文章编号:1001-9014(2025)06-0991-09 DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2025.06.017

基于小天体特征的混合固态激光雷达系统地形测绘验证方法

张庆藩[1], 谢 欢[1,2*], 晏雄锋[1], 金雁敏[1], 陈 杰[1], 奚源廷[1], 谢 俊[1], 马月超[3,4], 朱飞虎[3,4*], 童小华[1,2]

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院,上海 200092;
2. 同济大学 上海市航天测绘遥感与空间探测重点实验室,上海 200092;
3. 北京控制工程研究所 空间光电测量与感知实验室,北京 100190;
4. 中国空间技术研究院,北京 100094)

摘要:本文介绍了一种专用于探测快速自转小天体的混合固态激光雷达系统,并根据其多快反镜、单光子面阵探测的特性进行测距原理分析和成像模型构建,为评估其在小天体探测中的性能和稳定性,提出一种基于小天体特征外场沙盘的测绘验证方法。结果显示,混合固态激光雷达系统可以在不同工作模式和功率下保持较高的精度,在全球地形测绘模式下分辨率达到1 100×1 100,成像时间为0.86 s,在100 m距离下的测绘精度达到2.86 cm;在步进扫描模式下,其分辨率约为前者的1/7,在34~83 m距离下平均精度达到3.10 cm。

关 键 词:激光雷达;地形测绘;三维成像;小天体探测
中图分类号:TN958.98 **文献标识码**:A

Terrain mapping validation method for a hybrid solid-state LiDAR system based on small celestial body features

ZHANG Qing-Fan[1], XIE Huan[1,2*], YAN Xiong-Feng[1], JIN Yan-Min[1], CHEN Jie[1], XI Yuan-Ting[1], XIE Jun[1], MA Yue-Chao[3,4], ZHU Fei-Hu[3,4*], TONG Xiao-Hua[1,2]

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Space Mapping and Remote Sensing for Planetary Exploration, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Space Optoelectronic Measurement and Perception Lab., Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;
4. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: A hybrid solid-state LiDAR system specifically designed for detecting rapidly rotating small celestial bodies was introduced. The ranging principle was analyzed and an imaging model was designed based on the characteristics of the fast steering mirrors and the single-photon array detector. To evaluate the performance and stability of the LiDAR system in small celestial body detection, a mapping validation method based on an outdoor terrain model simulating small celestial body features was proposed. The results show that the hybrid solid-state LiDAR system maintains high accuracy under different operating modes and power levels. In the global terrain mapping mode, the resolution was 1 100×1 100, and the imaging time was 0.86 s. The mapping accuracy was 2.86 cm at a distance of 100 m. In the step-scanning imaging mode, the resolution was approximately one-seventh that of the global terrain mapping mode, and the

收稿日期:2025-03-29,**修回日期**:2025-04-22 **Received date**:2025-03-29,**Revised date**:2025-04-22
基金项目:国家自然科学基金项目(42325106、42271455、42221002);上海市教育委员会科研创新计划自然科学重大项目(2023ZKZD30);上海市优秀学术带头人计划(23XD1404100);中央高校基本科研基金
Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (42325106, 42271455, 42221002); the Major Natural Science Projects under the Research and Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (2023ZKZD30); the Shanghai Academic Research Leader Program (23XD1404100); and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China
作者简介(Biography):张庆藩(1997—),男,辽宁鞍山人,博士研究生,主要从事激光雷达与小天体测绘方面的研究. E-mail: zhangqingfan@tongji.edu.cn
*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: huanxie@tongji.edu.cn;zhufeihu1986@163.com

average accuracy reached 3. 10 cm at distances ranging from 34 m to 83 m.
Key words: LiDAR, terrain mapping, three-dimensional imaging, small celestial body detection

引言

深空探测任务有助于深化人类对宇宙的理解，推动科学认知的不断拓展[1]。小天体研究对揭示太阳系早期演变机制、预防潜在的小行星撞击风险具有重要意义，因此越来越多的研究团队投身于这一领域[2]。小天体指太阳系内的一系列小型天体，包括小行星、彗星、流星和其他星际物质等[3]。小行星通常具有形状不规则、旋转情况复杂、反射特性多变等特点，为高精度地形测绘和快速成像带来了挑战[4]。激光雷达技术以其高分辨率、高灵敏度和非接触测量的独特优势，被广泛应用在远距离探测任务中[5-7]。同时，激光雷达还能使探测器在低照度环境下对未知地形进行测绘和导航，成为获取小行星表面三维数据的核心手段[8]。

在现有的深空探测任务中，探测器的稳定运行不仅依赖激光技术在远距离测量和微弱信号探测方面的优异性能，也得益于在地面测绘试验与理论建模分析基础上所进行的反复验证与优化。以OSIRIS-REx航天器为例，其搭载的激光测距仪(OLA)在地面经过多轮测试，对光照干扰、温度骤变等极端环境的工作性能进行了充分验证[9]；日本隼鸟二号(Hayabusa2)探测器装配的激光雷达在发射前进行了多次地面实验，对激光雷达系统在不同姿态、不同目标反射率条件下的工作状态进行了高精度标定和性能评估[10]。火星轨道激光高度计(Mars Orbiter Laser Altimeter, MOLA)作为早期的火星探测激光高度计，同样进行了充分的地面验证[11]。这些案例说明，对激光扫描仪进行充分的地面验证实验，对其光学组件和数据处理流程进行验证，能够确保其在复杂的深空环境中获得稳定且高精度的数据。

尽管上述系统在实际任务中取得了良好效果，其地形测绘能力在发射前多依赖实验室标定、简化场景测试或飞行后数据交叉验证，缺乏面向真实复杂地形的系统性验证手段。例如，OLA在地面阶段主要通过安置固定距离下的平面靶标进行精度校准，此外还借助远距离建筑物(0. 9~1. 2 km)开展室外对准测试，虽然一定程度上验证了其指向精度与测距性能，但仍未进行对真实地形结构测绘的全面评估[12]。隼鸟二号的激光雷达也采用标准地面标定与在轨图像比对的方式实现姿态校准，但在应对地形曲面复杂、光照条件不稳定等情况时，仍缺乏针对性的模拟测试与评估[13]。这些验证方法难以还原深空环境下的成像条件，尚未形成面向小天体地形特征的测试方法。为此，亟需设计具备高地形相似度与测试灵活性的地面验证实验平台，针对小天体表面特征进行精细还原与系统性评估，以提升激光雷达系统在真实深空任务中的适应性与可靠性。

在探索快速自转小天体的需求背景下，中国国家航天局(CNSA)研发出一种混合固态激光雷达系统。该系统将单光子探测技术、衍射光栅以及快反镜(Fast-Steering Mirrors, FSM)等先进光学器件相结合，可在有限体积和质量的约束下，实现对目标的高速率与高帧率扫描[14]。该系统将用于探测近地小天体2016HO3，协助航天器的绕飞探测与附着采样[15]。相比传统的机械转镜式激光雷达，混合固态激光雷达系统利用衍射光栅和快反镜等元件，能够在保持较高探测精度的同时显著提升扫描效率。此外，单光子探测技术则使得系统在光照复杂的环境中依旧能够获得清晰的回波信号[16]。这些优势使混合固态激光雷达系统在面对自转特性与光照环境均不确定的小天体目标时，依旧具备较强的成像能力和导航辅助功能，能够在小天体飞掠、绕飞及着陆过程中提供关键的实时地形信息。

然而，混合固态激光雷达系统新颖的结构设计和独特的工作模式对成像建模、测绘验证以及数据处理解算工作产生了更高需求。此外，小天体表面的独特反射率、复杂的地形和曲率、太阳光的噪声干扰等因素，都需要在地面阶段进行针对性的模拟与测试[17]。为此，本研究在系统分析混合固态激光雷达系统成像原理的基础上，针对其单光子面阵探测特性构建了能够反映其多快反镜扫描所产生的光束空间分布的成像模型；同时提出了一种基于小天体表面特征的地面测绘验证方法，通过构建具有高相似度的仿真沙盘，实现了系统在复杂地形条件下的测试。结合理论建模与外场测绘结果分析，一方面可评估混合固态激光雷达系统在不同环境条

件下的性能和适用范围,另一方面也可根据评估结果对系统各模块进行有针对性的优化。

综上所述,研究旨在围绕混合固态激光雷达系统在小天体探测任务中面临的成像建模与地面测绘验证挑战展开深入研究。在分析其工作原理的基础上,充分考虑系统中多快反镜结构与单光子面阵探测机制,建立了适配其成像特性的几何模型;同时,结合深空探测的实际需求,提出一种基于小天体特征沙盘的测绘验证方法,分析小天体2016HO3的潜在特征,设计出高相似度的仿真沙盘作为外场测试平台。在此基础上,开展了覆盖多工作模式、多测距距离与不同发射功率条件的实验,完成了对系统测绘精度与稳定性的系统评估。通过构建"建模 - 仿真 - 验证"一体化的技术路径,研究成果不仅为后续小天体探测与采样返回任务提供了重要支撑,也为深空任务中激光雷达系统的地面验证提供了可复用的方法框架。

1　混合固态激光雷达系统

1.1　系统设计

混合固态激光雷达系统由三个主要部分构成:发射单元、接收单元以及二维音圈电机快反镜单元。发射单元由光纤激光器和一个达曼衍射光栅(Dammann Grating)组成。鉴于小天体2016HO3可能呈现较为复杂的表面光谱特征,选择波长为532 nm的激光作为探测波段[14]。达曼光栅作为一种常用的相位光栅,将发射光束衍射为32×32的均匀子光束。接收单元由望远镜系统和32×32单光子面阵探测器(Single-Photon Avalanche Diodes,SPADs)构成,用于收集来自目标表面的散射回波。图1展示了混合固态激光雷达的系统结构与两种工作模式。在图像处理单元(Image Processing Unit)的指令下,激光发射单元发射532 nm的光束,最高可在0.86 s内发射43,000个激光脉冲。激光束经达曼光栅衍射后,形成32×32的二维激光阵列,经过快反镜反射后照射在小天体表面。

对于接收单元,来自天体表面的散射光束通过望远镜系统传输至32×32单光子探测器阵列,在现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array)的控制下,利用时间飞行原理(Time of Flight, TOF)实现1 024个激光照射点的距离测量。单光子阵列探测器共有1 024个探测单元,每个单元都具有独立的时间-数字转换器(Time-to-Digital Converter, TDC)计时电路,并独立进行光子计数。TDC计时电路用于测量激光脉冲发射与检测到回波光子的精确时间间隔,从而进行距离计算。对于面阵单光子激光雷达,每个探测单元的每一帧可以对多个光子进行计数,大大增加了光子检测的灵敏度和距离测量的准确性。每帧开始时会出现短暂的停顿,随后每个探测单元对帧内的多个光子进行独立计数。当探测单元检测到光子时,计数器会递增,SPAD复位。这一迭代过程一直持续到每一帧结束,随后进行数据传输。

二维音圈电机快反镜单元主要负责精确控制发射光束的角度。混合固态激光雷达系统配有两个快反镜:小快反镜用于对初始光束方向进行细调,以确保光束准直;大快反镜则可以控制系统的工作模式,使其既能进行精细的地形测绘又可以实现高效率的在轨导航。根据大快反镜的不同摆动方式,混合固态激光雷达系统主要支持两种模式:全球地形测绘模式(MODE-A)和步进扫描模式(MODE-B)。在MODE-A中,大快反镜沿着x轴方向进行往复连续扫描,生成周期性的三角波信号,沿y轴方向进行大角度阶跃,最终完成对目标区域的亚像素扫描,达到1 100×1 100的高分辨率。该模式常用于高精度的地形测绘。在MODE-B中,大快反镜以离散步进方式进行扫描,不再进行亚像素扫描,使得激光阵列以更大的角度间隔进行移动,其成像分辨率约为MODE-A的1/7。这种模式适用于快速扫描场景,能够在更短时间内完成成像,通常被用于导航任务。

表1展示了混合固态激光雷达系统的具体参数。该系统可在5~600 m的测绘范围内工作,视场为6.5°×6.5°,并能在MODE-A模式下实现1 100×1 100的高分辨率成像。其整体重量仅约4.0 kg,便于在多种环境和平台上灵活部署。单光子阵列探测器的规模为32×32,在532 nm波长下的光子探测效率可达20%以上,同时具备最高300 kHz的读取帧频,确保了系统在高帧率与高分辨率条件下的稳定数据采集与处理能力。这些参数共同支撑了系统在小天体探测、地形测绘及导航等领域的应用潜力。

1.2　成像原理

混合固态激光雷达系统的光路结构如图2所示。激光束由发射单元发射,由小快反镜进行俯仰方向的微调,随后通过衍射光栅,均匀分成32×32个子光束。激光束阵列经45°镜反射后再由大快反镜

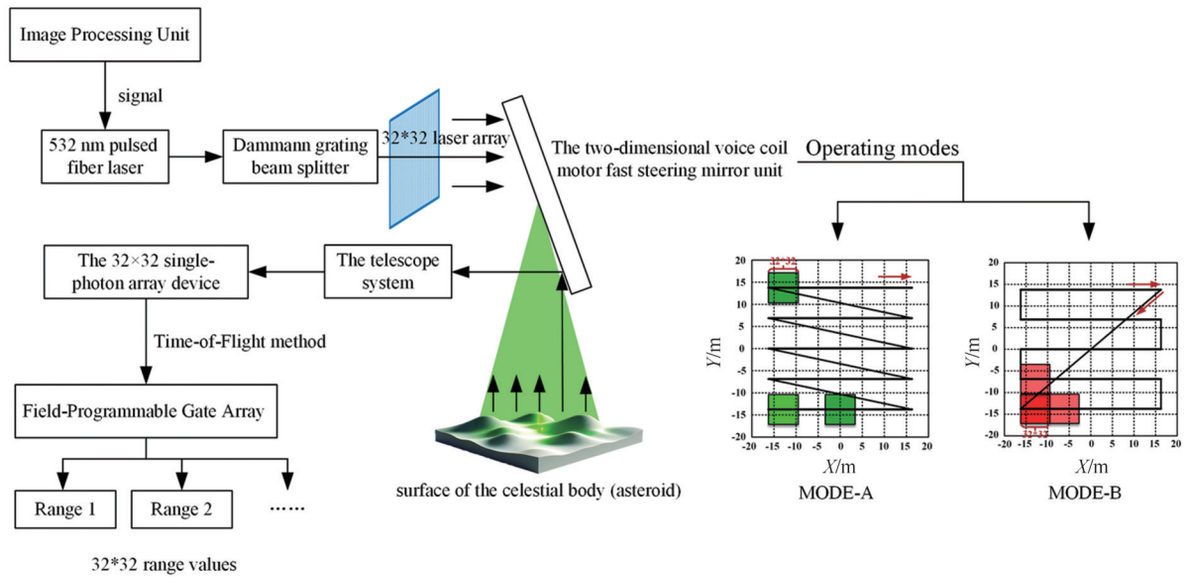

图1 混合固态激光雷达系统结构与工作模式[14]

Fig. 1 System structure and operating modes of the hybrid solid-state LiDAR system[14]

表1 混合固态激光雷达系统参数[14]

Table 1 Parameters of the hybrid solid-state LiDAR system[14]

指标	参数
测绘距离/m	5~600
视场/°	6.5×6.5
成像分辨率(MODE-A)	1 100×1 100
系统重量/kg	4.0
阵列探测器尺寸	32×32
光子探测效率	≥20% @532 nm
最大读取帧频/kHz	300

反射,最终照射在待测目标表面。O_a、O_b、O_c分别表示三块反射镜的中心点,B是衍射光栅的中心点。a表示发射单元到小快反镜中心点的距离,b_1表示小快反镜中心点到光栅中心点的距离,b_2表示光栅中心点到45°镜中心点的距离,d表示45°镜中心点到大快反镜中心点的距离。B'表示光束经小快反镜反射后照射在衍射光栅上的点,P_1表示光栅所发射的第p行q列个子光束照射在45°反射镜上的位置(其中p和q的取值范围均为1到32),P_2表示该光束照射在大快反镜上的位置,P表示该光束照射在待测目标表面的位置。

在混合固态激光雷达系统中,采集到的原始数据主要包括测距值r以及大快反镜沿其x轴和y轴方向上的偏转角(θ_x, θ_y)。对于每次激光脉冲,单光子探测器阵列会记录1 024个独立测量点,因此每个子光束的原始数据记为$(r_{pq}, p, q, \theta_x, \theta_y)$。对于第$p$行$q$列的子光束,测距值$r_{pq}$的计算公式如下:

$$r_{pq} = A - B_{pq} - d_{\text{inner}} \quad , \quad (1)$$

其中,A表示从发射单元到目标的总距离;B_{pq}表示从TDC计时电路接收该子光束的光子雪崩信号到其终止的时间间隔所对应的距离;d_{inner}为系统内部将种子光转换为出射光的固有延迟。

激光从发射单元照射到待测目标表面的过程可被分为五部分:AO_a、O_aB'、$B'P_1$、P_1P_2、P_2P。在此前的研究中,已经对该系统的成像模型进行了具体的推导,以大快反镜中心点O_c为原点,大快反镜的两轴为X、Y轴建立右手坐标系O_c-XYZ。假设经光栅衍射后的激光阵列中第p行、第q列光束的单位方向向量为(l, m, n),则该激光束从大快反镜到待测目标表面的距离P_2P的公式如下:

$$d_{P_2P} = r_{pq} - a - \frac{b_1}{\cos 2\alpha} - \sqrt{(X_{P_1} - X_{B'})^2 + (Y_{P_1} - Y_{B'})^2 + (Z_{P_1} - Z_{B'})^2} - \sqrt{(X_{P_1} - X_{P_2})^2 + (Y_{P_1} - Y_{P_2})^2 + (Z_{P_1} - Z_{P_2})^2} \quad , \quad (2)$$

其中,α表示此时小快反镜的偏转角度。根据反射定律,直线P_2P的单位方向向量可以表示为:

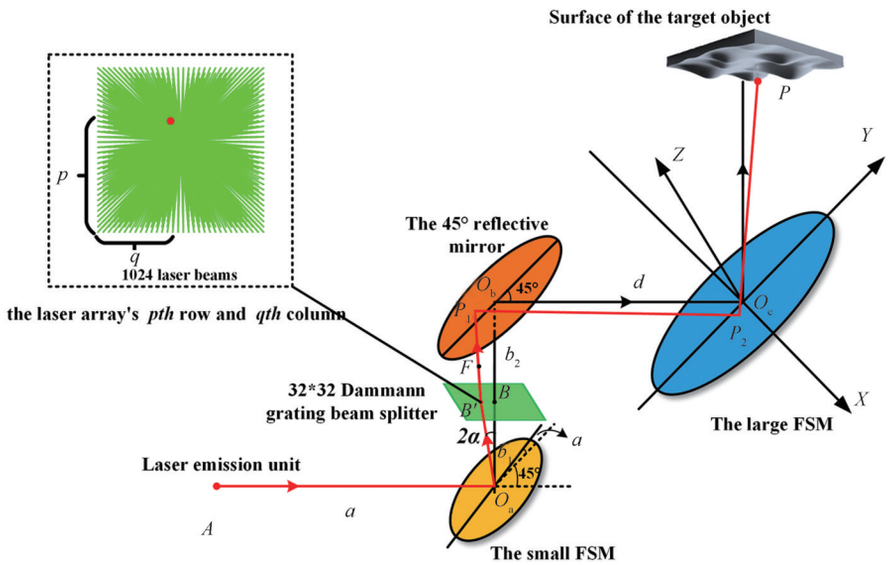

图2　混合固态激光雷达系统光路结构

Fig. 2　Optical geometry of the hybrid solid-state LiDAR system

$$\overrightarrow{P_2P}=\begin{bmatrix} n_{x_{P_2P}} \\ n_{y_{P_2P}} \\ n_{z_{P_2P}} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} l-2\dfrac{\tan\theta_x}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}\left(l\dfrac{\tan\theta_x}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}+m\dfrac{\tan\theta_y}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}-n\dfrac{1}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}\right) \\ m-2\dfrac{\tan\theta_y}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}\left(l\dfrac{\tan\theta_x}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}+m\dfrac{\tan\theta_y}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}-n\dfrac{1}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}\right) \\ -n-2\dfrac{1}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}\left(l\dfrac{\tan\theta_x}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}+m\dfrac{\tan\theta_y}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}-n\dfrac{1}{\sqrt{\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y+1}}\right) \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中，$n_{x_{P_2P}}$、$n_{y_{P_2P}}$、$n_{z_{P_2P}}$分别表示$\overrightarrow{P_2P}$在三轴上的分量。　则P_2的坐标$(X_{p_2}, Y_{p_2}, Z_{p_2})$的计算公式如下：

$$\begin{cases} X_{p_2}=X_F+\dfrac{l}{n}\left(\dfrac{\sqrt{2}}{2}d-Z_F\right)+\dfrac{l}{m}\left(Y_{p_2}-Y_F-\dfrac{m}{n}\left(\dfrac{\sqrt{2}}{2}d-Z_F\right)\right) \\ Y_{p_2}=\dfrac{-n_x{*}X_F+\dfrac{l}{n}\left(\dfrac{\sqrt{2}}{2}d-Z_F\right)+n_x{*}\dfrac{l}{m}\left(Y_F+\dfrac{m}{n}\left(\dfrac{\sqrt{2}}{2}d-Z_F\right)\right)-\dfrac{\sqrt{2}}{2}d{*}n_z-n_z{*}\dfrac{n}{m}\left(Y_F+\dfrac{m}{n}\left(\dfrac{\sqrt{2}}{2}d-Z_F\right)\right)}{n_x{*}\dfrac{l}{m}+n_y-n_z{*}\dfrac{n}{m}} \\ Z_{p_2}=\dfrac{\sqrt{2}}{2}d+\dfrac{n}{m}\left(Y_F+\dfrac{m}{n}\left(\dfrac{\sqrt{2}}{2}d-Z_F\right)-Y_{p_2}\right) \end{cases} \tag{4}$$

最终，在空间坐标系O_c-XYZ中，点$P(X_p, Y_p, Z_p)$的坐标可由下式计算：

$$\begin{cases} X_p=X_{p_2}+d_{P_2P}{*}n_{x_{P_2P}} \\ Y_p=Y_{p_2}+d_{P_2P}{*}n_{y_{P_2P}} \\ Z_p=Z_{p_2}+d_{P_2P}{*}n_{z_{P_2P}} \end{cases} \tag{5}$$

2　实验与结果分析

2.1　沙盘设计

完成混合固态激光雷达系统的成像建模与室内测试后，对系统的测距测角误差进行修正。随后设计外场沙盘测绘实验和模拟导航实验，以验证系统的精度表现和数据采集的稳定性。考虑到2016HO3的独特结构，提出一种基于外场沙盘的测绘验证方法，该沙盘具有与小行星2016HO3相似的地形特征。沙盘的设计流程如图3所示。

根据已有研究对2016HO3的椭球参数猜测[18]，选取其三轴比为$b/c=1$，$b/a=0.479$作为2016HO3的椭球仿真输入，并将该椭球按照与小行星Bennu拟合椭球长半轴相同的尺度进行缩放，最终获得三轴长度分别为a=250.000 7 m，b=c=120.192 7 m。在此基础上，对仿真椭球表面各点进行高斯曲率计算，计算公式如下：

$$K=\frac{LN-M^2}{EG-F^2} \tag{6}$$

其中，L、M和N是二阶导数的系数，E、F和G是第一基本形式系数。

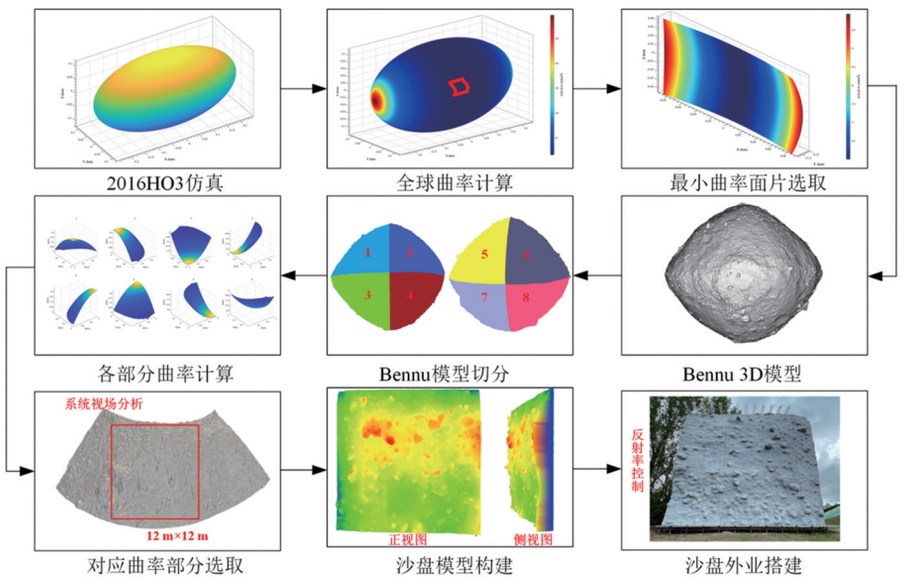

图3 外场实验沙盘设计流程图

Fig. 3 Flowchart of the design process for the outdoor terrain model

结果显示，椭球在中部区域的曲率较小，沿长轴向两端逐渐增大；故选取椭球曲率最小的区域（如图所示区域）作为后续沙盘设计的曲率参照区域。为在实际可获取的数据中寻找与该区域具有相似曲率特征的真实地形，利用小天体测绘工具（Small Body Mapping Tool，SBMT v0.8.4.5）获取Bennu小行星的公开三维模型，并将其分割为八个部分。随后对各部分进行高斯曲率计算，并以该值为控制指标，筛选出与仿真椭球参照区域最为接近的地形区域。最终选定的Bennu地形区域，其高斯曲率相较于仿真椭球参考区域的相对误差低于2%，可有效作为实验的代表性地形。最后，通过以下公式计算其在Bennu坐标系下的经纬度范围：

$$\begin{cases} L = \arccos\left(\dfrac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \\ B = \arctan\left(\dfrac{z}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \\ H = \sqrt{x^2+y^2+z^2} \end{cases}, \quad (7)$$

其中，L表示经度（-180°~180°），B表示纬度（-90°~90°），H表示高程。

基于混合固态激光雷达系统在100 m测距范围内6.5°×6.5°视场所对应的测绘面积，裁剪出12 m×12 m的区域，确保其曲率分布与2016HO3选定区域相近且具备明显特征，将其作为本次外场实验的沙盘模型。在实际搭建沙盘时，将其表面反射率控制在0.2左右，以尽可能接近对2016HO3反射率的相关推测。此方法可在一定程度上模拟小行星真实的地表情况，从而为后续激光雷达测绘实验提供更具代表性的测试场景。

2.2 测绘验证实验

使用混合固态激光雷达系统的MODE-A工作模式开展扫描实验，获取完整的沙盘点云，并评估其在模拟2016HO3地形条件下的测绘精度。为提升点云的精度，根据系统的角度分辨率对数据进行网格化处理，如图4(a)所示。首先以系统角度分辨率为划分单元建立二维平面网格，将阵列探测器接收到的回波光子按照网格进行分类，即每个网格中包含多个脉冲序列的回波光子。取网格内所有回波光子x、y坐标的平均值来表示该网格的平面位置；随后，对网格内回波光子的z值进行直方图分析，并将其峰值用作该网格的测量z值。实验过程中系统工作在高信噪比条件下，并引入测量值滤波进行数据预处理，从而抑制噪声干扰，提高峰值稳定性。由于测试目标为静态沙盘，回波信号形态清晰，未出现多重回波干扰，峰值提取方法适用性良好。未来在复杂目标或远距离探测中，可进一步结合回波拟合与多峰筛选等手段提升测距鲁棒性。

为验证结果的准确性，本研究选取RIEGL VZ2000所测量的沙盘点云作为参考真值，并对系统测得的点云与参考真值进行误差分析与精度对比。图4(b)为混合固态激光雷达系统所测得的点云，图4(c)展示了两种点云的侧视对比图。为保证实验严

谨性,混合固态激光雷达系统在不同激光发射功率(不同回波光子数)条件下采集18组点云,并分别评估其测绘精度。图4(d)和图4(e)显示了各测例的精度变化情况:在不同的测例中,混合固态激光雷达系统所采集点云的平均三倍标准差为2.86 cm,均方根误差(RMSE)为1.47 cm,整体误差变化幅度较小,表现出良好的稳定性。结果证明,混合固态激光雷达系统在中距离场景测绘时能够维持稳定的精度,且其性能未因回波光子数的变化而出现显著波动,能够满足小天体地形测绘任务对精度与可靠性的要求。

2.3　导航验证实验

为评估混合固态激光雷达系统的导航精度,在不同观测距离下采用系统的MODE-B工作模式对沙盘进行了多组扫描实验。通过改变测距距离,以模拟探测器在导航下降过程中的工作状态,从而在模拟2016HO3地形环境中对系统的导航能力进行评估。为降低实验过程中环境因素对测量精度的影响,沙盘材料的反射率控制为0.2,以接近2016HO3的实际表面反射特性。此外,为避免太阳光照变化造成干扰,所有数据采集均在夜晚条件下进行。在每次测量前,对激光雷达系统进行性能自检以确保仪器状态一致。实验共选取了六个观测距离(如表2所示),对每个观测距离分别利用混合固态激光雷达系统与RIEGL VZ2000获取点云数据以进行精度分析。为实现各观测距离点云数据的对比与精度评价,在每个测例中分别使用全站仪测量沙盘上布设的控制点与混合固态激光雷达系统上的标志点。通过配准控制点与激光雷达标志点坐标,将混合固态激光雷达系统采集的点云数据和RIEGL VZ2000的点云数据统一至混合固态激光雷达系统坐标系O_c-XYZ。同时,考虑到姿态变化对测量精度的潜在影响,实验中使用稳固的三维安装平台,确保激光雷达系统始终以垂直姿态朝向沙盘表面。

表2　观测距离

Table 2　Observation distance

测例	D1	D2	D3	D4	D5	D6
距离/m	83	73	63	54	44	34

图5(a)显示了混合固态激光雷达系统测得的六组点云,图5(b)为六组测量点云与真值点云的对比。表3显示了不同距离下混合固态激光雷达系统测量点云的精度,六组数据三倍标准差的平均值为3.10 cm,且系统的精度并未因距离的变化而出现显著波动。实验结果表明,混合固态激光雷达系统可

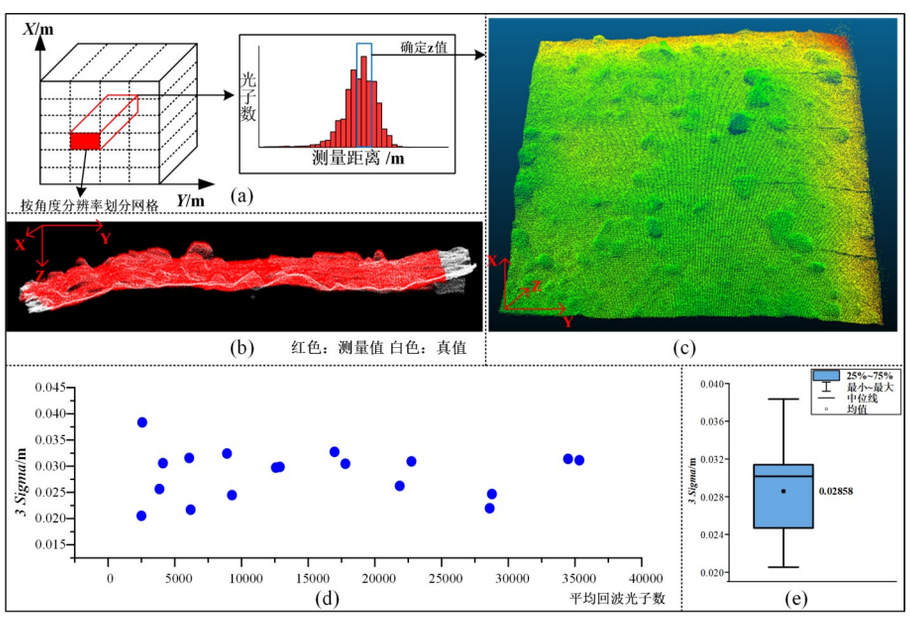

图4　(a)点云网格化与回波光子直方图;(b)混合固态激光雷达系统测量点云与真值点云对比侧视图;(c)测量点云与真值点云对比正视图;(d)不同测例的精度对比(散点图);(e)不同测例的精度分析(箱式图)

Fig. 4　(a) Point cloud gridding and photon histogram; (b) comparison between the point clouds derived from the hybrid solid-state LiDAR system and the real point clouds (side view); (c) comparison between the measured point clouds and the real point clouds (front-view); (d) accuracy comparison of different cases (scatter plot); (e) accuracy analysis of different cases (box plot)

在不同距离下保持高精度测绘性能，满足小天体导航任务的需求。

表3 不同距离下混合固态激光雷达系统测量点云精度评价

Table 3 Accuracy assessment of point clouds derived from the hybrid solid-state LiDAR system at different distances

测例	D1	D2	D3	D4	D5	D6
三倍标准差(cm)	3.34	2.58	2.84	2.96	2.90	3.92

3 结论

研究针对小天体探测中对高精度地形信息的需求，对一种专用于探测快速自转小天体的混合固态激光雷达系统进行理论分析，并验证其在多种工作模式下的测绘与导航性能。首先对系统采集数据的过程进行原理分析，并针对其特有的单光子阵列探测与多快反镜结构设计成像模型。随后提出一种基于小天体2016HO3特征外场沙盘的测绘验证方法，利用沙盘对系统进行了多距离、多功率、多模式的测试。

结果表明，在30~100 m的测绘距离下，混合固态激光雷达系统在全球测绘模式和步进扫描模式下均能获得亚分米量级的测距精度，其三倍标准差与均方根误差随回波光子数或测量距离的变化幅度较小，依旧维持了对目标位置与形变特征的高探测灵敏度，展现出良好的精度。实验证明了混合固态激光雷达系统在应对复杂多变的深空环境以及高曲率、低反射率的小行星表面特性时，能够表现出良好的适用能力。混合固态激光雷达系统结合单光子面阵探测与多快反镜等技术手段，能够在重量与功耗较小的情况下实现较大视场与高分辨率的扫描，并具备一定的抗外界干扰能力。总体而言，研究所提出的测绘验证方法有效弥补了传统方法在模拟真实小天体地表特征方面的不足，为混合固态激光雷达在深空探测与小天体采样返回任务中的广泛应用奠定了坚实技术基础。

References

[1] Yu D Y, Ma J N. Progress and prospect of deep space exploration in China [J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(1): 17-27.
于登云, 马继楠. 中国深空探测进展与展望 [J]. 前瞻科技, 2022, 1(1): 17-27.

[2] Azadmanesh M, Roshanian J, Hassanalian M. On the importance of studying asteroids: A comprehensive review [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2023, 142(10): 100957.1-100957.27.

[3] Li C, Wang C, Wei Y, et al. China's present and future lunar exploration program [J]. Science, 2019, 365(6450): 238-239.

[4] Ye P, Peng J. Deep space exploration and its prospect in China [J]. Engineering Science, 2006, 8(10): 13-18.
叶培建, 彭兢. 深空探测与我国深空探测展望 [J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 13-18.

[5] Lopac N, Jurdana I, Brnelić A, et al. Application of laser systems for detection and ranging in the modern road transportation and maritime sector [J]. Sensors, 2022, 22(16): 5946.

[6] Lai Z, Jia Z, Guo S, et al. Extrinsic calibration for multi-LiDAR systems involving heterogeneous laser scanning models [J]. Optics Express, 2023, 31(26): 44754-44771.

[7] Liu H B, Li M, Wang F X, et al. A high accuracy multi-beam Lidar system and its verification on several photons [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(4): 535-541.

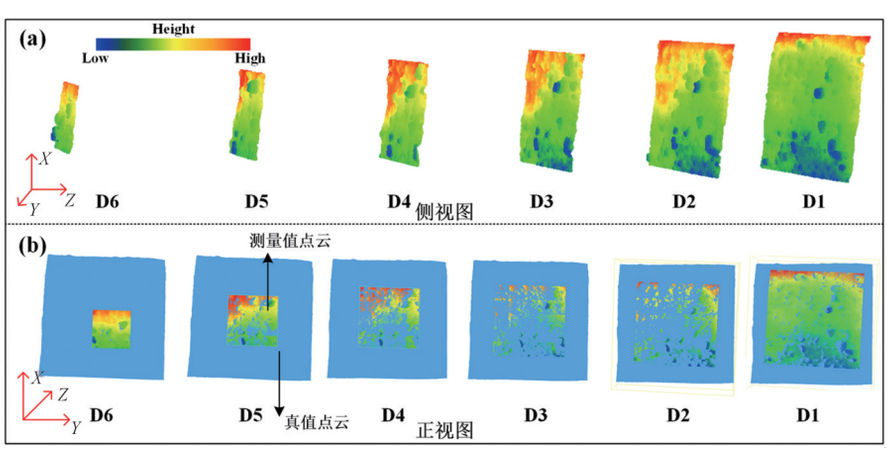

图5 (a)不同距离下混合固态激光雷达系统测量点云(侧视图);(b)测量点云与真值点云对比(正视图)

Fig. 5 (a) Point clouds derived from the hybrid solid-state LiDAR system at different distances (side view); (b) comparison between the measured point clouds and the real point clouds (front view)

刘鸿彬, 李铭, 王凤香, 等. 一种少光子高精度多波束激光雷达系统及验证 [J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(4): 535-541.

[8] Seabrook J, Daly M, Barnouin O, et al. Global shape modeling using the OSIRIS-REx scanning laser altimeter [J]. Planetary and Space Science, 2019, 177: 104688.

[9] Werner R A, Scheeres D J. Exterior gravitation of a polyhedron derived and compared with harmonic and mascon gravitation representations of asteroid 4769 Castalia [J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 1996, 65: 313-344.

[10] Kawaguchi J I, Fujiwara A, Uesugi T. Hayabusa—Its technology and science accomplishment summary and Hayabusa-2 [J]. Acta Astronautica, 2008, 62(10/11): 639-647.

[11] Salamunićcar G, Lončarić S. Open framework for objective evaluation of crater detection algorithms with first test-field subsystem based on MOLA data [J]. Advances in Space Research, 2008, 42(1): 6-19.

[12] Daly M, Barnouin O, Dickinson C, et al. The OSIRIS-REx laser altimeter (OLA) investigation and instrument [J]. Space Science Reviews, 2017, 212: 899-924.

[13] Noda H, Senshu H, Matsumoto K, et al. Alignment determination of the Hayabusa2 laser altimeter (LIDAR) [J]. Earth, Planets and Space, 2021, 73: 1-15.

[14] Guo S G, Li L, Zhu F H, et al. Integrated design method for laser topographic mapping and navigation of small celestial bodies [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(4): 417-426.

[15] Wang X, Liu J J. Analyses of the environmental characteristics of asteroids and the current research state [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(6): 533-541.
王兴, 刘建军. 小行星环境特性分析与研究现状 [J]. 航天器环境工程, 2019, 36(6): 533-541.

[16] Yang J, Ma Y, Yu W B, et al. Noise model of oceanic spaceborne photon counting Lidar [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2024, 43(3): 393-398.
杨坚, 马跃, 于文博, 等. 星载单光子激光雷达海洋噪声模型 [J]. 红外与毫米波学报, 2024, 43(3): 393-398.

[17] De La Fuente Marcos C, De La Fuente Marcos R. Asteroid (469219) 2016 HO3, the smallest and closest Earth quasi-satellite [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 462(4): 3441-3456.

[18] Li X, Scheeres D J. The shape and surface environment of 2016 HO3 [J]. Icarus, 2021, 357: 114249.