

小天体激光地形测绘与导航一体化设计方法

郭绍刚^{1,2}, 李林^{1,2}, 朱飞虎^{1,2}, 王立^{1,2}, 张运方^{1,2}, 赵琴^{1,2}, 郑岩^{1,2},
马月起^{1,2}, 张恒康^{1,2}

(1. 北京控制工程研究所 空间光电测量与感知实验室 北京 100190; 2. 中国空间技术研究院 北京 100094)

摘要: 针对小天体探测高帧率、高分辨率和高测距精度需求, 深入分析了激光测绘导航方法现状, 提出了一种混合固态激光三维地形测绘与导航一体化设计方法。通过单光子面阵探测器与532 nm光纤激光器实现高成像帧率、二维音圈电机快反镜多模式扫描实现大视场和亚像素成像分辨率, 采用达曼光栅分束器实现激光光束高精度扩束与衍射。将其应用到小天体探测中, 结果表明: 激光测距精度优于3 cm (3σ), 帧频4 Hz, 成像分辨率达到 $1\ 100 \times 1\ 100$ 。所提出的方法可兼顾地形测绘与导航, 实现多功能轻小型一体化设计, 可极大地降低资源消耗, 对中国小天体探测任务的实施具有良好的指导意义。

关键词: 小天体; 激光地形测绘与导航; 混合固态; 单光子; 快反镜

中图分类号: V448.224

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)04-0417-10

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220041

引用格式: 郭绍刚, 李林, 朱飞虎, 等. 小天体激光地形测绘与导航一体化设计方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(4): 417-426.

Reference format: 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.

引言

小天体是太阳系内各类小行星和彗星的统称, 由于体积小、演化程度低, 较为完整地保留了太阳系形成早期乃至形成前的物质, 小天体探测可为太阳系早期演化过程研究提供重要的线索, 并有望揭示生命的起源^[1-4]。少数小天体具有撞击地球的潜在威胁, 研究小天体是制定相应防御策略、避免撞击威胁的前提^[5-9]。采样返回是目前最具科学和技术价值的小天体探测方式^[4,9-10]。2019年4月18日, 中国国家航天局(China National Space Administration, CNSA)公布了小天体探测计划, 其中探测器将开展对近地小天体2016HO3的绕飞探测, 随后择机附着在小行星表面并采集样品, 携带样品返回地球^[11]。对小天体进行地形测绘, 完成小天体表面地形、地貌的三维重建, 可获取小天体全球地形信息, 这将为科学研究提供最宝贵的原始数据; 此外, 全星地形信息将为航天器着陆采样提供导航数据来源与三维点云数据匹配, 引导航天器在安

全可靠及具有高度科学研究价值的位置附着采样。

目前小天体2016HO3在轨自转方向无法确定, 甚至无法判断其是否存在稳定的自转轴^[12]。相比采用一触即走(Touch And Go, TAG)采样方式的“隼鸟一号”(Hayabusa 1)、“隼鸟2号”(Hayabusa 2)^[13]与“欧西里斯-雷克斯号”(Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer, OSIRIS-REx)^[14], 中国将采取探测器附着小天体表面后进行样品采集的方式^[11], 获取小天体表面高精度的地形地貌信息对于小天体着陆采样任务总体设计至关重要。小天体2016HO3直径约40~100 m, 全球尺寸小, 表面特征cm级, 自转周期约0.467 h, 并且自转方向未知^①, 这使得表面无光照和太阳光照射环境呈现无规律的交替变化状态。小天体自身的特性决定了探测器必须具备高动态、高分辨率和高测距精度需求。

激光探测技术具备阳光免疫和无光照条件下使探测器对未知地形仍有测绘和导航能力, 在小天体探测

收稿日期: 2022-05-06 修回日期: 2022-05-20

基金项目: 国家航天重大工程专项、北京市科技新星计划(Z211100002121076); 国家自然科学基金资助项目(51905034, 52275083); 国家重点研发计划项目(2021YFB3203100)

①数据来源于: MPC数据库(IAU Minor Planet Center), http://minorplanetcenter.net/db_search/showobject?object_id=469219, 2019-7-10; ALCDEF数据库, http://alcdef.org/PHP/alcdef_generateALCDEFPage.php, 2019-7-10。

中得到重点关注^[15-19]。目前,国际空间激光探测技术已发展了3代:第1代为机械扫描式,采用机械振镜以及线阵APD探测器,以OSIRIS-Rex上的激光高度计(Optical Laser Altimeter, OLA)^[20-21]和Hayabusa 2上的LIDAR(Laser Intensity Direction Finding and Ranging)^[22-23]为代表;第2代产品为MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)扫描式,特点是小型化、轻量化,适合于深空探测任务,以北京控制工程研究所研制的火星多功能避障敏感器^[24]及美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的MEMS激光雷达^[25-26]为代表。第3代产品为面阵成像式,通过一次成像或多次成像统计的方式进行三维成像,花费少数激光脉冲的时间即可获得高分辨率三维图像,以OSIRIS-Rex的闪光激光雷达(FLASH LIDAR)^[27]为代表。以上3代激光探测技术各有特点,但均不能同时满足高帧率、高分辨率和高测距精度的需求。

本文结合国际目前已实施的小天体探测任务,对激光探测技术在导航和地形测绘中的应用进行了系统性总结,归纳梳理了与激光导航和测绘相关技术的最新研究进展,在此基础上,结合前3代激光探测技术特点,提出了一种适用于小天体探测的混合固态激光探测方法,以实现导航与三维地形测绘一体轻量化设计,对中国小天体地形测绘与导航的工程实施具有一定的指导意义。

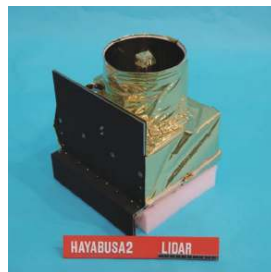
1 激光测绘导航探测方法

采用激光探测方法进行导航和地形测绘的典型产品为激光雷达,是一种激光技术与现代光电探测技术相结合的先进探测系统,通过发射激光束探测目标的位置、速度、姿态等特征量,具有自主性、全天时、全天候获取目标信息的特点^[28]。激光雷达可对目标成像生成三维地形,直接描述目标区域的地形起伏和特征细节,实时自主障碍检测。通过激光主动探测成像获取的高精度地形图,可为地外天体探测器的导航和地形测绘提供最直接的信息。该项技术在火星探测、月球探测^[29-33]中得到了积极的应用,并取得了系列成果。

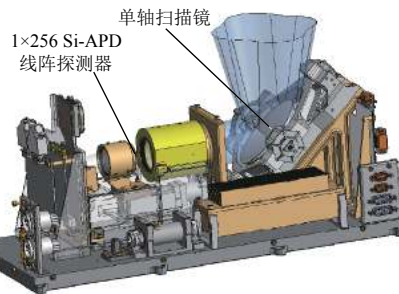
1.1 机械扫描式

机械扫描式为第一代激光探测技术,以Hayabusa 2上配备的LIDAR、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的火星着陆激光雷达、OSIRIS-Rex上配备的激光高度计OLA为典型代表,中国科学院上海技物所研制的月球着陆激光三维成像仪^[31]也为机械扫描式。

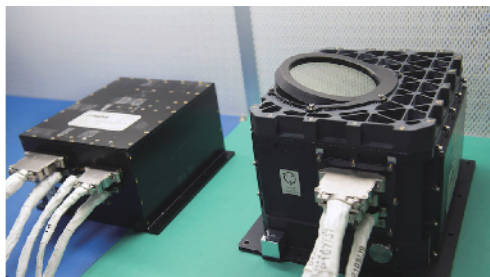
日本小行星探测器Hayabusa 2^[34]的激光雷达LIDAR^[22,30]实物图如图1(a)所示,质量仅3.52 kg,该产品主要包含激光模块、接收光学系统和控制电路,采用两套接收光学系统,远场镜头口径110 mm,近场镜头口径3 mm,两套光学系统的设计使得整机的动态测量范围为30 m~25 km。由于采用了机械振镜,其扫描速度很慢,导致图像刷新率和图像分辨率较低。ESA火星着陆激光雷达^[35]整机模型如图1(b)所示,采用1×256的线阵探测器,并且在接收光学镜头上增加了调焦机构,测距精度大幅提升,5 km远距离的测距精度优于5 m,在近距离10 m时的测距精度优于2 cm,但阵列个数过多导致激光能量分散,作用距离受限,且机械振镜体积、重量均较大,使得整个产品质量达到了10 kg。NASA用于执行小行星采样返回任务的OSIRIS-Rex探测器于2016年发射,其激光高度计OLA采用二维快反镜(FSM)和单点线性模式APD探测器^[20-21],实



(a) Hayabusa 2的LIDAR实物图



(b) ESA火星着陆激光雷达内部组成



(c) OLA实物(左线路,右探头)

图1 国外第一代典型激光探测产品

Fig. 1 International first generation of typical laser detection instrument

物如图1(c)所示, OLA采用高能激光器(被动调Q固体激光器(Cr+/Nd:YAG))和低能激光器(被动调Q微片激光器(Cr+/Nd:YAG)), 中心波长均为1 064 nm, 在轨通过线扫描和面扫描两种模式进行探测, 具备较高的测距精度和横向分辨率, 但体积、重量较大, 单帧图像成像时间在2~6 min, 由于配备了两台激光器, OLA的总重量高达21.4 kg。

中国科学院上海技术物理研究所研发了用于行星导航和软着陆的激光雷达系统^[31]。该系统由激光测距仪、激光测速仪和激光三维成像仪组成, 如图2所示。激光测距仪能在离行星高度30 km处开始工作, 直至10 m高度全程测距; 激光测速仪在离行星高度3 km处开始工作, 连续测速直至高度4 m, 测速精度达到15 cm/s; 激光三维成像仪对选择的着陆区进行三维成像, 最大视场达到30°×30°, 成像精度达到5 cm (1σ)。激光三维成像仪部组件包括激光器、光学发射和接收单元、二维扫描机构单元、回波接收单元、信息处理单元和电源分配单元等。探测器为Si-APD线阵1×16探测器, 通过两个机械振镜扫描扩大探测视场, 激光器采用全光纤体制激光器, 虽能满足高重频、大功率要

求, 但作用距离较近, 测距精度和成像分辨率相对较低。

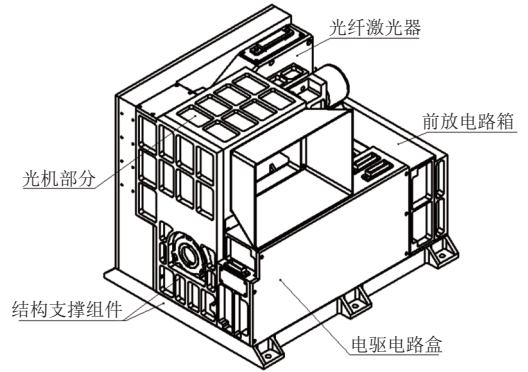


图2 中科院上海技术物理研究所激光三维成像仪
Fig. 2 Picture of SITP LIDAR

第一代典型激光探测技术指标对比如表1所示, 采用机械振镜扫描方式的激光探测方法对功耗需求较高, 同时产品质量较大, 采用机械振镜使得扫描速度有限, 帧率很低, 无法适用于高动态的三维成像, 对高速自转小天体或者在快速接近的导航任务中都不适用。

表1 第一代典型激光探测产品指标对比

Table 1 Parameters of First generation of typical laser detection instrument

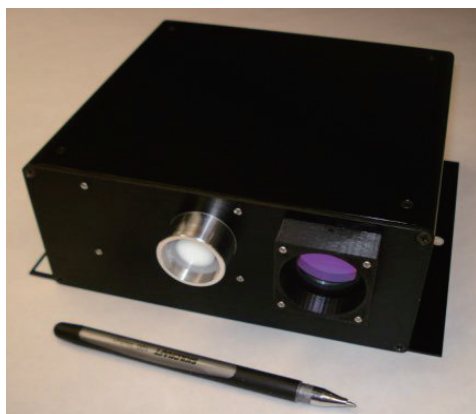
项目	日本Hayabusa 2 激光雷达	ESA火星着陆 激光雷达	NASA OSIRIS-Rex 激光高度计	中国科学院上海技术物理研究所 激光成像仪
工作距离/km	0.030 ~ 25	0.01 ~ 5	0.26 ~ 9 (高能量) 0.036 ~ 1.2 (低能量)	0.04 ~ 0.16
测距精度 (3σ)	± 3 m @ 30 m ± 16.5 m @ 25 m	< 15 m @ 5 km < 30 cm @ 300 m < 6 cm @ 10 m	< 26 cm (高能量) < 11 cm (低能量)	≤ 15 cm
更新率/Hz	1	> 1	—	—
激光波长/nm	1 064	532	1 064	1 064
脉冲能量/重 频	15 mJ	12 kHz	0.7 mJ (高能量) 10 μJ (低能量)	100 μJ
脉冲宽度/ns	7	< 10	5 (高能量) 1 (低能量)	12
接收光学系 统	远场: φ110 mm 近场: φ3 mm	口径: φ 50 mm	口径: φ76 mm	视场: 30° × 30°
功耗/W	18	60	59	≤ 250
重量/kg	3.52	10	探头: 7.6 线路: 13.8	10
外形尺寸 /mm	241 × 228 × 229	—	探头: 270 × 320 × 230 线路: 265 × 250 × 142	—

1.2 MEMS扫描式

第二代激光探测技术为MEMS扫描式, 以NASA的MEMS激光雷达^[25-26]和北京控制工程研究所研制的火星多功能避障敏感器^[24]为代表, 第二代产品采用了MEMS扫描镜, 其体积重量很小, 在扫描速度上具有较高的技术优势。由于MEMS扫描镜的镜面尺寸

较小, 接收光学系统孔径受限, 其作用距离也受限, 此外, 镜面尺寸小导致激光出射光斑较小, 使得激光发散角较大, 图像分辨率精度受到限制。NASA的MEMS激光雷达作用距离仅能达到40 m, 实物图如图3(a)所示。北京控制工程研究所为“天问一号”火星探测器研制的多功能避障敏感器同样采用MEMS摆

镜扫描成像,采用1 064 nm激光器作为主动光源,是一种轻小型化、高分辨率的激光三维成像敏感器,且集成了光学成像功能,具备抗高低温环境灵敏度漂移、抗背景杂光干扰、大视场大相对孔径能量接收、高精度MEMS扫描镜训练与标定等技术优势。火星多功能避障敏感器是首次应用于深空探测的MEMS扫描激光雷达产品,其作用距离为80~120 m,实物图如图3 (b)所示。



(a) NASA的MEMS激光雷达探头实物图



(b) BICE火星多功能敏感器实物图

图3 MEMS扫描式典型产品

Fig. 3 Second generation of typical laser detection instrument

第二代典型激光探测产品指标对比如表2所示,据表2可知,采用MEMS镜扫描方式的激光探测方法具有较高的扫描速度,但MEMS扫描镜未引入闭环控制,指向精度不高,在0.1°量级,距离小天体2016HO3探测需要达到的0.005°~0.01°的指向精度还有较大的差距。

1.3 面阵成像式

为解决作用距离、图像分辨率、图像刷新率受限的问题,第3代面阵成像式激光探测技术应运而生,以美国OSIRIS-Rex小天体探测任务的FLASH LIDAR^[27]为代表,其分辨率为128×128,作用距离达到3 km。

表2 MEMS扫描式技术典型产品技术指标

Table 2 Parameters of second generation of typical laser detection instrument

参数	NASA的MEMS激光雷达	BICE火星多功能敏感器
作用距离/m	40	40 ~ 130
测距精度	≤ 6.25 mm (3σ)	0.12 m (3σ)
视场	15° × 7.5°	30° × 30°
帧率/Hz	10 ~ 12	1
成像时间/s	0.1	1
分辨率/pixel	256 × 128	256 × 256 (扫描)
激光器	1 550 nm, 400 mW, 2 ~ 3 ns, 200 kHz	1 064 nm, 6 ns, 150 kHz
探测器	线性模式Si APD线阵 1 × 1	线性模式Si APD线阵 1 × 1
MEMS镜	φ1.2 mm 扫描范围 ± 6°	φ2 mm 扫描范围 ± 5°
功耗/W	18	<18
质量/kg	1.6 (探头)	5.5
外形尺寸/mm	—	240 × 248 × 145

FLASH LIDAR为美国ASC公司生产,产品型号为GoldenEye,有两个子型,其中S级别的“SOLID”子型面向深空探测任务,主要应用于是OSIRIS-REx; M级别的“GEO 3D”子型主要面向地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)和月球探测任务。FLASH LIDAR的实物如图4所示,技术指标参数如表3所示,OSIRIS-REx探测器上安装了2台闪光激光雷达(LIDAR-1和LIDAR-2)为GNC提供导航。

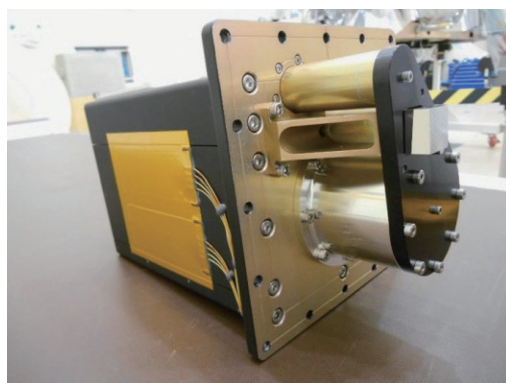


图4 闪光激光雷达飞行件实物

Fig. 4 Picture of OSIRIS-Rex FLASH LIDAR

据表3可知,FLASH LIDAR虽然成像帧率很快,但成像分辨率、测距精度较低,不适用于小天体2016HO3全球地形测绘的需求。128 × 128阵列规模成像器件分辨率有限,此外,测距精度仅为15 cm (3σ)量级,对于小天体2016HO3科学探测cm级需求有较大

的差距。

表 3 OSIRIS-REx 闪光激光雷达 (FLASH LIDAR) 的指标参数
Table 3 Parameters of OSIRIS-RE FLASH LIDAR

序号	参数	指标
1	作用距离/km	0.0028 ~ 1
2	测距精度	≤ 15 cm (3σ)
3	测距准确度	≤ 10 cm + 1% × R (R为距离)
4	视场/(°)	6
5	图像刷新率/Hz	10
6	激光器	1 064 nm, 7 mJ, 5 ns
7	成像分辨率	128 × 128
8	探测器	InGaAs (100 μm pitch)
9	供电电压范围/V	20 ~ 28
10	功耗/W	≤ 50
11	通讯接口	RS422 (主备份)
12	传图接口	LVDS (主备份)
13	外形尺寸/mm	175 × 165 × 218
14	重量/kg	6.9
15	工作温度范围/°C	0 ~ 35

2 混合固态激光三维成像探测方法

面阵探测器可以获得较高的成像帧率, 且单光子探测器比普通的线性模式 APD 探测器灵敏度高出至少 3 个数量级, 同等距离下所需激光能量更少。考虑到小天体探测需求, 现有的面阵成像器件分辨率不够, 激光地形测绘与导航一体设计方法采用快反镜二维扫描与单光子面阵探测器成像结合的总体方案, 即混合固态激光三维成像探测。

2.1 方案构成与功能

混合固态激光三维成像探测总体框图构成如图 5 所示, 主要包含光学组件和电子学组件两部分: 光学组件包括发射单元、接收单元以及二维音圈电机快反镜单元, 其中发射单元由脉冲光纤激光器和衍射光栅组成, 接收单元由望远镜系统和单光子面阵探测器组成; 电子学组件包括 SPAD 驱动及温控电路、快反镜驱动电路、主控处理电路、PIN 探测电路以及电源。

通过 RS422 串口接收到图像控制单元 (Image Processing Unit, IPU) 指令后, 激光器发出窄脉冲平行光束, 经过衍射光栅后形成二维激光点阵, 二维激光点阵投射至小天体表面上, 其散射光被望远镜系统收集, 并成像至单光子面阵探测器上, 在主控处理电路现场可编程门阵列 (Field-Programmable Gate Array, FPGA) 控制下, 通过时间飞行法 (Time Of

Flight, TOF)^[36]完成照射区域多个点位置的距离测量。二维音圈电机快反镜单元实现收发光路的同步扫描, 一方面通过大角度步进扩展地形成像视场; 另一方面通过像素内小角度扫描获得亚像素的成像分辨率。扫描获得的地形成像数据通过低电压差分信号 (Low-Voltage Differential Signaling, LVDS) 接口下传给 IPU。主要工作模式包含全球地形测绘模式 (MODE-A) 和六自由度位姿相对导航模式 (MODE-B)。

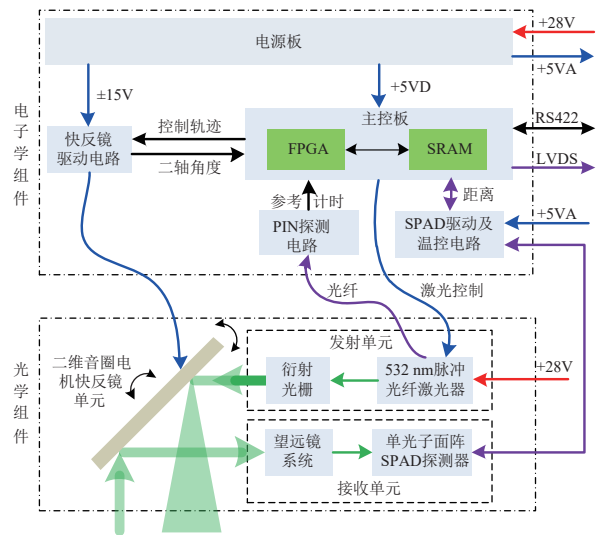


图 5 混合固态激光三维成像探测方法组成框图
Fig. 5 Block diagram of hybrid solid-state method

2.2 探测波段与成像器件

探测波段选择需要考虑到小天体 2016HO3 的光谱特性^[37]、激光器在所选波段具有较高峰值功率和较窄脉冲宽度, 同时成像器件在该波段具有较高的光子探测效率。通过地面望远镜观测小行星的平均光谱, 获得非常粗略宏观的光谱特性参数, 2016HO3 在 0.4 ~ 0.65 μm 之间的反射率迅速增大, 0.65 ~ 0.8 μm 之间反射率平坦, 0.8 μm 以后波段的反射率尚不清楚^[37-39]①。808 nm 波段的固体激光器以及光纤激光器功率能量较低, 1 064 nm 波段的激光器光束质量较好, 但单光子探测器的光子探测效率太低; 1 550 nm 波段虽然光纤激光器光束质量较好, 且对人眼安全, 但该波段不处于 Si 材料的灵敏区, 一般采用 InGaAs 或 Ge 材料^[40], 其性能远不如 Si 基探测器件。因此, 532 nm 波段是较为理想的探测波段。

单光子面阵成像器件的光子探测效率 (Photon Detection Efficiency, PDE)、暗计数 (Dark Count Rate, DCR)、时间分辨率 (Bin)、像素尺寸 (Φ)

①数据来源: MPC 数据库 (IAU Minor Planet Center), http://minorplanetcenter.net/db_search/showobject?object_id=469219, 2019-7-10。

和读出帧率对探测性能具有决定性的作用, 本方案选用某 32×32 阵列探测元件作为成像器件, 通过单光子噪声滤除算法, 可实现优于 3 cm (3σ) 测距精度, 成像器件技术指标如表4所示。

表 4 32×32 阵列面阵成像器件主要技术指标
Table 4 Parameters of 32×32 single photon array

指标	参数
阵列大小	32×32
光子探测效率 (PDE)	$\geq 20\% @ 532 \text{ nm}$
暗计数率 (DCR) (每秒计数)	< 100
像素间距 (Pitch) / μm	50
最大读出帧率/kHz	300

2.3 快反镜扫描方案

快反镜应具备较大的镜面尺寸、较高的带宽和角分辨率、较大的偏转角度和较小的体积重量, 以实现大视场、高分辨率、高帧率和轻小型化设计。本文设计的二维音圈电机快反镜机械偏转角度 $\pm 1.5^\circ$, 角分辨率 $< 2 \mu\text{rad}$ 。基于音圈电机的快反镜由4个直线型音圈电机所驱动, 两两一组分别驱动镜面的两个横轴 (X 轴和 Y 轴)。该快反镜扫描设计已在地面实验室完成了各项空间环境的考核验证。

快反镜的扫描方式如图6所示, MODE-A为全球地形测绘模式, 快反镜以连续方式进行扫描, X 轴以周期性三角波形进行往复扫描, 32×32 连续扫描5次, 每次扫描间隔中, 在像素之间设置精细扫描策略, 像素之间的角间距为 0.041° , 快反镜单次步进的光学角度为 0.0055° , 像素之间扫描7次, 全球地形测绘模式下分辨率到达 $1\ 100 \times 1\ 100$; MODE-B为步进扫描成像模式, 该模式不设置像素间扫描, 在相同的硬件配置下, 其分辨率相对较低, 为MODE-A的 $1/7$ 。

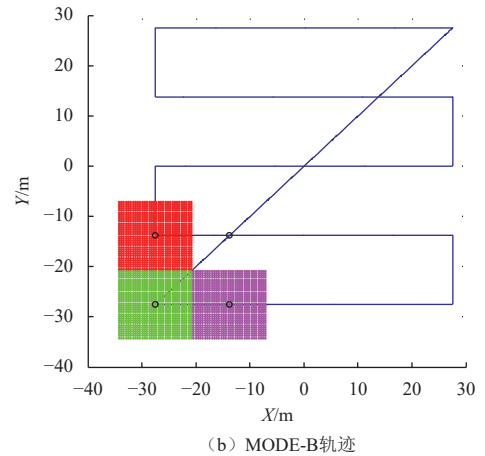
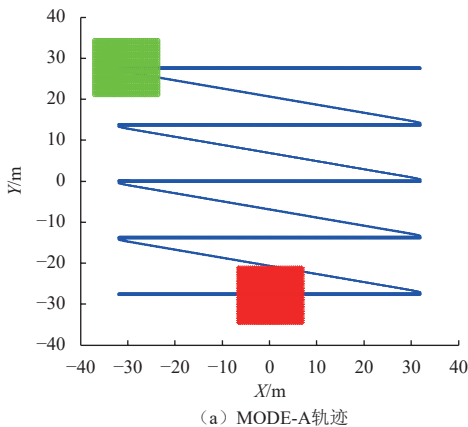


图 6 快反镜扫描方案 (蓝色为扫描轨迹)
Fig. 6 Scanning trajectory of fast mirror

2.4 望远镜光学系统

根据成像器件和快反镜参数, 望远镜光学系统应具备较大的入瞳直径、较小的弥散斑, 并设计窄带滤光片。单光子成像器件灵敏度很高, 应尽可能降低进入光学系统的太阳背景光能量, 否则将引起背景光计数, 减少甚至湮没掉正常的回波光计数。考虑到滤光片的角度蓝移效应, 1° 角度偏离约偏移 1 nm , 选择滤光片的带宽为 $\pm 1.5 \text{ nm}$ 。望远镜系统光路如图7所示, 系统指标如表5所示。所选成像器件像素大小 $7 \mu\text{m}$, 光学系统焦距 70 mm , 经计算角分辨率为 0.1 mrad , 可获得较高的角分辨率。

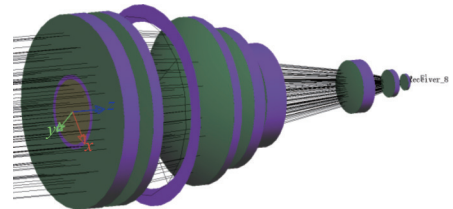


图 7 望远镜系统光路图
Fig. 7 Optical path of telescope system

表 5 望远镜系统主要技术指标
Table 5 Parameters of telescope system

指标	参数
中心波长/nm	532
滤光片带宽/mm	± 1.5 (FWHM)
焦距/mm	69.686 ± 0.2
对角线视场/ $^\circ$	1.91 ± 0.05
入瞳直径/mm	35
弥散圆直径/ μm	≤ 2.8
光学系统透过率/%	≥ 78
重量/g	≤ 400

2.5 算法实现流程

混合固态激光三维成像探测算法涉及两个方面, 小天体全球地形测绘和高精度高动态导航, 算法实现流程如图8所示。在探测器距离小天体表面600 m高度时, 快反镜单元采用MODE-A扫描模式进行三维点云

扫描, 通过直方图统计滤波、多项式滤波和均方根 (Root Mean Square, RMS) 值滤波等进行三维点云降噪预处理, 针对全球扫描的相邻两帧三维点云的重叠部分进行预配准, 完成高精度全球地形测绘。

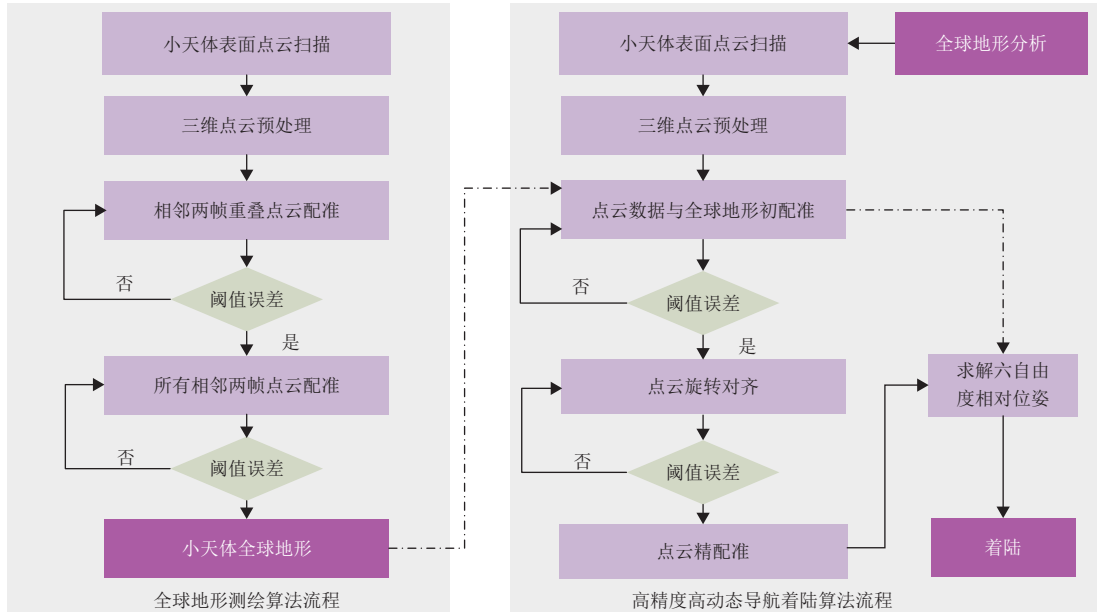


图 8 算法实现流程

Fig. 8 Algorithm implementation process

在600 m高度完成全球地形测绘, 通过对地形数据分析, 获取小天体表面科学探测着陆标后, 在600~30 m的接近段快反镜单元转入MODE-B扫描模式, 进行三维点云扫描, 将预处理后的三维点云与全球测绘地形先验信息初配准, 根据先验信息进行点云六自由度旋转, 完成点云精配准, 进而获得六自由度相对位姿, 据此进行定点着陆。需要说明的是, 粗配准使用基于特征点检测、描述与匹配的算法, 并结合深度学习算法进行样本训练。精配准使用临近点迭代法 (Iterative Closest Point, ICP) 实现。

3 结果与讨论

小天体2016HO3的预估反照率为0.2^[39], 经仿真分析, 混合固态激光三维成像探测方法可实现小天体全球地形测绘、六自由度位姿相对导航能力。全球地形测绘模式下, 测距精度达到2.475 cm, 更新率1.16 Hz, 成像分辨率达到1 100 × 1 100, 在600 m高度时的横向分辨率为6.15cm。六自由度位姿相对导航模式下的测距精度可达到2.475 cm (3σ)。激光地形测绘与导航一体化设计方案可实现的指标如化设计方案可实现的指标如表6所示。

表 6 混合固态激光三维成像探测方法技术指标

Table 6 Parameters of hybrid solid-state method

指标	参数
测量距离/m	5 ~ 600
视场/ (°)	6.46 × 6.57
测距精度/cm	2.475 (3σ)
更新率/Hz	4
成像分辨率	1 100 × 1 100
重量评估/kg	4.0

混合固态激光三维成像探测方法呈现出的高帧率、高分辨率和高测距精度能力, 将为中国小天体2016HO3探测提供高精度三维地形数据, 为科学探测任务实施提供地形测绘和导航服务。

随着单光子探测器技术的发展, 未来面阵探测将由现有的32 × 32阵列、128 × 128阵列发展到256 × 256阵列, 甚至更大面阵规模, 这将对空间激光探测技术带来变革性的发展, 大规模面阵阵列器件的发展将使得成像时间缩短到μs级, 激光探测技术将在空间交会对接、地外天体测绘、空间非合作目标告警防护等领域获得进一步应用。

4 结 论

激光探测技术具备阳光免疫和无光照条件下使探测器对未知地形仍有测绘和导航能力的优势,在深空探测任务重得到了广泛的应用。本文总结了国际上已开展小天体探测任务中所涉及到的地形测绘与导航技术特点,设计了一种适用于小天体2016HO3探测的混合固态激光探测方法,为全球提供地形测绘和高精度高动态导航,并通过仿真验证,得出如下结论:

1) 采用机械振镜扫描方式的激光探测方法对功耗需求较高,同时产品质量较大,采用机械振镜使得扫描速度有限,帧率很低,无法适用于高动态的三维成像,不适用于高速自转小天体探测或者在快速接近的导航任务;

2) MEMS镜扫描方式的激光探测方法具有较高的扫描速度,但MEMS扫描镜未引入闭环控制,指向精度不高,在 0.1° 量级,距离小天体2016HO3探测需要达到的 $0.005^\circ\sim 0.01^\circ$ 的指向精度还有较大的差距;

3) 闪光激光雷达虽然成像帧率很快,但成像分辨率、测距精度较低,不适用于小天体2016HO3全球地形测绘的需求, 128×128 阵列规模成像器件分辨率有限,此外,测距精度仅为 15 cm (3σ)量级,对于小天体2016HO3科学探测厘米级需求有较大差距;

4) 混合固态激光探测方法将单光子探测器和二维音圈电机快反镜相结合,设置多模式扫描实现大视场、亚像素成像分辨率,该方法激光测距精度优于 3 cm ,帧频 4 Hz ,成像分辨率达到 $1\ 100\times 1\ 100$, 600 m 高度时的横向分辨率为 6.15 cm ,该设计方法兼具高成像分辨率、高成像帧率、高测距精度且能够实现轻小型设计的方案。

参 考 文 献

[1] 林杨挺. 太阳系起源与小天体探测的前沿科学问题[J]. 空间碎片研究, 2019, 19(3): 14-21.
LIN Y T. Key questions of solar system formation and exploration of small celestial bodies[J]. Space Debris Research, 2019, 19(3): 14-21.

[2] LI C, WANG C, WEI Y, et al. China's present and future lunar exploration program[J]. *Science*, 2019, 365: 238-239.

[3] 黄江川, 李翔宇, 乔栋, 等. 小天体多目标多模式探测任务设计[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2019, 49: 084512.
HUANG J C, LI X Y, QIAO D, et al. Mission design for multi-target and multi-mode rendezvous missions to small bodies[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 084512.

[4] 徐伟彪, 赵海斌. 小行星深空探测的科学意义和展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2005, 20(11): 1183-1190.
XU W H, ZHAO H B. Scientific significance and prospect of asteroid deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2005,

20(11): 1183-1190.

[5] PATRICK M, FRANCESCA E D, WILLIAM F B. Asteroids IV [M]. Tucson: University of Arizona Press, 2015.

[6] 季江徽, 胡寿村. 太阳系小天体表面环境综述[J]. 航天器环境工程, 2005, 20(11): 1183-1190.
JI J H, HU S C. A review of the surface environment of small bodies in solar system[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2005, 20(11): 1183-1190.

[7] PERNA D, BARUCCI M A, FULCHIGNONI M. The near-Earth objects and their potential threat to our planet[J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2013, 21(1): 1-28.

[8] 张韵, 刘岩, 李俊峰. 小行星防御动能撞击效果评估[J]. 深空探测学报(中英文), 2017, 4(1): 51-57.
ZHANG Y, LIU Y, LI J F. Evaluation of effects of kinetic impact deflection on hazardous asteroids[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(1): 51-57.

[9] 马鹏斌, 宝音贺西. 近地小行星威胁与防御研究现状[J]. 深空探测学报(中英文), 2016, 3(1): 10-17.
MA P B, BAOYIN H X. Research status of the near-Earth asteroids' hazard and mitigation[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(1): 10-17.

[10] 刘德赞, 赖小明, 王露斯, 等. 小天体表面采样技术综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(3): 246-261.
LIU D Y, LAI X M, WANG L S, et al. Summary of sampling technology for small celestial bodies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(3): 246-261.

[11] 中国国家航天局. 小行星探测任务有效载荷和搭载项目机遇公告[EB/OL]. (2019-04-20)[2022-05-06]. <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6805886/part/6780392.pdf>.

[12] 李翔宇, 乔栋, 黄江川, 等. 小行星探测近轨操作的轨道动力学与控制[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2019, 49: 084508.
LI X Y, QIAO D, HUANG J C, et al. Dynamics and control of proximity operations for asteroid exploration mission (in Chinese)[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 084508.

[13] 澄空. 日本隼鸟-2 完成首次小行星采样返回[J]. 国际太空, 2020(12): 19-20.

[14] LAURETTA D S, BALRAM-KNUTSON S S, BESHORE E, et al. OSIRIS-Rex: sample return from asteroid(101955)Bennu[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212(1-2): 1-60.

[15] 王科, 郑适, 解虎, 等. 雷达技术在小天体任务中的应用研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2019, 6(5): 496-502.
WANG K, ZHENG S, XIE H, et al. Application study of radar technology for small body exploration missions[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 496-502.

[16] KOBAYASHI T, OYA H, ONO T. A-scope analysis of subsurface radar sounding of lunar mare region[J]. *Earth Planets Space*, 2002, 54(2002): 973-982.

[17] HERGENROTHER C W, BARUCCI M A, BARNOUIN O. The design reference asteroid for the OSIRIS-REX mission target (101955) Bennu[EB/OL]. (2014-09-16)[2022-05-06]. <https://arxiv.org/abs/1409.4704>.

[18] SUGITA S, HONDA R, MOROTA T, et al. The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: implications for parent-body processes[J]. *Science*, 2019, 364(6437): eaaw0422.

[19] 李雁斌, 王凤姣, 江利中. 小行星浅表探测雷达技术[J]. 制导与引信,

- 2015, 36(1): 51-58.
- LI Y B, WANG F J, JIANG L Z. Asteroid subsurface detection radar technology[J]. *Guidance & Fuze*, 2015, 36(1): 51-58.
- [20] DALY M G, BARNOUIN O S, DICKINSON C, et al. The OSIRIS-REx Laser Altimeter (OLA) investigation and instrument[J]. *Space Science Reviews*, 2017, .
- [21] LAURETTA D S, BALRAM-KNUTSON S S, BESHORE E, et al. OSIRIS-REx: sample return from Asteroid (101955) Bennu[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212: 925-984.
- [22] YAMADA R, SENSU H, NAMIKI N, et al. Albedo observation by Hayabusa 2 LIDAR: instrument performance and error evaluation[J]. *Space Sci Rev*, 2017, 208: 49-64.
- [23] MIZUNO T, KASE T, SHIINA T, et al. Development of the Laser Altimeter (LIDAR) for Hayabusa2[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 208: 33-47.
- [24] 刘旺旺, 李茂登, 李涛, 等. 天问一号探测器火星着陆自主避障技术与验证[J]. *宇航学报*, 2022, 43(1): 46-55.
- LIU W W, LI M D, LI T, et al. Design and qualification hazard detection and avoidance system for Tianwen-1 Mars landing mission[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(1): 46-55.
- [25] STANN B L, DAMMANN J F, GIORNO M D, et al. Integration and demonstration of MEMS-scanned LADAR for robotic navigation[J]. *Proc. of SPIE*, 2014, 9084: 90840J.
- [26] STANN B L, DAMMANN J F, GIZAA M M, et al. MEMS-scanned lidar for small unmanned air vehicles[J]. *Proc. of SPIE*, 2018, 10636: 106360E.
- [27] SORNSIN B A, SHORT B W, BOURBEAU T N, et al. Global shutter solid state flash LIDAR for spacecraft navigation and docking applications[J]. *Proc. of SPIE*, 2019, 11005: 110050W.
- [28] 陈建武, 史永敏, 祝浩, 等. 深空探测中着陆雷达技术发展与应用研究[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(4): 10-20.
- CHEN J W, SHI Y M, ZHU H, et al. Research on the development and application of landing radar in deep space explorations[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(4): 10-20.
- [29] SUN X L, NEUMANN G A, ABSHIRE J B, et al. Mars 1 064 nm spectral radiance measurements determined from the receiver noise response of the Mars orbiter laser altimeter[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17): 3960-3971.
- [30] ARAKI H, TAZAWA S, NODA H, et al. Observation of the lunar topography by the laser altimeter LALT on board Japanese lunar explorer SELENE[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(2): 317-322.
- [31] 舒嵘, 徐卫明, 黄庚华. 用于行星导航和软着陆的激光雷达系统 [C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第十届学术年会论文集. 太原, 中国宇航学会深空探测技术专业委员会, 2013.
- [32] MIZUNO T, KASE T, SHIINA T, et al. Development of the Laser Altimeter (LIDAR) for Hayabusa 2[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 208(1/2/3/4): 33-47.
- [33] DALY M G, BARNOUIN O S, DICKINSON C, et al. The OSIRIS-REx Laser Altimeter (OLA) investigation and instrument[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212(1/2): 899-924.
- [34] TSUDA Y, NAKAZAWA S, KUSHIKI K, et al. Flight status of robotic asteroid sample return mission Hayabusa 2[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 127: 702-709.
- [35] CARMO J P D. Imaging LIDAR technology developments at the European Space Agency[J]. *Proc. of SPIE*, 2011, 19: 800129.
- [36] 李占利, 周康, 牟琦, 等. TOF相机实时高精度深度误差补偿方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(12): 1213004.
- LI Z L, ZHOU K, MOU Q, et al. TOF camera real-time high precision depth error compensation method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 1213004.
- [37] REDDY V. The observation of 2016HO3[C]//AAS/Division for Planetary Sciences Meeting. Provo, Utah: AAS, 2017.
- [38] DEMEO F E, ALEXANDER C M O D, WALSH K J, et al. The compositional structure of the asteroid belt[J]. *Asteroid IV*, 2015, 505(7485): 629-634.
- [39] 王昊, 马月华, 赵海斌, 等. 利用修正高斯模型分析Q型近地小行星表面矿物光谱特[J]. *天文学报*, 2016, 57(4): 437-446.
- WANG H, MA Y H, ZHAO H B, et al. Analysis of Q-type near-Earth asteroid spectra with modified Gaussian model[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2016, 57(4): 437-446.
- [40] 向静静. 高速高灵敏度InP/InGaAs雪崩光电二极管[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- XIANG J J. High-speed and high sensitivity InP/InGaAs APDs[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014.
- 作者简介:
郭绍刚(1982-), 男, 研究员, 主要研究方向: 空间光电测量与智能感知技术。
 通讯地址: 北京市中关村南三街16号(100190)
 电话: (010)68379843
 E-mail: guoshaogang1217@aliyun.com
朱飞虎(1986-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 空间光电测量与智能感知技术。**本文通讯作者**。
 通讯地址: 北京市中关村南三街16号(100190)
 电话: (010)68379843
 E-mail: zhufeihu1986@163.com

Integrated Design Method for Laser Topographic Mapping and Navigation of Small Celestial Bodies

GUO Shaogang^{1,2}, LI Lin^{1,2}, ZHU Feihu^{1,2}, WANG Li^{1,2}, ZHANG Yunfang^{1,2}, ZHAO Qin^{1,2},
ZHENG Yan^{1,2}, MA Yuechao^{1,2}, ZHANG Hengkang^{1,2}

(1. Space Optoelectronic Measurement and Perception Lab., Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the requirements of high frame rate, high resolution and high ranging accuracy in small celestial body detection, the characteristics of laser detection technology were deeply analyzed, and a hybrid solid-state laser 3D terrain mapping and navigation integrated design method was proposed. High imaging frame rate was realized by single photon array device and 532nm fiber laser, large field of view and sub-pixel resolution were realized by multi-mode scanning of two-dimensional voice coil motor fast mirror, and high-precision beam expansion and diffraction of laser beam were realized by Damman grating beam splitter. The results show that the laser ranging accuracy is better than 3 cm (3 sigma), the frame rate is 4 Hz, and the imaging resolution is as high as 1 100×1 100. The proposed method can give consideration to both topographic mapping and navigation, realize multi-function, light and miniaturized design, and greatly reduce resource consumption. It has good guiding significance for the implementation of small celestial body exploration missions.

Keywords: small celestial body; laser topographic mapping and navigation; hybrid solid-state; single photon array; fast mirror

Highlights:

- Characteristics of three generation laser detection technology was deeply analyzed.
- A hybrid solid-state laser 3D terrain mapping and navigation integrated design method was proposed.
- The hybrid solid-state laser method has a good performance with a 3.5 cm laser ranging accuracy, 4 Hz frame rate and 1 100×1 100 imaging resolution.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]