

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.02.04

合成孔径雷达在深空探测任务中的应用与 发展趋势

薛喜平^{1,2}, 苏彦^{1,2}, 李海英^{1,2}, 戴舜^{1,2}, 孔德庆^{1,2}, 朱新颖^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101; 2. 中国科学院 月球与深空探测重点实验室, 北京 100012)

摘要: 合成孔径雷达以飞机、卫星等运动物体为载体, 具备全天候、全天时观测能力, 俨然成为一种高效的遥感探测手段, 在深空探测、军事侦察、地形测绘、灾害监测、农林生长监测和洋流观测等众多领域广泛应用。对几个国外深空探测器携带的 SAR 系统的技术状态、科学目标和探测成果进行了梳理, 并作出了相应的比较分析, 希望能够对中国未来深空探测任务提供一定的帮助。同时, 对未来深空探测星载 SAR 发展趋势进行分析, 星载 SAR 逐渐向着高分辨率、多参数、多模式、多基成像和轻量化等多方面发展, 终将在更丰富的应用领域中发挥重要的作用。

关键词: 深空探测; 合成孔径雷达; 高分辨率; 多模式

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

1 引言

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种主动式成像雷达, 其工作原理是雷达系统向探测目标发射电磁波束并接收其回波信号, 然后雷达处理机对回波信号进行合成处理, 最终生成高分辨率图像^[1]。SAR 通过发射宽带调频信号和脉冲压缩技术实现距离向高分辨率, 通过方位合成孔径技术获得方位向高分辨率^[2]。SAR 分辨率不断提高, 已接近甚至超过光学设备的成像分辨率, 因此在军事侦察、地形测绘、地质勘探、农林生长监测和洋流观测等众多军事和民用领域得到广泛应用^[3-8]。SAR 通过主动发射信号对目标进行观测, 不易受到气候和光照条件限制, 具备全天候、全天时成像能力。SAR 不仅能够反映观测目标的微波散射特性, 还具有一定的地表穿透能力, 是获取地表或者地下物质信息的一种重要技术手段^[2,9,10]。

收稿日期: 2023-10-20; 修回日期: 2024-03-26

资助项目: 国家自然科学基金 (12073048, 62227901)

通讯作者: 苏彦, suyan@nao.cas.cn

SAR 的起源要追溯到 20 世纪 50 年代, 最早提出 SAR 概念的是美国古德依尔公司。1978 年, 美国国家航空航天局喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 发射了世界上第一颗 SAR 卫星 (Seasat-A), 从此各个国家或组织陆续集中力量研究与发展 SAR 技术。在 SAR 诞生后的 40 余年里, 美国、欧盟、苏联、加拿大、日本、德国、中国、印度和以色列等国家已陆续发射 SAR 卫星, 大都应用在地球遥感探测领域, 获取到很多有价值的观测数据, 为研究地球的地质、气候和环境等方面做出巨大贡献^[11]。1979 年, 中国科学院电子学研究所成功获取国内首批 SAR 图像, 标志着中国 SAR 系统研制成功。到目前为止, 中国已发射 10 余颗各种型号的星载 SAR 卫星, 工作频率覆盖 L、S、C 和 X 频段。其中, 2016 年发射的高分三号雷达卫星是中国首个 C 频段、多极化、高分辨率的星载 SAR 系统。它具备单极化、双极化和全极化观测能力, 具有 12 种常规成像模式, 最高分辨率可达 1 m, 最大幅宽达 650 km, 代表了国际 C 频段星载 SAR 最高水平。陆地探测一号卫星是《国家民用空间基础设施中长期发展规划 (2015—2025 年)》中首个完成实施的科研卫星, 由 A、B 双星组成。A、B 星分别于 2022 年 1 月和 2 月在酒泉卫星发射中心成功发射, 双星相距数千米相伴飞行, 通过双基 SAR 干涉体制协同对地面成像, 获取地表高程信息, 可实现毫米级地表形变测量^[12]。2023 年 8 月 13 日陆地探测四号 01 星在西昌卫星发射中心成功发射, 标志着我国成为世界上第一个拥有地球同步轨道 SAR 卫星的国家。陆地探测四号 01 星也是世界首颗进入工程实施阶段的地球高轨 SAR 卫星, 投入使用后将进一步完善我国的天基灾害监测系统, 丰富我国重点区域的观测手段, 全面提升我国防灾、减灾和救灾的综合能力^[13]。

纵观 SAR 技术发展历程, SAR 不仅在对地观测中广泛应用, 在各国的深空探测任务中同样发挥着重要作用, 以美国为代表的部分国家都已实现星载 SAR 对月球、金星和土星等其他地外星球的遥感探测, 如金星 15/16 号、麦哲伦号、卡西尼号、月船 1/2 号和月球勘测轨道飞行器等探测器均搭载 SAR 系统, 完成了各自的探测目标, 并获得有价值的观测数据^[14-16]。2005 年 2 月, 在美国月球与行星研究所 (Lunar and Planetary Institute, LPI) 召开的雷达对月表与行星探测会议中, 与会的 58 位科学家和工程师明确指出: 在未来的地外行星探测任务中, 合成孔径雷达和雷达探测仪这两种先进的雷达探测技术将是不可或缺的重要探测手段^[17]。

中国探月工程一、二、三期和首颗火星探测任务均已顺利完成, 取得大批科学成果, 已开展月球背面采样返回及月球两极探测活动。根据嫦娥二号 (CE-2) 探测器获取的高分辨率全月图和美国月球轨道探测器 (LRO) 长时间探测结果, 月球极区地形复杂, 存在永久阴影区的撞击坑众多, 这些撞击坑内可能存在水冰^[18]。中国有必要针对月球极地开展详细的探测活动, 中国探月工程四期嫦娥七号任务 (CE-7) 轨道飞行器搭载了极化合成孔径雷达 (polarization synthetic aperture radar, Pol-SAR), 其主要任务是实现对月球极区表面进行成像以及极区水冰探测。Pol-SAR 不仅可以填补 SAR 技术在中国深空探测领域的应用空白, 还将引领中国深空探测技术快速发展。本文对外国多个深空探测任务中所使用的 SAR 载荷的技术状态、科学目标以及取得的探测成果进行梳理与分析, 也对未来深空探测星载 SAR 技术的发展趋势进行分析, 旨在对中国深空探测 SAR 载荷研制与发展予以启示。

2 SAR 在深空探测任务中的应用与分析

自 20 世纪 60 年代开始, 伴随各国深空探测技术的不断成熟, SAR 载荷在竞争中取得了长足发展, 俄罗斯、美国、印度以及欧盟等国家和地区都陆续实现 SAR 技术对太阳系内其他星体的主动遥感探测。与光学、光谱遥感技术相比, SAR 技术在月球以及行星探测活动中具有明显的优势: 可实现对探测目标全天时、全天候探测; 可实现对探测目标永久阴影区探测; 可以实现对具有浓厚大气层的目标表面高精度成像或者散射特性测量等。

2.1 金星 15 号/16 号

人类对太阳系行星的探测首先是从金星开始。1961 年 2 月 12 日, 前苏联发射了世界上第一个金星探测器“金星 1 号”, 之后探测器与地面失去联系。前苏联又分别于 1983 年 6 月 2 日和 6 月 7 日成功发射“金星 15 号”和“金星 16 号”探测器。两个探测器分别于 1983 年 10 月 10 日和 14 日到达金星附近, 运行在极地轨道上, 轨道近金点均为 62°N , 成像区域覆盖 30°N 到北极, 探测周期为 24 h。探测器首次搭载了 SAR 载荷, 主要任务是对金星表面以扫描的方式进行成像, 雷达图像幅长约几百千米, 幅宽从几十到几百千米。图 1 所示的雷达图像幅长 620 km, 幅宽 150 km, 是金星 15 号 SAR 系统获取的第一幅金星表面图像。金星 15 号与 16 号 SAR 系统绘制的图像面积约占金星表面图像的 25%, 如图 2 所示, 图像分辨率达到 $1\sim 2\text{ km}$ 。

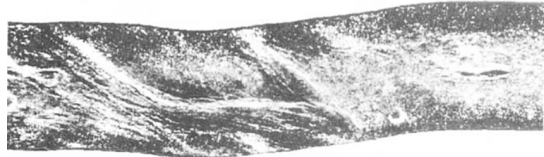


图 1 金星 15 号雷达获得的第一幅图像^[19]

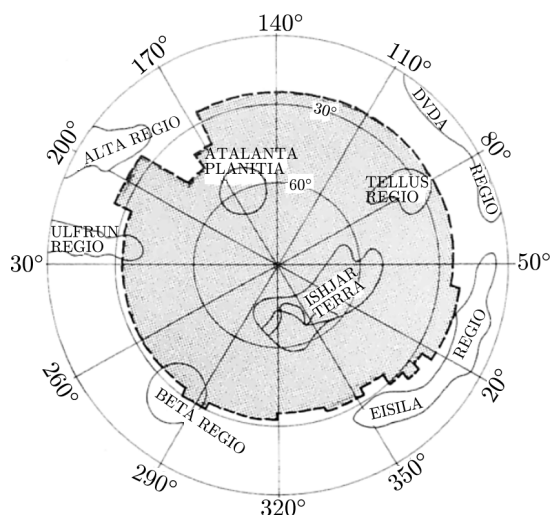


图 2 金星表面成像覆盖图^[19]

金星 15 号/16 号是第一批使用合成孔径雷达对行星进行成像的航天器, 它绘制出比较完整金星北部帽状图, 在深空探测技术上实现了突破与创新, 在深空探测历史上具有非常重要的意义^[19]。不足之处在于分辨率较低, 仅可看清金星表面的大致地形结构, 且雷达图像没能覆盖金星全貌, 只绘制了金星 30°N 以北的大部分图像。

2.2 麦哲伦号探测器

1989 年 5 月 5 日, 美国在肯尼迪航天中心成功发射了麦哲伦号探测器 (Magellan), 探测器主要科学目标是了解金星的地质情况, 分析其表面构造及电特性; 分析火山和地壳构造形成的原因; 了解金星的物理学特性, 分析其密度分布和金星内部的力学特性。麦哲伦号探测器携带有一套先进的合成孔径雷达成像系统, 也是该探测器上唯一的科学载荷系统。图 3 为麦哲伦号探测器雷达系统组成示意图^[20]。

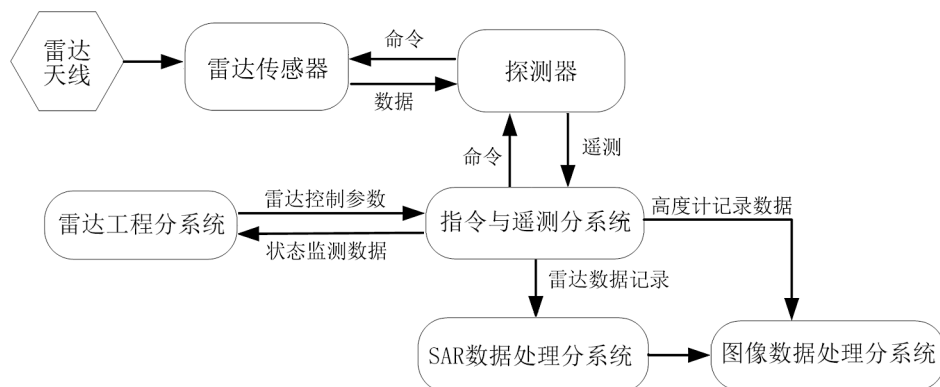


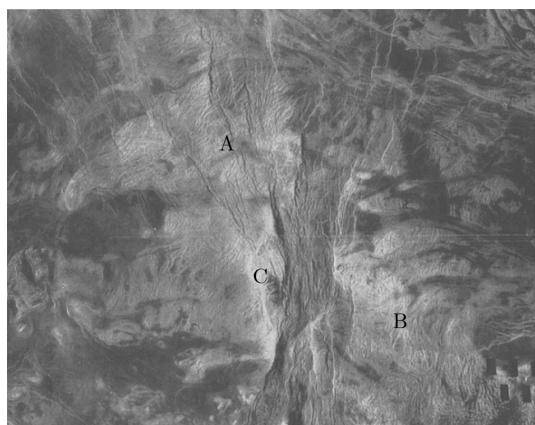
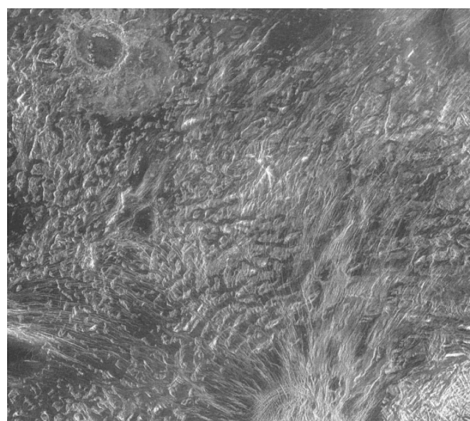
图 3 麦哲伦号雷达的系统组成示意图^[20]

探测器于 1990 年 8 月 10 日进入环绕金星的轨道, 1990 年 8 月 16 日飞至距地球 2.54×10^8 km 的地方对金星进行探测, 每隔 40 min 向地球传回观测数据, 下行数据传输速率 $268.8 \text{ Kb} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $115 \text{ Kb} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在围绕金星的第一个测绘周期中, 雷达系统获取到金星表面 84% 的图像, 同时通过雷达测高和亮温辐射测量技术还测量了金星表面形貌特征和电学特性^[21]。

麦哲伦号高分辨率雷达图像为科学家提供了有关金星地质活动结构和序列的更多信息, Sean 等人^[21]对金星表面具有鲜明地貌特征的区域进行了分析描述。图 4 是金星贝塔 (Beta) 区域北部, 图像中心位于北纬 33.5° , 东经 283° , 幅宽 900 km。它被南北走向的大裂谷所分割, 其地形典型特征是几千米的地形起伏, 在雷达图像上表现为雷达明暗线性特征。图 4 下半部分有一条非常明显的裂谷, 裂谷的西侧是被称为 Rhea Mons 的高地^[21]。

图 5 为金星 Ovida Regio 东部的内部地块地形, Ovida Regio 区域中心位于南纬 5° , 东经 70° , 主要结构是宽约 20 km 的圆顶和山脊。从图 5 南部边界附近的一个结构辐射出来的裂缝切割了圆顶和山脊, 这些山脊之间的山谷随后被雷达探测到的深色熔岩流淹没。图 5 底部圆形特征径向的广泛断裂系统晚于圆顶、山脊和淹没的山谷, 左上角明显可见一个撞击坑, 直径达 60 km^[21]。

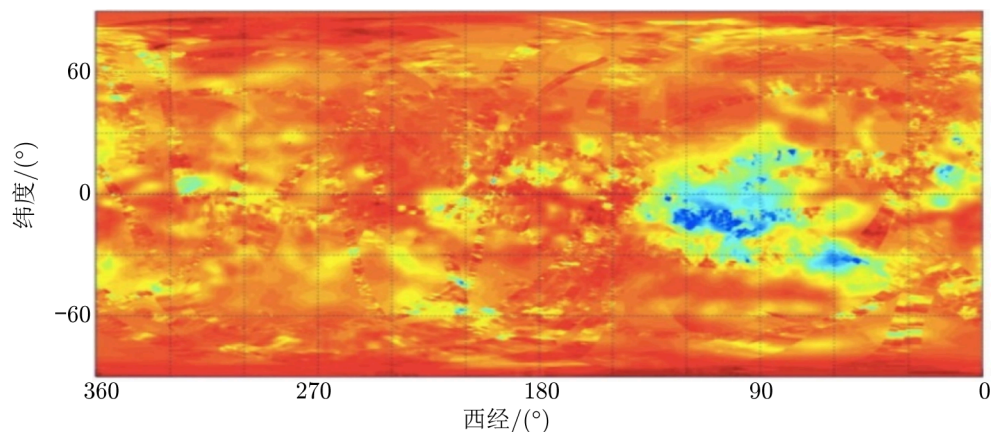
麦哲伦 SAR 雷达分辨率约为 150 m, 优于前苏联的金星 15 号/16 号探测器图像分辨率, 可透过厚厚的云层看到金星表面大小如足球场的物体图像。麦哲伦雷达测绘图像覆盖率达到金星表面的 98%, 至少有 85% 的金星表面被熔岩场和盾形火山所覆盖。麦哲伦雷达图像是人类首次获得的完整金星地形图像, 将金星的模样较清楚地展现在世人面前, 为人类

图 4 Beta 区域中心图像^[21]图 5 Ovida Regio 区域中心图像^[22]

认识与研究金星的地质地貌特性提供了详实的资料^[22]。

2.3 卡西尼号探测器

卡西尼-惠更斯号是美国国家航空航天局、欧洲航天局和意大利航天局等多个国家开展的一个具有标志性的国际组织合作项目。卡西尼号为探测器的一个组成部分，主要任务是环绕土星飞行，对土星及其大气、土星光环、土星的众多卫星进行深入探测。卡西尼号探测器携带一部先进的合成孔径雷达，其中心频率为 13.78 GHz，峰值功率为 63 W，总重量为 43.27 kg^[23]。该 SAR 有多种工作模式，包括合成孔径雷达成像、实际孔径测高、散射测量和辐射测量。在低轨处进行 SAR 成像，可实现 0.3~1.4 km 高分辨率成像，孔径测高分辨率可达 25~200 km。当探测器距离目标较远时，雷达即启用被动辐射测量模式，应用 Ku 波段测量泰坦全球亮度温度，绝对精度接近 1 K。亮度温度除了反映物理温度外，还与发射角、极化、介电常数、孔隙率、表面和次表面粗糙度等参数有关。图 6 是泰坦的全球亮温辐射图，结合了从泰坦获得的所有亮温辐射数据，数据记录时间跨度将近 10 a^[24,25]。

图 6 泰明亮温辐射覆盖图^[24]

但是内部具有高 CPR 的异常撞击坑集中在高纬度地区,有一部分撞击坑底部处于永久阴影中。

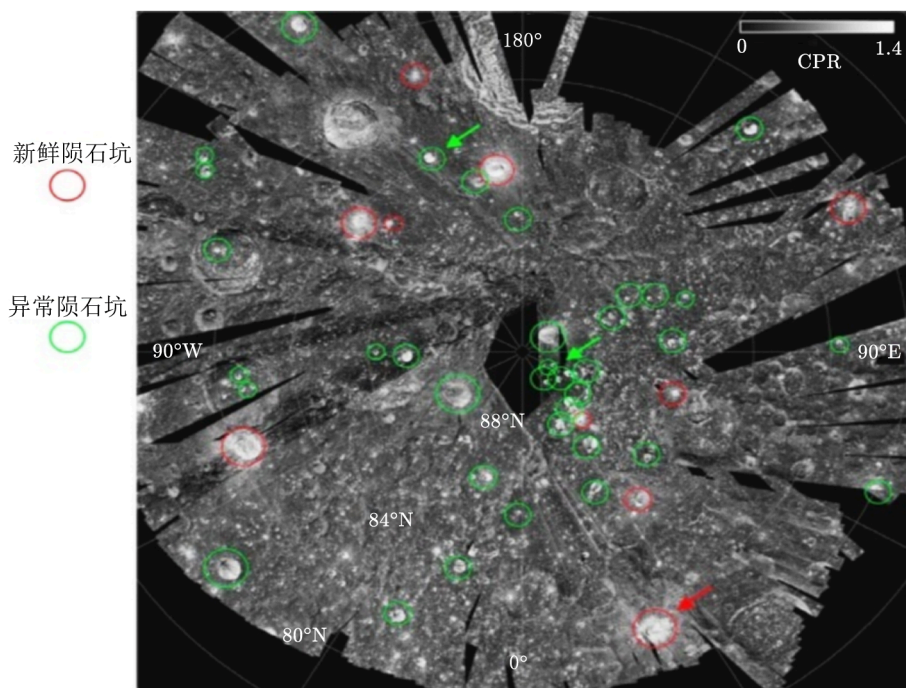


图 8 月球北极地区的 CPR 地图^[27]

同时期在月球轨道上工作的还有美国的月球轨道探测器,月船一号的 Mini-SAR 和 LRO 的 Mini-RF 在双基地模式下协同工作。图 9 为 Mini-SAR 和 Mini-RF 协同工作原理示意图:Mini-SAR 发射 S 频段雷达数据,Mini-RF 接收 S 频段雷达数据,两个探测器的运行轨道在极点交叉,相互配合进行高 CPR 目标位置的双基地测量^[28]。此次协同工作也是深空探测领域双基 SAR 工作模式的首次尝试。

2.5 月球轨道探测器

月球轨道探测器 (LRO) 于 2009 年 6 月 18 日在佛罗里达州卡纳维拉尔角空军基地发射升空,这标志着美国“重返月球”计划正式启动。LRO 运行在距月表 50 km 高的极月轨道上,其设计任务包括月面辐射环境探测以及寻找月面可用资源等,其中一个非常重要的任务是要在月球两极不见光的阴影区寻找水的踪迹^[29]。LRO 探测器搭载了 7 种科学载荷,图 10 为其科学载荷布局示意图,其中很重要的一个载荷就是微型射频仪雷达 (miniature radio frequency, Mini-RF),它也是一种合成孔径雷达,其可为月球上永久背光区域拍摄高清图像,分辨率可达 30 m。

Mini-RF 绘制了月球两极的地图,包括许多地基观测无法观测到的地方,图 11 为 Mini-RF 对月球极地的遥感测绘图^[30]。在 Mini-SAR 的技术基础上,Mini-RF 首次实现了双频段 (S 频段和 X 频段) 联合观测,可更好地测定回波信号,进而区分回波信号是来自

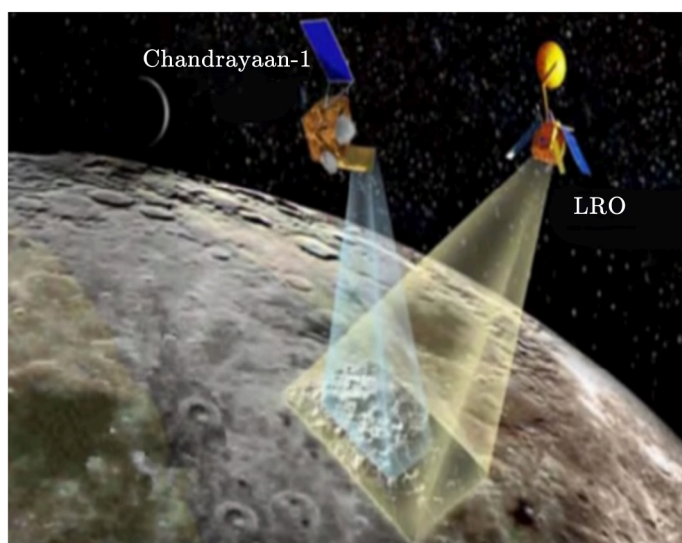


图 9 微型射频仪雷达工作原理示意图^[28]

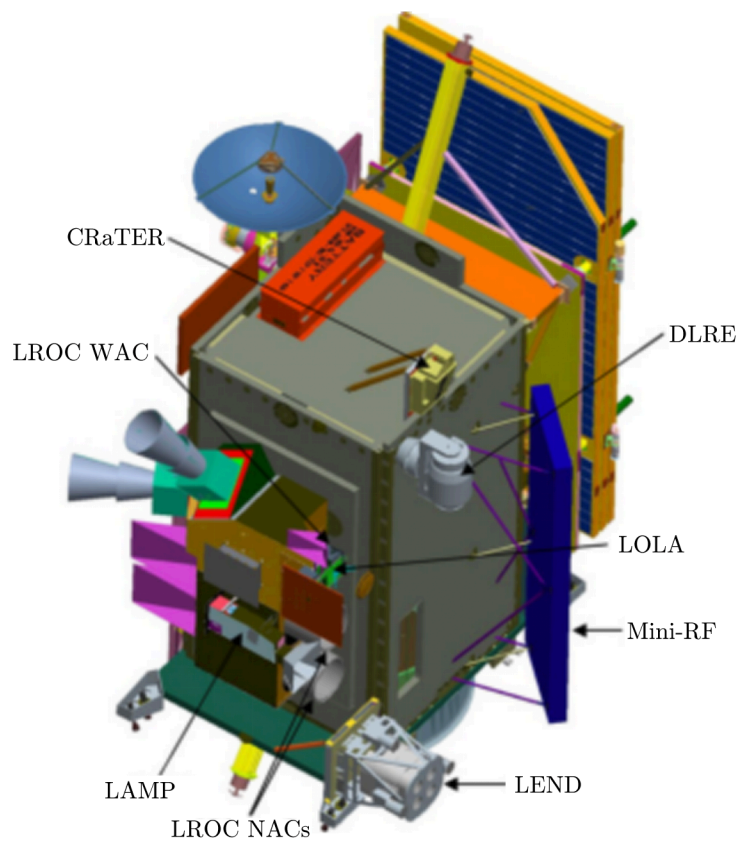


图 10 LRO 科学载荷布局示意图^[30]

于水冰还是粗糙的月面。Mini-RF 在月球两极发现了两种类型的 CPR 特征现象：一种是新鲜撞击坑周边的撞击沉积物，其 CPR 值升高发生在新鲜撞击坑的边缘内外；另外一种是在撞击坑内“异常”沉积物，仅在某些撞击坑内部显示出高 CPR 值。Spudis 等人^[31]提出，第一种情况主要反映了地质上年轻的表面撞击坑边缘溅射物的粗糙程度。后者异常沉积物是在永久阴影区发现的，这些地方温度很低（低于 100 K），从包括光谱、雷达数据在内的多种信息融合分析表明，这些沉积物很可能是水冰。

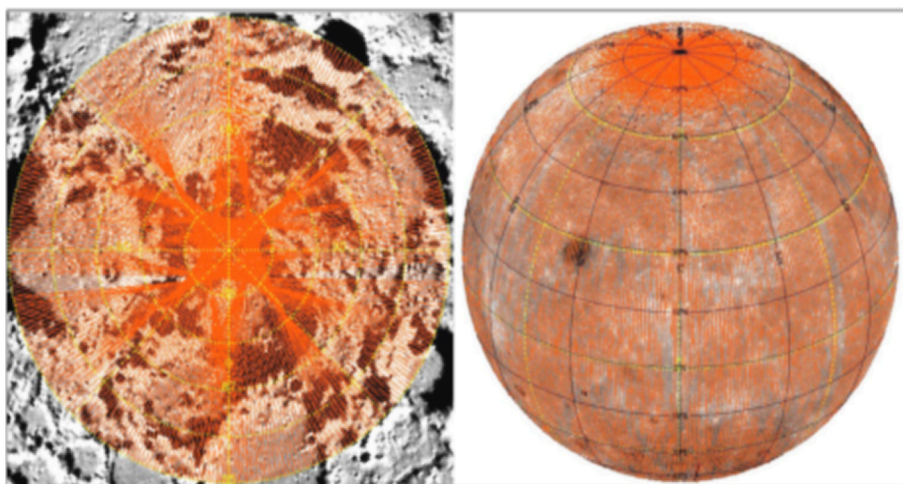


图 11 Mini-RF 对月球极地的遥感观测^[30]

如果这种预测是正确的，则表明在月球两极表面可能存在数亿吨的水冰，大量水冰沉积物的存在使人类能够长期居住在月球上，使得人类长期开发和使用月球成为可能^[31]。

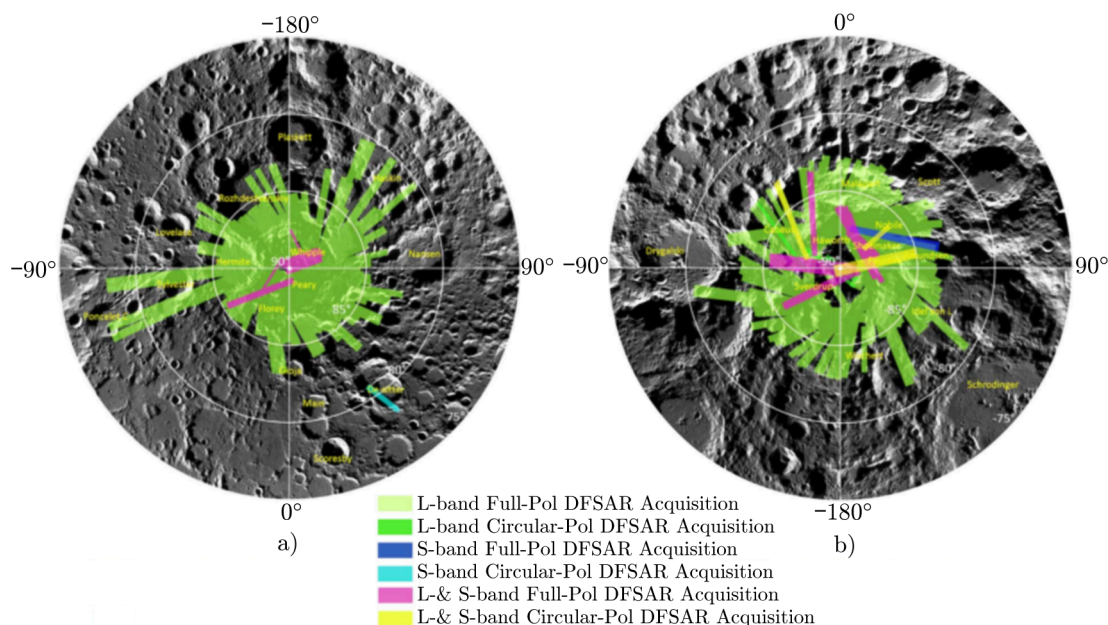
2.6 月船 2 号探测器

2019 年 7 月 22 日，印度成功发射第二个月球探测器月船 2 号 (Chandrayaan-2)。月船 2 号携带一种高分辨率双频合成孔径雷达 (dual-frequency SAR, DFSAR)，其工作频段为 S 频段和 L 频段，总重量为 15 kg，总功率为 100 W，数据率为 $160 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 。DFSAR 的主要任务是：探测和估计月球极地水冰，估计月球风化层的介电常数和表面粗糙度，测绘高分辨率和区域尺度的极地火山口底部风化层厚度和分布图^[32]。

DFSAR 被设计为两个相互独立的系统，即 L 频段 SAR 和 S 频段 SAR，共享一个微带天线，可以实现独立的 L 或者 S 频段成像以及 L 和 S 频段联合成像。由 L 频段系统产生定时信号，输入到 S 频段系统，解决联合成像时的时间同步问题，联合成像相位同步差可控制在 6° 以内。S 频段全极化和高分辨率数据将有助于表征月球风化层的形态特征和有效地探测极地水冰；L 频段极化 SAR 首次用于月球研究，估计风化层成分和基底性质对雷达回波的影响^[33]。

DFSAR 获取了两极（纬度 $80^\circ \sim 90^\circ$ ）大约 40% 的区域图像和少数非极区的图像。图 12 显示了 DFSAR 在不同极化模式下绘制的月球两极 L 频段和 S 频段图像覆盖。相比于

Mini-SAR 和 Mini-RF, DFSAR 独特的双波长全极化 SAR 可以更好地探测月球风化层散射特性。Sriram 等人^[33]提出了有关月球表面上 CPR 异常的解释(俗称“脏冰”),即风化层中可能存在冰包体——冰与风化层混合物的混合物。



注: a) 月球北极区域; b) 月球南极区域。

图 12 DFSAR 在月球的图像覆盖^[33]

2.7 SAR 参数比较分析

全世界多个深空探测器的合成孔径雷达的主要技术参数以及取得的科学成果汇总如表 1 所示。

3 深空探测星载 SAR 发展趋势分析

经过几十年的发展,星载 SAR 技术取得了巨大发展:空间分辨率不断提高,已经提升到亚米级;从最初的单极化、单频段发展到多极化、多频段;从单一工作模式到现在的多种工作模式并存;从单星观测发展到多星联网协同观测。星载 SAR 的观测维度和应用场景在不断拓展,新体制雷达也在不断涌现。本文将围绕星载 SAR 技术发展趋势进行分析阐述。

3.1 高分辨率成像

深空探测星载 SAR 的核心功能就是对探测目标表面进行高分辨率成像,因此图像分辨率是深空探测星载 SAR 系统的关键性能指标,高分辨率能够更精细地反映探测目标的表层特征信息。因此,高分辨率星载 SAR 一直是国际星载 SAR 技术发展的重点。目前,国际上对地观测 SAR 的最高分辨率已优于 0.3 m。世界上第一个分辨率达到 0.3 m 的 SAR 卫星

表 1 多个深空探测器 SAR 主要参数及科学成果表

卫星名称	Veneras15/16	Magellan	Cassini	Chandrayaan-1	LRO	Chandrayaan-2
发射年份	1983	1989	1997	2008	2009	2019
所属国家或地区	前苏联	美国	欧盟	印度	美国	印度
工作频段	S	S	Ku	S	S、X	S、L
发射机功率/W	80	325	63	40	20	40~45
天线形状与尺寸/m	抛物面蝶形, 6×1.4	抛物面, 3.7	抛物面, 4	带状天线, 1.37×0.925	抛物面, 1.8	微带天线, 1.35×1.1
轨道高度/km (近地点)	1 000	250	1 000	100	50	100
距离分辨率/m	1 000~2 000	150	400~2 100	86	115	2~75
方位分辨率/m	1 000~2 000	150	400~1 000	150	150	150
极化方式	单极化	单极化	单极化	圆极化	正交线性极化	混合极化、全极化、单极化和双极化
成像范围/km	120	20	120~450	8	10	10
探测目标	金星	金星	土星及土卫六	月球	月球	月球
科学成果	绘制了金星 30°N 以北大部分图像, 绘制图像面积约占金星表面地形图像的 25%, 图像分辨率达到 1~2 km。对金星表面成像覆盖率高达 98%, 分辨率约为 100 m, 将金星的模样较清楚地展现在世人面前。对土卫六泰坦进行了 127 次飞越与成像, 图像条带在纬度和经度上分布均匀, 很好地呈现土卫六全球地表图像。绘制了纬度为 80° 以上的极地 95% 的地图, 空间分辨率 150 m。与 LRO 实现了双基 SAR 工作模式的首次尝试。在月球两极发现了高 CPR 特征, 表明月球表面两极可能存在数亿吨的水冰。绘制了极地 (纬度 80°~90°) 大约 40% 的图像和少数非极区的图像。双波长全极化 SAR 可以更好地探测月球风化层散射特性。					

是美国的“长曲棍球”(Lacrosse)。德国 TerraSAR-X 卫星在聚束模式下可实现方位向分辨率 0.24 m。HRWS (High-Resolution Wide-Swath) 是德国正在研制的新一代高分辨率成像卫星, 设计分辨率可达 0.25 m^[2]。在深空探测应用领域, 印度的 DFSAR 对月成像最高分辨率可达 2 m^[32], 我国正在研制的嫦娥七号 Pol-SAR 预计可实现 0.5 m 的分辨率。

提高距离向分辨率, 主要通过发射大带宽信号来实现, 信号带宽增加必然对 SAR 收发系统链路、宽带天线与高速数字处理器设计与实现提出很高要求。为了实现大宽带信号, 科学家又提出了多子带工作方式, 即利用数字信号处理的方法将各个子带信号进行拼接合成, 从而得到大带宽信号, 获得距离向高分辨图像。如法国的 RAMSES 系统利用 5 个子带进行拼接可得到 1.2 GHz 的宽带信号; 德国的 PAMIR 系统则合成得到 3.6 GHz 的宽带信号; 中国科学院电子学研究所研制的多子带机载 SAR 系统也获得了 3.6 GHz 宽带信号, 距离向分辨率达到 4.17 cm^[2,34,35]。提高方位向分辨率, 主要利用聚束和滑动聚束模式增加雷达合成孔径时间来实现。

总之, SAR 分辨率要求越高, 需要的雷达发射信号带宽越大、合成孔径长度越长, SAR 系统设计与实现就变得更加复杂与困难。

3.2 多参数化

SAR 利用不同频率、不同极化以及不同视角的电磁波对地物进行观测, 已逐渐发展成为具备多频段、多极化、多视角观测的多参数雷达系统^[36]。

多极化是指 SAR 系统的收发极化方式, 纵观雷达极化技术的发展进程, 其主要可分为单极化、双极化和全极化等发展阶段。由于电磁波的极化对观测目标的物质介电常数、表面粗糙度和几何形状等物理特性比较敏感, 因而极化散射矩阵蕴含着丰富的目标物理特性。极化散射矩阵包含目标散射回波信号的幅度和相对相位信息, 这些信息对深入分析与获取目标的物理特性具有重要意义。因此, 实现目标极化散射特性的测量与获取, 是制约极化雷达系统研发及应用的难题^[37]。

多频段指 SAR 的工作频段有多个, 由于探测目标在不同频率下的散射特性不同, 人们可以更好地对目标进行分类和识别。低频段电磁波能穿透地表, 可获取地下目标信息, 高频段电磁波能获取目标表面的高精度信息^[38]。深空 SAR 采用多频段设计, 通过不同频段 SAR 图像融合实现地物的准确分类与识别, 可有效提升对深空目标的探测能力。在多频段 SAR 系统中, 多个频段既可以独立观测, 也可以协同观测。

不同视角目标的形态特征和散射特性是有差异的, 其目标识别性能也会有所波动, 导致单视角 SAR 目标识别性能不稳定。多视角 SAR 比单视角更具有优势, 多视角 SAR 图像比单视角 SAR 图像蕴含更丰富的目标识别信息。但是同一目标在多视角 SAR 图像中通常会发生几何变化, 如形状和方向的变化。如何有效地从 SAR 图像的每个视角中提取特有分类特征, 同时适应其目标几何变化, 并能够对这些特征进行有效融合, 是当前多视角 SAR 目标识别任务亟待解决的问题。

3.3 多种工作模式

具有多种工作模式已经成为星载 SAR 发展的一种趋势,单一模式已经很难满足现实应用需求。条带模式是星载 SAR 最常用的成像模式,也是早期 SAR 仅有的工作模式,以单一视角对目标进行照射;扫描模式可以获得宽测绘带宽,相比条带模式,扫描模式的分辨率较低,但测绘带宽得到了充分扩展;聚束模式可以获得高分辨率,但是测绘范围受限;滑动聚束模式是一种介于条带模式和聚束模式之间的 SAR 工作模式,既可以获得宽测绘带、高分辨率的 SAR 图像,还可以在方位向通过扫描来扩大测绘范围,比聚束模式更灵活、更方便^[39-41]。

多模式与多相位中心、多极化等先进技术结合也是未来发展趋势,可以进一步提高多模式成像技术的能力。现在的星载 SAR 系统中,多模式成像技术已经与多极化技术有一定的结合,比如 TerraSAR-X 中,条带模式和聚束模式都可以与双极化相结合^[39]。在未来星载 SAR 系统中,将会有更多新技术与多模式技术相结合。随着 SAR 应用场景的不断变化,SAR 工作模式也发生变化,未来还会有更多的工作模式涌现。

3.4 星载双/多基 SAR

单基 SAR 需要较长的合成孔径时间才可以获得高分辨率图像,而且容易被侦测和干扰。同时,受到物理机理的限制,只能对侧方、斜前方位置成像,无法获取航迹方向的目标信息。与单基 SAR 相比,双/多基 SAR 系统是一种收发空间分立、协同多视角观测的新体制,具备短时高分辨率成像、平台静默抗干扰、系统资源优化等技术优势^[2,42]。

多基 SAR 将进一步拓展雷达遥感的观测维度,例如,垂直航迹多基线干涉可用于获取亚米级精度的 DEM。多基 SAR 已经成为当前的研究热点,多个航天大国相继提出各自的多基 SAR 系统任务规划。例如,HRWS 是德国宇航局提出的一项多基合成孔径雷达任务,由德国宇航局和欧洲航天局联合开展的双基 SAR 串联卫星编队 SAOCOM-CS 任务^[43]。

双/多基 SAR 尽管具有很多优势,同时也存在颇多问题。如发射与接收平台不一致,带来的空间、时间和相位同步问题,导致成像性能下降,无法实现高精度干涉测量^[44,45];其次,双基 SAR 斜距历程也从单基 SAR 的“单根式”转换为“双根式”,成像参数空变性严重,进一步增加了双/多基 SAR 高精度成像的难度^[46-48]。

3.5 小型化和轻量化

为了提高探测效率,通常要求各载荷的结构、体积和功耗设计等做到小型化和轻量化。其中,信号体制和天线体制是星载 SAR 实现小型化和轻量化时首先需要考虑的问题。

传统脉冲体制占空比低,要求峰值发射功率大,对雷达系统的功耗设计和结构设计要求很高。连续波体制在理想情况下占空比可达 100%,要求峰值功率低,雷达可以做到体积小、重量轻、成本低;缺点是收发天线无法共用,而且处于同一平台,发射信号与接收信号很难做到完全隔离,存在信号串扰和泄露,容易出现误报现象。结合脉冲体制和连续波体制各自的优点,人们提出了间断连续波体制,其工作原理是通过工作模式的切换实现雷达天线分时复用。天线首先设置在发射模式下持续发射线性调频信号,在近距离目标回波返回雷达的瞬间,天线转换为接收模式开始收集回波信号,回波信号收集完毕后,天线再次切换为发

射模式^[2,49,50]。通过设备复用, 同样具有体积小、重量轻、成本低的特点。

SAR 天线重量和天线收拢尺寸是星载 SAR 实现轻量化、小型化的关键影响因素, 天线重量一般占到整个 SAR 载荷重量的 70% 以上, 天线收拢尺寸决定着整个 SAR 载荷的空间占比。小型化 SAR 天线体制主要包括集中馈电的反射面天线体制和平板式天线体制^[51]。反射面天线的面密度较小、质量较轻, 具有大的收拢展开比; 平板式天线, 基于高集成度的设计方法, 将收发系统、中央电子设备集成为几个模块, 有效减轻了载荷重量^[52,53]。

3.6 星上雷达图像处理技术

随着星载 SAR 分辨率的提高和测绘带宽度的增加, 雷达工作一次产生的数据量非常大, 即使经过星上实时数据压缩, 其数据量仍然很庞大。然而深空探测器距离地球接收站较远, 目前地球接收站所能接收的数据传输速率很低, 很难将如此大规模的观测数据实时传输至地球接收站。因此发展星上先进的数据处理技术势在必行, 在星上实时处理观测数据生成 SAR 图像数据, 图像数据量远低于雷达原始采集数据量, 将图像进行对地下传, 可以有效地降低星载 SAR 数据传输速率要求, 大大缩短探测数据传输时间, 实现雷达数据的实时或者准实时下传^[54,56]。

3.7 月基 SAR 对地观测

一些学者提出了月基合成孔径雷达对地观测的概念。Moccia 和 Regna^[57]提出了包含 X、C 和 L 三个频段的月基干涉对地观测系统, 具有高空间分辨率和时间分辨率的特点; 郭华东等人^[58]提出了 GCOLB-SAR (global change observation lunar based SAR) 的设想, GCOLB-SAR 在全球变化监测方面具有良好的空间覆盖性能和分辨能力, 尤其是在扫描模式下幅宽可以达到 6 500 km, 是星载 SAR 幅宽的 10 倍之多。李德伟等人^[59]也进行了月基 SAR 系统关键参数分析与仿真, 并提出采用多波束工作模式, 可使测绘带宽达到千米级。

在月球上布设 SAR 设备对地球进行观测, 把月球当作一个对地观测平台, 基于月基平台的寿命远远长于人造卫星, 可提供长期、稳定的对地观测能力。与传统的星载、机载对地观测平台相比, 月基平台具有非常明显的特点, 是一个具有更宽测绘带宽、更大测绘范围和更稳定可靠的观测平台。因此, 月基 SAR 为固体地球宏观运动现象的观测提供了新思路^[60-63]。

4 结束语

本文详细介绍了外国深空探测任务中的 SAR 系统, 对各个 SAR 系统的技术状态、科学目标和探测成果进行了梳理与分析, 并给出了相应的技术参数比较, 希望能够对中国未来深空探测任务中合成孔径雷达设计提供一定的帮助。同时, 对未来深空星载 SAR 发展趋势进行分析, 星载 SAR 逐渐向着高分辨率宽测绘带、多参数、多模式、分布式多基成像、轻量化等多方面发展, 以更好地满足不同应用需求。新式雷达的研究过程及其漫长, 全世界科技工作者任重道远, 需要不断进行技术创新, 不断地打破技术壁垒。未来, 星载 SAR 终将在更广阔的应用领域中发挥更加重要的作用。

参考文献:

- [1] 皮亦鸣, 杨建宇, 付毓生. 合成孔径雷达成像原理. 成都: 电子科技大学出版社, 2007: 1
- [2] 邓云凯, 禹卫东, 张衡, 等. 雷达学报, 2020, 9(1): 1
- [3] 张伟, 石汉青, 姜祝辉, 等. 地球物理学报, 2021, 64(7): 2436
- [4] 徐广东, 胡兆国, 高升, 等. 地理空间信息, 2023, 21(6): 53
- [5] 乔冠禹, 代大海, 纪朋徽. 现代雷达, 2022, 44(8): 31
- [6] 李晓峰, 张彪, 杨晓峰. 雷达学报, 2020, 9(3): 425
- [7] 孙建明, 王仁强, 刘昌华. 舰船科学技术, 2023, 45(10): 139
- [8] 杨佳旺, 钱建平, 龙思远, 等. 防灾减灾学报, 2022, 38(4): 17
- [9] 罗汝, 赵凌君, 何奇山, 等. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/10.1030.TN.20230703.1552.002.html>, 2023
- [10] 张润宁, 王国良, 梁健, 等. 航天器工程, 2021, 30(6): 52
- [11] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 雷达学报, 2012, 1(1): 1
- [12] 中国科学院空天信息创新研究院航天微波遥感系统研究部. 雷达学报, 2022, 9(02): 1
- [13] 光明日报-光明网(gmw.cn), 2023 年 08 月 22 日 08 版
- [14] Saunders R S, Pettengill G H, Arvidson R E, et al. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1990, 95(B6): 8339
- [15] Lorenz R D, Lopes R M, Paganelli F, et al. Planetary and Space Science, 2008, 56 (8): 1132
- [16] Bussey D B, Spudis P D, Butler B. 41st Lunar and Planetary Science Conference. 2010, 1533: 2319
- [17] 苏才国, 张鬼, 任友良, 等. 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第八届学术年会论文集. 上海: 宇航学会, 2011: 417
- [18] 吴伟仁, 于登云, 王赤, 等. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(3): 223
- [19] Barsukov V L, Basilevsky V A T, Burb G A, et al. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B4): D378
- [20] Bruce A. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(E9): 17099
- [21] Sean C S, Suzanne E S, Duane L B. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(E8): 13199
- [22] Johnson W T K. IEEE, 1991, 19 (6): 777
- [23] Borgatelli L, Im E, Johnson W T K, et al. Planetary and Space Science, 1998, 46(9/10): 1245
- [24] Paganelli F, Janssen M A, Lopes R M, et al. Planetary and Space Science, 2007, 56: 100
- [25] Lopes R M C, Wall S D, Elachi C. Space Sci Rev, 2019, 215: 33
- [26] Pooja M, Shailesh K, Dharmendra S. IEEE Journal of Selected Topic in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(1): 30
- [27] Spudis P D, Bussey D B, Baloga S M, et al. Geophysical Research Letters, 2009, 37: L06204
- [28] Bussey D B J, Carter L M, Spudis P, et al. Lunar and Planetary Science Conference. New York: LPSC, 2008: 2083
- [29] David E S, Maria T Z, Glenn B J. Space Science Reviews, 2008, 5: 1
- [30] Richard V J G J. Space Science Reviews, 2010, 150: 7
- [31] Spudis P D, Bussey D B J, Baloga S M. Journal of Geophysical research: Planets, 2013, 118: 2016
- [32] Deepak P, Sanjay T, Anup D. Current Science, 2020, 118(2): 1
- [33] Sriram S B, Tathagata C, Deepak P, et al. The Planetary Science Journal, 2021, 2: 134
- [34] Wang X, Wang R, Deng Y, et al. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2017, 55(8): 4252
- [35] 匡辉, 于海锋, 高贺利, 等. 信号处理, 2022, 38(4): 879
- [36] 邓云凯, 张衡, 范怀涛, 等. 中国空间科学技术, 2023, 43(2): 32
- [37] 王泽众, 金燕, 林宽. 电子与信息学报, 2023, 44: 1
- [38] 郭磊, 李立, 颜昭, 等. 航天器工程, 2019, 28(6): 24
- [39] 杨汝良, 戴博伟, 李海英. 雷达学报, 2016, 5(2): 132
- [40] 李敏慧, 朱力, 刘爱芳, 等. 现代雷达, 2022, 44(9): 58
- [41] 李诗润, 刘昕, 杨娟娟, 等. 空间电子技术, 2022, 19(2): 106
- [42] 武俊杰, 孙稚超, 吕争, 等. 雷达学报, 2023, 12(1): 13

- [43] Rott H, Lopez-dekker P, Solberg S, et al. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Fort Worth: IEEE, 2017: 107
- [44] 逆晶晶, 索志勇, 王婷婷, 等. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(2): 42
- [45] Sakar N, Rodriguez-cassola M, Prats-iraola P, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(3): 1931
- [46] Wang R, Deng Y. Biostatic SAR System and Signal Processing Technology. Singapore: Springer Press, 2018: 1
- [47] Zhang H, Deng Y, Wang R, et al. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2016, 54(9): 5203
- [48] 刘金, 刘哲, 倪虹. 系统仿真学报, 2019, 31(8), 1477
- [49] 闵林, 刘向前, 郝晓龙, 等. 电子与信息学报, 2023, 45(4): 1285
- [50] 闵林, 刘向前, 李宁. 电子与信息学报, 2022, 44(7): 2461
- [51] 姜秀鹏, 常新亚, 姚芳. 空间电子技术, 2016, 1: 77
- [52] 谭小敏, 党红杏, 刘听, 等. 航天器工程, 2022, 31(2): 1
- [53] 王志刚, 陈梁玉, 杨听广, 等. 航天器工程, 2022, 31(5): 126
- [54] 熊君君, 王贞松, 姚建平, 等. 电子学报, 2005, 33(6): 1070
- [55] 陈亮, 龙腾. 北京理工大学学报, 2008, 28(6): 545
- [56] 韩涛, 孙娟, 于巍巍, 等. 空间电子技术, 2014, 4: 65
- [57] Moccia A, Regna A. IEEE T Aero Elec Sys, 2010, 46: 1034
- [58] 郭华东, 丁翼星, 刘广, 等. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1760
- [59] 李德伟, 江利明, 蒋厚军, 等. 系统工程与电子技术, 2020, 42(4): 66
- [60] 郭华东, 吴文瑾, 张珂, 等. 测绘学报, 2022, 51(6): 862
- [61] 郭华东, 丁翼星, 刘广. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(3): 250
- [62] Cllamia M, Fornaro G, Franschetti G, et al. Piers online, 2010, 6(4): 330
- [63] Ding Y, Guo H, Liu G. IEEE Geosciences and Remote Sensing Symposium, 2013: 1767

Application and Development Trend of Synthetic Aperture Radar in Deep Space Exploration

XUE Xi-ping^{1,2}, SU Yan^{1,2}, LI Hai-ying^{1,2}, DAI Sun^{1,2},
KONG De-qing^{1,2}, ZHU Xin-ying^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of lunar and deep space exploration, Chinese Academy of Science, Beijing 100012, China)

Abstract: Synthetic Aperture radar (SAR), which uses airplane, satellites or other moving objects as the platform, has the ability of all-weather and all-time to observe. It has become a highly efficient method of remote sensing detection, and has been widely used in various fields, such as deep space exploration, military reconnaissance, topographic mapping, disaster monitoring, agricultural and forestry growth monitoring, ocean current observation and other fields. This article sorts out the SAR technology status, scientific objectives, and detection results of several SAR systems, which have been set up in deep space ex-

plorations of foreign countries and areas. And it provides comparative analysis of SAR systems, including Veneras15 and 16, Magellan, Cassini, Chandrayaan-1/2 and LRO. The Pol-SAR (Polarization Synthetic Aperture Radar) is carried by the Chinese lunar exploration Chang'e-7 (CE-7). Pol-SAR will lead the rapid development of China's deep space exploration technology. It is hoped that it can provide some help for China's deep space exploration in the future. At the same time, the development trends of spaceborne SAR are analyzed. Spaceborne SAR is gradually moving towards high-resolution, multi-parameters, multi-modes, multistatic imaging, lightweight and other aspects. It will eventually play a more important role in richer application fields.

Key words: deep space exploration; synthetic aperture radar(SAR); high resolution; multi-modes