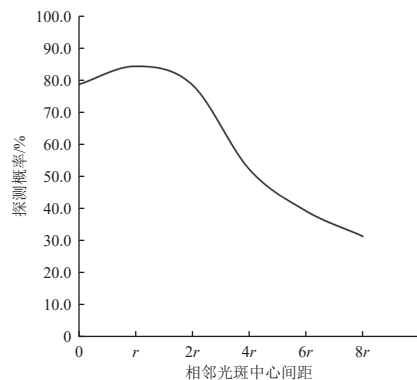


图 8 激光束相邻光斑中心间距与探测概率的关系曲线

Fig. 8 Center distance between adjacent spots of laser beam vs. detection probability

3 空间碎片探测精度实验及误差分析

天基激光探测系统的探测精度受诸多因素的影响,包括:卫星的定轨误差、测姿误差、载荷安装误差、时间同步误差和激光测距误差等。天基激光探测仿真实验中,空间碎片的初始轨道确定精度设定为 1000 m,多次模拟不同工况下系统探测空间目标过程并开展探测精度分析。

3.1 仿真实验及参数

卫星轨道测量误差主要受星载 GNSS 本身的定位精度所影响,通常低轨遥感卫星采用双频 GPS 接收机,实时轨道测量精度为 5~10 m^[17]。故本文将卫星平台 X、Y、Z 向的位置误差分别确定为 5 m、10 m、20 m,作为实验的仿真参数。

姿态测量误差主要是卫星在轨运行时,星敏、陀螺等仪器测量卫星姿态时产生的误差。目前我国卫星的姿态测量精度普遍可达到 3"~15",测绘卫星的姿态测量精度更可达到 1"~2"^[17-18]。故本文将卫星姿态三个方向滚动(roll)、俯仰(pitch)和航偏(yaw)的角测量误差分别确定为 1"、5"、10",作为实验的仿真参数。

时间同步误差是指不同传感器的数据采集和传输时间的差异,天基激光探测系统与 GNSS 接收机之间存在时间同步误差,导致计算时使用的卫星位置与实际的卫星位置之间存在偏差。本文参考现有研究^[19],将 3 种仿真工况的系统时间同步误差分别确定为 10 μ s、20 μ s、30 μ s,作为实验的仿真参数。

激光测距仪的测距误差包括系统测距误差和随机误差。系统测距误差主要为系统设备安装和激光测距仪测量时延误差,可以通过在轨标定予以消除^[20];随机误差主要包括测量过程中的噪声等。本文以目前卫星激光载荷能达到的测距精度作为参考值,将 3 种仿真工况的激光测距精度分别确定为 0.1 m、0.3 m 和 0.5 m,作为实验的仿真参数。

3.2 实验结果与分析

在综合考虑卫星轨道测量误差、卫星平台姿态测量误差和激光载荷测量误差的前提下,设置 3 种仿真工况,每种工况均包含测量系统测距误差和随机误差,如表 1 所示。

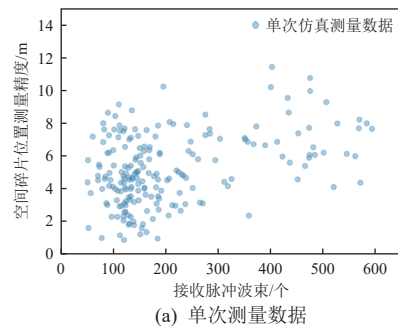
表 1 天基激光探测精度仿真实验参数

Table 1 Parameters of spaceborne laser detection precision simulation test

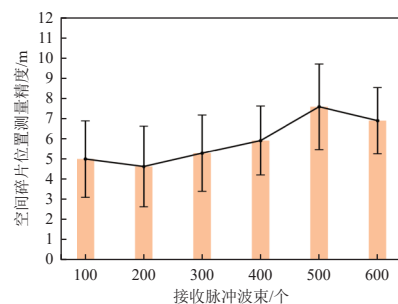
| 误差因素 | | 仿真参数 | | | |
|------|-----------------|------|-----|-----|-----|
| | | 对照组 | 工况1 | 工况2 | 工况3 |
| 系统误差 | 轨道测量误差/m | 0 | 5 | 10 | 20 |
| | 姿态测量误差/(") | 0 | 1 | 5 | 10 |
| | 时间同步误差/ μ s | 0 | 10 | 20 | 30 |
| 随机误差 | 测距误差/m | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 |
| | 轨道测量误差/m | 0 | 5 | 10 | 20 |
| | 姿态测量误差/(") | 0 | 1 | 5 | 10 |
| | 测距误差/m | 0 | 0.1 | 0.3 | 0.5 |

分别按表 1 中 4 组仿真参数开展天基激光探测空间碎片的模拟实验,每个实验组进行 200 次重复试验;统计每次实验的接收脉冲波束与空间碎片位置测量精度数据;再将接收脉冲波束分段统计,并计算每一区间内空间碎片位置测量误差的平均值。

对照组的仿真实验结果如图 9 所示。可以看到,接收到的脉冲波束个数与空间碎片位置测量精度相关性较弱。分段统计后,每一个区间内的空间碎片位置测量精度在 8 m 之内,这是由于数据处理过程中通过激光光斑中心进行定位,光斑大小限制了数据处理的定位精度。



(a) 单次测量数据



(b) 分段统计数据

图 9 对照组空间碎片位置测量精度仿真结果

Fig. 9 Measurement precision simulation results of space debris positions of the control group

其他 3 种工况下的仿真实验结果如图 10 所示。可以看到:测量精度与接收脉冲波束个数相关,

符合幂函数模型分布；随着接收脉冲波束的增加，空间碎片位置测量精度也逐渐提高；结合分段统计

结果分析，单次仿真接收脉冲波束个数 > 300 时，空间碎片位置测量精度趋于稳定。

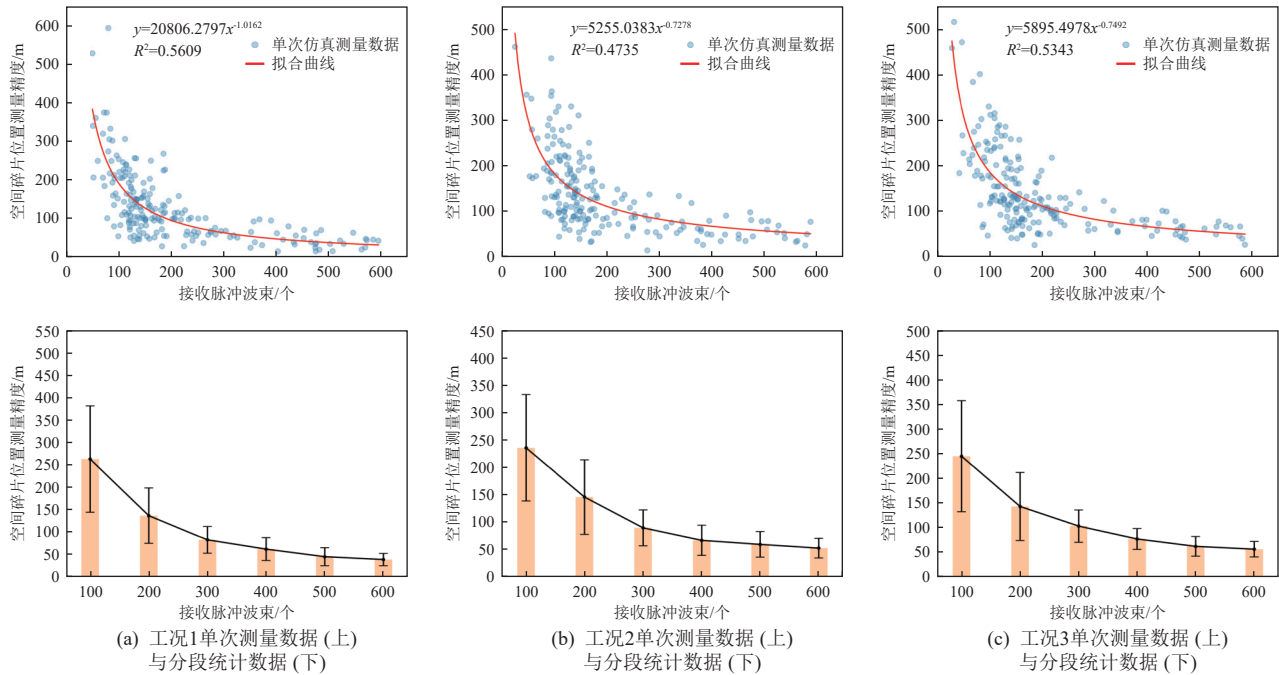


图 10 实验组空间碎片位置测量精度仿真结果

Fig. 10 Measurement precision simulation results of space debris positions of experimental groups

每个实验组 200 次重复实验后，分别统计接收脉冲波束在 0~100、200~300 和 500~600 区间的空间碎片位置测量精度，结果如表 2 所示。

表 2 空间碎片测量精度分析

Table 2 Space debris measurement precision analysis

| 接收脉冲波束 | 空间碎片位置测量精度/m | | | |
|---------|--------------|---------|---------|---------|
| | 对照组 | 工况1 | 工况2 | 工况3 |
| 0~100 | 4.979 | 262.130 | 235.127 | 244.548 |
| 200~300 | 5.272 | 81.779 | 88.956 | 103.228 |
| 500~600 | 6.886 | 37.802 | 52.059 | 56.697 |

仿真实验中，空间碎片的初始测量误差为 1000 m，采用天基激光探测系统对空间碎片的轨道进行观测的测量精度提升至 100 m 内。但是，由于仿真实验仅针对卫星平台及载荷存在的误差进行了分析，忽略了太空中的电磁噪声以及目标干扰、运动碎片抖动误差等影响，所以激光探测系统的测量精度仍存在不确定性因素，后续还需对复杂空间环境进行深入探讨和分析。

4 结束语

本文针对探测概率模型最优条件，利用天基激光探测仿真软件对不同工况下的卫星轨道测量误差、卫星平台测姿误差和激光载荷测量误差对空间

碎片测量精度的影响进行了仿真实验，结果表明：在平台的实时定轨精度优于 5.0 m、测姿角误差 < 1.0"、时间系统的同步误差 < 10 μs 以及接收脉冲波束 > 500 条件下，采用天基激光平台探测空间碎片的精度将由 km 量级提升至 60 m 以内。可见，激光辅助天基探测系统可显著提升空间碎片的轨道位置精度，可用于空间碎片精确定轨和预报。

本文研究为我国对空间碎片的监测和碰撞预警提供了一种有效途径。

参考文献 (References)

- [1] 王雪瑶. 国外空间目标探测与识别系统发展现状研究[J]. *航天器工程*, 2018, 27(3): 86-94
WANG X Y. Development status research of foreign space target detection and identification systems[J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, 27(3): 86-94
- [2] ZHANG H F, LONG M L, DENG H R, et al. Developments of space debris laser ranging technology including the applications of picosecond lasers[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(21): 10080
- [3] ZHANG Z P, YANG F M, ZHANG H F, et al. The use of laser ranging to measure space debris[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(2): 212-218
- [4] 姜云彬, 赵华, 郝刚刚, 等. “天基红外系统”高轨卫星构型分析与启示[J]. *航天器环境工程*, 2023, 40(2): 203-212

- JIANG Y B, ZHAO H, HAO G G, et al. Configuration analysis and enlightenment of high orbit satellite in the Space-Based Infrared System[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2023, 40(2): 203-212
- [5] 王宇, 马成, 彭博, 等. 天基红外预警卫星高精度协同目标跟踪方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2022, 30(2): 257-263
- WANG Y, MA C, PENG B, et al. High precision cooperation target tracking method for space-based infrared early-warning satellite[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2022, 30(2): 257-263
- [6] 黄普, 郭璞, 张国雪. 低轨卫星对高轨卫星仅测角初轨计算方法[J]. *飞行力学*, 2020, 38(1): 80-83
- HUANG P, GUO P, ZHANG G X. A method to calculate bearings-only initial orbit of high orbit satellite by low orbit satellite[J]. *Flight Dynamics*, 2020, 38(1): 80-83
- [7] PHIPPS C R, BONNAL C. A spaceborne, pulsed UV laser system for re-entering or nudging LEO debris, and re-orbiting GEO debris[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 118: 224-236
- [8] 曾小峰, 李松, 王吉, 等. 天基单光子激光雷达危险空间碎片探测仿真[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(10): 219-224
- ZENG X F, LI S, WANG J, et al. Detection simulation of dangerous space debris based on spaceborne single photon radar[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(10): 219-224
- [9] 单杰, 田祥希, 李爽, 等. 星载激光测高技术进展[J]. *测绘学报*, 2022, 51(6): 964-982
- SHAN J, TIAN X X, LI S, et al. Advances of spaceborne laser altimetry technology[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 964-982
- [10] 曹秋生. 成像激光雷达的无人机载技术探讨[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 18-25
- CAO Q S. Technical discussion on imaging lidars as UAV payloads[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 18-25
- [11] 程兆谷, 王润文. 高斯光束低阶模焦点能量的相对分布[J]. *中国激光*, 1986(6): 321-327
- CHENG Z G, WANG R W. Relative distribution at focal plane of low-order modes for Gaussian laser beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1986(6): 321-327
- [12] LI S N, LI C K, ZHANG G, et al. Geometric calibration of satellite laser altimeters based on waveform matching[J]. *The Photogrammetric Record*, 2021, 36(174): 104-123
- [13] 侯利冰, 黄庚华, 况耀武, 等. 光子计数激光测距技术研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(18): 5186-5190
- HOU L B, HUANG G H, KUANG Y W, et al. Research of photon counting laser ranging technology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(18): 5186-5190
- [14] MILSTEIN A B, JIANG L A, LUU J X, et al. Acquisition algorithm for direct-detection lidars with Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(2): 296-311
- [15] GATT P, JOHNSON S, NICHOLS T. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(17): 3261-3276
- [16] 杨子健, 陈锋, 李抄, 等. 微脉冲激光雷达中的光子计数死区时间瞬态效应[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 408-414
- YANG Z J, CHEN F, LI C, et al. Transient effect of dead time of photon-counting in micro-pulse lidar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 408-414
- [17] 唐新明, 陈继溢, 李国元, 等. 资源三号 02 星激光测高误差分析与指向角粗标定[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(11): 1611-1619
- TANG X M, CHEN J Y, LI G Y, et al. Error analysis and preliminary pointing angle calibration of laser altimeter on Ziyuan-3 02 satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1611-1619
- [18] 袁利, 王苗苗, 武延鹏, 等. 空间星光测量技术研究发展综述[J]. *航空学报*, 2020, 41(8): 7-18
- YUAN L, WANG M M, WU Y P, et al. Development of space starlight measurement technology: review[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(8): 7-18
- [19] 黄朝围, 李国元, 李姗姗, 等. 不同地形条件下的星载激光测高系统误差分析[J]. *测绘科学*, 2016, 41(1): 44-49
- HUANG C W, LI G Y, LI S S, et al. Error analysis of satellite laser altimeter system under different terrain conditions[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(1): 44-49
- [20] 赵朴凡, 马跃, 伍煜, 等. 基于自然地表的星载光子计数激光雷达在轨标定[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(11): 86-94
- ZHAO P F, MA Y, WU Y, et al. Spaceborne photon-counting LiDAR on-orbit calibration based on natural surface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 86-94

(编辑: 许京媛)

一作简介: 李少宁, 副教授, 主要从事激光测高卫星数据处理技术研究。

*通信作者: 贺涛, 高级工程师, 主要从事航空航天科学和技术的研究。