

# The Application Research of Ground Penetrating Radar Technology to Lunar Exploration

Ke Shang, Rongyi Qian\*

China University of Geosciences (Beijing), Beijing  
Email: shangke@cugb.edu.cn, \*rongyiqian@cugb.edu.cn

Received: Apr. 5<sup>th</sup>, 2017; accepted: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2017; published: Apr. 27<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Using electromagnetic waves that possess different propagation characteristics in different materials, Ground Penetrating Radar (GPR) is an efficient and non-invasive technique for probing terrestrial and planetary subsurfaces. Since the 1970s, GPR has been applied to lunar exploration programs, including the mapping of lunar regolith and the detection of subsurface geologic structures and water ice. Along with the application, Chinese Chang'E-3 lunar penetrating radar (LPR) onboard Yutu lunar rover stands out as one of the notable achievements. As the first situ lunar radar detector, Chang'E-3 LPR demonstrated that GPR can be used to determine subsurface stratigraphy on the Moon. This paper provides a review of the study on LPR equipment and data processing method as well as the results of the application of GPR technology in lunar exploration. Furthermore, as shown in the last part, GPR also applies to surveys of other planets, such as Mars. However, human are still faced with several problems in this field. For example, it is of much difficulty to carry out research on the far side of the moon with situ detectors.

## Keywords

Lunar Penetrating Radar (LPR), Lunar Exploration, Chang'E-3 Mission, Data Processing Method

---

# 雷达探测技术在月球科学探测研究中的进展

尚 可, 钱荣毅\*

中国地质大学(北京), 北京  
Email: shangke@cugb.edu.cn, \*rongyiqian@cugb.edu.cn

收稿日期: 2017年4月5日; 录用日期: 2017年4月22日; 发布日期: 2017年4月27日

\*通讯作者。

## 摘要

雷达探测技术利用高频电磁波在不同介质中传播和反射性质的差异, 获取地下探测对象的地质剖面, 具有快速、连续、无损和高分辨率等优势。自20世纪70年代以来, 已在月球科学探测研究中获得了丰硕的成果, 涉及领域如月球地形地貌测绘、月壤厚度探测、月球次表层结构探测和月球水冰探测等。2014年, 中国嫦娥三号探测器携带的测月雷达圆满完成月球巡视探测, 标志着中国在测月雷达设备研制、数据采集、软件设计和数据处理解释等方面取得了令人瞩目的成就。本文针对国际上测月雷达方法技术研究、雷达仪器设备研制、测月雷达数据处理方法以及雷达探测技术探月研究成果进行综述, 并对应用雷达探测技术进行外星体探测的未来前景进行展望。

## 关键词

测月雷达, 月球探测, 嫦娥三号, 雷达数据处理

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

雷达作为一种无损、高效的探测技术, 可以获得大量地下信息, 目前已经在探月工程和星体探测中得到广泛应用。自雷达探测技术问世以来, 其在月球地质、水资源和月壤探测研究等方面已经取得了丰硕的成果。1972年, 阿波罗17号(Apollo17)搭载的月球探测实验雷达对月表进行了大约13个小时的观测, 获得了月表地形的变化、月球次表层的介电常数特性以及月球表层的地质结构特征[1][2], 开辟了人类使用雷达探测技术进行月球科学探测的先河。这之后, 雷达作为重要仪器设备之一, 在多次探月任务中发挥了举足轻重的作用, 如2007年日本月亮女神号(SELENE)[3][4], 2009年美国月球勘测轨道飞行器(The Lunar Reconnaissance Orbiter)[5], 2013年中国“嫦娥三号”探测器(Chang'E-3)都携带了雷达探测装置进行月球科学研究[6], 美国阿雷西博天文台(Arecibo Observatory)和金石太阳系(Golden Stone Solar System Radar, GSSR)地基雷达也对月球进行了多次观测。截至目前这些科学研究已经提供了数幅全月雷达地图以及月壤厚度数据、区域地质结构等重要月球科学信息[7]。

雷达探测研究表明, 月球表面存在无数个规模不等的撞击坑。撞击作用可使局部基岩在一定程度上发生形变或破碎, 撞击坑溅射物覆盖在撞击坑附近的月壤层或基岩之上, 使月表横向变化更快。此外, 月球早期火山爆发形成的玄武岩层在空间分布上的不确定性, 也使月球表层和次表层地质结构更为复杂, 因此要求探测方法和仪器具有更高的精度, 才能使探测结果的真实性强。目前用于月球科学探测的雷达探测方式有四种, 地基探测、星载探测、星地联合探测和就位探测[6]。地基探测方法利用地面大口径合成孔径雷达对月球进行观测, 观测周期短, 较为经济, 但是空间分辨率较低[8]且无法获取月球背面的信息; 星载探测是将雷达搭载到卫星上、在近月轨道上对月球进行观测的探测方式, 理论上可满足全月观测的要求、精确度较高, 但成本昂贵、观测周期长; 星地联合探测是将雷达收发设备分置于星载、地基两个不同载体平台的探测方式, 结合了星载雷达与地基雷达的优势, 减少了星载雷达的载荷负重, 较为经济, 但数据处理算法上更为复杂; 就位探测是将雷达搭载在月球巡视器上的实地登陆的探测方式,

可以获得不同区域的地质信息, 相对于其他探测方式精度更高, 有成为未来外星体雷达探测主要方式的趋势。

随着深空探测纳入中国“十三五”计划纲要, 雷达探测技术将成为最重要、最有潜力的空间探测方法之一。中国计划于 2018 年发射的嫦娥四号月球探测器和 2020 年发射的火星探测器都将携带雷达探测仪器。本文重点介绍嫦娥三号测月雷达, 其高频、低频通道分别获取了雨海地区的月壤层和月球次表层结构的详细信息。作为国际上首个月球就位探测雷达, 嫦娥三号测月雷达所取得的成就为这种高精度的探测方式在外星体探测中的应用奠定了基础。在设备研制和探测方案设计等方面, 嫦娥三号测月雷达等雷达设备的技术参数及探测成果具有极大参考价值, 本文从测月雷达方法研究、雷达仪器设备研制、测月雷达数据处理解释方法以及月球雷达探测研究成果这四个方面进行综述, 为今后的相关研究提供参考。

## 2. 测月雷达方法研究

雷达设备由发射天线发射电磁波, 穿透月球表层与次表层, 当电磁波脉冲遇到月球表面以及月球次表层内不连续的分界面时, 将产生回波信号并由雷达接收天线接收。通过对回波信号的分析与解译, 可以获得月球次表层的地质信息。因为电磁波在月球介质中衰减较慢、对探测对象产生零损害以及可以快速完成信号收发等突出优点, 雷达探测技术成为月球科学探测的理想方法。

众所周知, 探月项目耗费大量人力、物力, 所以要尽可能地提高仪器及探测结果的可靠性。雷达设备的大多数采集参数是预先设定的, 因受通讯能力、仪器的大小和重量等条件的限制, 当其在外太空中开始工作之后, 地面指挥中心能够进行的调整十分有限。由于探月任务的复杂性和月表环境的苛刻, 需要结合目标及月表环境开展大量专项模拟实验[9], 通过实验结果与任务要求的比对, 对雷达设计参数进行调整, 提高其探测效率和对月表环境的适应能力, 保证探月任务的顺利完成; 掌握类月地质结构与雷达回波特征之间的规律, 为将来的数据解释工作提供参考。

测月雷达的模拟试验分为室内和室外两个方面, 在室内主要通过浅层的相关剖面设计来模拟雷达对浅层物质的探测能力, 多数是在装有干砂的砂槽中放置石块等物质来模拟月球次表层地质概况[10]; 野外选取类月模拟试验场, 对月球车和各类仪器的温差耐受性、抗震性能以及月球车的行进性能等各方面进行调试。中国嫦娥三号的室外模拟试验场位于库姆塔格沙漠与罗布泊交界的阿克奇谷地附近, 此处白天酷暑难耐, 夜晚寒冷无比, 沙粒细且干燥, 地质条件等各方面都是国内最接近月球环境的地方[11]。

## 3. 测月雷达仪器设备研制

相对于星载雷达和地基雷达, 就位探测雷达频带更宽, 因此具有相对较高的水平、垂向分辨率和相对较小的噪声干扰[6]。嫦娥三号测月雷达是世界上首个采用就位探测方式的测月雷达, 相对于以往的星载和地基雷达, 其距离分辨率是最高的[6]。随着通信、能源供给、火箭运载能力以及各项仪器设备性能的提升, 就位探测有望成为将来执行外星体探测任务的主流方式。就位探测方式所使用的雷达设备由收发天线、发射机、电缆组件和电子学单元(控制器单元和接收机单元)组成。发射机在雷达主控制器输出的发射时钟触发下产生符合要求的脉冲信号, 并由天线辐射出去; 接收天线接收到地下目标回波信号后传送给接收机对其进行放大、传送到主控制器进行数字化, 再经过一系列简单的处理后由巡视器下传[12]。月球环境因素复杂、探测条件苛刻, 应该充分考虑仪器对于月球表面的高低温、地形地貌[9]、强宇宙射线辐射等方面的耐受能力和适应能力[13]。为了便于开展后续的处理工作和有效信息的提取, 在月球车荷载仪器的设计和位置布设方面要尽可能地消除或减弱仪器间的相互影响[14]。此外, 对于依靠运载火箭发射至外太空的探测仪器来讲, 重型设备的发射成本高、难度大, 所以在保证探测效果的条件下, 要尽可能地缩减仪器重量、调整尺寸。

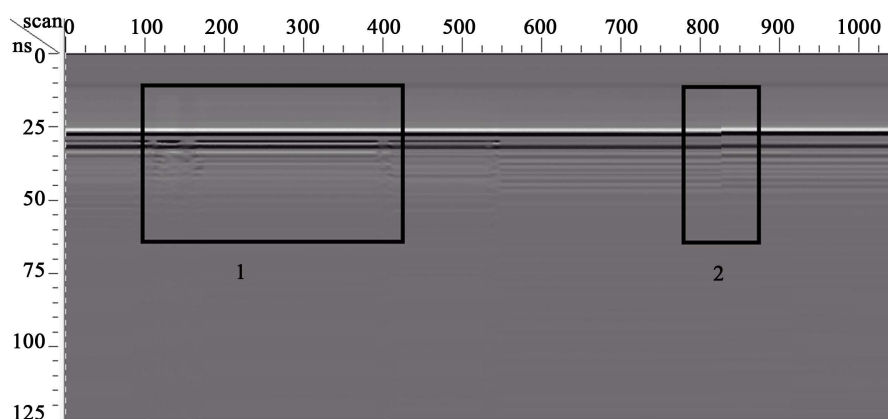
在测月雷达设备研制工作中, 天线系统设计是最关键的部分之一[15]。天线的设计必须考虑到探测目标特性、月壤特性、信号处理、波形设计等方面, 并与传播媒质的性质和目标体的几何形状等因素相匹配[16]。同时, 还要求天线发射的窄脉冲源重复性高、脉冲幅值大、前沿陡、宽度窄[17]。研究表明, 增加雷达探测仪的带宽, 可以分辨月球表面的细节特征, 但是带宽增加提高了雷达探测仪中心频率, 使得探测深度变浅。因此带宽的选择应该综合考虑距离分辨率与探测深度的要求[18]。中国嫦娥三号测月雷达采用高频超带宽工作体制, 设计了两个独立的探测通道, 通道一和通道二的发射天线中心频率分别为 60 MHz 和 500 MHz [19], 兼顾探测深度和分辨率的要求。两个通道的设计探测深度分别为 100 m 和 30 m, 设计分辨率分别为米级和 0.3 m [19]。此外, 电磁波在金属材料表面几乎完全反射, 因此必需严格限制金属材质的月球车给雷达数据带来的干扰, 对此采用 XX 向极化天线可以达到较好的效果[20], 在浅表探测雷达中, 超宽频带天线普遍采用平面偶极子形式[17], 中国嫦娥三号测月雷达通道二的收发天线为碟形平面偶极子天线。在碟形收发天线后方增置矩形电磁屏蔽腔, 可以提高天线的辐射性能, 增强来自地面的反射信号, 减少来自周围环境的干扰。

#### 4. 测月雷达数据处理方法

测月雷达设备发回的原始数据, 由于信噪比较低不能直接进行解释。在星载探测和地基探测这两种方式中, 目标体与接收天线距离较远是造成信噪比低的原因之一, 对于就位探测雷达数据来说, 原因更为复杂。分析嫦娥三号测月雷达的原始数据, 最突出的特点是接收机饱和和恢复过程中的低频振荡产生的直流分量严重掩盖了有效信号, 导致在雷达数据剖面上几乎看不到有效反射信息(如图 1)。因此必须对原始数据进行处理, 才能进一步进行时深转换和解释工作。

对于星载低频(通常指中心频率在 10 MHz 左右)双天线雷达, 原始数据中最严重的问题是次表层回波容易被较深的表层回波淹没, 因此要考虑杂波抑制技术。相关实验证明, 采用比例相乘(王莹瑛等, 2011)、时域 RLS 杂波抑制方法(曹志国, 2013)以及对雷达多次接收信号进行叠加(李雁斌等, 2015)都具有很好的效果, 但是难点在于要先分析星体的地形结构[17] [21] [22]。

对于就位探测来说, 虽然雷达仪器距离月表很近(如嫦娥三号测月雷达天线距月表在 1 米以内[23]), 但是在雷达原始数据剖面上仍然可见明显的不连续(如图 1 中的两个黑色方框所标注的区域)和低信噪比特征。造成不连续的原因有很多, 如月球表面温差大、月球车静止不动时采集了大量的重复数据[24]、



**Figure 1.** Raw data from Channel 2-B of Lunar Penetrating Radar onboard Chang'E-3 spacecraft. As shown in the box 1, clutter of reflect signals indicates the movement of Yutu rover, while the horizontal and continuous banding indicates the pause. Discontinuity in the box 2 is caused by the change of the first arrival time of radar data

**图 1.** 嫦娥三号测月雷达 2B 通道采集原始数据剖面。方框 1 中, 波形杂乱的部分为月球车行驶时所采集的有效数据, 较平直的部分是月球车静止是采集的重复数据; 方框 2 中明显的同相轴错断是由直达波到时变化所引起的



采集参数变化以及月球车在行驶过程中天线与地面距离的变化导致直达波到时不同(如图 1)等。测月雷达数据上的特殊性使处理工作略显棘手, 为提高雷达成像的可靠性, 要采用提取有效道、道间均衡[24]、时间零点校正等方法来处理采集数据。在嫦娥三号测月雷达原始数据中, 主要存在的问题及其相应处理手段如下。第一, 数据中存在的直流分量严重压制了有效信号幅度, 这是由接收机饱和和恢复过程中的低频振荡产生的。对此使用沿时间方向的时域滑动滤波的处理方法, 不仅能剔除直流分量, 还能有效改善普通滤波方法所产生的时窗边缘信号抖动现象[24]。第二, 球面扩散、介质吸收作用使雷达波在月球浅表层衰减严重, 对此可以采用振幅补偿、自动增益等处理方法使深部和浅部的振幅达到相对均衡的程度[14][25]。第三, 采用柯西霍夫偏移和反褶积技术来提高雷达数据的分辨率[25][26], 但是反褶积后可能会产生高频噪音, 对此可再次滤波进行改善[14][26]。值得注意的是, 处理高频数据时要谨慎选择滤波器, 因为无限长滤波器在时域引起的非线性相位转换会引起时窗边缘信号的抖动——即“振铃效应”[27][28]。

将时间域的信号转换到深度域(时深转换), 需要使用雷达波在介质中传播的速度。在求取传播速度时, 介电常数至关重要, 通常利用反演计算来确定介质的介电常数值, 如数据库法, 迭代求解法, 显示函数求解法, 理论推导法[29], 双曲线拟合法[23]等。在很难直接通过反演来获取月球岩石的介电常数时, 可以利用阿波罗采样岩石的分析结果进行大致的估算[19]。

## 5. 测月雷达探测成果

在月球地形地貌测绘方面, 雷达探测技术主要在上世纪 60~80 年代间得到应用[7][30][31], 如今大多使用地形地貌相机和激光高度计来绘制月球地形图。现就月壤厚度、月球次表层结构以及月球水冰探测这三方面研究成果进行综述。

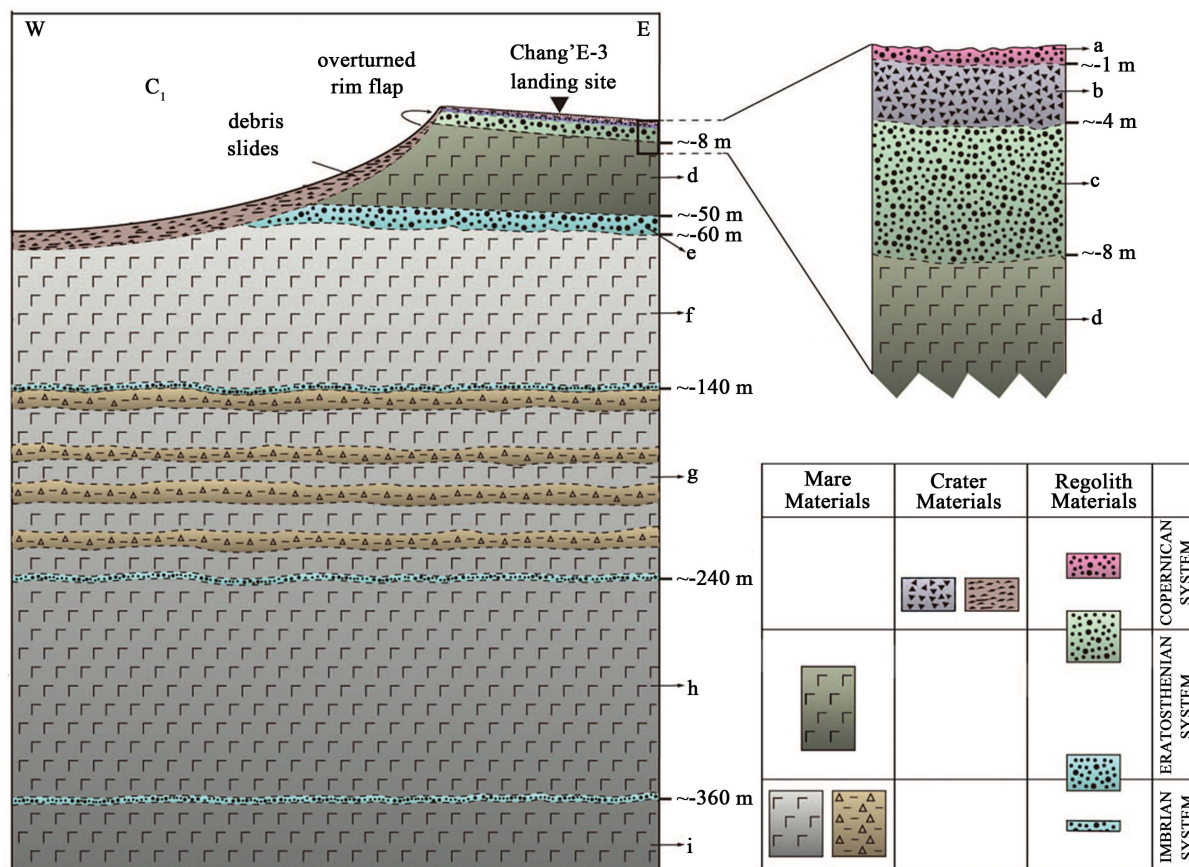
### 5.1. 月壤厚度

关于月球, 我们几乎所有的认识都是建立在月壤之上的: 所有的月岩和土壤样本、部分遥感信号[32]和就位探测研究成果来自月壤层。

根据以往的月壤探测成果, 年代老的地区月壤普遍更厚[33], 而地层年龄较年轻的地区月壤较薄; 高地的平均月壤厚度超过 10 米, 而海拔低的月海地区约 4~5 m [32][34]; 月球上几个比较大的地区宁静海、雨海、澄海和风暴洋地平均月壤厚度相近, 约为 6.3~6.5 米[35]。总体来讲, 月壤的地质模型可以划分为两层模型和三层模型。两层模型如阿波罗 17 号降落点金牛座利特洛峡谷[36], 上层为风化物, 下层为月岩, 是最典型的沉积风化模式; 三层模型如嫦娥三号降落点——雨海北部(见图 2), 常见于月球表面的撞击坑附近, 体现了小行星等撞击物对月球表面的改造。该模型由溅射物风化层、未风化或未完全风化的撞击坑溅射物沉积层以及月岩层组成[23][26]。

### 5.2. 次表层地质结构探测

人类最早使用雷达探测技术进行月球次表层探测是在阿波罗 17 号任务中实现的[37]。随着雷达分辨率的提高和处理手段的发展, 21 世纪月球次表层探测取得了突飞猛进的成果。月球次表层地质结构也可以划分为两种模型, 其一为两层结构模型, 上层为月壤, 下层为玄武岩, 如澄海和史密斯海地区, 这与月壤的两层模型是一样的; 另一个为三层结构模型, 上层为月壤, 中间层为玄武岩, 最下层为玄武岩熔流覆盖的风化层, 如风暴洋、雨海和危海地区[4][7]。肖龙等人分析了中国嫦娥三号测月雷达发回的数据, 认为月球上雨海东北部地区可再细分为 9 个地层, 从上到下编号依次为 a-i (如图 2)。最上面的 a-c 层为月壤, 从地表向下延伸至约 10 米; d、f、g、h、i 依次为从爱拉托逊纪到雨海纪的五个玄武岩层, 记录了五次明显的火山运动; 爱拉托逊纪和雨海纪玄武岩层之间的 e 层为一个古风化壳[26]。该成果已经于 2015 年发表于《Science》。



**Figure 2.** Sketched geological cross section and an inferred profile of the CE-3 landing site. Yutu has detected at list nine sub-surface interfaces, which formed from Imbrian to Copernican [26]

**图2.** 嫦娥三号着陆点附近的地质剖面模型[26]。肖龙等人推测该地可分为至少9个地层,从上到下依次编号为(a)-(i),其中(a)-(c)为月壤层, (d)-(f)为从哥白尼纪到雨海纪的数次火山爆发留下的玄武岩层

### 5.3. 月球水冰探测

水是生命之源,月球上的水冰资源关系到月球生命是否存在、宇航员能否在月球上长期停留等诸多重要问题。1961年, Watson 等人首次提出月球存在水冰的假设[38],但关于月球上是否有水存在,21世纪前都没有定论。20世纪90年代以及21世纪初,“克莱门汀号”、“月球勘探者号”以及“月船一号”都发现月球极地可能存在水的证据[39][40][41][42],但遭到很多科学家的质疑或反对。从那时起学术界形成了三种观点: Tsang(1985年)[43]、郑永春(2004年)[44]等人认为不能确定月球上是否有水冰,雷达波的大角度入射和月球表面粗糙等其他散射机制也会较带来较高的圆极化率,从而被误认为是水冰的反射特征; Nozette(1996年)[40]、张橙华(1999年)[39]、Spudis(2008年)[41]等人认为月面上的一些永久阴影区中不会受到光照,符合水冰存在的条件,雷达回波圆极化率增大是水冰确实存在的证据;另一些学者(Stacy等,1997[45]; Thomson等,2012[46])则认为月球上并不存在大面积的水冰,但不排除存在分散的、低于雷达分辨率的水冰。

直到2009年,美国国家航空航天局(NASA)的月球勘测轨道器(LRO)和月球陨坑观测与遥感卫星(LCROSS)撞击月球南极的 Cabeus 永久阴暗坑,才证实了月球确实存在水(Colaprete等,2010)[47]。2013年,Spudis等人根据LRO携带的微型射频频仪发回的雷达数据,进一步提出月球两极的一些异常撞击坑地表下2~3米的范围内可能存在数百万吨的纯冰[48]。但是要想获得更加准确的结论,尚需提高雷达的分

分辨率。NASA 计划 2018 年发射的 LunaH-Map 航天器将对月球极地进行更加详细的探测[49], 希望能够为月球上究竟存在多少水、水以何种形式存在这个问题提供更加确切的答案。

## 6. 问题和展望

回顾人类地探月历程, 雷达探测技术在月球科学研究中成绩斐然。从最初主要用来观测月球正面地形地貌的地基雷达, 发展到可以获取全月地质-地球物理概况的星载雷达, 以及更精确、更具有针对性的就位巡视探测雷达, 雷达仪器的探测精度在不断地提高, 在探测任务中取得的科研成果也越来越丰硕。迄今为止国际上已在月球表面地形地貌测绘, 月壤层探测, 月球浅表层探测以及水冰存在性等方面取得了丰硕的科研成果。随着国际上对月球科学探测和资源开发的进一步需求, 高精度的雷达探测技术将在未来的探月任务中占据更加重要的地位。但是, 关于雷达技术探月尚且存在以下几方面的问题:

1) 嫦娥三号首次实现了探月工程的软着陆, 着陆点在月球的近地面。但在月球背面的探测中尚且没有较详细的勘探数据。由于月球背面总是背向地球, 就位巡视探测器无法直接完成对地信号传输, 借用中继星(如嫦娥四号计划使用“地月 L2 卫星”)进行数据传输则距离较远, 对信号发射功率和接收灵敏度的要求都很高[50]。

2) 依据嫦娥三号测月雷达取得的科学成果, 就位巡视探测在高精度、高分辨率的要求下是最理想的探测方式。但在国际上目前只有中国实现了一次雷达就位探测, 该领域仍然具有很大的发展空间。

3) 地面探测研究需要利用综合地球物理信息结合钻井信息进行综合解释, 并可利用已知信息进行成果验证。但是对于月球探测, 探测数据难以获得、已知信息少, 探测结果主要依据综合研究推断获得, 并无法验证。因此如何获取多方面的资料, 或是研究现有资料下可靠的解释方法是未来月球科学探测领域面临的重要问题之一。

雷达探测技术不仅用于探月, 在火星等其他外星球探测上也取得了诸多成就: 欧洲航天局(ESA) 2003 年发射的火星快车号和美国国家航空航天局(NASA) 2005 年发射的火星勘测轨道飞行器(MRO)都在火星上发现了水冰存在的确切证据[51] [52] [53]。目前, 中国空间技术能力已步入世界先进行列。载人航天、探月工程重大专项取得了重大阶段性成果, 已圆满完成“三步走”发展目标的前两步。未来 5~10 年, 中国将加快实施以火星探测为重点的深空探测计划。2020 年完成小行星、木星系、月球后续等深空探测工程方案深化论证和关键技术攻关。雷达探测技术作为一种快速、连续和无损的高分辨率探测技术, 必定是未来航天科学研究中举足轻重的一部分[54] [55] [56]。

## 参考文献 (References)

- [1] Phillips, R.J., Adams, G.F., Brown, W.E., *et al.* (1973) Apollo Lunar Sounder Experiment. NASA Technical Report.
- [2] Porcello, L.J., Jordan, R.L., Zelenka, J.S. and Adams, G.F. (1974) The Apollo Lunar Sounder Radar System. *Proceedings of the IEEE*, **62**, 769-783. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9517>
- [3] Ono, T. and Oya, H. (2000) Lunar Radar Sounder (LRS) Experiment On-Board the SELENE Spacecraft. *Earth, Planets and Space*, **52**, 629-637. <https://doi.org/10.1186/BF03351671>
- [4] Ono, T., Kumamoto, A., Nakagawa, H., Yamaguchi, Y., Oshigami, S., Yamaji, A., *et al.* (2009) Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layers under the Nearside Maria of the Moon. *Science*, **323**, 909-912. <https://doi.org/10.1126/science.1165988>
- [5] Nozette, S., Spudis, P., Bussey, B., Jensen, R., Raney, K., Winters, H., *et al.* (2010) The Lunar Reconnaissance Orbiter Miniature Radio Frequency (Mini-RF) Technology Demonstration. *Space Science Reviews*, **150**, 285-302. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9607-5>
- [6] 丁春雨, 封剑青, 郑磊等. 雷达探测技术在探月中的应用[J]. *天文研究与技术*, 2015, 12(2): 229-240.
- [7] Thompson, T.W. (1987) High-Resolution Lunar Radar Map at 70-cm Wavelength. *Earthmoon and Planets*, **37**, 59-70. <https://doi.org/10.1007/BF00054324>



- [8] 李雄耀, 王世杰, 陈丰, 欧阳自远, 程安云, 李世杰. 月壤厚度的研究方法与发展[J]. 矿物学报, 2007: 64-68.
- [9] 孙泽洲, 张焯, 贾阳, 等. 嫦娥三号探测器地面验证技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2014(4): 369-376.
- [10] 连懿. 基于嫦娥探月微波数据的月球浅表层成分反演与结构分析研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [11] 喻菲. 揭秘月球车试验场:中国最像月球的地方[N]. 新华每日电讯, 2013-12-05(005).
- [12] 代树武, 吴季, 孙辉先, 张宝明, 杨建峰, 方广有, 等. 嫦娥三号巡视器有效载荷[J]. 空间科学学报, 2014, 34(3): 332-340.
- [13] 孙泽洲, 张廷新, 张焯, 等. 嫦娥三号探测器的技术设计与成就[J]. 中国科学: 技术科学, 2014(4): 331-343.
- [14] Zhao, N., Zhu, P.M., Yang, K.S., Yuan, Y.F. and Guo, S.L. (2014) The Preliminary Processing and Analysis of LPR Channel-2B Data From Chang'E-3. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, **57**, 2346-2353. <https://doi.org/10.1007/s11433-014-5590-2>
- [15] Fang, G.Y., Zhou B., Ji, Y.C., et al. (2014) Lunar Penetrating Radar Onboard the Chang'e-3 Mission. *Research in Astronomy and Astrophysics*, **14**, 1607-1622. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/14/12/009>
- [16] 郑磊, 苏彦, 郑永春, 等. 地基雷达技术及其在太阳系天体探测中的应用[J]. 天文学进展, 2009, 27(4): 373-382.
- [17] 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.
- [18] 法文哲, 金亚秋. 雷达探测仪对月球次表层结构的探测模拟方法[J]. 中国科学: 地球科学, 2010(4): 473-485.
- [19] Li, C., Liu, J., Ren, X., Zuo, W., Tan, X., Wen, W., et al. (2015) The Chang'E 3 Mission Overview. *Space Science Reviews*, **190**, 85-101. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0134-7>
- [20] Angelopoulos, M., Redman, D., Pollard, W.H., et al. (2014) Lunar Ground Penetrating Radar: Minimizing Potential Data Artifacts Caused By Signal Interaction with a Rover Body. *Advances in Space Research*, **54**, 2059-2072.
- [21] 王莹瑛, 方广有. 基于星载双天线的月球表面杂波抑制方法研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(10): 39-47.
- [22] 曹志国. 次表层探测雷达成像仿真技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [23] Lai, J., Xu, Y., Zhang, X. and Tang, Z. (2016) Structural Analysis of Lunar Subsurface With Chang'E-3 Lunar Penetrating Radar. *Planetary & Space Science*, **120**, 96-102.
- [24] 高云泽, 董泽华, 方广有, 纪奕才, 周斌. 嫦娥三号测月雷达第一通道数据处理与分析[J]. 雷达学报, 2015(5): 518-526.
- [25] Fa, W., Zhu, M., Liu, T., et al. (2016) Regolith Stratigraphy At the Chang'E-3 Landing Site as Seen by Lunar Penetrating Radar. *Geophysical Research Letters*, **42**, 10179-10187.
- [26] Xiao, L., Zhu, P., Fang, G., et al. (2007) A Young Multilayered Terrane of the Northern Mare Imbrium Revealed By Chang'E-3 Mission. *Science*, **347**, 1226-1229. <https://doi.org/10.1126/science.1259866>
- [27] Bianchi, G. (2007) Electronic Filter Simulation & Design.
- [28] Ifeachor, E.C., Jervis, B.W. and O'Reilly, J.O. (1995) Digital Signal Processing: A Practical Approach. IEEE Colloquium on Teaching of Digital Signal Processing. Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc., Boston, 6/1-6/8. <https://doi.org/10.1049/ic:19950210>
- [29] 雷学莲. 雷达探月仿真与实测数据分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [30] Zisk, S.H., Pettengill, G.H. and Catuna, G.W. (1974) High-Resolution Radar Maps of the Lunar Surface at 3.8-cm Wavelength. *Earth, Moon, and Planets*, **10**, 17-50.
- [31] Hagfors, T., Nanni, B. and Stone, K. (1968) Aperture Synthesis in Radar Astronomy and Some Applications to Lunar and Planetary Studies. *Radio Science*, **3**, 491. <https://doi.org/10.1002/rds196835491>
- [32] Fa, W.Z. and Wiczorek, M.A. (2012) Regolith Thickness over the Lunar Nearside: Results from Earth-Based 70-cm Arecibo Radar Observations. *Icarus*, **218**, 771-787.
- [33] Shkuratov, Y.G. and Bondarenko, N.V. (2001) Regolith Layer Thickness Mapping of the Moon by Radar and Optical Data. *Icarus*, **149**, 329-338. <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6545>
- [34] Jaumann, R., Hiesinger, H., Anand, M., et al. (2012) Geology, Geochemistry, and Geophysics of the Moon: Status of Current Understanding. *Planetary & Space Science*, **74**, 15-41.
- [35] Kobayashi, T., Kim, J.H., Lee, S.R., et al. (2010) Simultaneous Observation of Lunar Radar Sounder and Laser Altimeter of Kaguya for Lunar Regolith Layer Thickness Estimate. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, **7**, 435-439. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2038499>
- [36] Strangway, D.W., Pearce, G.W. and Olhoeft, G.R. (1977) Magnetic and Dielectric Properties of Lunar Samples. NASA Special Publication, 370.



- [37] Peebles, W.J., Sill, W.R., May, T.W., *et al.* (1978) Orbital Radar Evidence for Lunar Subsurface Layering in Maria Serenitatis and Crisium. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **83**, 3459-3468. <https://doi.org/10.1029/JB083iB07p03459>
- [38] Watson, K., Murray, B.C. and Brown, H. (1961) The Behavior of Volatiles on the Lunar Surface. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **66**, 3033-3045.
- [39] 张橙华. 月球勘探者号及其科学成果[J]. 物理教师, 1999, 20(2): 34-35.
- [40] Nozette, S., Lichtenberg, C.L., Spudis, P., *et al.* (1996) Clementine Bi-Static Radar Experiment: Preliminary Results. *Lunar and Planetary Science*, **27**, 967.
- [41] Spudis, P.D., Bussey, B., Lichtenberg, C., *et al.* (2009) Mini-SAR: An Imaging Radar for the Chandrayaan-1 Mission to the Moon. *Current Science*, **96**, 533-539.
- [42] Mohan, S., Das, A., Pandey, D. and Saran, S. (2011) Results of the Mini SAR Imaging Radar, Chandrayaan-1 Mission. *Planetary Science and Exploration, Chandrayaan-1 Meeting*, Ahmedabad.
- [43] Tsang, L., Jin, A.K. and Shin, R.T. (1985) Theory of Microwave Remote Sensing. Wiley, New York.
- [44] 郑永春, 王世杰, 刘春茹, 李雄耀, 欧阳自远. 月球水冰探测进展[J]. 地学前缘, 2004: 573-578.
- [45] Stacy, N.J.S., Campbell, D.B. and Ford, P.G. (1997) Arecibo Radar Mapping of the Lunar Poles: A Search for Ice Deposits. *Science*, **276**, 1527-1530. <https://doi.org/10.1126/science.276.5318.1527>
- [46] Thomson, B.J., Bussey, D.B.J., Neish, C.D., *et al.* (2012) An Upper Limit for Ice in Shackleton Crater as Revealed by LRO Mini-RF Orbital Radar. *Geophysical Research Letters*, **39**, L14201. <https://doi.org/10.1029/2012gl052119>
- [47] Colaprete, A., Schultz, P., Heldmann, J., *et al.* (2010) Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume. *Science*, **330**, 463. <https://doi.org/10.1126/science.1186986>
- [48] Spudis, P.D., Bussey, D.B.J., Baloga, S.M., *et al.* (2013) Evidence for Water Ice on the Moon: Results for Anomalous Polar Craters from the LRO Mini-RF Imaging Radar. *Journal of Geophysical Research Planets*, **118**, 2016-2029. <https://doi.org/10.1002/jgre.20156>
- [49] Hardgrove, C., Bell, J., Thangavelautham, J., *et al.* (2015) The Lunar Polar Hydrogen Mapper (LunaH-Map) Mission: Mapping Hydrogen Distributions in Permanently Shadowed Regions of the Moon's South Pole. *Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group*, Columbia, 20-22 October 2015, 2035.
- [50] Wang, Q. and Liu, J. (2016) A Chang'E-4 Mission Concept and Vision of Future Chinese Lunar Exploration Activities. *Acta Astronautica*, **127**, 678-683.
- [51] Nielsen, E. (2004) Mars Express and MARSIS. *Space Science Reviews*, **111**, 245-262. <https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000032712.05204.5e>
- [52] Picardi, G., Plaut, J.J., Biccari, D., *et al.* (2005) Radar Soundings of the Subsurface of Mars. *Science*, **310**, 1925. <https://doi.org/10.1126/science.1122165>
- [53] Brothers, T.C., Holt, J.W. and Spiga, A. (2015) Planum Boreum Basal Unit Topography, Mars: Irregularities and Insights from SHARAD. *Journal of Geophysical Research Planets*, **120**, 1357-1375. <https://doi.org/10.1002/2015JE004830>
- [54] Falkner, P., Peacock, A. and Schulz, R. (2007) 10.18-Instrumentation for Planetary Exploration Missions. *Treatise on Geophysics*, **17**, 595-641.
- [55] Heggy, E., Fong, T., Kring, D.A., *et al.* (2009) Potential of Probing the Lunar Regolith Using Rover-Mounted Ground Penetrating Radar: Moses Lake Dune Field Analog Study.
- [56] Russell, P.S., Grant, J.A., Williams, K.K., *et al.* (2010) Ground Penetrating Radar Field Studies of Lunar-Analog Geologic Settings and Processes: Barringermeteor Crater and Northern Arizona Volcanics. *42nd Lunar and Planetary Science Conference*, Woodlands, March 7-11 2011, Article No. 2097.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)