

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2025.05.011

SHARAD 和 RoPeR 的火星乌托邦平原南部 介电常数反演研究

段迪文, 孟旭, 刘海, 李鉴辉, 刘超, 王向宇

(广州大学土木与交通工程学院, 广东广州 510006)

摘要: 雷达是探测火星次表层结构和属性的重要手段。火星勘测轨道飞行器(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)搭载的SHARAD(Shallow Radar)在过去的近20年间已基本实现了对整个火星的环绕探测,为探索火星提供了大量宝贵数据。然而,当前针对SHARAD数据的反演和解释研究主要针对其中包含次表层反射的部分,占比最多的表面反射数据没有得到充分利用。2021年,美国“毅力号”火星车和我国“祝融号”火星车先后成功着陆在Jezero撞击坑和乌托邦(Utopia)平原南部。两者均搭载了探地雷达设备并采集了大量数据,为SHARAD表面反射数据的标定提供了关键依据。本文首先对SHARAD数据进行处理,剔除电离层、卫星姿态和地面粗糙度的影响。然后对“祝融号”上搭载的火星次表层探测雷达(Mars Rover Penetrating Radar, RoPeR)低频通道雷达数据进行处理和反演,用于标定SHARAD数据的表面反射功率。最后,基于SHARAD表面反射功率反演了火星乌托邦平原南部的介电常数分布图。结果表明乌托邦平原南部表面物质的相对介电常数较为均匀(3.5~4.5),但其南部高地的介电常数略高于北部低地。本研究提出了一种联合SHARAD和RoPeR的数据处理与反演方法,有助于提高火星雷达大范围数据处理和解释能力,深化火星表面性质和演化历史的认识。

关键词: 火星; SHARAD雷达; 火星次表层探测雷达; 反演; 介电常数

中图分类号: TN959.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-2337(2025)05-0569-08

引用格式: 段迪文, 孟旭, 刘海, 等. SHARAD 和 RoPeR 的火星乌托邦平原南部介电常数反演研究[J]. 雷达科学与技术, 2025, 23(5): 569-576.

DUAN Diwen, MENG Xu, LIU Hai, et al. Permittivity Map of the Southern Utopia Planitia on Mars Inverted from SHARAD and RoPeR[J]. Radar Science and Technology, 2025, 23(5): 569-576.

Permittivity Map of the Southern Utopia Planitia on Mars Inverted from SHARAD and RoPeR

DUAN Diwen, MENG Xu, LIU Hai, LI Jianhui, LIU Chao, WANG Xiangyu

(School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Radar is a crucial tool for detecting subsurface structures and properties on Mars. The shallow radar (SHARAD) aboard the Mars reconnaissance orbiter (MRO) has conducted almost comprehensive orbital surveys of Mars over the past two decades, which provides a lot of valuable data for detection of Mars. However, the current research on the inversion and interpretation of SHARAD data mainly focuses on the part containing subsurface reflection, and the surface reflection data, which accounts for the largest proportion, has not been fully utilized. In 2021, the US “Perseverance” rover and China’s “Zhurong” rover successfully landed in Jezero Crater and southern Utopia Planitia, respectively. Both rovers were equipped with ground-penetrating radar systems and collected a large amount of data, providing crucial references for calibrating SHARAD surface reflection data. Firstly, the SHARAD data is processed to eliminate the influence of ionosphere interference, satellite attitude and ground roughness. Then, the low-frequency channel radar data from Mars rover penetrating radar (RoPeR) on “Zhurong” rover are processed and inverted to calibrate the surface reflection power of SHARAD data. Finally, a permittivity distribution map of the southern Utopia Planitia is generated based on the processed SHARAD surface reflection power. The results indicate that the permittivity map in southern Utopia Planitia is relatively uniform, ranging from 3.5 to 4.5, but the permittivity values in the southern highland are slightly higher than those in the northern lowland. A data processing and inversion method by combining SHARAD and RoPeR is proposed in this study, which can help improve the large-scale data processing and interpretation

收稿日期: 2025-02-28; 修回日期: 2025-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(No.52179126, 52379099); 广东省基础与应用基础研究基金项目(No.2024A1515010934)

capabilities of Mars radar and enhance the understanding of Mars surface properties and evolution history.

Key words: Mars; SHARAD; RoPeR; inversion; permittivity

0 引言

深空探测雷达是当前探测月球和火星等深空目标的重要地球物理方法^[1-2]。其原理是利用电磁波在地下传播的过程中遇到介电性质存在差异的界面时会产生反射、散射、绕射等,通过滤波、时频分析、偏移和反演等多种数据处理与成像方法对地下结构和介质属性进行解释。深空探测雷达的工作频率范围在几兆赫兹到上千兆赫兹之间,对应的分辨率从数百米至分米级别。由于具有采集速度快、设备便携、可穿透性等优势,美国、日本、欧洲以及我国均已研制了多款搭载在轨道器或巡视器上的深空探测雷达系统并成功应用^[3-5]。

2003年,欧洲航天局发射的火星快车上搭载了火星地下和电离层探测先进雷达系统(Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding, MARSIS)^[5]。MARSIS的工作频率为1.3~5.5 MHz之间的4个带宽为1 MHz的窄带,能够探测数百米至几千米深度的地下结构,但其垂直分辨率较低,约为150 m。2005年,美国宇航局发射的火星勘测轨道飞行器(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)上搭载了SHARAD(Shallow Radar)^[6]。SHARAD的工作频率为15~25 MHz,其垂直分辨率和沿轨水平分辨率分别为约15 m和300 m。Mouginot等提取了MARSIS雷达数据中的表面回波功率,并进行了地形与电离层衰减校正,构建首个火星全球表面介电常数分布图^[7]。但由于MARSIS的数据覆盖率较低,其结果缺乏细节信息。与MARSIS雷达数据相比,SHARAD雷达数据的分辨率、信噪比和覆盖率都更高,因此火星轨道雷达数据的分析和解释主要使用SHARAD数据。Castaldo等基于MOLA地形数据,将火星极地地区作为纯净的水冰对SHARAD雷达数据进行了标定和反演,构建了火星全球介电常数图^[8]。Lauro等利用MOLA(Mars Orbiter Laser Altimeter)数据筛选平坦区域回波后,反演了火星北极地区Boreales Scopuli区域的基底单元的介电常数^[9]。但是目前的火星轨道雷达数据反演仍存在两个问题:1)由于处理过程复杂,雷

达数据中有效占比最大的表面反射信息没有得到充分利用;2)尚未有火星样本返回,轨道雷达数据的反演缺乏准确标定。

与轨道雷达探测器不同,安装在火星着陆巡视器上的探地雷达系统可以对巡视路径下方的次表层结构进行高分辨率探测。在火星探测中,美国宇航局的“毅力号”火星车于2021年2月成功着陆在Jezero撞击坑。“毅力号”上搭载的火星地下探测雷达成像仪(Radar Imager for Mars' Subsurface Exploration, RIMFAX)的科学目标是探测火星过去的沉积层、寻找地下水冰以及探测可能保存的有机物质^[10]。Casademont等使用双曲线拟合方法反演了“毅力号”火星车获得的RIMFAX雷达数据,计算结果显示Jezero撞击坑浅表层(5 m内)的相对介电常数平均值为8.9^[11]。2021年5月,我国“天问一号”火星探测任务的“祝融号”火星车成功着陆在乌托邦平原南部,其搭载的火星次表层探测雷达系统(Mars Rover Penetrating Radar, RoPeR)旨在寻找次表层水冰、远古大洋存在证据及可能保存的生命迹象^[4,12]。Liu等针对RoPeR高频数据提出了一种改进的双曲线拟合方法,通过解决反演过程中非唯一解提高了反演精度^[13]。然而,由于火星车行驶范围非常有限,轨道雷达数据仍是分析大范围地下结构和介质属性的主要依据。例如,祝融号火星车的巡视距离仅为约1.9 km,其有限的探测范围远不足以揭示乌托邦平原南部的区域地质特征。

为解决上述难题,本文首先对SHARAD雷达数据进行处理,剔除了受电离层、卫星姿态和表面粗糙度影响的数据。之后,处理并反演了RoPeR低频数据用于标定SHARAD雷达数据的表面反射功率。最后,利用处理后的SHARAD雷达数据估算了乌托邦平原南部(20°N~30°N, 100°E~120°E)的表面介电常数分布图并进行了地质解释。

1 数据处理与反演方法

本文提出的介电常数反演流程如图1所示,主要包括RoPeR数据处理、双曲线拟合、SHARAD数

据处理以及SHARAD数据反演等。

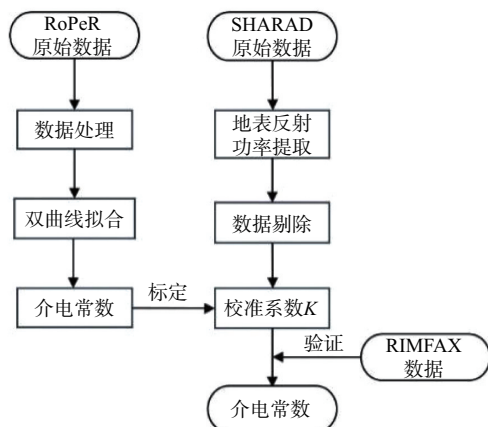


图1 介电常数反演流程图

1.1 RoPeR数据处理

RoPeR低频通道通过一对单极子天线发射和采集雷达数据,具体参数如表1所示。其工作频率为15~95 MHz。本文处理了RoPeR低频通道前1 200 ns的数据用于反演和解释,具体的数据处理步骤如图2所示。

表1 RoPeR低频通道参数^[4]

天线类型	单极子天线
天线频率	15~95 MHz
天线高度	903 mm
探测深度	100 m(冰)
时窗	15 000 ns

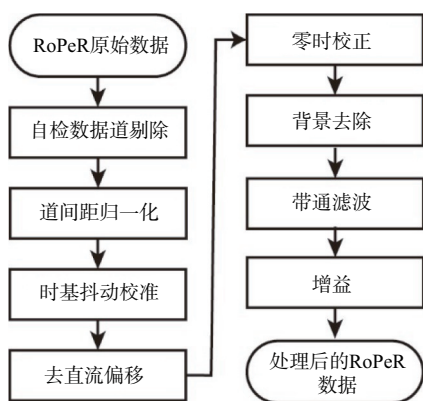


图2 RoPeR低频通道数据处理步骤

1) 自检数据道剔除:自检数据道指专门用于检查雷达工作状态的数据,在相应的数据标签文件中被标记为“Self_test”,需要剔除。

2) 道间距归一化:早期的RoPeR低频通道数

据的道间距为50 cm,但2021年8月17日之后的数据道间距调整为25 cm,本文通过插值处理使道间距统一为25 cm。

3) 时基抖动校准:时基抖动是指雷达系统在进行数据采集时受采样时间影响产生的微小随机偏差。本文采用互相关算法将所有数据道的直达波进行对齐,以确保雷达数据解释的准确性。

4) 去直流偏移:在使用模数转换器对模拟信号进行数字化时,输出通常包含一个小的直流分量。为消除RoPeR雷达数据中的直流偏移,本文分别对每一道原始数据进行减去该道平均值处理:

$$A'(n) = A(n) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} A(i), n:0 \rightarrow N-1 \quad (1)$$

式中, $A(n)$ 是一道原始雷达数据, $A'(n)$ 是去除直流后的雷达数据, n 表示单道数据中的第 n 个样本数, N 是该道数据的总采样点数。

5) 零时校正:根据数据说明,低频通道原始数据的212.5 ns位置对应实际的数据零时,因此该时间之前数据被删除。

6) 背景去除:RoPeR的背景噪声主要来源于天线系统的振铃效应、地表的多次反射以及火星车的反射。本文采用滑动窗口滤波方法消除背景噪声:

$$A'' = A' - \frac{1}{Num} \sum_{i=0}^{Num} A'(i) \quad (2)$$

式中, A' 是原始雷达数据, A'' 是去背景后的数据, Num 为滑动窗口中的数据道数,本文中 Num 取值为30。

7) 带通滤波:采用梯形带通滤波器来提高雷达数据信噪比,该滤波器使用汉明窗来确保通带与阻带之间的平滑过渡,具体参数为:低频边界为15 MHz和50 MHz,高频边界为70 MHz和95 MHz。

8) 增益:为了补偿信号随深度衰减的影响,采用包络增益曲线对雷达信号进行处理。包络增益曲线的计算步骤为:首先对雷达数据进行希尔伯特变换计算包络,之后将包络进行叠加和归一化,最后取其倒数作为增益曲线。

1.2 RoPeR数据反演

双曲线拟合方法可以根据雷达图像中的双曲

线反射形态反演介电常数,进而解释地下介质的物质成分和地质成因^[13]。本文推导了包含空气层折射的双曲线拟合方法,用于 RoPeR 雷达数据反演(见图 3)。根据菲涅尔定律,可以推导出以下方程:

$$\sqrt{\varepsilon_0} \sin \theta_1 = \sqrt{\varepsilon_r} \sin \theta_2 \quad (3)$$

式中, θ_1 和 θ_2 分别是电磁波入射角和反射角, ε_0 和 ε_r 分别是真空和地下介质的相对介电常数,且 $\varepsilon_0=1$ 。当探地雷达沿着测线移动时,探地雷达天线与埋藏物体之间的单程距离 R 为

$$R = h \sec \theta_1 + H \sqrt{\varepsilon_r} \sec \theta_2 \quad (4)$$

式中, H 是天线的高度, h 是埋藏物体的深度。天线与埋藏物体之间的水平距离 x 可以表示为

$$x = h \tan \theta_1 + H \tan \theta_2 \quad (5)$$

基于公式(3)、(4)和(5),天线到地下目标的单程距离 R 与两者水平距离 x 之间的双曲线关系为

$$\frac{R^2}{\varepsilon_r H^2} - \frac{x^2}{H^2} = 1 + \frac{2 \cos \theta_1}{\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_1}} \frac{h}{H} + \frac{1 - \varepsilon_r \sin^2 \theta_1}{\varepsilon_r \cos^2 \theta_1} \frac{h^2}{H^2} \quad (6)$$

根据公式(6)不同双曲线的顶点位置和次表层介电常数可以生成一系列双曲线,再通过手动对 RoPeR 低频通道中的双曲线进行特征点提取来拟合生成的双曲线。两者误差最小时对应的介电常数即为反演的次表层介电常数。

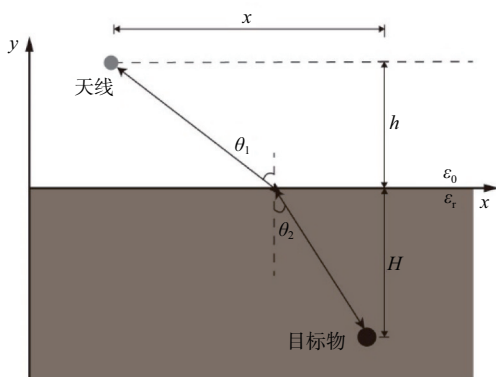


图3 电磁波传播过程的示意图

1.3 SHARAD 雷达数据处理

SHARAD 雷达数据采集高度通常在 250~316 km 的高空,因此其表面反射功率受电离层效应、卫星姿态(滚转角)和地表粗糙度的影响^[14]。为了确保

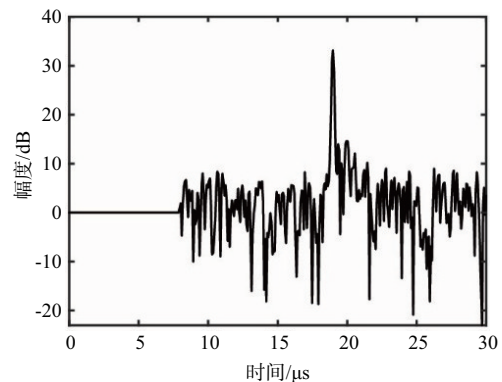
反演结果的可靠性和准确性,本文对 SHARAD 雷达数据进行以下处理:

1) 表面反射功率提取:SHARAD 雷达图像中的第一个强反射对应地表反射,其位置可以通过以下公式确定^[7]:

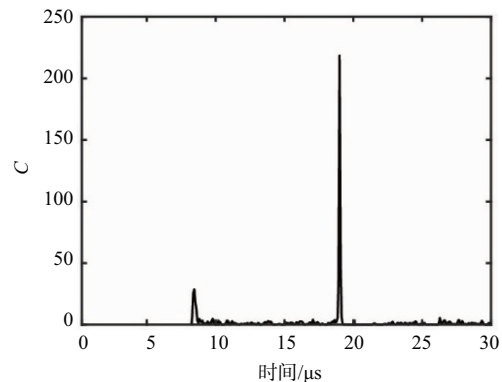
$$C(i) = \frac{|S(i)|^2}{\text{mean}(|S(i-1:i-30)|^2)} \quad (7)$$

式中, $S(i)$ 表示在传播时间 i 下的 SHARAD 信号强度。在此公式中,当 $|S(i)|$ 达到峰值时, $C(i)$ 达到最大值,且此时的时间索引 i 表示地表回波的位置。

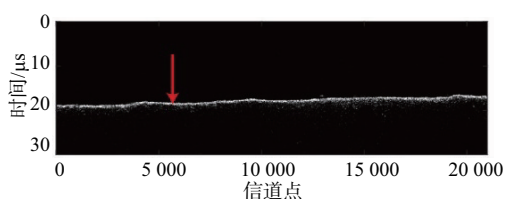
图 4(a)为一道 SHARAD 雷达数据,图 4(b)为根据公式(7)计算得到的 C 值。对比两者发现 C 在 18.9 μs 处最大,该位置对应该道数据的表面反射功率为 33.14 dB。之后,将该算法用于轨道编号 1911202 的雷达数据,如图 4(c)所示,该轨数据共包含 20 964 道信号。计算得到的地表反射位置如图 4(d)所示,结果表明该算法能够准确定位 SHARAD 雷达数据中的表面反射位置,进而自动提取对应的表面反射功率。



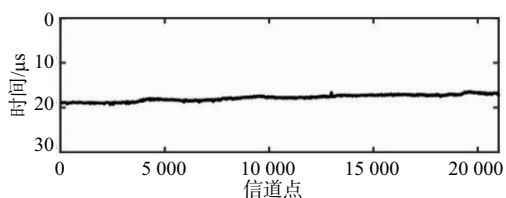
(a) SHARAD 时域信号



(b) 时域信号对应的 C 值



(c) SHARAD 雷达剖面(图中红色箭头表示(a)中时域信号的位置)



(d) 提取的地表反射位置

图4 SHARAD 表面反射自动提取示意图

2) 电离层影响剔除:电离层的高电子密度导致雷达信号显著衰减。为了避免电离层影响,本文仅使用夜间轨道雷达数据。

3) 卫星姿态影响剔除:卫星姿态影响 SHARAD 发射电磁波在火星表面的入射角,为保证数据的一致性,本文使用翻滚角在 $90^\circ \pm 1^\circ$ 范围内的雷达数据。

4) 地表粗糙度影响剔除:地表粗糙度是决定 SHARAD 表面反射功率的重要参数,然而当前的火星表面高程数据的分辨率不能定量表征地表粗糙度的影响。本文计算了 SHARAD 雷达数据的 -3 dB 脉冲宽度,剔除该宽度大于 150 ns 的数据^[9],如图 5 所示。

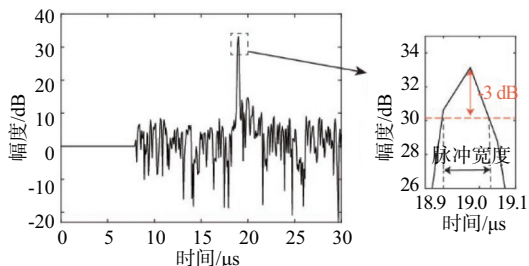


图5 SHARAD 雷达数据的-3 dB 宽度计算示意图

1.4 SHARAD 雷达数据反演

根据 Porcello 等(1974年)提出的方法,地表回波功率 P_s 可以表示为^[15]

$$P_s = P_t \left(\frac{G\lambda}{8\pi H} \right)^2 |R_s|^2 L_s \quad (8)$$

式中, P_t 是传输功率, G 是天线增益, λ 是雷达波长, H 是飞行器高度, R_s 是地表反射系数, L_s 是地表粗糙度损失项。

根据 RoPeR 反演结果和 SHARAD 在该区域的表面反射功率,定义校准系数 K :

$$K = P_t \left(\frac{G\lambda}{8\pi} \right)^2 = \frac{P_{s0} H_{s0}^2}{|R_{s0}|^2 L_{s0}} \quad (9)$$

式中, P_{s0} 、 R_{s0} 、 L_{s0} 和 H_{s0} 分别是 SHARAD 在祝融号着陆区的表面回波功率、表面反射系数、地表粗糙度损失项和卫星轨道高度。经地表粗糙度影响剔除后, L_{s0} 可以忽略,则校准系数 K 简化为

$$K = \frac{P_{s0} H_{s0}^2}{|R_{s0}|^2} \quad (10)$$

在得到校准常数 K 后,其他位置处的地表反射系数可根据 SHARAD 表面反射功率 P_s 和轨道高度 H 根据下列公式计算得到:

$$|R_s|^2 = \frac{P_s H^2}{K} \quad (11)$$

地表反射系数 R_s 与次表层相对介电常数 ϵ_r 存在关系:

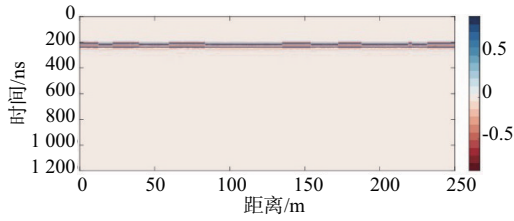
$$|R_s|^2 = \left(\frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \right)^2 \quad (12)$$

2 结果和解释

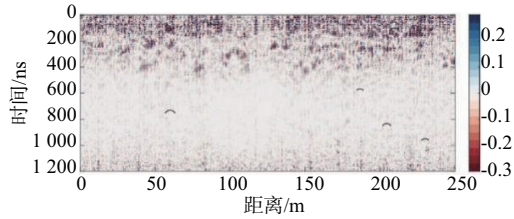
2.1 RoPeR 结果

图 6(a) 为 RoPeR 低频通道的原始数据,图 6(b) 为经过数据处理之后的数据,处理步骤包括自检数据道剔除、道间距归一化、时基抖动校准、去直流偏移、零时校正、背景去除、带通滤波以及增益。经过处理后的雷达数据信噪比明显提升,从图中可以看出 0~100 ns 深度范围内的雷达反射比较杂乱,100~500 ns 深度范围内包含了多个较连续的倾斜反射。之后,本文采用了 1.2 节的双曲线拟合算法计算了“祝融号”火星车巡视路径下方地层的介电常数,共选取 42 道双曲线,前 250 m 所选取的双曲线位置及介电常数在图 6(b) 和 (c) 中列出。

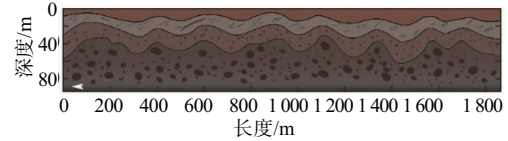
对反演的介电常数数值进行插值,用相对介电常数 4.9 进行时程转换后得到如图 7(a) 所示的



(a) 原始数据



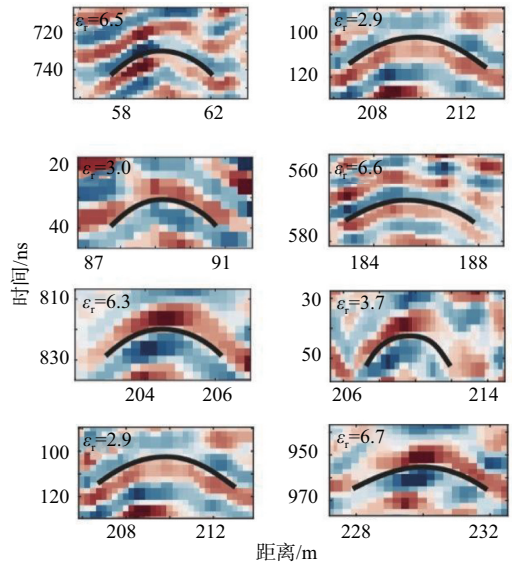
(a) 插值得到的介电常数剖面图



(b) 地质解释图

图7 RoPeR 低频通道结果

(b) 处理后数据及双曲线拟合结果



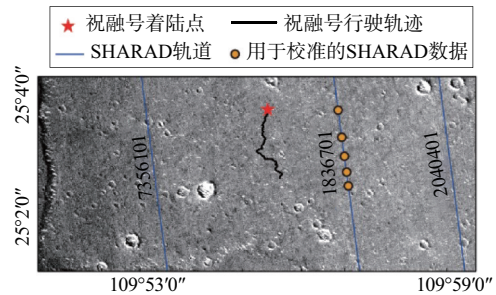
(c) 双曲线拟合结果放大图

图6 前 250 m 的 RoPeR 低频通道雷达图

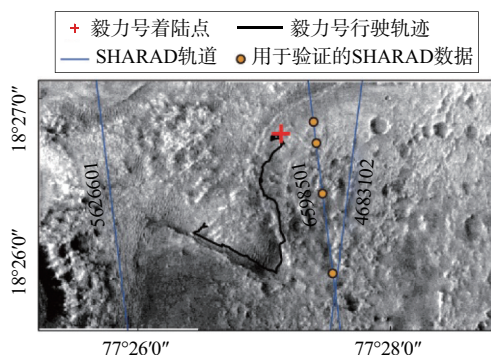
介电常数剖面图。从图中发现,“祝融号”火星车巡视路径下方地层的相对介电常数在 3~7.8 之间,且介电常数值随着深度的增加逐渐增大,对应地下介质的密度也逐渐增大。根据图 7(b),将着陆区地下结构划分为 4 个主要分层:表层(0~10 m)具有较低的相对介电常数,主要为火星表面风化层或松散的堆积物;第二层(10~30 m)具有适中的相对介电常数(4~5),可能是古代大洋的沉积物;第三层(30~50 m)显示出较高的相对介电常数(5~6),可能为破碎的基岩;第四层(50~85 m)具有最高的相对介电常数(6~7.8),表明其为较密实的基岩。

根据前人研究结果,对于火星北半球低地单元,SHARAD 表面反射包含了约 10 m 深度范围内的次表层参数信息^[16]。因此,本文使用图 7(a)中 0~10 m 范围内的平均介电常数(4.32)来计算校准系数 K 。图 8(a)为“祝融号”火星车的巡视路径,该区域内 1836701 轨道的 SHARAD 雷达数据距离最近。如图 8(a)所示,经过数据处理后,该轨数据中有 5 个数据点满足计算要求,这些数据点的反射功率在 26.83~26.99 dB 之间,平均值为 26.89 dB。根据公式(10),校准系数 K 的值为 1.67×10^{12} 。

本文利用 RIMFAX 数据对计算得到的校准系数 K 进行验证。轨道 6598501 的 SHARAD 数据经处理后有 4 个数据道距离“毅力号”的行驶区域最近,如图 8(b)所示,这些数据道的表面反射功率在 55.1~55.9 dB 之间,平均反射功率为 55.6 dB。根据公式(10)和计算的校准常数 K ,反演的相对介电常数为 8.12~8.26,平均值为 8.2。Casademont 等反演得到的次表层平均相对介电常数约为 8.9^[11]。两者之间的绝对误差为 -0.7,证明了本文所提出数据处理和反演方法的有效性。



(a) 用于校准的 SHARAD 数据(轨道 1836701)

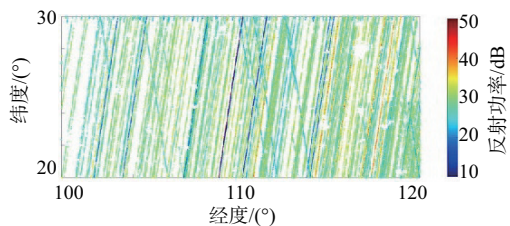


(b) 用于验证的SHARAD数据(轨道6598501)

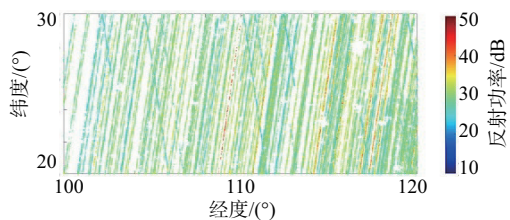
图8 SHARAD数据位于CTX图像中的位置

2.2 乌托邦平原南部介电常数图

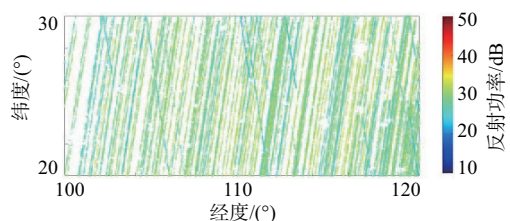
本文的研究区域为 $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$, 包含391轨SHARAD雷达数据。图9(a)为原始数据直接提取的表面反射功率, 从图中可以看到存在部分轨道反射功率明显偏高或者偏低的现象。图9(b)~(d)分别为经过使用电离层、卫星姿态和地表粗糙度数据剔除处理后的表面反射功率, 经过处理后的轨道反射功率变得更加均匀。经过处理后, 数据道从2 233 849个减少至87 962个, 如图9(d)所示。



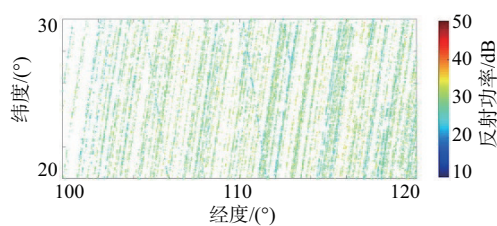
(a) 原始数据



(b) 电离层影响剔除后的数据



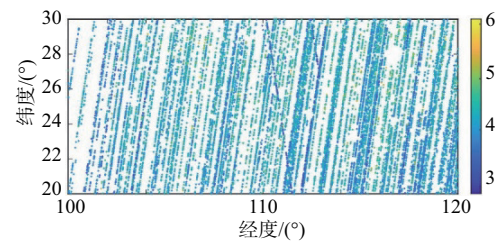
(c) 卫星姿态影响剔除后的数据



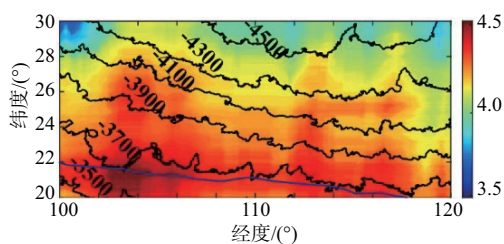
(d) 地表粗糙度影响剔除后的数据

图9 SHARAD雷达数据处理过程

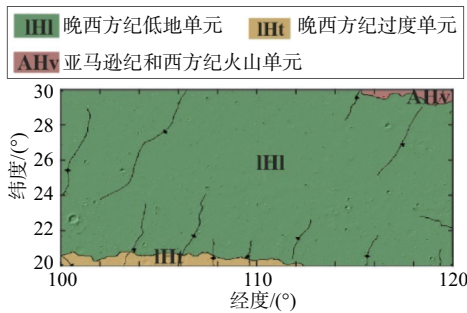
使用处理后的地表回波功率(图9(d))反演研究区域的次表层介电常数, 结果如图10(a)所示。反演的介电常数值在3.5~4.5范围内, 平均值为4.0, 与前人研究成果一致^[8]。图10(b)为在图10(a)基础上进行插值和平滑获得, 图中黑线代表等高线, 蓝线代表海岸线^[17], 表现出了更多的细节。具体地, 研究区域南部的介电常数值较高, 而北部区域的值较低。该差异与研究区域的火星地质单元比较符合, 其南部为晚西方纪过度单元, 而北部为晚西方纪低地单元(图10(c))^[18]。晚西方纪过度单元由泥流、河流、湖泊的沉积物和火山岩组成, 而晚西方纪低地单元由河流、湖泊、海洋沉积物以及崩积物组成。因此南部地层的组成介质相对于北部地层更粗糙且密度也更高, 也就是介电常数的值要更高, 与我们的反演结果一致。由于本文反演计算的次表层介电常数分布图仅能反映表面以下约10 m范围内的介质信息, 其成因可能与乌托邦平原早期大洋的沉积物或后期的撞击、风化等表面重塑产物有关^[19]。



(a) 介电常数散点图



(b) 对图(a)进行插值和平滑后的介电常数图



(c) 火星地质图

图10 研究区域的介电常数图与地质图

3 结束语

本文提出了一种联合轨道雷达和巡视器雷达的火星表面介电常数反演方法,得到了乌托邦平原南部的表层介电常数分布图。结果表明研究区域的介电常数在3.5~4.5范围内,但是整体呈现南高北低的特征。本文结果中呈现的介电常数分布与乌托邦平原的演化历史相关,未来可用于分析火星古海洋的存在和演变过程。此外,本文提出的方法极大简化了火星轨道雷达表面反射信号的处理和反演过程并得到了验证,该方法可用于更大范围(如乌托邦平原其他区域或克律塞平原等)的表层介电常数反演,为寻找火星次表层水冰、研究火星过去地质历史等提供数据支持。

参考文献:

- [1] 丁泽刚,曾涛,张光伟,等.分布式地基雷达深空探测技术[J].雷达科学与技术,2022,20(1):28-33.
- [2] 龙腾,丁泽刚,曾涛,等.地基深空探测雷达研究进展与展望[J].信号处理,2024,40(1):56-72.
- [3] LI Chao, ZHENG Yikang, WANG Xin, et al. Layered Subsurface in Utopia Basin of Mars Revealed by Zhurong Rover Radar [J]. Nature, 2022, 610:308-312.
- [4] ZHOU Bin, SHEN Shaoxiang, LU Wei, et al. The Mars Rover Subsurface Penetrating Radar Onboard China's Mars 2020 Mission [J]. Earth and Planetary Physics, 2020, 4(4):345-354.
- [5] JORDAN R, PICARDI G, PLAUT J, et al. The Mars Express MARSIS Sounder Instrument [J]. Planetary and Space Science, 2009, 57(14):1975-1986.
- [6] SEU R, PHILLIPS R J, BICCARI D, et al. SHARAD Sounding Radar on the Mars Reconnaissance Orbiter [J].

Journal of Geophysical Research: Planets, 2007, 112(E5): E05S05.

- [7] MOUGINOT J, POMMEROL A, KOFMAN W, et al. The 3-5MHz Global Reflectivity Map of Mars by MARSIS/Mars Express: Implications for the Current Inventory of Subsurface H₂O[J]. Icarus, 2010(2):612-625.
- [8] CASTALDO L, MEGE D, GURGUREWICZ J, et al. Global Permittivity Mapping of the Martian Surface from SHARAD[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 462: 55-65.
- [9] LAURO S E, MATTEI E, SOLDOVIERI F, et al. Dielectric Constant Estimation of the Uppermost Basal Unit Layer in the Martian Boreales Scopuli Region [J]. Icarus, 2012 (1):458-467.
- [10] HAMRAN S-E, PAIGE D A, AMUNDSEN H E F, et al. Radar Imager for Mars' Subsurface Experiment-RIMFAX[J]. Space Science Review, 2020(8):128.
- [11] CASADEMONT T M, EIDE S, SHOEMAKER E S, et al. Rimfax Ground Penetrating Radar Reveals Dielectric Permittivity and Rock Density of Shallow Martian Subsurface [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2023(5):e2022JE007598.
- [12] 杨佳琦,邵芸,卞小林,等.基于祝融号火星车次表层探测雷达的乌托邦平原浅表层结构分析[J].中国科学院大学学报(中英文),2025,42(1):116-125.
- [13] LIU Renrui, XU Yi, CHEN Ruonan, et al. An Improved Hyperbolic Method and Its Application to Property Inversion in Martian Tianwen-1 GPR Data[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61:5104014.
- [14] 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(5):114358.
- [15] 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.
- [16] CROCI R, SEU R, FLAMINI E, et al. The Shallow Radar (SHARAD) Onboard the NASA MRO Mission [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(5):794-807.
- [17] CLIFFORD S M, PARKER T J. The Evolution of the Martian Hydrosphere: Implications for the Fate of a Primordial Ocean and the Current State of the Northern Plains [J]. Icarus, 2001(1):40-79.
- [18] TANAKA K L, SKINNER J A, DOHM J M, et al. Geologic Map of Mars [M]. [S.l.]: Astrogeology (下转第590页)

- sis of Antenna Arrays in Vehicle-Mounted Phased Array Radar: A Heat Dissipation Perspective [J]. International Journal of Heat and Technology, 2023, 41(4):838-846.
- [4] CHEN Long, HONG Linfeng. Lightweight Design of a High Mobility Vehicle-Based Radar [C]//Third International Conference on Mechanical Design and Simulation, Xi'an, China: SPIE, 2023:1263904.
- [5] 马林, 杨文军, 程望东, 等. 精密跟踪测量雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2024.
- [6] 唐宝富, 张轶群, 周金柱. 智能结构与相控阵雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [7] 刘炳辉, 程春红, 袁海平. 雷达结构精度影响因素与测量的分析研究[J]. 电子机械工程, 2019, 35(1):5-10.
- [8] 孙京, 马兴瑞, 于登云. 星载天线双轴定位机构指向精度分析[J]. 宇航学报, 2007, 28(3):545-550.
- [9] 李岩, 范大鹏. 光电稳定机构指向误差建模与敏感度分析[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(1):104-109.
- [10] 张赟霞, 任波. 一种地基相控阵天线指向系统性误差分析[J]. 微波学报, 2018, 34(4):16-21.
- [11] 韩旭, 于大群. 相控阵天线指向测量误差分析及消除方法研究[J]. 微波学报, 2023, 39(2):52-57.
- [12] 何文杰, 张增太, 房景仕, 等. 某测量雷达天线座轴系设计与精度测量[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(3):332-336.

作者简介:

- 祝崇辉** 男, 高级工程师, 主要研究方向为雷达结构总体。
- 赵文** 男, 高级工程师, 主要研究方向为雷达结构总体。
- 贺照鹏** 男, 工程师, 主要研究方向为雷达结构总体。
- 邹敏** 女, 研究员, 主要研究方向为雷达总体。
- 石同武** 男, 研究员, 主要研究方向为雷达结构总体。

(上接第 568 页)

- [3] LAMBOUR R, RAJAN N, MORGAN T, et al. Assessment of Orbital Debris Size Estimation from Radar Cross-Section Measurements [J]. Advances in Space Research, 2004, 34(5):1013-1020.
- [4] 于春锐, 梁佃农, 董臻, 等. 基于窄带雷达 RCS 序列的空间目标尺寸估计[J]. 空间科学学报, 2010, 30(3):250-254.
- [5] 刘芑, 韩飞, 曾惠忠, 等. 一箭多星发射微小卫星构型设计[J]. 航天器工程, 2020, 29(5):57-64.
- [6] 刘江, 田宗军, 徐欣, 等. 一种适合组批部署的小卫星构型与结构设计[J]. 航天器工程, 2023, 32(5):63-68.
- [7] 季鹏飞, 张煜晨, 华松逸, 等. “星链”卫星低成本建设因素及方法研究[J]. 科技创新与生产力, 2023, 44(10):36-39.
- [8] 于兴伟, 张学文, 侯鑫宇, 等. 基于窄带 RCS 数据的低速旋转空间目标识别研究[J]. 现代雷达, 2022, 44(7):75-81.
- [9] MAHAFZA B R. Radar Systems Analysis and Design Using Matlab [M]. USA: CRC Press, 2000.
- [10] 高治明, 罗子娟, 李雪松, 等. 卫星辅助的无人机视觉惯性自主定位方法[J]. 导航与控制, 2024, 23(2):41-50.
- [11] 李心草, 倪培双, 裴昊, 等. 基于 ISAR 图像的空间卫星目标姿态估计 [C]//2024 年全国微波毫米波会议, 北京: 中国电子学会, 2024:338-340.

作者简介:

- 张显** 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为信号处理、目标识别。
- 杨波威** 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为卫星通信网络、人工智能技术。

(上接第 576 页)

- Research Program (USGS), 2014.
- [19] LI Jianhui, LIU Hai, MENG Xu, et al. Ancient Ocean Coastal Deposits Imaged on Mars [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2025, 122(9):e2422213122.

作者简介:

段迪文 男, 硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达无损检测和深空探测。

孟旭 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为探地雷达无

损检测、数字信号处理和探月雷达数据反演。

刘海 男, 博士, 教授, 主要研究方向为城市工程物探、无损检测和深空探测。

李鉴辉 男, 博士研究生, 主要研究方向为探地雷达数据处理、深空探测和火星地质解释。

刘超 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大型地下工程施工及维护和地下工程智慧感知及智能施工。

王向宇 男, 博士, 主要研究方向为探地雷达成像和数据反演。