

LI Yuxi, SHEN Shaoxiang, LU Wei, TANG Chuanjun, LI Shidong, LI Zhongpeng, HE Wangdong, FANG Guangyou. Calibration Method and Implementation for the Lunar Penetrating Radar on Chang'E-7 Mission (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(2): 507–519. CSTR:32142.14.cjss.2025–0102. DOI:10.11728/cjss2026.02.2025–0102

»嫦娥七号任务有效载荷定标方法

嫦娥七号任务测月雷达定标方法及实现*

李玉喜¹ 沈绍祥^{1,2} 卢伟^{1,2} 唐传军^{1,2}
李士东¹ 李忠鹏¹ 何望栋¹ 方广有¹

1(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100190)

摘要 嫦娥七号搭载的测月雷达旨在探测月球次表层结构. 为确保探测数据的有效性, 并提升数据解译的准确性与一致性, 提出一套适用于航天级穿透雷达的系统定标方法, 包括全系统增益标定与系统传递函数标定等. 基于该方法, 对测月雷达进行系统定标, 明确其在轨运行的最优参数配置. 在此参数设置下, 雷达系统各项性能指标均达到设计要求: 低频通道与高频通道的系统增益分别为 171.02 dB 与 169.70 dB, 分别满足 400 m 与 40 m 探测深度的需求. 所获取的接收时变增益曲线及系统传递函数经模拟月壤试验验证, 可为月面探测科学数据提供有效的校准基准. 该定标方案可为未来深空探测任务中的雷达系统校准提供技术参考与范式.

关键词 嫦娥七号, 测月雷达, 系统定标, 系统增益, 传递函数, 时变增益

中图分类号 V416.6

Calibration Method and Implementation for the Lunar Penetrating Radar on Chang'E-7 Mission

LI Yuxi¹ SHEN Shaoxiang^{1,2} LU Wei^{1,2} TANG Chuanjun^{1,2}
LI Shidong¹ LI Zhongpeng¹ HE Wangdong¹ FANG Guangyou¹

1(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract The Chang'E-7 mission carries a Lunar Penetrating Radar (LPR) for investigating lunar shallow subsurface structures. To ensure the validity of the acquired data and improve the accuracy and

* 国家自然科学基金重大项目 (62495034), 国家重点研发计划项目 (2025YFF0513100) 和国家自然科学基金面上项目 (62471457) 共同资助

2025-06-30 收到原稿, 2025-09-20 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

consistency of its interpretation, this study presents a comprehensive calibration framework suitable for space-grade penetrating radar systems, incorporating full-system gain calibration and system transfer function calibration, among others. Applying this methodology, the lunar radar system was rigorously calibrated, clarifying the optimal parameter configuration for its in-orbit operation. Under this parameter setting, all performance metrics of the radar system meet the design requirements: the system gains of the Low-Frequency (LF) and High-Frequency (HF) channels are 171.02 dB and 169.70 dB, respectively, fulfilling the detection depth requirements of 400 m and 40 m. The acquired Time-Varying Gain (TVG) curve and system transfer function, validated through simulated lunar regolith experiments, can provide effective calibration baselines for scientific data obtained during lunar surface exploration. This calibration scheme can serve as a technical reference for the calibration of radar systems in future deep-space exploration missions.

Key words Chang'E-7, Lunar Penetrating Radar (LPR), System calibration, System gain, Transfer function, Time-variant gain

0 引言

中国于 2000—2003 年提出探月工程“绕、落、回”三步走战略规划^[1,2]. 嫦娥一号/二号 (Chang'E-1/2) 月球探测器成功实现了“绕”, 获得了全月面三维影像获取及月壤厚度探测^[3]. 嫦娥三号/四号 (Chang'E-3/4) 探测器实现了“落”, 完成了月球软着陆就位探测与巡视探测^[4]. 嫦娥五号/六号 (Chang'E-5/6) 实现了“回”, 完成了月球样品返回任务^[5-7]. 嫦娥七号 (Chang'E-7) 任务作为国际月球科研站的先期任务, 计划 2026 年发射, 设计寿命 8 年, 将在月球南极地区开展综合性探测^[8,9]. 该探测器由轨道器、着陆器、飞跃器和巡视器组成^[9,10], 其中巡视器搭载的测月雷达 LPR (Lunar Penetrating Radar) 作为关键科学载荷, 是高分辨率月表穿透成像雷达.

航天领域穿透成像雷达相比于地面穿透成像雷达, 工作环境更为严苛, 通常处于真空或低气压、温度范围大的条件下, 电子元器件在不同温度下会产生温度漂移, 影响设备性能. 因此, 航天雷达必须开展定标工作. 通过定标试验, 可以深入剖析设备的性能, 精准定位其最佳工作状态. 通过精细调节发射功率、接收灵敏度以及信号处理参数, 系统探测能力与抗干扰性能得以显著提升, 为复杂环境下的高精度探测任务筑牢根基. 然而, 穿透成像雷达领域关于系统定标缺乏国际标准, 仅少数文献^[11-13]等提及定标方法. 地外天体探测雷达定标方法更为稀缺, 如

SHARAD, STEREO/WAVES 和 WISDOM 等虽有定标实践^[14-17], 但资料有限.

Chang'E-3/4 巡视器搭载的移动式测月雷达、Chang'E-5/6 着陆器配置的静态阵列式次表层雷达均开展了初步定标试验, 但均未系统考虑环境温度对设备性能的影响. 面向 Chang'E-7 任务需求, 新一代测月雷达需在移动工况下实现 400 m 以上探测深度, 远超 Chang'E-3/4 测月雷达的 100 m 需求, 同时需适应月球南极-230℃ 极端低温环境及 8 年长寿命工作要求, 这对雷达系统的可靠性与稳定性提出了严峻挑战. 针对 Chang'E-7 测月雷达更复杂的工况条件和更严苛的环境要求, 亟须建立完整的航天级穿透雷达定标体系. 基于前期任务经验, 创新性提出一套适用于深空探测环境的穿透雷达系统化定标方法, 并应用于 Chang'E-7 测月雷达.

1 测月雷达系统

Chang'E-7 测月雷达采用双频模式, 即两个通道, 高频通道频带范围为 100~1500 MHz, 低频通道为 10~110 MHz, 主要由以下几部分组成: 电子学单元、发射前端 (高频和低频)、高频天线 (发射/接收 H/接收 V) 及低频天线 (发射/接收), 设备性能指标列于表 1, 设备在巡视器的布局如图 1 所示^[18]. Chang'E-7 测月雷达的设计寿命为 8 年, 远超 Chang'E-3/4 的 3 个月, 对系统的可靠性要求更高, 因此放弃了原来的冲击脉冲体制, 采用伪随机编码体制, 需要通过脉冲压缩实现等效大幅度脉冲, 属于相干雷达. Go-

表 1 Chang'E-7 测月雷达的主要技术指标要求
Table 1 Main technical requirements of the Chang'E-7 Lunar Penetrating Radar (LPR)

No.	Parameter	Low frequency channel	High frequency channel
1	Operating frequency/MHz	10~110	100~1500
2	Transmit power/W	≥ 0.2	≥ 0.2
3	Receiver dynamic range/dB	≥ 80	≥ 70
4	Receiver sensitivity/dBm	≤ -80	≤ -70
5	Antenna polarization	HH	HH, HV
6	Thickness resolution	Better than 2 m ($\epsilon_r=6.0$)	Better than 15 cm ($\epsilon_r=3.0$)
7	Penetration depth/m	≥ 400 ($\epsilon_r=6.0$)	≥ 40 ($\epsilon_r=3.0$)
8	Design lifetime/a	≥ 8	

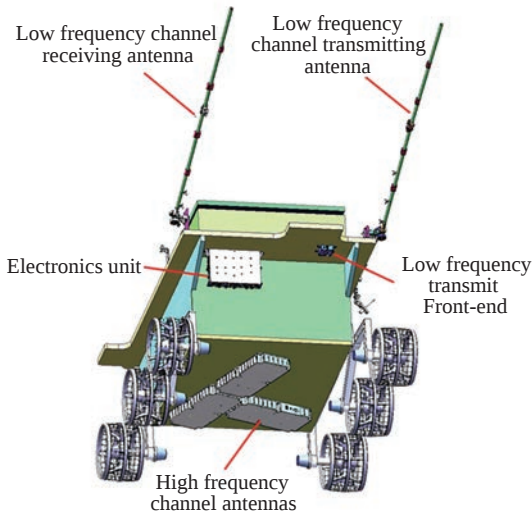


图 1 Chang'E-7 测月雷达器布局
Fig. 1 Layout diagram of the Chang'E-7 LPR

lay 互补码是伪随机编码的一种, 分为 A 码和 B 码, 其合成输出无旁瓣, 但需要发射两次不同的波形, 对回波脉压后相加才能得到一道合成回波, 时间效率相对较低. 由于巡视器在月面移动较慢, 而雷达系统的扫描率较高, 因此 Golay 互补码更加适合测月雷达. 测月雷达的月面探测数据下传至地面后, 再进行脉冲压缩. 脉冲压缩的基本流程如图 2 所示, 图 2 中 $e_A(n)$ 和 $e_B(n)$ 为目标回波信号, $c_A(n)$ 和 $c_B(n)$ 为参考信号, $f_A(n)$ 和 $f_B(n)$ 为脉冲压缩后的结果, 下标 A 和 B 分别代表 A 码元信号和 B 码元信号.

测月雷达系统各组件因安装位置和热控设计的差异, 其工作温度范围存在显著差异. 具体表现, 低频与高频通道发射前端的工作温度范围均为

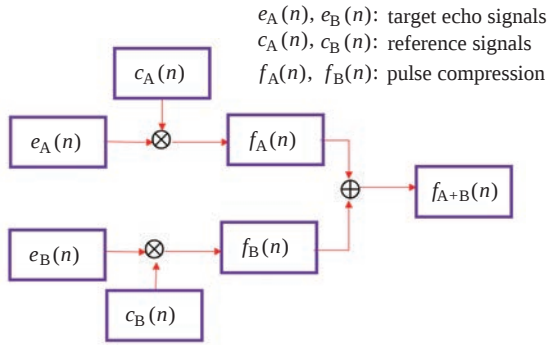


图 2 Chang'E-7 测月雷达数据脉冲压缩处理流程
Fig. 2 Pulse compression processing flowchart of Chang'E-7 LPR

-40~+55℃, 而雷达电子学单元的工作温度范围则为-20~+55℃. 值得注意的是, 电子学单元受温度效应影响显著, 其关键参数 (例如本振频率、放大器增益等) 会产生温漂现象, 因此必须进行精确的温度标定. 高低频通道天线均为无源组件, 其辐射特性参数 (包括方向图主瓣增益、副瓣电平) 在 10~1500 MHz 的频带内主要与天线结构相关. 而天线结构基本不受温度变化影响, 因此仅在常温下完成标定即可.

2 测月雷达定标目的与试验项目

2.1 定标项目设置目的

次表层穿透成像雷达定标是确保设备实现科学目标的关键环节, 旨在深入剖析设备的性能, 精准定位其最佳工作状态, 获取载荷设备的定量标定参数, 为在轨科学数据处理提供基准.

2.1.1 实现科学任务直接相关指标

深空次表层穿透雷达需根据科学任务需求确定核心性能指标, 主要包括探测深度与厚度分辨率。

2.1.1.1 探测深度影响因素

由次表层穿透成像雷达原理及雷达方程, 设备最大探测深度为

$$R_{\max} = \left[\frac{P_T G_{Tx} G_{Rx} t_{\text{int}} G_{\text{sysL}} \lambda^2 \sigma_T e^{-4\alpha R_{\max}}}{(4\pi)^3 k T B F \sigma_{\text{SNR}}} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (1)$$

其中, k 为玻尔兹曼常数 ($1.380649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$). 由式 (1) 可知, 最大探测深度 $R_{\max}$ 由以下关键参数决定。

(1) 天线系统特性: 发射天线增益 G_{Tx} 与接收天线增益 G_{Rx} .

(2) 发射机性能: 最大发射功率 P_T .

(3) 设备的系统插损: G_{sysL} .

(4) 电磁传播特性: 介质中电磁波波长 λ , 目标散射截面 σ_T , 介质衰减常数 α .

(5) 接收系统参数: 相关累积时间 t_{int} , 系统噪声温度 T , 接收带宽 B , 噪声系数 F .

(6) 检测要求: 可靠检测所需信噪比 σ_{SNR} .

按照影响雷达探测深度的因素是否可控, 可分为两类。一是设备相关参数 (主观因素), 包括工作频率/波长、发射/接收天线的增益、发射功率、相关累计时间、接收机的带宽和噪声系数等。二是探测目标相关参数 (客观不可控因素), 包括介质衰减常数、目标体散射特性、系统噪声温度等。

综上可知, 可通过与设备相关的参数表征次表层穿透雷达的探测能力。这些指标又可以通过设备的系统增益 (System performance) 统一表示, 具体系统增益 G_L 定义如下:

$$G_L = \frac{P_T G_{Tx} G_{Rx} t_{\text{int}} G_{\text{sysL}}}{P_{\min}}. \quad (2)$$

其中, $P_{\min}$ 为接收机最小可检测信号功率, $P_{\min} = k T B F \sigma_{\text{SNR}}$, 为雷达接收机理论设计的灵敏度。

在探测区域或者介质已知的情况下, 根据以上指标可以计算得出探地雷达的理论探深能力。

2.1.1.2 厚度分辨率影响因素

被测介质的相对介电常数为 ϵ_r 时, 则次表层穿透成像雷达探测的厚度分辨率 Δd 与设备的工作带宽 B_{eff} 有关, 其表达式为

$$\Delta d = \frac{v}{2B_{\text{eff}}} = \frac{c}{2B_{\text{eff}}\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (3)$$

其中, v 为电磁波在介质中的速度, c 为光速。

由式 (3) 可知带宽和月壤的介电常数为影响厚度分辨率的重要因素, 在介质特性不可控条件下, 设备带宽是决定分辨率的关键参数。

2.1.2 保证与提升数据质量的关键因素

深空探测任务中的次表层穿透成像雷达系统, 受空间环境严酷性、安装布局复杂性、雷达体制多样性以及应用场景特异性等因素影响, 其探测数据质量面临多重差异性挑战。鉴于航天任务不可逆的特性, 这些关键影响因素必须在地面研制阶段完成系统性表征与量化。

针对星载次表层穿透成像雷达在复杂探测环境中面临的背景杂波干扰问题, 创新性地提出一种基于系统传递函数的全链路校准方法。该方法通过同步采集两种基准信号: 一是平台条件下的无反射直达波信号 (自由空间背景); 二是全反射状态下的极限回波信号 (金属板目标), 构建了完整的雷达系统响应模型。通过该方法可实现背景干扰的精准分离与消除, 显著提升科学探测数据的信噪比^[19]。

除系统传递函数外, 针对其他不同星载次表层穿透成像雷达, 由于应用场景不同、体制不同等诸多差异, 还需重点考虑以下差异化因素, 如阵列式雷达的通道时延差异、时域超宽带雷达的时变增益、频域雷达的预失真校准等。

2.2 测月雷达定标试验项目分析与设置

2.2.1 全系统增益

由于 Chang'E-7 测月雷达采用伪随机编码体制, 需要进行脉冲压缩, 结合式 (1) 和式 (2), 雷达方程可转换为如下公式:

$$G_L^{\text{Obj}} = \left[\frac{e^{-4\alpha R_{\max}} \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 R_{\max}^4} \right]^{-1}, \quad (4)$$

$$G_L^{\text{Ins}} = \frac{P_T G_{\text{pCom}} G_{\text{add}} G_{Rx} G_{Tx} G_{\text{sysL}}}{P_{\min}}. \quad (5)$$

其中, G_{pCom} 为脉冲压缩增益, 此项与式 (1) 相比为新增项, 该参数反映了系统采用的信号编码体制 (如伪随机编码或频域) 对探测性能的提升效果, 其数值可通过系统设计的码元参数直接计算获得, 因此在评估

雷达整体性能时必须将该增益项纳入考量; G_{add} 为累加增益, 由雷达工作时选用的累加次数获取, 即为式 (1) 中的相关累计时间 t_{int} ; G_{sysL} 为系统插损, 对于 Chang'E-7 测月雷达为电缆的插损. 式 (4) 为与探测目标相关的参数, 根据已知的月球探测结果^[20-22], 可估算出不同频段雷达实现不同探深时所需的系统增益; 式 (5) 为与设备相关的要素, 通过定标试验可以标定出雷达可实现的系统增益. 当式 (5) 标定的结果大于式 (4) 估算的结果时, 即可认为雷达可实现该深度的探测指标.

针对粗糙分界面, 其雷达散射截面 σ_t 可通过基于物理光学近似的镜像理论进行解析推导, 具体可表述为^[23]

$$\sigma_t = |\Gamma|^2 \pi \lambda R_{\text{max}} / 2. \quad (6)$$

其中, Γ 为不同介电常数分界面的反射系数, 其表达式为

$$\Gamma = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}; \quad (7)$$

$$\eta_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\varepsilon_i}}, \quad i = 1, 2. \quad (8)$$

其中, η_1 和 η_2 分别为月壤与月球岩石层的波阻抗; μ_i 和 ε_i 为介质的磁导率和介电常数. 则 G_L 的表达式可写为

$$G_{L_Rou_Sur} = \left[\frac{|\Gamma|^2 e^{-4\alpha R_{\text{max}}} \lambda^3}{128\pi^2 R_{\text{max}}^3} \right]^{-1}. \quad (9)$$

当考虑真空与月壤交界面对探测深度的影响时, 则式 (9) 可改写为

$$G_{L_Rou_Sur} = \left[\frac{|\Gamma|^2 |R_1|^2 |R_2|^2 e^{-4\alpha R_{\text{max}}} \lambda^3}{128\pi^2 R_{\text{max}}^3} \right]^{-1}. \quad (10)$$

其中, R_1 为电磁波信号由真空透射至月壤的透射系数, R_2 为由月壤至真空的透射系数.

根据 Apollo 计划、Luna 计划和中国探月工程的研究结果^[20-22], 真空相对介电常数为 1, 月球岩石相对介电常数可取为 $\varepsilon_{r2} \approx 6$, 月壤相对介电常数可取为 $\varepsilon_{r1} \approx 3$. 当中心频率为 800 MHz 和 60 MHz 时, 月壤和月岩损耗角正切值综合估计分别为 0.003 和 0.007. 针对月表物质的电磁特性, 现有研究表明, 月壤和月球岩石均呈现非磁性特征, 其相对磁导率可近似取值为 1. 考虑真空与月壤交界面对探测深度的影响, 则

电磁波信号由真空透射至月壤的透射系数为 1.2679, 反之由月壤至真空为 0.7321, 月壤与底层月球岩石交界面处的反射系数为 -0.1716. 对于高频通道, 探深要求不小于 40 m, 电磁波在月壤中波长为 0.22 m, 全系统增益需不小于 142 dB; 对于低频通道, 探深要求不小于 400 m, 电磁波在月壤中波长约为 2.89 m, 全系统增益需不小于 161 dB. 因此, 为了实现 40 m 和 400 m 的探测, 测月雷达的高频和低频通道的全系统增益分别需不小于 142 dB 和 161 dB.

2.2.2 系统传递函数

次表层穿透成像雷达的系统传递特性可通过全反射状态下的极限回波信号 (金属板目标) 谱函数 $H_c(jw)$ 和无反射条件下的直达波信号 (自由空间背景) 谱函数 $H_F(jw)$ 完整表征. 基于该系统函数模型, 可实现对雷达实测回波的精确校准, 从而有效抑制系统固有误差, 如接收机背景噪声、射频通道非线性失真、阻抗失配引入的驻波干扰等; 还可压制环境的干扰, 如表面杂散反射信号、天线耦合效应、多径干扰分量等. 经校准处理的雷达探测数据可显著提升月表介质电磁参数的反演精度, 特别是对表层月壤复介电常数 ($\varepsilon' - j\varepsilon''$) 的求解具有重要价值. 在 Chang'E-7 测月雷达的月面探测任务中, 利用系统传递函数对原始信号进行校准, 可显著改善信号质量, 为后续科学分析提供更可靠的数据基础.

利用全反射状态下的回波信号谱函数 $H_c(jw)$ 和无反射条件下的直达波信号谱函数 $H_F(jw)$ 对雷达实际探测回波信号进行校准, 校准后的月面实现回波信号谱 $H_p(jw)$ 为

$$H_p(jw) = \frac{H_M(jw) - H_F(jw)}{H_c(jw) - H_F(jw)}. \quad (11)$$

其中, $H_M(jw)$ 为雷达月面原始实测回波信号谱.

2.2.3 时变增益曲线

次表层穿透成像雷达的电磁波在传播过程中会因介质吸收和球面扩散效应而产生渐进衰减. 时变增益 (TVG) 曲线能够根据信号传播时间对接收信号进行动态补偿, 从而增强深层目标的微弱反射信号, 有效提升探测深度和分辨率. 对基于巡视器或着陆器的次表层穿透成像雷达, 可以有效压制直耦波, 避免浅表层强反射信号导致的接收机饱和. Chang'E-7 测月

雷达的高频与低频通道均采用了时变增益技术. 然而, 在特定数据处理过程中 (例如月壤衰减特性反演), 需要恢复原始信号特征, 此时必须对时变增益曲线进行精确标定^[24]. 这种精确的增益标定过程是确保科学数据真实性和反演精度的关键环节.

2.2.4 测月雷达定标项目设置

基于上述分析, 测月雷达系统定标需求主要包括系统增益、系统传递函数和时变增益曲线三部分^[25,26]. 系统增益的定标项目包括发射前端输出功率 P_T 、接收机最小可检测功率 $P_{\min}$ 、发射接收天线增益 G_{Tx} 和 G_{Rx} 、系统插损 G_{sysL} . 系统传递函数包括无反射条件下的直达波信号和全反射状态下的极限回波信号.

3 测月雷达定标方案与试验结果

3.1 发射前端输出功率定标

发射前端输出功率定标, 旨在获取不同温度条件下测月雷达发射前端输出功率的线性增益工作区间, 在线性增益区内优化设置最大发射功率参数, 确保月面探测时获得最优的系统性能表现.

将测月雷达两通道发射前端放置于温箱中, 分别设置温箱温度为 $-40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70^\circ\text{C}$, 温箱温度至每一个温度条件后, 雷达开始进行高低频探测, 待温度稳定后, 设置电子学发射射频通道中数控衰减器处于不同的衰减量, 进而利用宽带实时示波器抓取发射前端的波形幅度数据, 计算并记录相应的发射功率.

测月雷达发射前端输出功率的定标结果如图 3 所示. 从图 3(a) 可以看出, 当低频通道发射增益设置在 $32\sim 63$ 区间内时, 为线性区, 此时最大的输出功率约为 28.1 dBm (0.64 W). 从图 3(b) 可以看出, 当高频通道发射增益设置在 $26\sim 63$ 区间内时, 为线性区, 此时最大的输出功率约为 26.65 dBm (0.46 W). 定标结果表明, 高低频通道的最大输出功率均满足 $> 0.2\text{ W}$ 的指标要求, 在线性增益区内, 低频通道可设置发射增益 32 , 实现最大输出功率 0.64 W ; 高频通道可设置发射增益 26 , 实现最大输出功率 0.46 W ; 同时, 可以根据在轨测试的情况, 在线性增益区内调整发射功率, 保证系统稳定性的前提下, 最大化雷达的

探测效能.

3.2 接收机灵敏度及动态范围定标

接收机灵敏度及动态范围定标目的在于获取不同温度下的接收机的输入动态, 包含接收机的最大可接收信号和最小可检测信号.

将测月雷达电子学单元和地检设备放置于温箱中. 分别设置温箱温度为 $-20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50^\circ\text{C}$, 雷达开始进行高低频探测, 待温度稳定后, 发射射频通道中数控衰减器衰减量保持不变, 然后使用高速示波器抓取高频通道和低频通道输出波形数据, 计算并记录相应的发射功率 P_{out} , 其表达式为

$$P_{\text{out}} = \left(\frac{V_{\text{p-p}}}{2\sqrt{2}} \right)^2 / 50. \quad (12)$$

其中, $V_{\text{p-p}}$ 为示波器测量信号的峰-峰值. 将接收机中增益衰减量调为最低, 改变外置衰减器的衰减量, 直到达到接收机的最小可检测状态 (信噪比为 6 dB), 根据已知的发射信号功率和延迟环路插入损耗, 可得出接收机灵敏度 $P_{\min}$, 其表达式为

$$P_{\min} = P_{\text{out}} - A_1 - L. \quad (13)$$

其中, P_{out} 为发射功率, A_1 为外置衰减器测量灵敏度

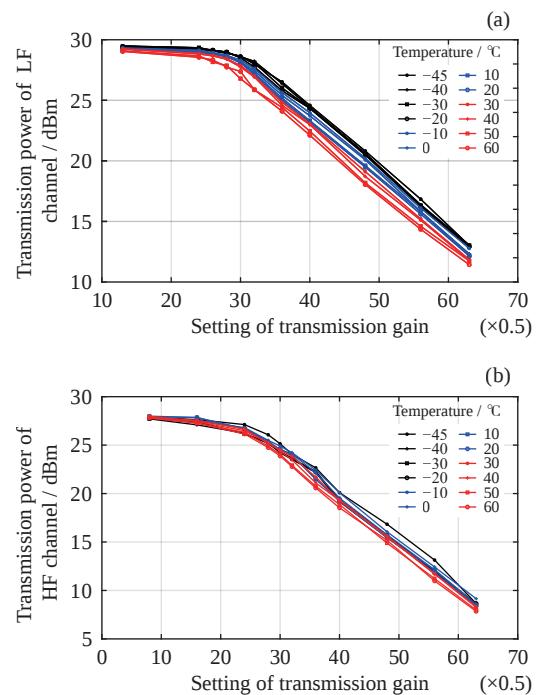


图 3 发射功率定标测试结果

Fig. 3 Results of transmit power calibration test

时的衰减量, L 为测量线路插损. 再将接收机中压控衰减器的衰减量调为最高, 调节外置衰减器, 以测量接收机最大可检测信号 P_{-1} 值, 其表达式为

$$P_{-1} = P_{\text{out}} - A_2 - L. \quad (14)$$

其中, A_2 为外置衰减器测量最大可检测信号时的衰减量. 根据 P_{-1} 值和最小可检测信号, 获取接收机动态范围 D , 其表达式为

$$D = P_{-1} - P_{\text{min}}. \quad (15)$$

测试结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 低频通道最小可检测信号为 -95.59 dBm , 动态范围 $\geq 105 \text{ dB}$; 高频通道最小可检测信号为 -97.35 dBm , 动态范围 $\geq 103 \text{ dB}$.

3.3 天线增益定标与方向图定标

天线增益定标与方向图定标, 旨在分别获取高频通道和低频通道天线的方向图, 判断天线的主要辐射方向是否指向月面, 以及天线不同频点的最小增益

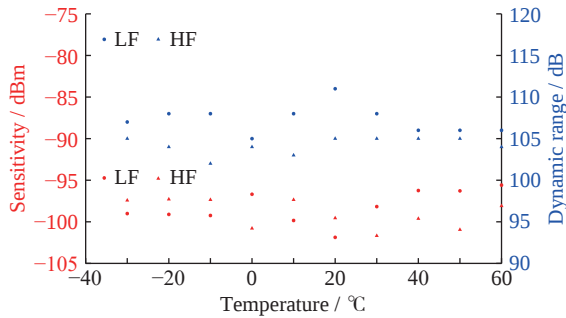


图 4 接收机不同温度下的灵敏度和动态范围
Fig. 4 Receiver sensitivity and dynamic range at different temperatures

值, 估算设备的系统增益.

测月雷达天线的增益特性采用标准比较法进行精确测试, 该方法通过同步测量待测天线与标准增益天线在相同测试条件下的接收信号电平, 基于相对测量原理计算获得待测天线的完整辐射特性. 天线增益计算公式为

$$G_u = G_s + (V_u - V_s). \quad (16)$$

其中, G_s 为标准天线增益, 单位 dBi ; V_u 为待测天线接收电平, 单位 dBm ; V_s 为标准天线接收电平, 单位 dBm .

由于高频通道的最低频点为 100 MHz , 低频通道的频带为 $10 \sim 110 \text{ MHz}$, 当前现有的微波暗室无法覆盖如此低的频点, 因此在开阔场进行标定, 如图 5 所示. 同时, 由于低频的频带过低, 按照 $1:4$ 的比例制作缩比的巡视器模型, 将 $1:4$ 缩比天线安装在缩比着陆巡视器模型上, 完成该试验.

测月雷达高频通道天线在 800 MHz 处的增益为 -1.6 dBi , 天线在 $100 \sim 1500 \text{ MHz}$ 频段内的增益曲线如图 6 所示. 完成高频天线的方向图测试验证后, 部分测试结果如图 7 所示. 在图 7 中, 180° 方向对应着月面方向. 方向图测试结果表明, 天线的最大辐射方向精准指向月球表面, 这充分证明了该天线具备满足探测任务需求的性能.

测月雷达低频通道天线在 60 MHz 处的增益为 -9 dBi , 在 $10 \sim 110 \text{ MHz}$ 频段内的增益曲线如图 8 所示. 天线单元方向测试天线 E 面部分结果如图 9 所示. 从天线方向图测试结果中可以看出, 天线的全向

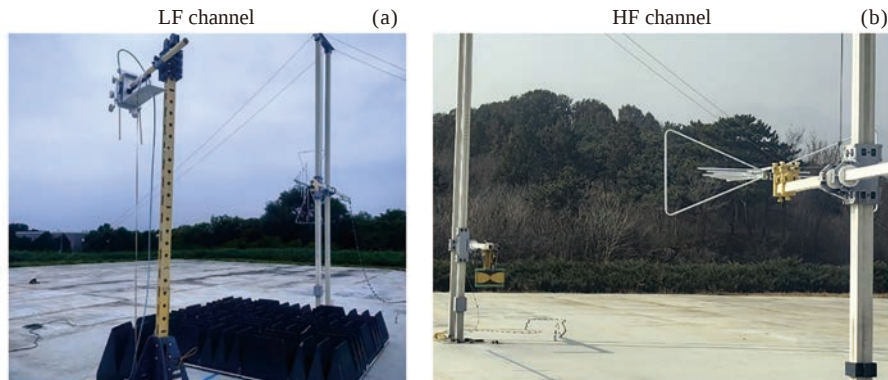


图 5 天线增益、方向图测试
Fig. 5 Antenna gain and radiation pattern test

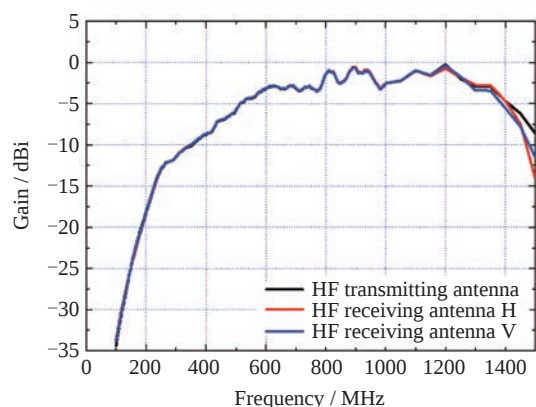


图6 高频通道天线增益测试结果

Fig. 6 Test results of antenna gain for the HF channel

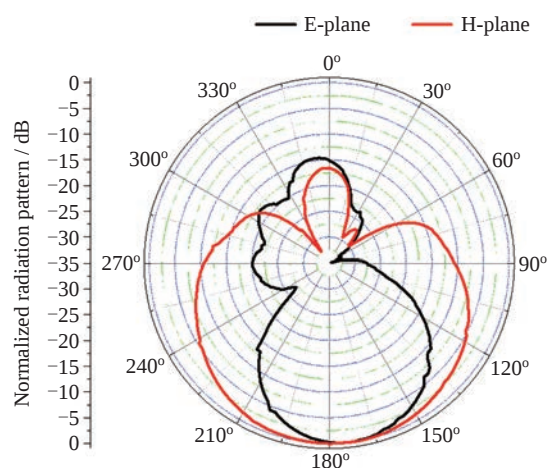


图7 高频天线方向图 (800 MHz)

Fig. 7 Radiation pattern of the HF antenna (800 MHz)

性较好, 能够满足探测的需求.

3.4 电缆插损标定

电缆插损标定, 用于获取高低频通道电磁波在电缆中传播的损耗, 标定两通道的系统增益. 分别将高低频通道的高频同轴电缆两端连至矢量网络分析仪端口 1 测试电缆和端口 2 测试电缆, 然后测试该电缆在各自频段内的最大插损. 低频通道电缆插损为 0.79 dB, 高频通道 HH 电缆插损为 1.43 dB, 高频通道 HV 电缆插损为 1.44 dB.

3.5 时变增益曲线定标

测月雷达为了避免浅表层强反射信号导致接收机饱和, 同时增强深层目标的微弱信号, 采用了时变增益技术. 根据天线的隔离度和电磁波的辐射特性, 测月雷达标定了相应的增益曲线, 对接收信号实现时

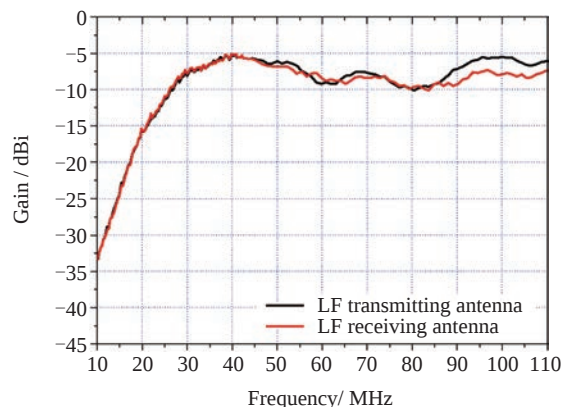


图8 低频天线增益测试结果

Fig. 8 Test results of antenna gain for LF channel

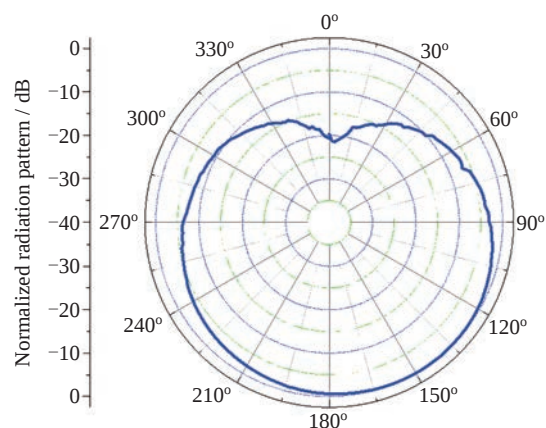


图9 低频天线方向图 (60 MHz)

Fig. 9 Radiation pattern of the LF antenna (60 MHz)

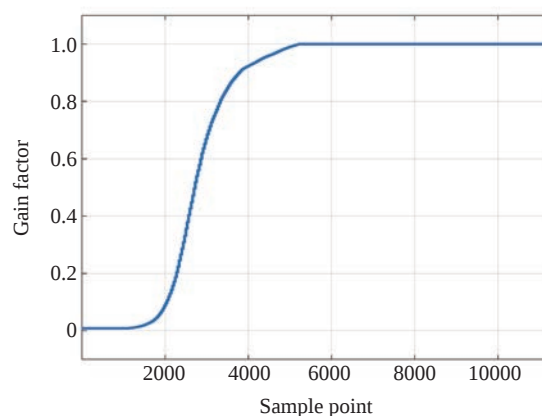


图10 测月雷达高频通道增益曲线

Fig. 10 Gain curve of the HF channel

变增益控制, 部分增益曲线如图 10 所示.

增益还原后的信号表达式为

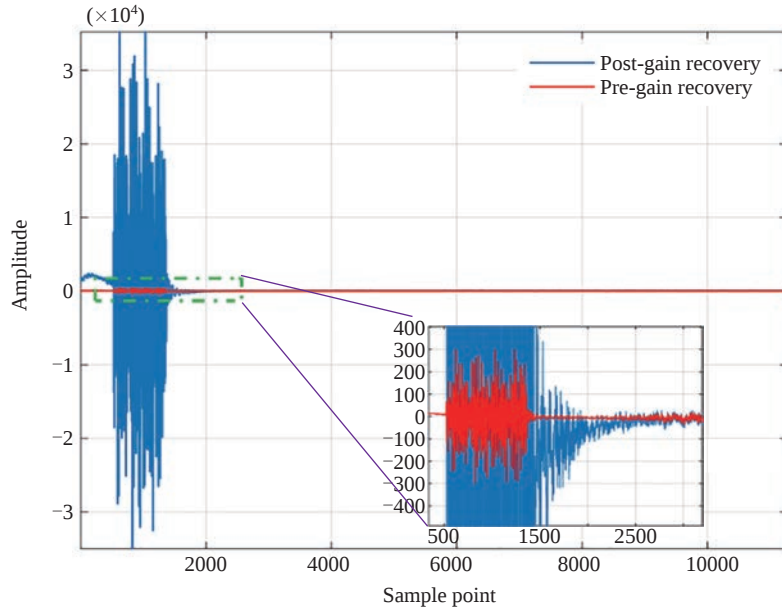


图 11 测月雷达高频通道时变增益还原结果

Fig. 11 Time-variant gain restoration results of the HF channel

$$V_{\text{gain_rec}} = \frac{V_{\text{raw}}}{\delta_{\text{Gain}}}. \quad (17)$$

其中, V_{raw} 为增益还原前的信号, δ_{Gain} 为增益因子. 按照式 (17) 对采集的原始信号进行增益恢复, 如图 11 所示. 增益还原后的信号可为科学分析提供无失真数据基础.

3.6 系统传递函数定标

测月雷达的全反射回波信号获取: 将雷达安装在 1:1 模拟巡视器平台上, 在试验场地面铺设金属反射板, 设置雷达参数为在轨工作模式, 采集高低频通道的全反射回波信号. 无表面反射回波信号是指在雷达信号时窗内不存在探测目标的自由空间背景回波信号, 为了获取该信号, 将雷达及模拟巡视器吊至空中超 300 m 的高度, 保证高频通道约 $2 \mu\text{s}$ 时窗内无目标. 然而, 对于低频通道, 由于其采用全向天线设计, 且探测时窗约为 $10 \mu\text{s}$, 地面测试难以实现无表面反射回波信号的获取, 因此采用将地面反射波及之后的时窗置为底噪, 作为无表面反射回波信号, 测试现场如图 12 所示. 测月雷达的部分全反射回波信号及无表面反射回波信号如图 13 和图 14 所示.

利用对模拟月壤 (火山灰) 探测, 验证雷达系统传递函数的有效性. 对全发射、无反射和模拟月壤实测信号进行增益还原; 基于系统传递函数, 在时域利



图 12 测月雷达无反射信号获取现场

Fig. 12 Field image of LPR non-reflective signal acquisition

用式 (11) 对模拟月壤 (火山灰介质) 的实测回波信号进行校准处理; 再利用反射系数法, 反演获得模拟月壤表层介电常数约为 3 (见图 15). 对模拟月壤 (火山灰介质) 的实测回波信号进行校准处理, 待测模拟月壤的相对介电常数

$$\epsilon_r = \left(\frac{A_m + A}{A_m - A} \right)^2. \quad (18)$$

其中, A_m 为经过传递函数校准的全反射回波信号, A 为经过传递函数校准的模拟月壤回波信号.

由图 15 可以看出, 该结果与介质实际介电特性

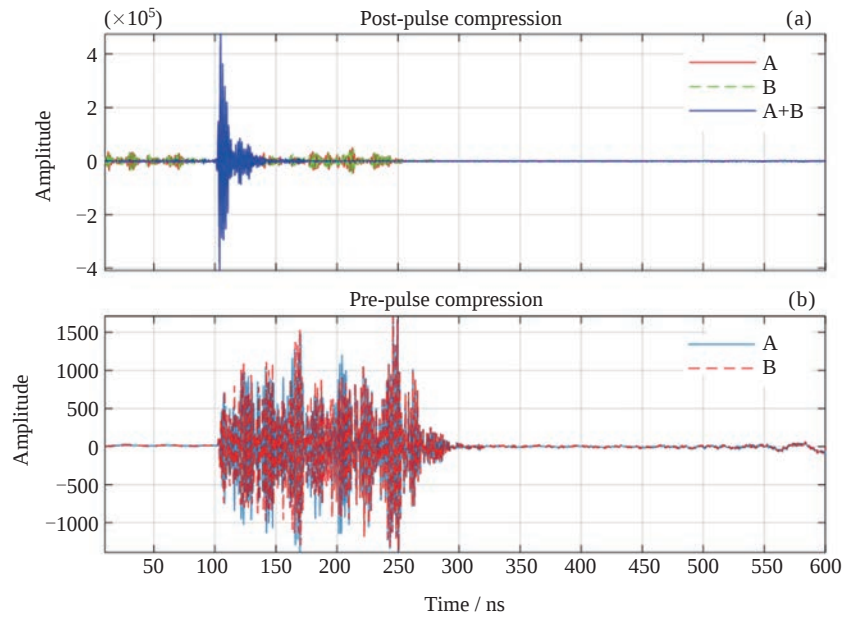


图 13 高频通道 HH 极化全反射回波信号

Fig. 13 HF channel HH polarization full reflection echo signal

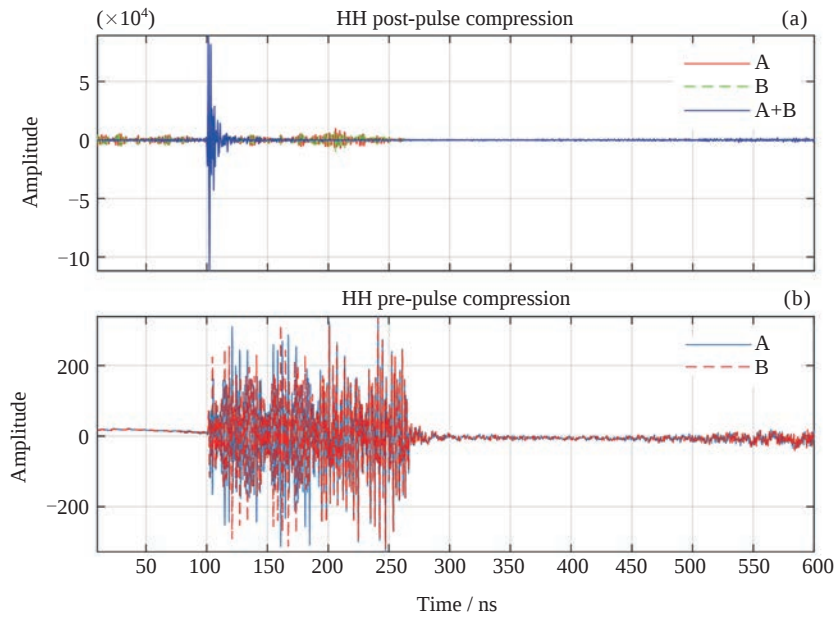


图 14 高频通道 HH 极化无反射回波信号

Fig. 14 HF Channel HH polarization echo signal without reflection

相符, 验证了系统传递函数对实际探测回波信号校准的有效性. 这表明该方法可为未来月面探测任务的信号校准提供可靠技术方案. 对测月雷达的模拟月壤探测信号进行频谱分析, 结果如图 16 所示, 按照 20 dB 带宽、模拟月壤相对介电常数 3, 利用式 (3) 进行计算, 低频通道的厚度分辨率约为 1.13 m, 高频通

道的约为 8.5 cm, 均满足指标要求.

3.7 试验结果

Chang'E-7 测月雷达低频通道的伪随机编码码长为 1024 位, 则脉冲压缩增益 G_{pCom} 为 30.10 dB. 根据以往型号巡视器的速度约为 $5.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 探测间隔预设为 25 cm, 则最大累加次数可为 4096 次, 则时间累

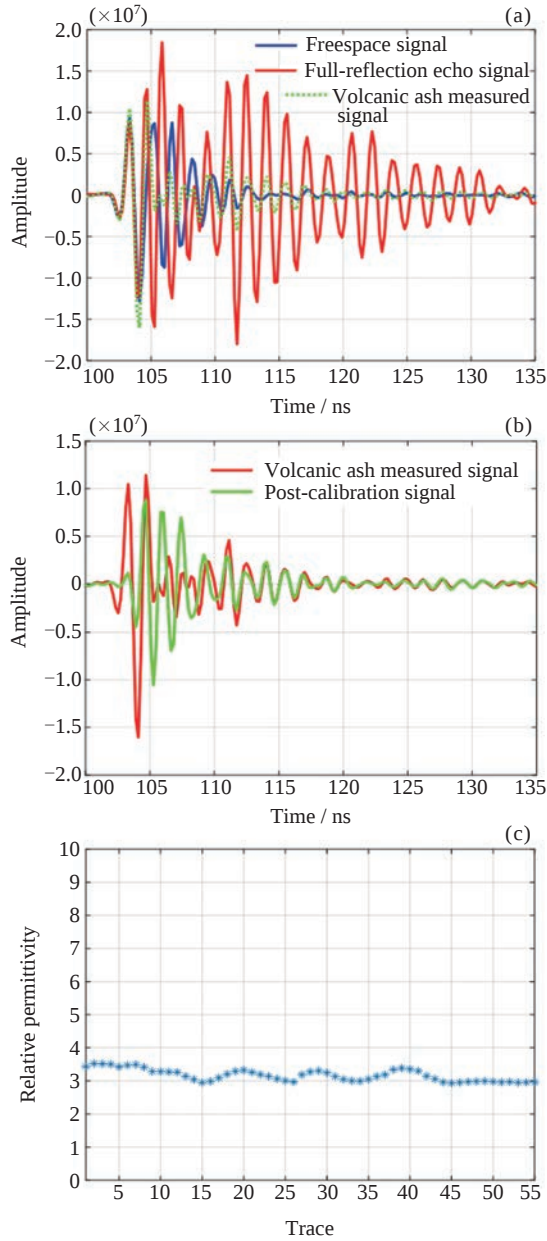


图 15 系统传递函数校准探测数据. (a) 校准前信号, (b) 校准信号比对, (c) 利用校准后信号估算火山灰介电常数

Fig. 15 Detection signal calibrating by using system transfer function. (a) Pre-calibration signal, (b) signal comparison during calibrating, (c) dielectric constant estimation of volcanic ash by using post-calibration signal

积增益 G_{add} 为 36.12 dB. 发射功率 P_T 为 28 dBm, 电缆插损 G_{sysL} 为 -0.79 dB, 发射、接收天线增益 G_{Rx} 和 G_{Tx} 均为 -9 dBi, 接收机灵敏度为 -95.59 dBm, 则低频通道的系统增益为 171.02 dB, 满足低频探深

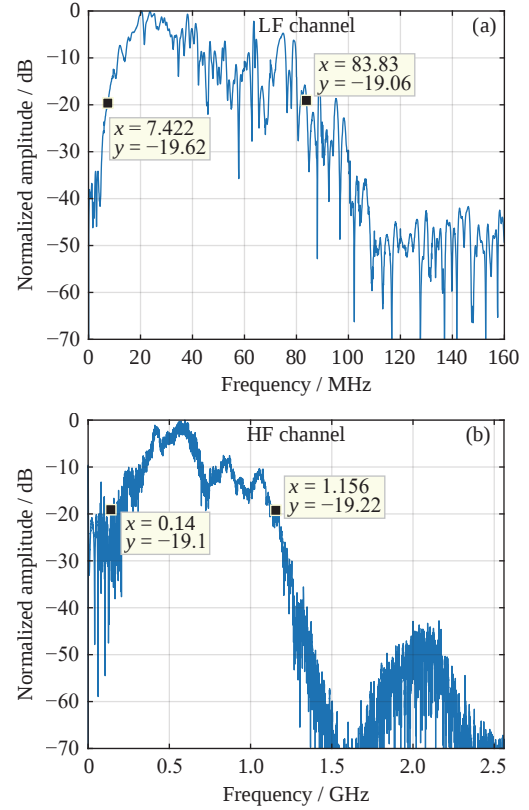


图 16 测月雷达两通道实测信号频谱

Fig. 16 Measured signal spectra of dual-channel LPR

400 m 所需 161 dB 需求。

Chang'E-7 测月雷达高频通道的码长为 128 位, 则脉冲压缩增益 G_{pCom} 为 21.07 dB. 探测间隔预设为 5 cm, 则最大累加次数可为 1024 次, 则时间累积增益 G_{add} 为 30.10 dB. 发射功率 P_T 为 26 dBm, 电缆插损 G_{sysL} 为 -1.44 dB, 发射、接收天线增益 G_{Rx} 和 G_{Tx} 均为 -1.7 dB, 接收机灵敏度为 -97.35 dBm, 则高频通道的系统增益为 169.70 dB, 故满足高频探深 40 m 所需 142 dB 需求。

利用 Chang'E-7 测月雷达模拟月壤的探测数据进行分析, 结果表明, 厚度分辨率满足指标要求. 通过定标获取了时变增益曲线和系统传递函数, 经验证, 二者均可为未来月面探测数据提供精准的校准基础。

4 结语

针对地外天体探测次表层穿透成像雷达系统定标方法稀缺的现状, 研究提出一套完备的定标方法, 并成功应用于 Chang'E-7 测月雷达系统定标. 试验结果

表明,雷达各项性能指标均满足设计要求,低频通道和低频通道标定系统增益分别为 171.02 dB 和 169.70 dB,满足 400 m 和 40 m 的探深需求,所获取的系统传递函数和时变增益曲线,可为未来月面探测数据提供精准的校准基础,显著提升科学数据的可靠性与反演精度。

在月球及深空探测任务中,次表层穿透成像雷达凭借其非接触、无损探测及穿透能力等优势,已成为获取地外天体内部结构的必备科学载荷。无论是环绕器搭载的轨道探测雷达,抑或巡视器配置的就位探测雷达,面对不同行星环境均具有技术共通性。Chang'E-7 测月雷达建立的定标方法体系与工程实践经验,将为后续月球与深空探测任务中(例如木星冰卫星探测)的雷达系统定标提供重要技术参考。

参考文献

- [1] YE P J, PENG J. Deep space exploration and its prospect in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2006, **8**(10): 13-18
- [2] WANG Jingjin, LI Chengzhi. Practical history and innovation of China's Chang'E lunar project[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2024, **16**(3): 364-374 (王晶晶, 李成智. 中国嫦娥探月工程的实践历程与创新初探 [J]. 工程研究, 2024, **16**(3): 364-374)
- [3] YE Peijian, HUANG Jiangchuan, SUN Zezhou, *et al.* The process and experience in the development of Chinese lunar probe[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, **44**(6): 543-558 (叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探 [J]. 中国科学: 技术科学, 2014, **44**(6): 543-558)
- [4] SUN Zezhou, ZHANG Tingxin, ZHANG He, *et al.* The technical design and achievements of Chang'E-3 probe[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, **44**(4): 331-343 (孙泽洲, 张廷新, 张焄, 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, **44**(4): 331-343)
- [5] HU Hao, PEI Zhaoyu, LI Chunlai, *et al.* Overall design of unmanned lunar sampling and return project—Chang'E-5 mission[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2021, **51**(11): 1275-1286 (胡浩, 裴照宇, 李春来, 等. 无人月球采样返回工程总体设计——嫦娥五号任务 [J]. 中国科学: 技术科学, 2021, **51**(11): 1275-1286)
- [6] LI C L, HU H, YANG M F, *et al.* Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission[J]. *National Science Review*, 2022, **9**(2): nwab188
- [7] LI C L, HU H, YANG M F, *et al.* Nature of the lunar far-side samples returned by the Chang'E-6 mission[J]. *National Science Review*, 2024, **11**(11): nwae328
- [8] YU Houman, RAO Wei, ZHANG Yiyuan, *et al.* Mission analysis and spacecraft design of Chang'E-7[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, **10**(6): 567-576 (余后满, 饶炜, 张益源, 等. “嫦娥七号”探测器任务综述 [J]. 深空探测学报(中英文), 2023, **10**(6): 567-576)
- [9] WANG C, JIA Y Z, XUE C B, *et al.* Scientific objectives and payload configuration of the Chang'E-7 mission[J]. *National Science Review*, 2024, **11**(2): nwad329
- [10] FU Xiaojing, CAI Xiaodong, LIU Yiming, *et al.* Comprehensive testing technology for multi spacecraft collaboration in Chang'E-7 lunar probe[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, **10**(6): 577-585 (傅晓晶, 蔡晓东, 刘一鸣, 等. “嫦娥七号”探测器多器协同综合测试技术 [J]. 深空探测学报(中英文), 2023, **10**(6): 577-585)
- [11] ASTM International. ASTM D6087-22 Standard Test Method for Evaluating Asphalt-covered Concrete Bridge Decks using Ground Penetrating Radar[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022
- [12] MAHMOUDZADEH ARDEKANI M R, LAMBOT S. Full-wave calibration of time- and frequency-domain ground-penetrating radar in far-field conditions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(1): 664-678
- [13] PAJEWSKI L, VRTUNSKI M, BUGARINOVIĆ Ž, *et al.* GPR system performance compliance according to COST action TU1208 guidelines[J]. *Ground Penetrating Radar*, 2018, **1**(2): GPR-1-2-1
- [14] CROCI R, FOIS F, FLAMINI E, *et al.* Calibration report of the SHARAD instrument[C]//2007 4th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. Aula Magna Partenope: IEEE, 2007: 241-245. DOI: 10.1109/AG-PR.2007.386560
- [15] BENEDIX W S, PLETTEMEIER D, WOLF K, *et al.* External calibration of GPR antenna accommodated on a rover[C]//Proceedings of the 4th European Conference on Antennas and Propagation. Barcelona: IEEE, 2010: 1-4
- [16] CAMPBELL B A, MORGAN G A, BERNARDINI F, *et al.* Calibration of Mars reconnaissance orbiter Shallow Radar (SHARAD) data for subsurface probing and surface reflectivity studies[J]. *Icarus*, 2021, **360**: 114358. DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114358
- [17] HERVÉ Y, CIARLETTI V, LE GALL A, *et al.* The WISDOM radar on board the ExoMars 2022 Rover: characterization and calibration of the flight model[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, **189**: 104939
- [18] SHEN Shaoxiang, ZHAO Bo, LU Wei, *et al.* Final Design Report of the Lunar Penetrating Radar Flight Model for

- Chang'E-7 Payload Subsystem: KTY-CEY200-7-X JB 43[R]. Beijing: Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2024 (沈绍祥, 赵博, 卢伟, 等. 嫦娥七号探测器有效载荷分系统测月雷达正样设计报告: KTY-CEY200-7-X JB 43[R]. 北京: 中国科学院空天信息创新研究院, 2024)
- [19] LI Yuxi. Research on Calibration and Verification of Lunar Penetrating Array Radar for Chang'E-5 Payload[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019 (李玉喜. 嫦娥五号有效载荷月壤结构探测仪定标与验证研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019)
- [20] CARRIER III W D, OLHOEFT G R, MENDELL W. Physical Properties of the Lunar Surface[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991
- [21] LI C L, SU Y, PETTINELLI E, *et al.* The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar[J]. *Science Advances*, 2020, **6**(9): eaay6898
- [22] ZHANG J H, ZHOU B, LIN Y T, *et al.* Lunar regolith and substructure at Chang'E-4 landing site in South Pole-Aitken basin[J]. *Nature Astronomy*, 2020, **5**(1): 25-30
- [23] NOON D A, STICKLEY G F, LONGSTAFF D. A frequency-independent characterisation of GPR penetration and resolution performance[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1998, **40**(1/2/3): 127-137
- [24] SU Y, WANG R G, DENG X J, *et al.* Hyperfine structure of regolith unveiled by Chang'E-5 lunar regolith penetrating radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 5110414. DOI: 1109/TGRS.2022.3148200
- [25] LI Yuxi, SHEN Shaoxiang, LU Wei, *et al.* Calibration Test Outline of the Lunar Penetrating Radar for Chang'E-7 Payload Subsystem: KTY-CEY200-7-X DG 02[R]. Beijing: Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2024 (李玉喜, 沈绍祥, 卢伟, 等. 嫦娥七号探测器有效载荷分系统测月雷达定标试验大纲: KTY-CEY200-7-X DG 02[R]. 北京: 中国科学院空天信息创新研究院, 2024)
- [26] LI Yuxi, SHEN Shaoxiang, LU Wei, *et al.* Calibration Test Summary of the Lunar Penetrating Radar Flight Model for Chang'E-7 Payload Subsystem: KTY-CEY200-7-X SB 26[R]. Beijing: Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2024 (李玉喜, 沈绍祥, 卢伟, 等. 嫦娥七号探测器有效载荷分系统测月雷达正样件定标试验总结: KTY-CEY200-7-X SB 26[R]. 北京: 中国科学院空天信息创新研究院, 2024)

作者简介



李玉喜 男, 1984年4月出生于河南省孟州市, 现为中国科学院空天信息创新研究院副研究员, 主要研究方向为星载探测雷达系统的研制、探地雷达(GPR)信号处理技术等。
E-mail: liyx002994@aircas.ac.cn