

嫦娥四号着陆区次表层介电特性 全波形反演与仿真验证*

陈书睿 冯永玖 童小华 唐盼丽
许雄 王超 柳思聪 杨其全 肖长江

(同济大学测绘与地理信息学院 上海 200092)

(上海市航天测绘遥感与空间探测重点实验室 上海 200092)

摘要 介电特性是决定雷达波在物质中传播速度的重要参数。嫦娥四号测月雷达提供的高垂向分辨率次表层雷达剖面信息有助于加深对月球次表层物质介电特性的理解与认识。全波形反演法充分利用雷达波场的运动学和动力学信息,根据雷达波模拟结果与真实数据的差异计算更新参数,迭代初始介电模型实现对次表层介电剖面的反演。本文结合嫦娥四号测月雷达数据与时域有限差分方法下均质模型和随机等效介质模型的雷达回波特性,确定随机等效介质模型能够更好地模拟嫦娥四号着陆区次表层物质的介电特性。全波形方法反演的介电模型与真实模型在大部分区域的相对介电常数误差小于 0.2,为反演月壤厚度及构建次表层温度模型提供了重要的数据支撑。

关键词 介电特性, 全波形反演, 测月雷达, 随机扰动介质模型, 仿真验证

中图分类号 P184

Numerical Validation of Subsurface Dielectric Property Estimation Based on Full Waveform Inversion at Chang'E-4 Landing Site

CHEN Shurui FENG Yongjiu TONG Xiaohua TANG Panli
XU Xiong WANG Chao LIU Sicong YANG Qiquan XIAO Changjiang

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092)

(Shanghai Key Laboratory of Space Mapping and Remote Sensing for Planetary Exploration, Shanghai 200092)

Abstract Dielectric property is an important parameter that determines the propagation speed of radar wave in materials, which is widely used in stratigraphic division, regolith thickness inversion, radar model construction and water-ice detection. However, continuous impacts may cover the traces of impor-

* 国家自然科学基金项目资助 (42371422, 42221002)

2023-10-19 收到原稿, 2023-11-20 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

tant geological activities and hinder the exploration of lunar geological. In January 2019, China's Chang'E-4 carried the Yutu-2 rover successfully landed at the Von Kármán crater (177.5991°E, 45.4446°S) in the South Pole-Aitken (SPA) basin. The Yutu-2 rover equipped with dual-frequency ground penetrating radar (Lunar Penetrating Radar, LPR). The subsurface radar diagram with fine vertical resolution provided by the Chang'E-4 LPR can deepen our understanding of the dielectric property of lunar subsurface materials. Full Waveform Inversion (FWI) method can fully utilize the kinematic and dynamic information of radar wave field and invert the dielectric property by constructing an initial dielectric model and continuously updating this model with comparison of the observed radar data. By comparing the simulation results of homogeneous dielectric model and stochastic equivalent media model to the Chang'E-4 LPR diagram, we selected the stochastic equivalent media model as the real model to simulate the subsurface dielectric profile at the Chang'E-4 landing site and valid the dielectric accuracy inverted by FWI method. Our results reported that FWI method can not only capture the dielectric perturbation in local scale, but also generate two-dimensional dielectric profile with high spatial resolution. The initial dielectric model is able to better characterize the dielectric properties after 79 FWI iterations, and the maximum inversion error of relative dielectric constant is limited to 0.2 (the objective function is minimized to 0.91% of the initial value). The stochastic equivalent medium model can effectively simulate the dielectric properties of the lunar regolith, and the radar simulation results based on it are close to the Chang'E-4 LPR radar diagram.

Key words Dielectric property, Full waveform inversion, Lunar penetrating radar, Stochastic equivalent media model, Numerical validation

0 引言

陨石撞击、火山喷发及其他地质活动不仅会重塑月表形貌及地层结构,还可能掩盖月球重要历史地质活动遗留在月表的痕迹^[1]. 由于缺乏大气及不受生命活动的影响,月球次表层保存着地质活动和行星演化过程的重要线索^[2,3]. 次表层物质的介电特性在划分次表层地层结构、估算月壤厚度及构建温度模型等科学探测与反演中发挥着重要作用^[4,5]. 基于高精度介电特性反演的地层结构与月壤厚度还将为月球资源探测与估产、潜在水冰分布反演及月球科考站选址等应用提供数据支撑^[6].

目前最准确的月球表层和次表层物质介电特性数据均来自实验室对 Apollo 和 Luna 任务采集月球样本的地面测试^[1,7], 其中月壤物质的相对介电常数在 1.7~4.4 之间^[8]. 这些样品表明,不同采样位置及采样深度下的介电特性均存在差异. 考虑到迄今为止月球采样点都位于月球正面,其他未采样区域(特别是月球背面)的次表层物质介电特性仍存在较大的不确定性,因此有必要通过非采样方法获取高精度的次表层物质介电特性. 地基光学和雷达设备最早被用于绘制月球正面的反射率及地质图^[9],但因较低的分辨

率和地球大气层的影响限制了其在反演物质介电特性方面的应用. 在阿波罗 17 号任务中,三种不同波长 (60, 20, 2 m) 的轨道合成孔径雷达通过区分月球表层和次表层之间的回波延迟来估算次表层物质的介电特性^[10]. 日本 SELENE 探测器携带的 Lunar Radar Sounder (LRS) 通过对比撞击坑溅射物质种类判断最上方岩石层深度,并结合岩石层底部双程雷达回波时间计算其介电特性^[11]. 2008 年印度月船一号搭载的极化合成孔径雷达 Mini-SAR 通过极化雷达回波特征估算次表层物质介电特性,为南北极永久阴影区水冰探测提供了宝贵数据^[12]. 月船二号搭载的全极化合成孔径雷达通过 Pol-SAR 三分量混合分解方法计算共极化比率,实现了表层物质的介电特性和密度估算^[13]. 联合嫦娥一、二号的辐射亮温数据与一维热力学方程也能为反演次表层物质的介电特性提供新的约束^[14-16]. 然而,上述非采样反演方法多依赖于轨道器数据^[17,18],后者相对较低的空间与垂向分辨率难以满足高精度次表层科学分析的需求.

2019 年 1 月 3 日,嫦娥四号成功软着陆于南极-艾特肯盆地西北部的冯卡门撞击坑内 (177.5991°E, 45.4446°S),并释放出月兔二号巡视器开展就位科学

探测. 玉兔二号携带的测月雷达由两个中心频率分别为 60 和 500 MHz 的探测通道组成, 其中高频通道能够以约 30 cm 的垂向分辨率探测 30 m 深的次表层信息^[19], 从而提供远高于轨道器雷达分辨率的次表层雷达回波特征并可用于分析地层结构及物质介电特性^[20]. 介电特性决定了雷达波在次表层物质中的传播速度, 是基于雷达双程回波时间开展时间-深度转换并估算地层厚度的关键参数. 在以地层结构为重点的研究中, 由 Apollo 和 Luna 样品测得的月壤相对介电常数均值被广泛应用于地层厚度的估算^[21,22]. 而在仅以浅层区域及月壤为目标的研究中, 固定介电常数值可能会带来较大的深度估算误差^[23]. 因此, 开展高精度介电特性反演至关重要. 目前, 基于测月雷达的最便捷的介电特性反演方法是双曲线法, 其利用点目标雷达回波特征呈现双曲线形状这一特点, 根据顶点与同一双曲线中另一点的空间位置及两者的雷达双程回波时间差对目标的相对介电常数进行估算^[24,25]. 但双曲线法仅能获取离散点目标的介电特性, 而地层厚度或小区域异常介电特性的探测更依赖于连续二维介电剖面.

自 20 世纪 80 年代以来, 全波形反演法^[26,27]因能够提高回波分辨率而被广泛应用于地震学研究^[28]. 2010 年全波形反演法被引入探地雷达数据, 其核心是通过最小化模拟雷达回波与真实雷达回波的残差平方和, 实现对二维介电模型参数的估算^[29], 从而提高对浅层物质介电特性的认识. 近年来, 全波形反演法也被广泛应用于土壤水文相关研究^[30]. 在非均质含水层中注入介电特性差异较大的盐水、淡化水和乙醇后, 基于探地雷达数据和全波形反演法能够在分米尺度上进行高分辨率成像, 实现含水层非均质传输的观测^[31]. 在水文研究中, 结合水文模型与探地雷达正演的耦合 GPR 全波形反演 (CFWI) 方法能够更准确估计最上层土壤厚度, 且反演得到的水文参数与真实值偏差较小^[32]. 在测月雷达数据处理中, 当异常物体尺寸与雷达波的波长接近时, 难以通过传统的反射波进行识别, 而绕射波作为波场数据的重要组成部分能够提高反演的局部分辨率^[33]. 全波形反演通过将正演波场与伴随波场在时间上互相关实现对残差平方和的梯度计算, 不仅充分利用了雷达波场特征 (包含直达波、延迟波及绕射波), 而且能以较高的空间分辨率估算介电特性, 实现对小区域介电差异的识别^[34]. 本文

基于时域有限差分方法 (FDTD) 开展雷达波正演实验, 通过构建具有随机扰动特征的嫦娥四号着陆区次表层介电模型, 分析了全波形反演方法在连续二维介电剖面反演中的精度, 为其后续应用于嫦娥系列测月雷达数据提供了方法验证.

1 方法

1.1 全波形反演

全波形反演是一种利用观测区域雷达波场的运动学和动力学信息准确反演物质介电特性的高分辨率近地表特征定量探测技术^[35]. 该方法通过分析电磁场正演模拟数据与真实观测数据之间的差异, 迭代更新初始模型, 从而让更新后的初始模型与真实场景的介电特性趋近 (见图 1). 发射-接收天线对的正演模拟数据与真实观测数据的差异被定义为目标函数, 即

$$O(\varepsilon, \sigma) = \frac{1}{2} \sum_s \sum_t (E_{\text{sim}} - E_{\text{obs}})_{s,t}^T (E_{\text{sim}} - E_{\text{obs}})_{s,t}. \quad (1)$$

其中, ε 为相对介电常数, σ 为电导率, 上角 T 表示转置, s 为发射-接收天线对的数量, t 为雷达波正演模拟中的时间步长, E_{sim} 为正演模拟数据, E_{obs} 为真实观测数据. 当 $O(\sigma, \varepsilon)$ 足够小时, 更新后的模型可用于表征真实场景的介电特性. 为了最小化目标函数, 可以利

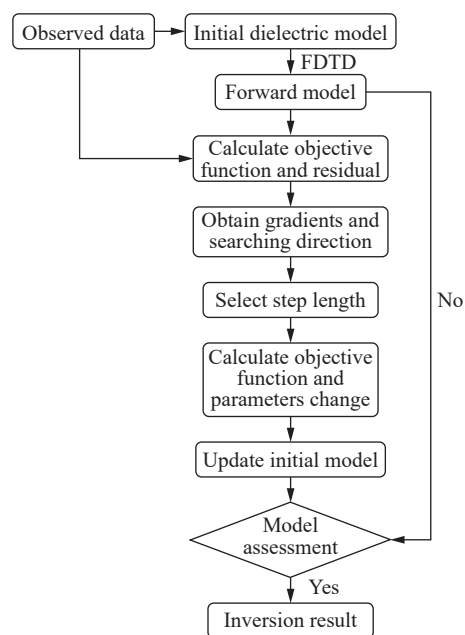


图 1 全波形反演流程

Fig. 1 Flowchart of full waveform inversion

用拉格朗日乘数法将这一反演问题转化为无约束优化问题, 相对介电常数和电导率的梯度可以表示为^[36]

$$\begin{cases} \nabla O_\varepsilon = \sum_s \int_0^T E_{\text{adj}} \frac{\partial E_{\text{for}}}{\partial t} dt, \\ \nabla O_\sigma = \sum_s \int_0^T E_{\text{adj}} E_{\text{for}} dt. \end{cases} \quad (2)$$

其中, ∇O_ε 和 ∇O_σ 分别为 ε 和 σ 的梯度, E_{for} 是从发射天线传播到接收天线的正演波场, E_{adj} 表示伴随波场 (将真实观测数据与正演模拟数据的差值在时间逆转后从接收天线传播到发射天线). 为了实现对初始介电模型的逐步更新, 通过最速下降法进行模型迭代, 并根据 $O(\varepsilon, \sigma)$ 的变化幅度决定步长, 有

$$\begin{cases} \varepsilon_{i+1} = \varepsilon_i - \zeta \nabla O_\varepsilon, \\ \sigma_{i+1} = \sigma_i - \zeta \nabla O_\sigma. \end{cases} \quad (3)$$

其中 ε_{i+1} 和 σ_{i+1} 分别是更新后的相对介电常数和电导率, ε_i 和 σ_i 分别是输入的相对介电常数和电导率, ζ 是 ∇O_ε 和 ∇O_σ 的步长. 当选择的步长较小时, 需要更多次迭代才能使目标函数收敛, 从而增加计算负担. 相反, 当步长设置较大时, 目标函数可能会停留在局部最小值, 破坏反演的稳定性. 本文使用的步长求解方法, 其最优步长 ζ 可以通过在梯度方向搜寻目标函数最小值获得^[29], 并以目标函数一阶导数为 0 时的值作为最小值, 即

$$\frac{\partial O(\varepsilon + \zeta \nabla O_\varepsilon, \sigma + \zeta \nabla O_\sigma)}{\partial \zeta} = 0. \quad (4)$$

解算后的步长可以表示为

$$\zeta = f_s \frac{E_A^{\text{qu}}}{E_B^{\text{qu}}}. \quad (5)$$

$$E_A^{\text{qu}} = \sum_s \sum_t [E_{\text{for}}(\varepsilon + f_s \nabla O_\varepsilon, \sigma + f_s \nabla O_\sigma) - E_{\text{for}}(\varepsilon, \sigma)]^T [E_{\text{for}}(\varepsilon, \sigma) - E_{\text{obs}}]; \quad (6)$$

$$E_B^{\text{qu}} = \sum_s \sum_t [E_{\text{for}}(\varepsilon + f_s \nabla O_\varepsilon, \sigma + f_s \nabla O_\sigma) - E_{\text{for}}(\varepsilon, \sigma)]^T [E_{\text{for}}(\varepsilon + f_s \times \nabla O_\varepsilon, \sigma + f_s \nabla O_\sigma) - E_{\text{for}}(\varepsilon, \sigma)]. \quad (7)$$

其中, f_s 为稳定因子, $E_{\text{for}}(\varepsilon, \sigma)$ 为当相对介电常数和电导率分别为 ε 和 σ 时的雷达波正演模拟数据, E_{obs} 为真实观测数据. 根据上述公式, 全波形反演方法可以单独或者同时反演电导率和相对介电常数 (本文仅单独反演相对介电常数, 电导率均设定为定值). 在迭代循环中, 当更新后的目标函数小于初始目标函数的 1% 时, 反演被认为是收敛的, 更新后的介电模型参数

被视为真实情况的近似值.

1.2 月球次表层介电模型

水平层状均质模型被广泛应用于月球次表层物质特性的遥感反演^[16,37]. 而月球次表层物质在演化过程中会受到太阳风、陨石撞击及月球内部不同压力的作用, 从而产生非均匀性的介电特性. 结合水平层状均质模型与椭圆自相关函数的随机等效介质模型^[38]能更好地表征月壤与月岩介电特性的非均质分布及随机扰动特性, 其二维模型可表示为

$$R(x, z) = R_0(x, z) [1 + r(x, z)]. \quad (8)$$

其中, x 和 z 分别代表水平方向和垂直方向的坐标位置, $R_0(x, z)$ 是初始介电模型 (本文中为水平层状均质模型), r 为相对介电常数扰动随机扰动系数. 该随机等效介质模型构建于椭圆自相关函数的基础上, 该函数可表示为

$$r(x, z) = \exp \left[- \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} \right) \right]^{\frac{1}{1+f}}. \quad (9)$$

式中, a 和 b 分别代表水平方向和垂直方向的自相关长度, f 为介于 0 和 1 之间的模糊度系数. 当 $f = 0$ 时, $r(x, z)$ 为高斯型函数; 当 f 在 0 和 1 之间时, $r(x, z)$ 为混合型函数; 当 $f = 1$ 时, $r(x, z)$ 为指数型函数. 图 2(a)~(c) 给出了自相关长度固定为 3 的情况下, 模糊度系数分别为 0, 0.5 和 1 时的随机等效介质模型, 模糊度系数的提高会使得单个扰动的范围增大, 形成波浪形的扰动, 降低区域的整体随机性. 图 2(d)~(f) 给出了在模糊度系数均为 0.5 时, 自相关长度分别为 3, 5, 7 的情况, 自相关长度的增长会使得同类扰动聚集的情况增加. 为使扰动能够随机出现在二维数据中, 随机函数被用于生成扰动发生的空间位置. 以坐标点为中心, 通过椭圆自相关函数生成不规则的随机扰动. 扰动函数可以表示为

$$\left[\frac{(x - x_0) \cos \theta + (z - z_0) \sin \theta}{m} \right]^2 + \left[\frac{-(x - x_0) \sin \theta + (z - z_0) \cos \theta}{n} \right]^2 = 1. \quad (10)$$

其中, x 和 z 分别代表水平和垂直方向的坐标位置, x_0 和 z_0 为随机函数确定的扰动发生未知的水平和垂直方向坐标, θ 为随机扰动生成的椭圆的角度, m 和 n 分别为水平方向和垂直方向随机扰动的作用范围.

为了验证随机等效介质模型能否较好地模拟真实的月球次表层雷达回波, 本文构建了一个由月壤层、混合层及月岩层共同构成的月球次表层模型 (见图 3a), 其深度和宽度分别为 15 m 和 10 m. 基于 Apollo 和 Luna 采集到的月球样本, 月壤物质相对介电常数随深度缓慢增长^[39]. 图 3(b) 构建的相对介电常数模型中也按此设定了月壤层的初始相对介电常数, 并叠加随机扰动生成最终的月壤层介电常数.

结合测月雷达第二通道发射和接收天线在玉兔二号的安装位置 (距离月表 30 cm, 两者相距 32 cm), 通过时域有限差分方法开展雷达波正演实验. 从 1~9 m 处, 以 0.1 m 为间隔共采集了 81 道雷达回波 (见图 3c), 在去除最上方的真空-月壤界面的强回波后, 可以清晰地观测到在 1050 个时间步长位置由月壤-混合层产生的强振幅回波, 同时观察到月壤层因为介电常数不均匀产生的回波形态特征.

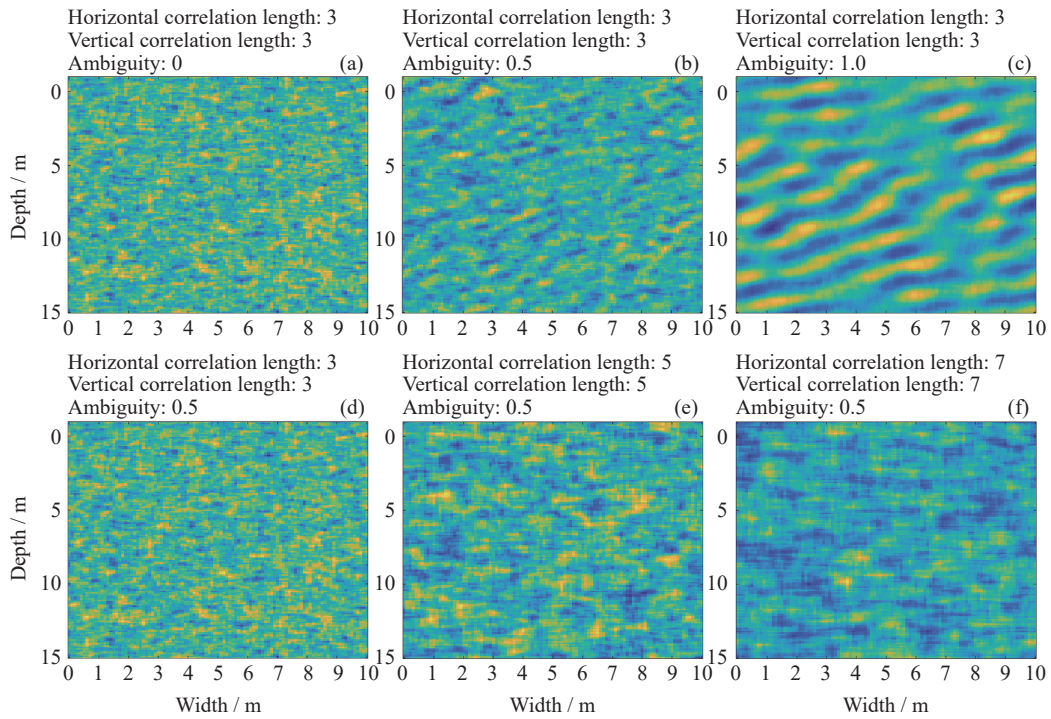


图 2 不同相关长度及模糊度条件下的随机等效介质模型

Fig. 2 Stochastic equivalent medium model with different correlation lengths and ambiguities

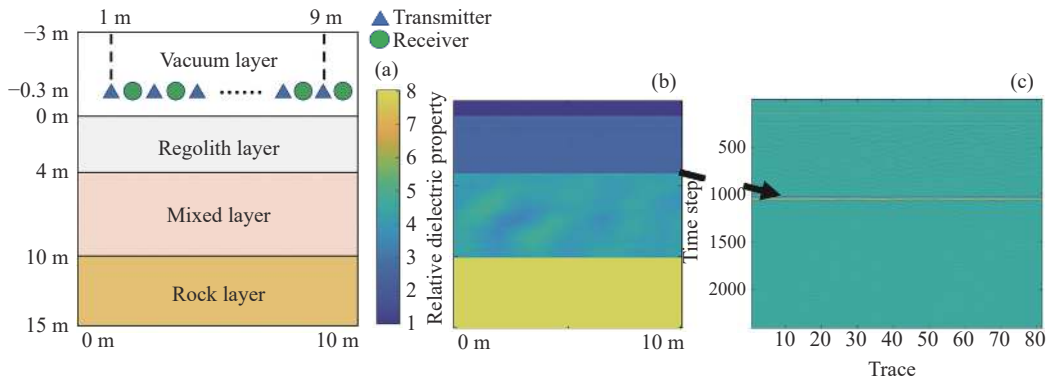


图 3 随机等效介质模型雷达回波仿真. (a) 次表层介电常数模型, (b) 随机等效介质模型, (c) 雷达波正演结果

Fig. 3 Radar diagram simulation of stochastic equivalent medium model. (a) Subsurface model, (b) stochastic equivalent medium model, (c) the simulation result of stochastic equivalent medium model

2 结果与讨论

2.1 测月雷达回波特性分析

为了清晰显示次表层结构特征, 测月雷达第二通道数据需要经过重复道数据去除、零时刻校正、直流去除、背景去除、带通滤波和回波增益等必要的数据处理工作. 图 4(a) 给出了前 5 个月昼预处理后的测月雷达影像, 其中最上方 150 ns 内的雷达回波振幅较小, 通常被解译为细腻的月壤物质. 月壤层下方是雷达波在月壤、溅射物及岩石等介电常数差异较大的物质传播而产生的强弱振幅回波交替出现的情况.

图 4(b) 是图 4(a) 中红色虚线框内月壤物质回波的放大图, 雷达回波多呈现为波浪或类双曲线形状, 这与基于随机等效介质模型获取的雷达回波类似 (见图 4c).

为更好地理解月球次表层物质介电特性对雷达回波的影响, 分别构建如图 5(a)(d) 所示的由真空层、月壤层、混合层和基岩层组成的均质模型和随机等效介质模型, 并基于表 1 给出的时域有限差分参数进行雷达波正演模拟. 图 5(b)(c) 和图 5(e)(f) 分别给出了均质模型和随机等效介质模型的原始正演模拟结果和零时刻校正后的结果. 图 5(b)(e) 中的真空层

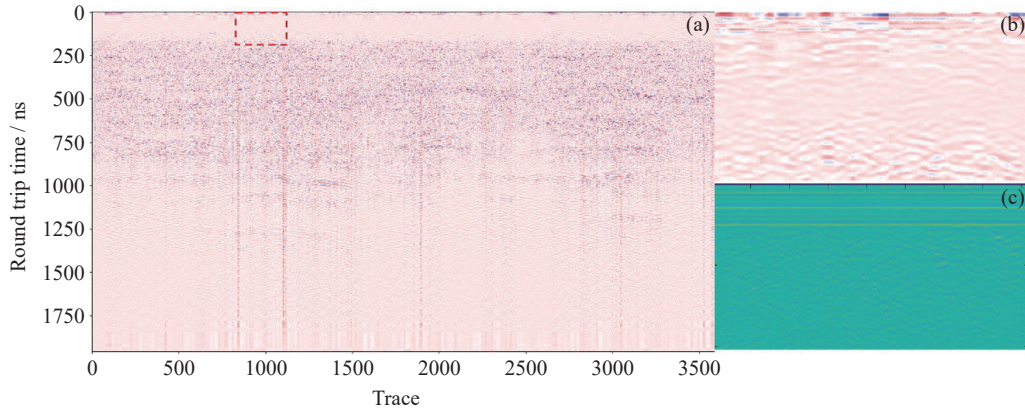


图 4 嫦娥四号测月雷达影像 (a), 局部放大 (b) 及随机等效介质模型正演结果的局部放大效果 (c)

Fig. 4 Chang'E-4 LPR radar diagram (a), partial enlargement (b) and partial enlargement (c)

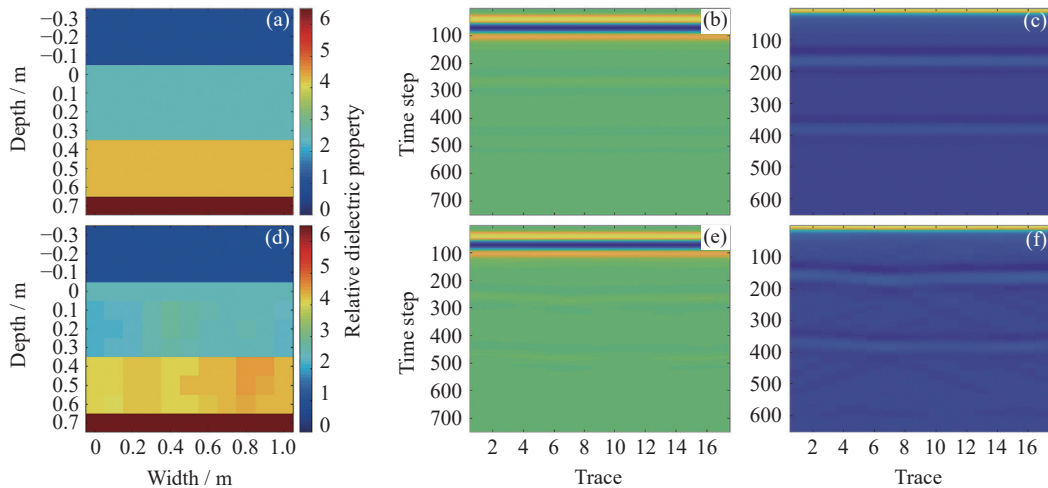


图 5 均质模型 (a), 均质模型的正演结果 (b), 零时刻校正后的均质模型的正演结果 (c), 随机等效介质模型 (d), 随机等效介质模型的正演结果 (e), 零时刻校正后的随机等效介质模型的正演结果 (f)

Fig. 5 Homogeneous model (a), raw result of homogeneous model (b), time-zero correction result of homogeneous model (c), stochastic equivalent media model (d), raw result of stochastic equivalent media model (e), time-zero correction result of stochastic equivalent media model (f)

-月壤层分界面的雷达波反射过强, 掩盖了更深层的雷达回波信息. 经过零时刻校正后, 次表层回波特征在第三列可以被清晰识别, 其中在均质模型的雷达回波的 180 和 380 时间步长附近观测到水平方向的强振幅回波, 这与月壤层-混合层及混合层-基岩层的地层分界相对应. 这两条分界线强回波在随机等效介质模型的雷达影像中呈现出中部向下弯曲的特征, 表明随机扰动介质模型中的中部物质的介电常数大于两

侧, 降低了雷达波的传播速度, 这与图 5(d) 中月壤层中部较高的相对介电常数值一致. 在分界面强回波下方还观测到类似于图 4(b)(c) 中的双曲线与波浪形回波, 这些回波主要由 0.6~0.9 m 深度处相对介电常数的不均匀分布引起 (见图 5 d). 综合对比测月雷达真实回波与均质模型和随机扰动介质模型的雷达波正演结果, 随机等效介质模型更能表征次表层物质的雷达回波特征.

2.2 全波形反演验证

为了验证全波形反演法对次表层物质相对介电常数的反演能力, 构建了一个由真空层、月壤层和岩石层组成的随机等效介质模型作为真实模型 (见图 6a), 并将基于该模型的雷达波正演模拟结果作为真实观测数据. 月壤层的相对介电常数平均值设定为 2.5^[25], 最大随机扰动被设为 0.3. 考虑到嫦娥四号着陆区位于月球背面, 该位置处的月壤相对介电常数值可能不同于已有月壤样本, 初始模型的月壤相对介电常数被设定为 2.1, 以增大与真实模型的差异 (见图 6b). 图 6(c) 的全波形反演后的介电常数结果给出的月壤层相对介电常数在 2.5 附近, 与真实模型中设置的均值较为接近. 为清楚地显示真实模型和反演模

表 1 雷达波正演模拟的时域有限差分参数		
Table 1 Forward simulation parameters of FDTD		
参数	数值	描述
中心频率/ MHz	500	测月雷达第二通道中心频率
波形	Ricker	模拟测月雷达发射波形
时间窗口/ ns	15	雷达波持续时间
天线高度/ m	0.3	发射天线距月面高度
天线偏移/ m	0.32	发射和接收天线距离
吸收边界类型	CPML	卷积完美匹配层
吸收边界厚度/ m	0.3	决定吸收边界的效果
离散格网大小/ m	0.01	决定仿真波场的空间分辨率

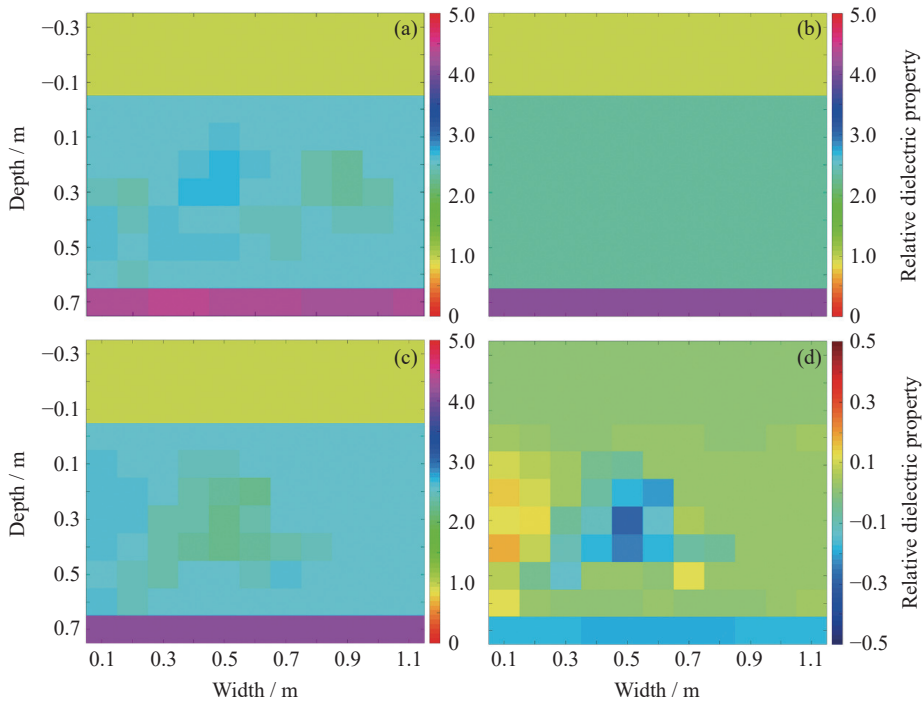


图 6 真实模型 (a), 初始模型 (b), 介电常数反演结果 (c), 真实模型和介电常数反演结果的差异 (d)
Fig. 6 Real model (a), initial model (b), inversed model (c), model comparison between
real model and inversed model (d)

型之间的差异, 图 6(d) 中在每一个像素位置都用真实模型结果减去反演模型结果. 在绝大部分反演区域, 相对介电常数的反演差异接近 0, 而相对介电常数差异的最大值也在 0.2 以内. 全波形反演法的反演效果由更新后的目标函数除以初始目标函数来评估 (见图 7), 该值在第一次迭代后急剧收缩 (至 23%), 然后逐渐减小, 在第 79 次迭代中减小到 0.91% (小于 1% 的阈值). 综合目标函数的变化和各像元中真实模型和反演模型的差异, 本文认为全波形反演法能较好地捕获月球次表层物质介电特性变化.

2.3 均质模型与随机等效介质模型

早期研究主要通过地面射电望远镜和雷达初步获取月表物质的物理参数并开展月壤厚度估算^[40]. 受限于技术水平, 这些设备的空间分辨率与垂向分辨率过低, 无法准确区分月壤及下方岩石物质的回波特性, 因而在次表层结构与月壤厚度反演中多采用由月壤和月岩构成的水平层状均质模型^[4]. 对于就位探测的测月雷达, 水平层状均质模型不仅被应用于雷达回波分析, 还因为其相对简单的结构被广泛用于各类反演方法^[4,41]. 在水平层状均质模型中, 雷达波仅在介电特性发生变化的地层分界面处产生反射波, 而地层内因物质均匀介电特性使得接收到的回波振幅几乎一致, 这与测月雷达实际探测结果不符 (见图 4b). 尽管月壤的相对介电常数总体上随深度增加而增加, 陨石撞击及火山喷发等活动会导致次表层月壤物质与相对介电常数差异较大的溅射物、岩石等物质混合, 改变局部介电常数, 并在水平方向上呈现出一定的随机扰

动特性. 因此, 本文将随机等效介质模型运用到月球次表层介电模型中, 通过模型的随机特性实现对次表层物质介电特性的模拟. 随着次表层雷达数据处理与地层及地下结构解译工作的推进, 结合地表形貌、地下结构及非均匀介电特性的非水平层状随机介质模型^[42], 将为复杂场景介电特性反演提供更精准的初始模型.

2.4 全波形反演法特性

自嫦娥三号与嫦娥四号分别着陆在月球正面的雨海及月球背面的冯卡门撞击坑区域以来, 科学家获得了通过就位高分辨率测月雷达探测次表层雷达回波特征、分析地层结构及反演地层厚度的宝贵数据. 基于测月雷达数据, 双曲线拟合法被首先用于相对介电常数的估算, 获取的介电常数被用于划分次表层结构及估算地层厚度^[41]. 相邻雷达道探测数据之间的相关性也被用于定位次表层分界面及次表层结构识别, 并根据每个雷达道的平均相对介电常数值开展月壤厚度反演^[43]. 由月壤样本给出的相对介电常数实部经验值被广泛应用于各地层的时间-深度转化中^[6,44]. 这些方法在获取大范围月球次表层物质介电特性及地层厚度估算中发挥了重要作用, 但同时也受限于离散点目标的空间与垂向分布、噪音及介电损耗对振幅影响及次表层物质的非均质介电特性, 难以捕获小范围内精细介电特性的变化.

全波形反演法基于时域有限差分方法实现对初始介电模型的雷达波正演仿真, 通过前向波场和后向传播波场之间的交叉相关, 更新初始介电模型. 该方

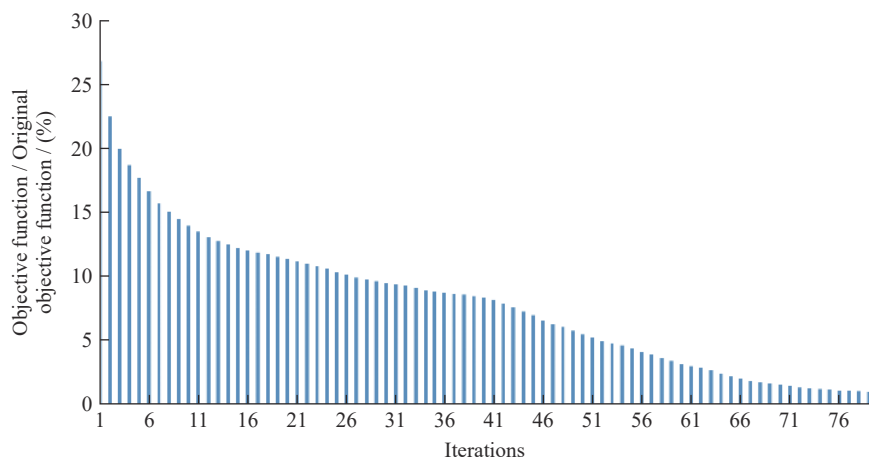


图 7 全波形反演过程中的模型评估

Fig. 7 Model assessment during the FWI iterations

法不仅能够捕获更为精细的次表层物质介电特性, 还适用于多种数据和测量设备. 与基于测月雷达的离散点介电常数反演的方法相比, 全波形反演法可以绘制连续的二维介电剖面图, 准确计算每个探测位置的地层厚度从而分析地层的厚度变化, 进而加深对月球浅表层结构的认识. 在全波形反演过程中, 误差可能来源于在目标函数最小化过程中, 基于梯度下降的局部最优化方法陷入局部极值的可能; 初始介电模型与真实场景差异过大; 深层回波信息复杂, 收敛效率和精度受影响^[45].

目前将全波形反演方法直接应用于真实测月雷达数据还存在一定的限制, 主要是仿真实验使用的 Ricker 子波与真实环境中受到天线形状、巡视器自身反射等多种因素影响后的发射波形存在差异^[46]. 后续工作将致力于更精细的发射波形模拟, 考虑天线形状与巡视器自身反射等外部因素对雷达波形的影响, 为捕获月球精细次表层介电特性及次表层分析提供新的技术手段.

3 结论

通过分析嫦娥四号测月雷达回波特性, 构建了能有效模拟嫦娥四号着陆区次表层雷达回波特性的次表层随机等效介质模型, 并通过仿真实验验证了全波形反演法对介电常数的反演精度. 这一方法将为在月球局部区域开展的地层结构分析与厚度估算、次表层温度建模及雷达回波特性分析等科学探测与反演工作提供精确的次表层物质介电特性.

研究表明, 全波形反演法不仅能够捕获局部区域的介电扰动, 还能绘制高空间分辨率的二维介电剖面; 仿真实验构建的初始介电模型经过全波形反演法 79 次迭代后能够较好地表征真实场景下的介电特性, 相对介电常数的最大反演误差在 0.2 以内; 随机等效介质模型能够有效模拟月壤物质的介电特性, 基于该模型的雷达回波仿真结果与测月雷达回波特性接近. 本文研究结果为获取月球非采样区域次表层物质介电特性提供了新的反演方法, 构建的次表层介电模型也将提高依赖于次表层物质介电特性的各类遥感反演模型精度, 为中国后续月球科学探测项目提供技术与数据支撑.

致谢 嫦娥系列数据集由中国月球与深空探测工程地

面应用系统处理制作, 由中国国家航天局提供 (<http://moon.bao.ac.cn>).

参考文献

- [1] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Source book, A User's Guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991
- [2] NEAL C R. The Moon 35 years after Apollo: what's left to learn?[J]. *Geochemistry*, 2009, **69**(1): 3-43
- [3] JAUMANN R, HIESINGER H, ANAND M, *et al.* Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: status of current understanding[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, **74**(1): 15-41
- [4] DONG Z J, FENG X, ZHOU H Q, *et al.* Properties analysis of lunar regolith at Chang'E-4 landing site based on 3D velocity spectrum of lunar penetrating radar[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(4): 629
- [5] WANG K, ZENG Z F, ZHANG L, *et al.* A compressive sensing-based approach to reconstructing regolith structure from lunar penetrating radar data at the Chang'E-3 landing site[J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(12): 1925
- [6] FA W Z, ZHU M H, LIU T T, *et al.* Regolith stratigraphy at the Chang'E-3 landing site as seen by lunar penetrating radar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(23): 10179-10187
- [7] LATHAM G V. Results from the apollo lunar seismic experiment[J]. *The Moon*, 1972, **3**(4): 386-387
- [8] KRUPENIO N N. Results of radar experiments performed on automatic stations Luna 16 and Luna 17[C]//Proceedings of the COSPAR Space Research XIII. Berlin: Akademie-Verlag, 1973
- [9] THOMPSON T W, MASURSKY H, SHORTHILL R W, *et al.* A comparison of infrared, radar, and geologic mapping of lunar craters[J]. *The Moon*, 1974, **10**(1): 87-117
- [10] PORCELLO L J, JORDAN R L, ZELENKA J S, *et al.* The Apollo lunar sounder radar system[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, **62**(6): 769-783
- [11] ISHIYAMA K, KUMAMOTO A, ONO T, *et al.* Estimation of the permittivity and porosity of the lunar uppermost basalt layer based on observations of impact craters by SELENE[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, **118**(7): 1453-1467
- [12] VASHISHTHA A, KUMAR S. Characterization of geomorphological features of lunar surface using Chandrayaan-1 Mini-SAR and LRO Mini-RF data[J]. *Quaternary International*, 2020, **575-576**: 338-357
- [13] 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*, 2022, **60**: 4600608
- [14] FENG Y J, CAO Y Z, TONG X H, *et al.* High-accuracy lunar global brightness-temperature mapping using third-order Fourier fitting and co-kriging interpolation[J]. *Icarus*, 2023, **403**: 115646
 - [15] MENG Z G, DONG X G, LEI J T, *et al.* Constructing a complete brightness temperature dataset of the moon with Chang'e-2 microwave radiometer data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, **61**: 5302114
 - [16] FENG J Q, SIEGLER M A, HAYNE P O. New constraints on thermal and dielectric properties of lunar regolith from LRO diviner and CE-2 microwave radiometer[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, **125**(1): e2019JE006130
 - [17] FA W Z, JIN Y Q. A primary analysis of microwave brightness temperature of lunar surface from Chang-E 1 multi-channel radiometer observation and inversion of regolith layer thickness[J]. *Icarus*, 2010, **207**(2): 605-615
 - [18] SIEGLER M, WARREN P, FRANCO K L, *et al.* Lunar heat flow: global predictions and reduced heat flux[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, **127**(9): e2022JE007182
 - [19] LI C L, ZUO W, WEN W B, *et al.* Overview of the Chang'e-4 mission: opening the frontier of scientific exploration of the lunar far side[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(2): 35
 - [20] FENG J Q, SIEGLER M A, WHITE M N. Dielectric properties and stratigraphy of regolith in the lunar South Pole-Aitken basin: observations from the Lunar Penetrating Radar[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, **661**: A47
 - [21] FENG J Q, SU Y, DING C Y, *et al.* Dielectric properties estimation of the lunar regolith at CE-3 landing site using lunar penetrating radar data[J]. *Icarus*, 2017, **284**: 424-430
 - [22] LAI J L, XU Y, BUGIOLACCHI R, *et al.* First look by the Yutu-2 rover at the deep subsurface structure at the lunar farside[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 3426
 - [23] FENG Y J, CHEN S R, TONG X H, *et al.* Exploring the lunar regolith's thickness and dielectric properties using band-limited impedance at Chang'E-4 landing site[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, **128**(3): e2022JE007540
 - [24] LAI J L, XU Y, ZHANG X P, *et al.* Comparison of dielectric properties and structure of lunar regolith at Chang'e-3 and Chang'e-4 landing sites revealed by ground-penetrating radar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(22): 12783-12793
 - [25] 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
 - [26] TARANTOLA A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation[J]. *Geophysics*, 1984, **49**(8): 1259-1266
 - [27] SINGH S C, WEST G F, BREGMAN N D, *et al.* Full waveform inversion of reflection data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, **94**(B2): 1777-1794
 - [28] WANG X, FENG D S. Multiparameter full-waveform inversion of 3-D on-ground GPR with a modified total variation regularization scheme[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, **18**(3): 466-470
 - [29] MELES G A, VAN DER KRUK J, GREENHALGH S A, *et al.* A new vector waveform inversion algorithm for simultaneous updating of conductivity and permittivity parameters from combination crosshole/borehole-to-surface GPR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(9): 3391-3407
 - [30] KLOTZSCHE A, JONARD F, LOOMS M C, *et al.* Measuring soil water content with ground penetrating radar: a decade of progress[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, **17**(1): 1-9
 - [31] HARUZI P, SCHMÄCK J, ZHOU Z, *et al.* Detection of tracer plumes using full-waveform inversion of time-lapse ground penetrating radar data: a numerical study in a high-resolution aquifer model[J]. *Water Resources Research*, 2022, **58**(5): e2021WR030110
 - [32] YU Y, HUISMAN J A, KLOTZSCHE A, *et al.* Coupled full-waveform inversion of horizontal borehole ground penetrating radar data to estimate soil hydraulic parameters: a synthetic study[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **610**: 127817
 - [33] DELL S, ABAKUMOV I, ZNAK P, *et al.* On the role of diffractions in velocity model building: a full-waveform inversion example[J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2019, **63**(4): 538-553
 - [34] KLOTZSCHE A, VEREECKEN H, VAN DER KRUK J. Review of crosshole ground-penetrating radar full-waveform inversion of experimental data: recent developments, challenges, and pitfalls[J]. *Geophysics*, 2019, **84**(6): H13-H28
 - [35] LAVOUÉ F, BROSSIER R, MÉTIVIER L, *et al.* Two-dimensional permittivity and conductivity imaging by full waveform inversion of multioffset GPR data: a frequency-domain quasi-Newton approach[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, **197**(1): 248-268
 - [36] YANG X, KLOTZSCHE A, MELES G, *et al.* Improvements in crosshole GPR full-waveform inversion and application on data measured at the Boise Hydrogeophysics Research Site[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, **99**: 114-124
 - [37] WEI G F, LI X Y, WANG S J. Thermal behavior of regolith at cold traps on the moon's south pole: revealed by

- Chang'E-2 microwave radiometer data[J]. *Planetary and Space Science*, 2016, **122**: 101-109
- [38] LI J, ZENG Z F, LIU C, *et al.* A study on lunar regolith quantitative random model and lunar penetrating radar parameter inversion[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, **14**(11): 1953-1957
- [39] CARRIER III W D, OLHOEFT G R, MENDELL W. Physical properties of the lunar surface[M]//HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Sourcebook, A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 475-594
- [40] THOMPSON T W, DYCE R B. Mapping of lunar radar reflectivity at 70 centimeters[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1966, **71**(20): 4843-4853
- [41] LAI J L, XU Y, ZHANG X P, *et al.* Structural analysis of lunar subsurface with Chang'E-3 lunar penetrating radar[J]. *Planetary and Space Science*, 2016, **120**: 96-102
- [42] ZHANG L, XU Y, ZENG Z F, *et al.* Simulation of martian near-surface structure and imaging of future GPR data from Mars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 5101812
- [43] DONG Z H, FANG G Y, JI Y C, *et al.* Parameters and structure of lunar regolith in Chang'E-3 landing area from lunar penetrating radar (LPR) data[J]. *Icarus*, 2017, **282**: 40-46
- [44] ZHAO N, ZHU P M, YANG K S, *et al.* The preliminary processing and analysis of LPR Channel-2B data from Chang'E-3[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2014, **57**(12): 2346-2353
- [45] ALKHALIFAH T, SUN B B, WU Z D. Full model wavenumber inversion: identifying sources of information for the elusive middle model wavenumbers[J]. *Geophysics*, 2018, **83**(6): R597-R610
- [46] LI J, BAI L G, LIU H. Numerical test of the Chang'E-5 lunar penetrating array radar full waveform inversion [C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Engineering Geophysics. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2021: 186-189

作者简介



陈书睿 男, 1996年2月出生于江苏省扬州市, 现为同济大学测绘与地理信息科学学院博士研究生, 主要研究方向为月球浅表层结构探测与温度分析。

E-mail: ChenSR96@outlook.com



冯永玖 (通信作者) 男, 1981年12月出生于云南省昭通市, 现为同济大学测绘与地理信息科学学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为深空遥感探测与选址分析。

E-mail: yjfeng@tongji.edu.cn