双基地雷达月表极地水冰沉积物探测

冯飞飞[1]，简念川[2]，汤海波[1]，孟 桥[3]，陈从颜[1]

（1. 东南大学 自动化学院，南京 210096；2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030；3. 东南大学 信息科学与工程学院，南京 210096）

摘 要：针对深空双基地雷达在天体探测面临的观测几何快速变化、极低信噪比以及由于缺乏本地校准源导致的通道增益与相位标定困难等问题，利用SPICE（Spacecraft Planet Instrument C-matrix Events）工具，围绕近后向散射条件下的散射回波数据，设计了一套面向深空场景的双基地回波地形反演系统。该系统包含模型构建、数据校正以及基于多参量综合反演表面地形特征。分析结果表明：成功提取了月球南极区域的回波强度增强、圆极化率（Circular Polarization Ratio，CPR）局部升高、介电常数下降以及交叉谱相位扰动等与水冰相关的电磁特征，综合验证了南极区域极地水冰沉积物存在的可能性。研究结果证明了深空双基地雷达在地形与介质反演的有效性，并为未来深空天体的双基地雷达应用提供了可拓展的技术路径。

关键词：地形反演；水冰沉积物检测；双基地雷达；SPICE

中图分类号：P165 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-9287(2025)06-0579-11

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250021

引用格式：冯飞飞，简念川，汤海波，等. 双基地雷达月表极地水冰沉积物探测[J]. 深空探测学报（中英文），2025，12（6）：579-589.

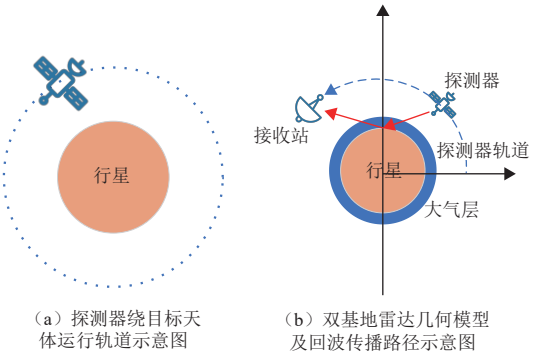
Reference format: FENG F F，JIAN N C，TANG H B，et al. Bistatic radar detection of water ice deposits in lunar polar regions[J]. Journal of Deep Space Exploration，2025，12（6）：579-589.

引 言

双基地雷达作为行星表面遥感探测的重要技术手段，在地形特征反演与物质成分分析中展现出独特的优势。在探测模式上，双基地雷达通过收发分置的几何构型，赋予系统灵活的参数调节能力；发射器可采用多样化的极化方式（如水平极化、圆极化等），利用不同极化状态下目标体的散射特性差异，获取丰富的电磁散射信息；同时，通过精确调整发射信号入射角，能够模拟多种观测条件，进而实现对行星表面物理特性的多维度表征[1]。

在行星探测工程应用[2-3]中，双基地雷达常采用“星载发射–地基接收”的经典构型：发射器搭载于飞越或环绕目标天体的航天器，接收器部署于地球地面站（图1）。这种分离式架构在扩展了单次探测覆盖范围的同时能有效抑制环境噪声及非目标体的杂散回波干扰，显著提升回波信号的信噪比与稳定性。

月球作为人类深空探测任务的重要目标之一，基于雷达测量技术的月表地形测绘与物质成分反演，始终是国际行星探测任务的核心科学目标之一。在国际研究进程中，月球雷达探测经历了从早期验证到高精度探测的技术跨越。1992年，阿雷西博天文台利用S频段双极化雷达波对月球极地开展探测[4]，尽管未发现大面积水冰分布，但其技术实践为后续行星雷达观测奠定了重要基础。20世纪90年代，美国“克莱门汀号”（Clementine）任务首次采用双基地雷达测量模式，系统获取了月球表面后向散射特性数据[5-6]，为后续开展月球极地水冰沉积物探测提供了关键的科学依据。随着技术的持续进步，美国“月球勘测轨道器”（Lunar Reconnaissance Orbiter，LRO）搭载的高分辨率微波雷达进一步提升了探测精度[7]，通过多极化数据分析，成



（a）探测器绕目标天体运行轨道示意图

（b）双基地雷达几何模型及回波传播路径示意图

图 1 双基地雷达示意图

Fig. 1 Bistatic radar schematic

收稿日期：2025-04-15 修回日期：2025-08-01

基金项目：国家重点研发课题（2021YFC2203502）

功揭示了月球南极永久阴影区存在水冰特征的可能性，推动月球水冰研究进入新的阶段。

中国在月球雷达探测领域同样取得了系统性的研究成果。自“嫦娥一号”[8]探月任务起，中国便开始利用微波探测技术对月球表面物质成分展开研究。“嫦娥二号”“嫦娥三号”任务通过技术迭代，实现了月球表面高分辨率成像，显著提升了地形反演精度。“嫦娥四号”[9]“嫦娥六号”[10]针对月球南极艾特肯盆地（South Pole-Aitken Basin）等关键区域开展了详细测绘工作[11]，获取了高精度的地形与地质数据，为后续的水冰探测与资源勘查任务提供了重要支撑。

在雷达探测技术研发方面，中国研究团队在单、双基地雷达试验领域也在不断收获创新性的突破。孙等[12]利用曲靖非相干散射雷达开展单基地自发自收探月试验，成功提取月面不同区域的雷达反射率及介电常数参数；同时，基于喀什深空站与昆明站构建的双基地雷达系统，通过连续波信号探测试验，验证了“射电望远镜–深空雷达”协同观测模式在月球探测的可行性与有效性。这一系列研究成果为中国自主发展行星雷达探测技术提供了理论与实践基础。此外，“天问一号”火星探测任务双基地雷达技术的成功应用[13]，标志着中国在深空探测领域实现了关键技术跨越，为行星表面地形反演及物质成分探测开辟了新路径。面向未来，中国规划于2029年实施的“天问四号”重大探测工程，拟以木卫四为主要研究对象，利用双基地雷达技术系统研究其表面冰层形貌与厚度特性，这将进一步推动中国在冰卫星探测领域的技术创新与科学发现。

然而，尽管双基地雷达已得到多次应用，其在深空环境下的运行条件与地基或近地轨道雷达存在根本差异。首先，深空探测器绕月飞行导致观测几何随时间快速变化，双基地角、入射角、多普勒频移均呈现强动态特性，与地面双基地稳定几何条件完全不同。其次，深空平台无法搭载本地校准源，使得通道增益漂移、系统噪声温度与相位漂移无法直接测量，必须依赖自然辐射源与轨道几何进行反演式校准。因此，构建一套适用于深空近后向散射条件的完整双基地反演系统，是实现高质量深空地形反演的关键。

基于上述科学需求和工程难题，本文针对Clementine获取的月球南极区域散射回波数据，开展深空双基地地形反演研究，重点分析近后向散射条件下的散射回波数据，通过对回波强度、圆极化率、介电常数及交叉谱等多参量的综合分析，评估南极区域可能存在的极地水冰沉积物特征。验证了深空双基地雷达在近后向散射条件下地形与介质反演的有效性，并为未来木星冰卫星等深空双基地雷达探测任务提供了可拓展的技术参考。

1 双基地月表极地水冰沉积物探测试验数据

1.1 双基地试验标称参数

本试验采用Clementine任务科学数据，探测区域覆盖月球南极关键地带。在数据筛选过程中，基于地月几何关系与探测器轨道特性，严格选取特定观测时段，确保月球极地区域在试验周期内处于地球可见视场，同时使地球相对探测器轨道平面处于优化观测构型[14]。

Clementine的核心探测参数如表1所示，其中，任务执行期间，探测器发射右旋圆极化（Right Circularly Polarized，RCP）的连续波S波段信号。该极化信号与月球表面复杂的地形地貌、物质组成及结构特征相互作用时，发生电磁散射与反射过程，导致信号极化状态产生显著改变。依据电磁波散射理论，经月表作用后的回波信号最终呈现为左旋圆极化（Left Circularly Polarized，LCP）与右旋圆极化成分混合的特征[5]，其极化态变化蕴含丰富的月表物理信息。

表 1 Clementine系统标称参数

Table 1 Nominal parameters of the Clementine system

参数	参考值
发射频段	S-Band
发射频率/MHz	2 273
波长λ/m	0.132
发射功率P_T/W	7.1
发射天线轴向增益G_T/dB	26.2
发射极化	RCP
接收天线轴向增益$G_R(\theta_R=0°)$/dB	63.22
天线有效孔径$A_R=\dfrac{\lambda^2 G_R}{4\pi}$/m^2	2 910
接收极化	RCP/LCP
发射/接收天线离轴角θ_T/θ_R	

1.2 双基地轨道几何描述

Clementine探测器运行至地球穿越其轨道平面时，从美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）深空网络（Deep Space Network，DSN）的观测视角分析，月球自转轴相对于地球的倾斜角度达到4.5°～5.5°，此时月球目标观测点、地球接收站与航天器恰好共处于同一轨道平面，如图2所示，$\boldsymbol{t}_{sp}$和$\boldsymbol{r}_{sp}$分别表示从月球南极点指向航天器和地面测站的矢量，β_{sp}为$\boldsymbol{t}_{sp}$与$\boldsymbol{r}_{sp}$之间的夹角；β则定义为月面任意表面点至航天器的向量$\boldsymbol{t}$与至测站的向量$\boldsymbol{r}$之间的夹角[15]。该几何构型为双基地雷达观测提供了理想的共面散射条件，确保极化信号的传输路径与散射特性可通过矢量分析模型进行精确描述。

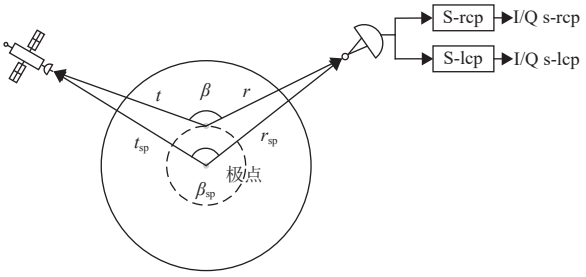


图 2　双基地雷达几何构型

Fig. 2　Bistatic radar geometric configuration

试验过程中，回波在近后向散射状态采集，提供了纯单基地系统无法实现的几何状态，可以搜索到更丰富的地形信息[14]。

所选数据的轨道散射点从南纬81.13°穿过90°，再至南纬86.26°，提供了穿过南极区域约500 km长的一条轨迹带，轨迹如图3所示。

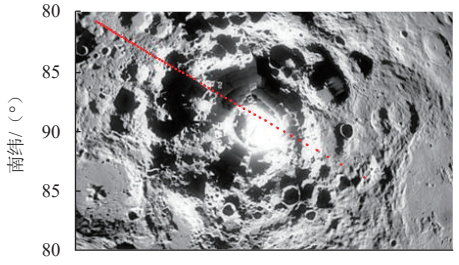


图 3　发射器散射点轨迹

Fig. 3　Scattering point trajectory of transmitter

南极点处双基地角最小为$\beta_{sp\min}$ = 0.1°，时间t_0为1994-4-9T18:46:36.5UTC。以t_0为中心的16 min观测窗口内，南极区域的入射角、散射角和双基地角随时间的动态变化如图4所示。除噪声功率校正环节需调用其它数据带，试验核心分析均基于该特定轨道段数据展开。在SPICE仿真计算中，为简化几何模型，月球被抽象为半径 1 737.4 km的均匀球体，暂不考虑地形起伏对电磁散射特性的影响。

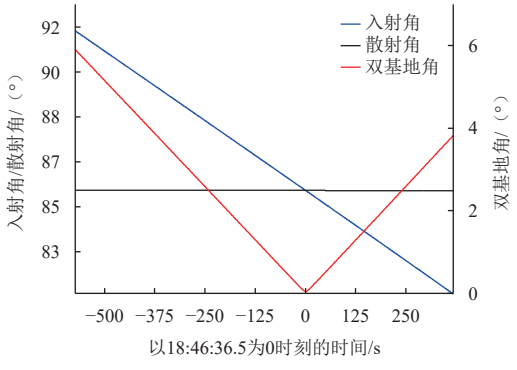


图 4　南极点处入射角、散射角及双基地角与时间的关系

Fig. 4　Relationship between time and incidence angle，scattering angle and bistatic angle at south pole

1.3　信号接收处理框架

在试验周期内，天线持续指向月球南极区域，数据采集时间范围1994-4-9T18:36:45UTC—1994-4-9T18:52:45UTC。系统以25 kHz采样频率同步获取右旋圆极化与左旋圆极化原始数据，数据存储于NASA行星数据系统（Planetary Data System，PDS）地球科学节点。原始数据集包含散射点经纬度坐标、数据校正参数等元信息，以ODR格式存储。作为深空探测领域标准化数据格式，ODR格式通过结构化设计实现了航天器轨道与姿态数据的高效记录、管理及高精度传输，被广泛应用于行星探测任务。

极化信号接收与处理流程如图5所示。输入可在接收天线和校准环境负载之间切换，在试验前后接入负载完成增益校正，以消除设备噪声与通道的误差。信号经两级混频器逐级下变频至目标通带，期间通过衰减器动态调整信号强度，避免功率过载导致的失真。最终，RCP与LCP通道的8位量化数据经同步合并后写入存储介质，为后续信号分析与地形反演提供原始数据源[16]。此处理架构通过标准化流程设计，确保极化信号采集的准确性与可靠性，为双基地雷达数据的科学解译奠定了基础。

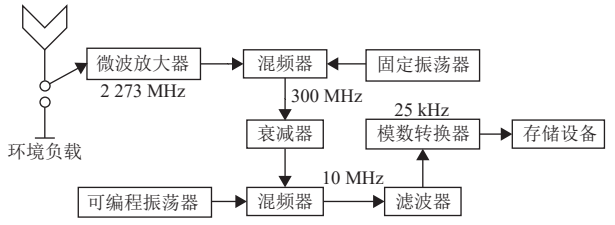


图 5　信号接收处理框图

Fig. 5　Block diagram of signal receiving and processing

1.4　多普勒效应及数据频谱特征

发射信号经散射后被测站接收，表面的每个点都可与飞船、接收机和表面的相对运动引起的多普勒频移相关联。对于南极点处的频率偏移为[17]

$$f_{\mathrm{sp}} = -\frac{1}{\lambda}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(|\boldsymbol{r}_{\mathrm{sp}}| + |\boldsymbol{t}_{\mathrm{sp}}|\right) \tag{1}$$

周边点相对于南极目标点的频率偏移为

$$f_{\mathrm{D}} = \frac{1}{\lambda}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[\left(|\boldsymbol{t}_{\mathrm{sp}}| + |\boldsymbol{r}_{\mathrm{sp}}|\right) - \left(|\boldsymbol{t}| + |\boldsymbol{r}|\right)\right] \tag{2}$$

从航天器直射到测站的信号的多普勒频移为

$$f_{\mathrm{c}} = -\frac{1}{\lambda}\cdot\frac{\mathrm{d}\left(|\boldsymbol{r}_{\mathrm{sp}} - \boldsymbol{t}_{\mathrm{sp}}|\right)}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

由于不同散射点的观测角度、表面粗糙度及空间位置存在差异，各散射点相对于发射源的径向速度、

回波信号传播路径及测站接收时间均呈现差异，进而导致多普勒频移的多样性。在此机制下，回波信号表现为多频率分量的复合叠加，其频率分布因表面粗糙度引发的散射特性变化而展宽，并在频域呈现典型的钟形分布特征[17]。

原始数据频谱特征如图6所示，其中幅值峰值对应航天器天线旁瓣辐射产生的直接信号，其右侧展宽区域为月球表面散射回波信号。

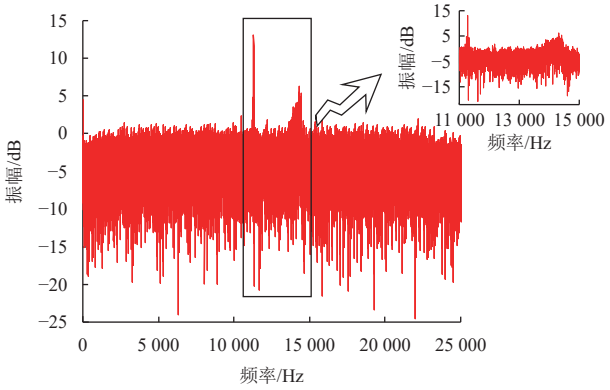


图 6 原始数据频谱
Fig. 6 Spectrum of raw data

原始RCP数据的功率谱密度分布如图7所示，结果表明直射信号与回波信号在频域呈现明显的分离特征，这一现象推测与发射信号时航天器的轨道动力学特性相关。结合图4的几何参数分析可知，试验全程双基地角始终保持在±6°范围内，航天器持续处于近后向散射状态。在此构型下，航天器相对于不同散射点及测站的径向速度方向相反，导致回波信号的频率偏移呈现反向特征，进一步验证了近后向散射条件下双基地雷达的多普勒频移机制。

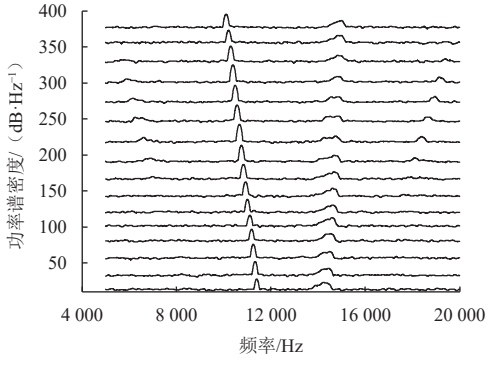


图 7 原始数据功率谱密度
Fig. 7 Power spectral density of raw data

1.5 基于SPICE的试验数据求解

SPICE是由美国喷气推进试验室（Jet Propulsion Laboratory，JPL）开发的航天仿真核心工具，专为航天任务提供高精度几何数据支持。其核心功能涵盖航天器轨道与姿态计算、仪器视场模拟、目标几何关系解算及多时间系统转换等，成为深空探测任务几何建模与动力学分析的标准工具[18]。

针对本试验对月球南极点位置、速度、目标多普勒频移及双基地角等关键几何参数的需求，需对任务周期内航天器、探测目标与地面测站的时空几何关系进行精确建模，因此采用SPICE接口作为核心技术支撑。具体求解流程如图8所示。首先构建南极点专用SPK（System Planet Kernel）内核文件，通过该文件精确描述南极点在惯性坐标系的位置与速度状态；后续基于该SPK内核，结合航天器轨道参数与测站坐标，实现双基地角、多普勒频移等关键几何量的实时计算，为回波信号的时空特性分析提供基础数据支撑。此建模方法利用SPICE的高精度历书计算能力，确保了几何参数解算的准确性与可靠性，满足双基地雷达试验对时空基准的严格需求。

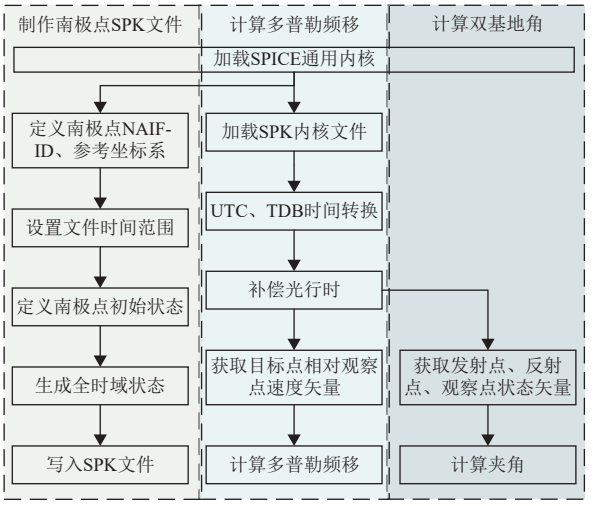


图 8 SPICE试验数据求解框图
Fig. 8 Block diagram of solution of SPICE experimental data

南极点笛卡尔坐标系的初始位置为

$$X = R \cdot \cos lat \cdot \cos lon \tag{4}$$

$$Y = R \cdot \cos lat \cdot \sin lon \tag{5}$$

$$Z = R \cdot \sin lat \tag{6}$$

在月固坐标系的角速度$(0,0,\omega)$，$\omega = 2\pi$/月球自转一周时间。故其速度为

$$v = (X,Y,Z) \otimes (0,0,\omega) \tag{7}$$

其中：lon、lat分别为月固坐标系的南极点经纬度坐标；月球半径R取1 737.4 km；$\otimes$为叉乘。基于初始状

态即可生成覆盖整个时间范围的状态点。

$$\cos\beta = \frac{\boldsymbol{r}\cdot\boldsymbol{t}}{|\boldsymbol{r}|\cdot|\boldsymbol{t}|} \tag{8}$$

多普勒频移和角度的计算需引入制作好的SPK文件，频移计算采用式（1）～（3）可得。当获取到反射点到观察点和入射点的矢量$\boldsymbol{r}$和$\boldsymbol{t}$后，双基地角β由式（8）计算可得。

2　数据校正

在行星科学研究中，精确的幅度与相位校准是获取可靠探测数据的关键前提，其核心任务包括消除接收路径间的绝对幅度偏差、抑制噪声干扰等。信号校正流程如图9所示，首先，输入信号经60阶FIR带通滤波器处理，该滤波器通过线性相位设计确保通带内恒定群延迟，有效补偿白噪声并消除基带输出的波动效应。在增益校正环节，系统针对数据采集过程中衰减器的实时变化进行动态补偿，同时校准各通道噪声水平，确保双极化通道信号具备统一的绝对幅度基准，显著提升极化测量的准确性。

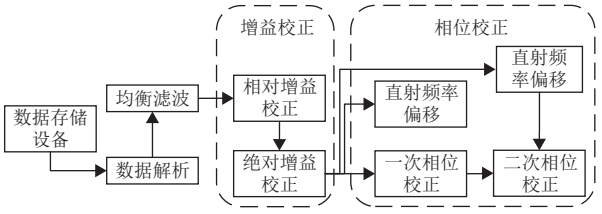


图 9　数据校正流程框图

Fig. 9　Block diagram of data correction process

相位校正用于将南极目标点频率移到频率带中心，鉴于Clementine没有配备精密振荡器，考虑使用载波信号作为参考，利用载波频率定位南极目标点的频率。因此需要分别计算载波信号和南极点散射信号的多普勒频移f_c和f_{sp}，用于消除回波由于运动产生的多普勒偏移。南极点信号相对于载波信号的频率偏移为

$$\delta f = f_{sp} - f_c \tag{9}$$

2.1　相对增益校正

在Clementine任务执行过程中，为确保模数转换器的输入幅度始终低于饱和阈值，避免信号失真，系统通过衰减器对输入信号动态调节。

相对增益校正前及滤波后经相对增益校正的信号功率特征如图10所示。图10（a）曲线的陡降段对应衰减器的实时调整操作，信号幅度降低约0.7～1 dB，理论上这些调整事件均应记录于存储文件。然而，LCP信号的最后一次陡降未在记录体现。Simpson等[14]研究指出，该异常现象可能源于LCP通道微波放大器或后续放大链路的自发增益波动。图10（b）为滤波后基于存储记录进行功率补偿的结果，可见增益漂移导致的信号偏差已得到有效修正。

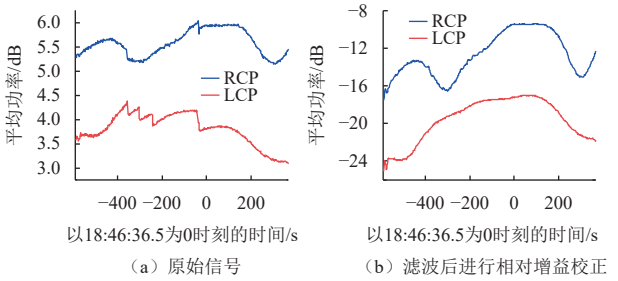


图 10　原始信号及滤波后进行相对增益校正的信号功率图

Fig. 10　Power of original signal and filtered signal with relative gain correction

2.2　绝对增益校正

在任务观测前后，极化接收器通过测量天空噪声温度（T_{sky}）等参数计算系统噪声温度（T_{sys}），以估算环境噪声功率并补偿回波功率[14]。噪声测量过程中，需引入环境负载温度（T_{amb}）、月球中心等效黑体温度（T_{ctr}）及月球边缘温度（T_{lim}）等关键参数。完整的功率校准测量结果汇总于表2，其中R代表右旋圆极化通道，L代表左旋圆极化通道，两类极化信号的测量值均基于独立固定幅度参考基准。各计算值由多次噪声样本经1 s时间平均、衰减器修正及加权平均处理后获得，最终表征为极化通道的平均噪声水平。

表 2　校准测量结果

Table 2　Calibration measurement results

极化	目标	开始时间/s	结束时间/s	平均噪声水平/K
R	SKY	64 150	64 675	4.455
R	AMB	64 695	64 875	63.606
R	LIM	65 562	71 460	16.014
R	CTR	71 489	71 700	42.330
R	AMB	71 745	72 105	60.298
R	SKY	72 125	72 309	4.212
L	SKY	64 175	64 675	2.202
L	AMB	64 685	64 870	33.436
L	LIM	65 571	71 460	9.543
L	CTR	71 610	71 710	21.808
L	AMB	71 745	72 105	31.488
L	SKY	72 125	72 309	2.083

$$Y_1 = \frac{T_{sys}+T_{amb}}{T_{sys}+T_{sky}} \tag{10}$$

$$Y_2 = \frac{T_{sys}+T_{amb}}{T_{sys}+T_{ctr}} \tag{11}$$

$$Y_3 = \frac{T_{sys}+T_{amb}}{T_{sys}+T_{lim}} \tag{12}$$

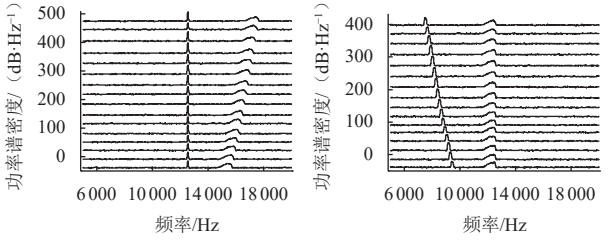
如果T_{sky}已知，可通过解式（10）、（11）和（12）得到T_{sys}、T_{ctr}和T_{lim}，其中Y_1、Y_2、Y_3分别为T_{amb}与T_{sky}、T_{amb}与T_{ctr}，T_{amb}与T_{lim}的平均噪声水平之比。

对于观测远距离点源的接收系统，研究重点在于T_{sys}，即天线指向暗天空时的背景噪声水平。试验期间，RCP和LCP的系统温度分别设定为21.51 K和20.12 K。根据这一系统温度设定，预计RCP在暗天空观测时的噪声功率应比LCP高0.29 dB。然而，试验前后的测量数据显示，RCP实际比LCP高3.05 dB（详见表2）。为确保两种极化信号的绝对幅度参考一致，需对所有LCP样本值增加2.76 dB的修正。

2.3 相位校正

通过南极点相对于载波的理论多普勒频移对回波信号进行相位校正。首先测量载波信号的瞬时多普勒频率，并依据测量频率拟合出一个分段线性连续频率函数，以此对信号相位进行一次调整，使载波频率出现在通带中心12 500 Hz处。

二次相位校正借助SPICE工具计算载波多普勒频移及南极目标点反射回波的相对多普勒频移，通过式（9）估算南极目标点相对于载波信号的频移，然后结合频移算子$\exp(-\mathrm{j}2\pi\cdot\delta f n/f_s)$进行补偿，达到将南极目标点的信号频率固定在通带中心12 500 Hz的目标。经两次相位校正的功率谱密度结果如图11所示，其中（a）、（b）分别为一次和二次相位校正后的功率谱密度。



（a）一次相位校正 （b）二次相位校正

图 11 相位校正后的功率谱密度

Fig. 11 PSD after phase correction

3 水冰沉积物特征提取与分析

利用雷达对月球极地水冰沉积物特征分析，可从回波功率特性、介电常数、圆极化率及交叉谱等多个维度展开研究。其中，介电常数是表征绝缘材料或电介质电性能的重要参数，可用于推断目标介质的物理特性，如成分和结构。圆极化率能够提供有关表面及近表面介质的更深入信息，有助于区分光滑表面与粗糙区域，并识别可能的水冰沉积物。交叉谱反映了同极化与相反极化信号的相关性，可用于表征地表粗糙度的空间分布并揭示沉积物的散射机制及介质结构特征，为研究水冰沉积物的形成过程与演化规律提供关键数据支撑。

3.1 回波功率特性

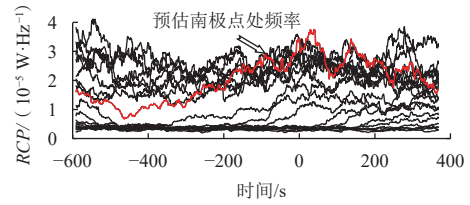
受频繁陨石撞击与长期空间风化作用影响，月球南极水冰沉积物多呈破碎态分布。相较于普通月壤，其表面粗糙度显著提升，结构呈现高度非均匀性[19]。这种独特的物理形态致使雷达波在穿透沉积物时，于内部发生多次反射与散射，形成强烈的多重散射效应。根据电磁散射理论，多重散射效应会显著增强后向散射强度，进而使雷达回波信号能量大幅提升，最终在探测数据中呈现为较强的雷达回波强度[5]。

为精准捕捉不同频段的回波强度特征，本研究对原始数据进行系统校正后，采用功率谱密度分析方法开展量化研究。在此过程中，通过改进传统求解算法，优化数据处理流程，有效提升了目标特征的提取精度与信号分辨率，使水冰沉积物的雷达响应特征得以更清晰准确的呈现。

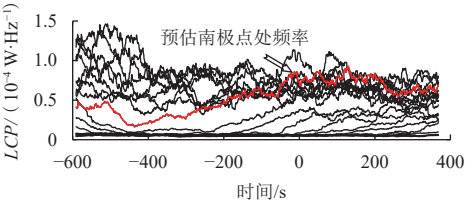
Nozette等[5]的原始处理流程包括对16 384点功率谱密度进行4 s相干平均，随后采用60阶滤波器实施时间平滑。本研究在该方法基础上引入系列改进。首先，将960 s数据按1 s间隔划分，基于凯瑟窗计算16 384点功率谱密度，该窗函数通过可调参数优化主瓣与旁瓣抑制比，显著降低频谱泄露效应；随后对数据进行2 s相干平均，并提取12 500 Hz中心频率附近1 024个频率点（覆盖±512 Hz带宽）用于后续分析，该频段可有效包含月表回波主要能量；最后对各频率点功率谱实施均值平滑处理，以增强长期趋势特征，抑制随机噪声干扰。改进后的处理流程在保留原始信号低频特征的同时，提升了频谱分析的频率分辨率与抗干扰能力，为地形反演提供了更可靠的数据基础。

12 480.1 ～12 513.8 Hz频率范围内功率谱随时间变化的22处曲线如图12所示。其中，红线表示预估南极点处频率。为更加直观地反映长期的变化趋势，对数据进行均值平滑处理。部分曲线出现了显著的峰值特征，仅考虑–200 ～200 s范围的信号特征，因为该范围外的信号散射点离南极中心较远，已经无法提供足够的南极点信息，呈现的回波增强特征与关注的南极中心区域关系较小。

在南极中心区域的特征分析中，RCP频段下，南极点频率及其左间隔9.18 Hz处的信号特征尤为突出。南极点频率曲线在t_0右间隔30 s和135 s位置，出现两处明显峰值。而在LCP频段，南极点左间隔7.65 Hz处，于t_0及t_0右间隔80 s位置观测到两处强度峰值。相较于均值，这些峰值的强度普遍提升1.5～2倍。



（a）RCP信号

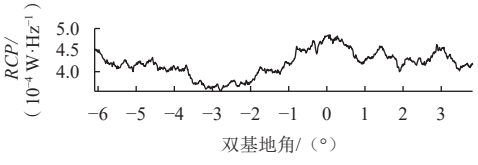


（b）LCP信号

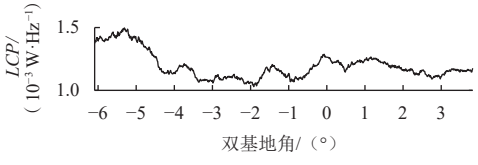
图 12　不同频率成分的信号功率强度与时间的关系

Fig. 12　Relationship between signal power strength and time for different frequency components

同极化与相反极化信号在约10°纬度带内的平均回波强度分布，揭示了信号整体趋势与双基地角的关系如图13所示。研究发现，双基地角在（–6°，–4°）的回波增强现象，由南极外围地形导致，与南极核心区域无关。因此，研究重点选取双基地角在[–2°，2°]的数据，该范围对应南极区域。分析显示，同极化回波强度在双基地角为0°时达到峰值，相反极化回波则在0°和1°时呈现显著增强。这些观测结果表明，南极目标区域内可能存在多种导致后向散射增强的介质或结构特征，包括与波长匹配的表面粗糙度、目标内部冰层或月壤次表层引发的多重反射干涉，以及具有特殊介电性质的破碎态水冰沉积物等。



（a）RCP信号



（b）LCP信号

注：图中双基地角定义为探测器、南极点及测站组成的夹角，当双基地角为0°时，南极区域处于搜索范围的中心，该定义同样适用于图14～16。

图 13　同极化与相反极化回波的平均功率强度

Fig. 13　Average power intensity of co-and oppositely-polarized echoes

3.2　圆极化率

对于地形试验，当发射器发射一个圆极化信号（RCP或LCP），如果信号经理想光滑表面反射，信号的圆极化特性将会反转。然而实际回波信号不会这么单一，回波分量中既有镜面反射成分，也会因表面粗糙度等原因包含漫反射等成分，导致回波信号表现为相同圆极化成分与相反圆极化成分的综合。通常采用同向成分与反向成分的比值来描述极化程度。回波的圆极化率表示为

$$\mu_c = \sigma_{sc}/\sigma_{oc} \tag{13}$$

其中：σ_{sc}为接收到的同向极化回波总能量；σ_{oc}为接收到的反向极化回波总能量。

圆极化率作为评估地表粗糙度与介质特性的关键指标，能有效反映表面相对于雷达波长尺度的粗糙程度。当雷达波入射至破碎态水冰沉积物或粗糙冰表面时，因其复杂的物理结构，电磁波将经历多路径散射与多次反射过程。在此过程中，后向散射信号中的同极化分量显著增强，进而导致CPR数值升高。研究表明，普通月壤的CPR均值通常处于0.4～0.5，而富含水冰等高散射特性物质的区域，其CPR可突破1.0阈值[20]。值得注意的是，圆极化率的变化受入射角、发射频率、地表粗糙度、月壤厚度及介电常数等多参数协同影响[4]，需综合考量各因素以准确解析其物理意义。

目标覆盖区域的圆极化率分布情况如图14所示。在双基地角[–2°，2°]范围内，圆极化率波动区间为0.38～0.52，均值约为0.469。这一结果与Fa等[21]基于S波段Mini-RF数据的研究成果高度契合——其测得南极纬度70°以上区域的平均圆极化率0.50。具体来看，图中呈现两处显著峰值，自左至右数值分别为0.528和0.473。鉴于峰值处CPR未出现大幅跃升，基本排除该区域存在纯净大面积水冰沉积的可能性。结合CPR的影响机制，该现象更倾向于表明此区域可能分布着冰–月壤混合物等特殊物质或者相较周边地形，该区域呈现出更为崎岖的地貌特征，富含陨石坑、岩石碎块等块状物，从而形成复杂的散射界面，影响雷达波的极化特性。

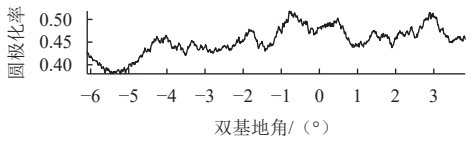


图 14　回波圆极化率

Fig. 14　Circular polarization rate

3.3　介电常数

介电常数表示材料在电场作用下的极化程度，反映了材料对电场的响应能力。不同的地表材质（如土

壤、岩石、水、沙子、植被等）具有不同的介电常数，这使得介电常数可以作为判断地表物质类型的一个重要指标。对于水冰沉积物，介电常数通常会低于月壤的平均介电常数（约为4）[22]。

假设目标表面是略微有损耗的电介质，则可使用菲涅尔电压反射系数来估计介电常数。线极化和圆极化的菲涅尔电压反射系数为[15]

$$R_{\mathrm{H}}=\frac{\cos\phi-\sqrt{\varepsilon-\sin^2\phi}}{\cos\phi+\sqrt{\varepsilon-\sin^2\phi}} \tag{14}$$

$$R_{\mathrm{V}}=\frac{\varepsilon\cos\phi-\sqrt{\varepsilon-\sin^2\phi}}{\varepsilon\cos\phi+\sqrt{\varepsilon-\sin^2\phi}} \tag{15}$$

$$R_{\mathrm{SC}}=(R_{\mathrm{V}}+R_{\mathrm{H}})/2 \tag{16}$$

$$R_{\mathrm{OC}}=(R_{\mathrm{V}}-R_{\mathrm{H}})/2 \tag{17}$$

其中：ε为表面材料的介电常数；R_{H}为水平菲涅尔电压反射系数，适用于入射波具有水平极化（平行于表面的电矢量），并且接收天线的方向是面向感应分量的；R_{V}为垂直菲涅尔电压反射系数，适用于当电矢量“垂直”或在入射和反射平面上时。当一个圆极化波（RCP或LCP）入射时，需要接收端具有相同和相反圆极化感应的组件进行信号的接收。

对于随机物理表面，假设RCP和LCP的散射函数一致。在此条件下，可得到RCP回波功率和LCP回波功率的比值$\rho_{\mathrm{SC}}/\rho_{\mathrm{OC}}$。

$$\rho_{\mathrm{SC}}/\rho_{\mathrm{OC}}=|R_{\mathrm{SC}}|^2/|R_{\mathrm{OC}}|^2 \tag{18}$$

对于已知的入射角和测得的功率比，表面介电常数可由上述公式组合获得。介电常数如图15所示，对于月壤，平均介电常数为4左右，当含水量较高时，介电常数会进一步降低。图15中整体介电常数分布在3.8～4.2，虽符合月壤的数值分布，但高于Fa等[23]估计的在月球永久阴影区温度下的纯水冰介电常数$\varepsilon=3.15$，这种现象可能受入射角、实际温度等多种因素影响。在双基地角为[–2°，2°]范围内，介电常数整体处于低谷，在3.811～4.085，均值3.984。介电常数的降低，为水冰沉积物的存在提供了可能性，但准确判断还需要结合圆极化率等其它参数一起分析。

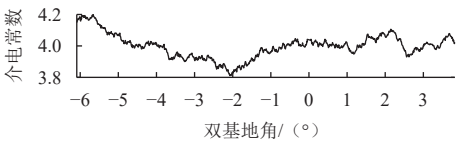


图 15 回波介电常数

Fig. 15 Dielectric constant of echo

3.4 交叉谱

交叉谱可有效反映极化信号间的相关性，用于表征地表特征的时变特性[15]。其中，交叉谱幅度与相位变化对水冰沉积物的辨识具有独特物理敏感性，其核心价值在于通过极化信号的相干性差异，揭示水冰的介电特性、表面粗糙度及空间分布均匀性，进而辅助区分岩石、尘埃等月表物质。

从幅度特征看，水冰沉积物较低的介电常数会降低表面的反射系数，理论上可能导致交叉谱幅度偏低。然而，若地表为光滑压实冰层（满足瑞利光滑条件），其镜面反射主导的极化相干性较高，交叉谱幅度仍可接近两种极化信号功率的几何平均值；相较之，高介电常数岩石因反射系数更高，在同等粗糙度条件下，交叉谱幅度通常显著高于水冰沉积区域。

在相位特征方面，水冰的低损耗及光滑特性使极化信号相位延迟微弱，相位谱表现出更高的稳定性；而岩石因介电损耗较高，会引入额外相位偏移，导致相位波动幅度显著加剧。这种差异为区分水冰与非冰物质提供了关键判据。

交叉谱是接收到的RCP与LCP共轭的平滑乘积，即

$$C_{xy}(f)=\langle X_{\mathrm{SC}}(f)X_{\mathrm{OC}}(f)*\rangle \tag{19}$$

其中：$X_{\mathrm{SC}}(f)$和$X_{\mathrm{OC}}(f)$分别为接收两种极化信号的傅里叶变换；$*$为复数共轭；$\langle\rangle$为时间平均。

信号的交叉谱幅度与相位变化特征如图16所示。数据显示存在两处显著波动区间，分别位于（–6°，–4°）和（–1°，1°）范围内。其中，（–6°，–4°）区间处于本研究设定的观测范围之外，故不纳入分析。而在（–1°，1°）区间内，交叉谱相位出现明显的高频振荡趋势，同时交叉谱幅度值显著高于两种极化信号功率的几何平均值。这种特征与典型粗糙岩石地表的电磁散射特性高度吻合，结合同期回波信号强度显著增强的现象，综合判定该区域为粗糙岩石覆盖区。

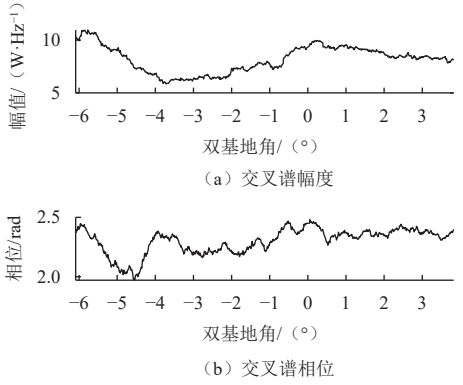


图 16 回波交叉谱幅度与相位变化

Fig. 16 Echo cross spectrum amplitude and phase variation

3.5　结果分析

使用雷达技术进行地形反演的核心难点在于单一指标难以全面约束复杂散射机制，可能存在多解性，无法准确量化结果。因此本研究充分利用雷达技术对复杂地形与环境的强适应性及多维度特征提取能力，采用多指标交叉验证体系提升解译可靠性。通过综合分析回波功率特性、介电常数、圆极化率及交叉谱幅相数据等多维参数，构建了系统性的约束条件，显著降低了单一指标分析结果的不确定性，为月球地形及水冰沉积物探测提供坚实的技术支撑。

在区间[–2°，–1°]内，圆极化率的显著升高表明该区域可能存在两种物理机制：表面粗糙度的增加或低损耗介质引发的多重散射效应增强。这一现象与交叉谱相位呈现的小幅波动特征相呼应，二者形成了机制层面的相互印证。值得注意的是，该区间内交叉谱幅度不仅未显著提升，反而略低于两种极化信号功率的几何平均值，这进一步支持了低损耗介质存在的推断。结合介电常数分析，该区域介电常数呈现下降的趋势且数值始终低于4，低于典型月壤的平均介电常数值，这一特性与水冰沉积物的散射特性高度契合。然而，由于介电常数下降幅度有限，表明大块纯净冰体存在的可能性较低。综合上述多参数分析，推测该区域的水冰物质更可能以冰–月壤混合体或破碎态沉积物的形式存在。

在（–1°，1°）范围内，圆极化率及回波强度同步升高，伴随交叉谱幅度显著增强且相位剧烈变化。这种特征与典型粗糙岩石地表的电磁散射特性高度吻合，表明电磁波在此区域经历多次散射，从而导致回波信号显著增强。

在[1°，2°]范围内，各参数趋于平均水平，未表现出明显变化特征，暗示该区域不存在特殊地形或介电特性差异。

综上所述，回波强度、圆极化率等参数在南极点附近约10°纬度范围内的规律性变化，充分印证了水冰沉积物与粗糙表面等特殊地形的存在。地形特征的成功提取，验证了本研究提出的双基地雷达回波地形反演方法的有效性与可靠性。

4　结　论

本文针对深空双基地雷达在月球南极观测中面临的观测几何快速变化、低信噪比以及幅相校正等问题，研究并构建了基于SPICE工具的双基地回波地形反演系统。该系统着力于提取月球南极水冰沉积物的特征，重点研究近后向散射条件下的回波散射数据，涵盖数据校正、观测几何数据仿真、回波数据处理、地形特征提取等多方面处理逻辑。试验利用Clementine数据，从回波强度、圆极化率、介电常数等多角度有效获取了月球极地地形特征，综合多指标交叉反演月表地形结构。试验结果表明在月球南极区域存在类似“冰–月壤混合物”或者破碎态水冰沉积物的特殊地形特征。该结果验证了双基地雷达试验在地形反演方面的可行性，并证明了本文提出试验方法的有效性。为雷达天体地形反演相关研究提供了重要技术参考。

本文提出的基于雷达的双基地地形反演方法具有几何适应性强、多指标交叉反演结果明确等优势，可适用于更广泛、更极端条件下的探测任务。随着后续深空探测任务获取更高分辨率、更丰富观测几何条件的雷达数据，该方法有望进一步在多任务、多天体环境中得到验证和完善。未来工作可结合更精细的地形仿真模型和更大规模的深空回波数据，对电磁特征进行深入对比分析，以不断提升深空双基地地形与介质反演方法的可靠性与适用范围。

参考文献

[1] ZAVOROTNY V U，GLEASON S，CARDELLACH E，et al. Tutorial on remote sensing using GNSS bistatic radar of opportunity[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine，2014，2(4)：8-45.

[2] WILLIS N J，GRIFFITHS H D，et al. Advances in bistatic radar[M]. Raleigh：SciTech Publishing，2007.

[3] CHERNIAKOV M. Bistatic radar：emerging technology[M]. Chichester：John Wiley & Sons，2008.

[4] STACY NJ，CAMPBELL D B，FORD P G. Arecibo radar mapping of the lunar poles：a search for ice deposits[J]. Science，1997，276(5318)：1527-1530.

[5] NOZETTE S，LICHTENBERG C L，SPUDIS P，et al. The Clementine bistatic radar experiment[J]. Science，1996，274(5292)：1495-1498.

[6] SPUDIS P D，NOZETTE S，LICHTENBERG C，et al. The Clementine bistatic radar experiment：evidence for ice on the Moon[J]. Solar System Research，1998，32(1)：17-22.

[7] SANIN A B，MITROFANOV I G，LITVAK M L，et al. Testing lunar permanently shadowed regions for water ice：LEND results from LRO[J/OL]. Journal of Geophysical Research：Planets，2012，117(E12)：E00H26.https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JE003971.

[8] 欧阳自远，李春来，邹永廖，等. 嫦娥一号的初步科学成果[J]. 自然杂志，2010，32(5)：249-266.
OUYANG Z Y，LI C L，ZOU Y L，et al. Preliminary scientific results of Chang’e-1 mission[J]. Chinese Journal of Nature，2010，32(5)：249-266.

[9] 吴伟仁，于登云，王赤，等. 嫦娥四号工程的技术突破与科学进展[J]. 中国科学：信息科学，2020，50(12)：1783-1797.
WU W R，YU D Y，WANG C，et al. Technological breakthroughs and scientific achievements of the Chang’e-4 project[J]. Science in China(Information Sciences)，2020，50(12)：1783-1797.

[10] 刘力维，韩坤英，丁孝忠，等. 嫦娥六号探测器预选着陆区区域地质特征及演化分析[J]. 地学前缘，2025，32(2)：332-345.
LIU L W，HAN K Y，DING X Z，et al. Regional geological characteristics and evolution of the pre-selected landing area of the Chang'e-6 probe[J]. Earth Science Frontiers，2025，32(2)：332-345.

[11] QIAO L，LING Z C，FU X H，et al. Geological characterization of the Chang'e-4 landing area on the lunar farside[J]. Icarus，2019，333：37-51.

[12] 孙靖，杨嵩，周峰，等. 中国地基雷达观测月球的现状和研究进展[J]. 天文研究与技术，2022，19(1)：29-40.
SUN J，YANG S，ZHOU F，et al. The status of earth-based radar astronomical observations of the Moon in China[J]. Astronomical Research & Technology，2022，19(1)：29-40.

[13] 陈略，王美，简念川，等. "天问一号"无线电掩星观测试验及特征分析[J]. 深空探测学报(中英文)，2023，10(1)：80-87.
CHEN L，WANG M，JIAN N C，et al. Tianwen-1 radio occultation observation experiment and feature analysis[J]. Journal of Deep Space Exploration，2023，10(1)：80-87.

[14] SIMPSON R A，TYLER G L. Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar south pole[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，1999，104(E2)：3845-3862.

[15] SIMPSON R A，TYLER G L，PÄTZOLD M，et al. Polarization in bistatic radar probing of planetary surfaces：application to Mars Express data[J]. Proceedings of the IEEE，2011，99(5)：858-874.

[16] FJELDBO G，KLIORE A，SEIDEL B. Bistatic radar measurements of the surface of Mars with Mariner 1969[J]. Icarus，1972，16(3)：502-508.

[17] SIMPSON R A. Spacecraft studies of planetary surfaces using bistatic radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，1993，31(2)：465-482.

[18] ACTON C，BACHMAN N，SEMENOV B，et al. SPICE tools supporting planetary remote sensing[C]//Proceedings of International Archives of the Photogrammetry，Remote Sensing and Spatial Information Sciences. [S. l]：Copernicus Publications Copernicus，2016.

[19] SIMPSON R. Electromagnetic reflection and transmission at interfaces involving graded dielectrics with applications to planetary radar astronomy[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation，1976，24(1)：17-24.

[20] LI X Y，WEI G F，ZENG X J，et al. Review of the lunar regolith and water ice on the poles of the Moon[J]. Journal of Deep Space Exploration，2022，9(2)：123-133.

[21] FA W Z，CAI Y Z. Circular polarization ratio characteristics of impact craters from Mini-RF observations and implications for ice detection at the polar regions of the Moon[J]. Journal of Geophysical Research：Planets，2013，118(8)：1582-1608.

[22] KUMAR A，KOCHAR I M，PANDEY D K，et al. Dielectric constant estimation of lunar surface using Mini-RF and Chandrayaan-2 SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2021，60：1-8.

[23] FA W Z，WIECZOREK M A，HEGGY E. Modeling polarimetric radar scattering from the lunar surface：study on the effect of physical properties of the regolith layer[J/OL]. Journal of Geophysical Research：Planets，2011，116(E3)：E03005 . https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JE003649.

作者简介：
冯飞飞(2001－)，男，硕士研究生，主要研究方向：多普勒信号高精度测量及雷达地形反演。
通信地址：南京市东南大学自动化学院(210096)
电话：15862120634
E-mail：fengff@seu.edu.cn
陈从颜(1969－)，男，教授，博士生导师，主要研究方向：深空探测和信号处理。**本文通信作者**。
通信地址：南京市东南大学自动化学院(210096)
电话：13815880378
E-mail：chency@seu.edu.cn

Bistatic Radar Detection of Water Ice Deposits in Lunar Polar Regions

FENG Feifei[1]，JIAN Nianchuan[2]，TANG Haibo[1]，MENG Qiao[3]，CHEN Congyan[1]

（1. School of Automation，Southeast University， Nanjing 210096，China；
2. Shanghai Astronomical Observatory，Chinese Academy of Sciences，Shanghai 200030，China；
3. School of Information Science and Engineering，Southeast University，Nanjing 210096，China）

Abstract：Deep space bistatic radar facing some challenges in planetary exploration，including rapidly varying observation geometry，extremely low signal-to-noise ratios，and difficulty in calibrating channel gain and phase due to the absence of onboard calibration sources. To address these issues, a bistatic radar terrain inversion system tailored for deep space applications was developed. Using the SPICE （Spacecraft Planet Instrument C-matrix Events） toolkit and focusing on echo data acquired under near-backscatter conditions. The system integratd geometry modeling，data calibration，and multiparameter inversion of surface characteristics. The analysis demonstrates that the proposed system successfully extracted electromagnetic indicators associated with potential water-ice deposits in the lunar south polar region，including enhanced echo power，locally elevated circular polarization ratios （CPR），reduced dielectric constants，and disturbed cross-spectrum phase behavior. These combined features support the possible presence of polar water-ice deposits. The results verify the effectiveness of deep space bistatic radar for surface and material inversion and provide a scalable technical pathway for future bistatic radar applications in deep space missions.

Keywords：terrain inversion；detection of water ice deposits；bistatic radar；SPICE

Highlights：

- Developed a SPICE-based deep space bistatic radar terrain inversion system that integrates geometry solving，data calibration and echo feature extraction into a complete processing chain.
- Proposed a Doppler inversion method and a dual polarization calibration technique tailored for deep space bistatic radar in near-backscatter geometry.
- Identified comprehensive electromagnetic signatures of potential water ice deposits in the lunar south polar region through multiparameter joint inversion，improving reliability of polar ice detection.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：宋利辉]