

基于月球形貌数据的SAR干涉图像仿真

张昊^{1,2}, 靳国旺^{1,2}, 叶豪¹, 秦永志³

(1. 信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450001; 2. 智能空间信息国家级重点实验室, 北京 100000; 3. 61206部队, 北京 100042)

摘要: 为了利用现有数据掌握月表SAR成像特点并辅助用于绕月SAR成像观测系统设计, 提出一种基于月球形貌数据的月表SAR干涉图像仿真方案。该方案在给定绕月飞行轨道和基线参数的情况下, 根据已有的月表DEM数据, 按照设置的SAR成像观测参数计算相应的侧视角度, 从而逐点计算对应月表的局部入射角, 依据RD几何构像模型和干涉测高原理, 按照设定的后向散射系数进行仿真计算, 得到仿真的SAR幅度图像和干涉相位。采用格网间距为118 m的LOLA DEM进行了不同基线情况下的月表SAR干涉图像仿真, 验证了仿真方案的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; SAR干涉图像仿真; 月球; 数字高程模型

中图分类号: P184.5

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)01-0058-06

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2025.20240013

引用格式: 张昊, 靳国旺, 叶豪, 等. 基于月球形貌数据的SAR干涉图像仿真[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(1): 58-63.

Reference format: ZHANG H, JIN G W, YE H, et al. Simulation of SAR interferometric images based on lunar topography[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(1): 58-63.

引言

深空探测是人类拓展生存空间、寻找地外生命、探索宇宙奥秘的必然途径, 也是体现国家航天科技能力和空间科学技术水平的重要标志^[1-2]。作为地球的天然卫星, 月球成为人类探索深空的首选对象^[3]。自前苏联“月球1号”(Chandrayaan-1)探测月球之后, 美国、欧盟、中国、日本、印度等诸多国家或组织先后多次开展了月球观测任务, 获取了丰富的月球表面影像和地形数据^[4-6]。徐青等^[1]对月球形貌测绘技术进行了详尽的总结和梳理, 邸凯昌等^[5]总结分析了月球轨道器影像摄影测量制图进展及应用。传统的月球观测主要依赖于光学成像系统, 难以获得永久阴影区高质量的成像结果^[7-8]。

SAR (Synthetic Aperture Radar) 具有不受光照条件限制的特点, 可在月球观测中发挥重要作用^[9]。柳钮滔等^[10]提出将高分辨率极化SAR数据应用于月球永久阴影区着陆点筛选方面, 可为月面探测器登陆任务提供参考。为了获取月球永久阴影区的精细形貌和物理属性信息, 已有月球探测器选择搭载SAR载荷进行对月观测^[11]。美国的“月球勘测轨道飞行器”(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)探测器搭载了Mini-RF对月进行观测^[12]。印度Chandrayaan-1探测器搭载多

极化Mini-SAR, 成功获取月表多极化SAR图像^[13]。印度“月船2号”(Chandrayaan-2)探测器搭载DFSAR (Dual-Frequency Synthetic Aperture Radar) 成功观测到月球永久阴影区中的撞击坑^[14]。

但在实际应用中, SAR载荷造价昂贵, 为降低SAR研发成本, 往往利用SAR仿真技术进行SAR系统验证。2002年, Kobayashi等^[15]进行了月球表面月海区域的SAR成像仿真工作, 采用高斯粗糙面来对月海区域进行地形建模, 得到的仿真SAR图像有助于确认HF波段(9 MHz)雷达对于月球表面和次表层探测的有效性。2009年, 法文哲等^[16]对有环形山分布的月球表面进行了数值建模, 并在此基础上进行了SAR图像仿真。2011年, 夏伟杰^[17]通过分形几何对月球环形山分布表面进行了建模, 并给出了SAR图像仿真结果。2023年, 柳钮滔等^[18-19]将SAR图像仿真用于地形匹配导航、月球SAR图像解译等方面, 扩展了SAR仿真应用场景。

为了利用现有数据了解月表SAR成像特点并辅助用于绕月SAR成像观测系统设计, 本文提出了一种基于月球形貌数据的月表SAR干涉图像仿真方案。该仿真方法可用于分析SAR月球观测的最佳侧视角和基线参数, 辅助用于绕月SAR成像观测系统设计。

1 SAR干涉图像仿真方案

基于月球形貌数据的SAR干涉图像仿真方案如图1所示, 在给定绕月飞行轨道和基线参数的情况下, 根据已有的月表DEM数据, 按照设置的SAR成像观测参数计算相应的侧视角度逐点计算对应月面局部入射角, 依据RD几何构像模型和干涉测高原理, 按照设定的后向散射系数进行仿真计算, 得到SAR幅度图像和干涉相位图。

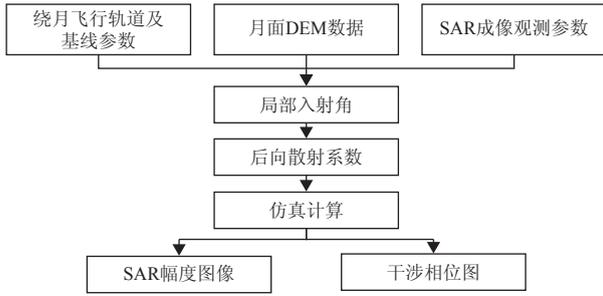


图1 基于月球形貌数据的SAR干涉图像仿真方案

Fig. 1 SAR interferometric image simulation scheme based on lunar topography data

1.1 SAR幅度图像仿真

对于SAR幅度图像仿真, 最关键的是逐点计算后向散射强度。在已知形貌数据的情况下, 可参考朗伯余弦定律计算回波强度。

如图2所示, 对于坡度角为 α 的月表地形, 在侧视角为 θ 的情况下, 根据式(1)计算对应的局部入射角 φ 。

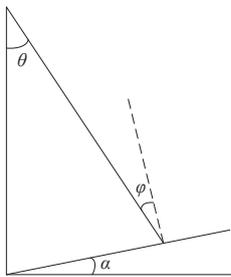


图2 局部入射角与侧视角、坡度关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the relationship between local incidence angle, side view angle, and slope

$$\varphi = \theta - \alpha \quad (1)$$

对于某一地表局部, 反射强度可参考朗伯余弦定律, 即当法线方向反射强度为 I_0 , 入射角(局部表面法线方向与入射方向的夹角)为 φ 时, 漫反射强度 $I' = I_0 \cos \varphi$ 。

由月表DEM逐点计算对应的像点坐标后, 对位于同一像点处的后向散射强度值进行积分(求和)。对于落到同一像点坐标 (x, y) 处的SAR信号幅度为各个

后向散射强度值的积分, 即

$$I_{(x,y)} = \sum_{(X,Y,Z)} I_0 \beta \cos \varphi_{(X,Y,Z)} = \sum_{(X,Y,Z)} 0.5 I_0 \cos \varphi_{(X,Y,Z)} \quad (2)$$

1.2 干涉相位图仿真

干涉相位图仿真计算过程中, 像点与月面点之间的关系依据RD几何构像模型表达, 干涉相位与月表高程之间的关系由InSAR测高原理式表达。

记月面某点 P 的三维坐标为 (X, Y, Z) , SAR系统天线相位中心 S 的瞬时位置为 (X_s, Y_s, Z_s) , 瞬时速度为 (V_x, V_y, V_z) , 仿真SAR图像中相应像点的方位向坐标为 x , 距离向坐标为 y , 距离向采样间隔为 M_s , 近距延迟为 R_0 , 波长为 λ , f_{dc} 为多普勒中心频率, 则仿真过程中RD模型表达为^[20]

$$\begin{cases} (X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2 = (R_0 + M_s y)^2 \\ \mathbf{V}_x(X - X_s) + \mathbf{V}_y(Y - Y_s) + \mathbf{V}_z(Z - Z_s) = \\ -\frac{\lambda(R_0 + M_s y)}{2} f_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

记真实干涉相位为 ϕ_a , 对应的主辅图像斜距差为 ΔR , 则对于单发双收模式月球观测, 有

$$\phi_a = 2\pi \frac{\Delta R}{\lambda} \quad (4)$$

此时, 根据InSAR测高原理式得到的干涉相位与月表高程之间关系表达为

$$\begin{aligned} h &= H - R \cos(90^\circ + \alpha - \beta) = \\ H - R \cos\left(90^\circ + \alpha - \arccos\left(-\frac{\Delta R}{B} + \frac{B}{2R} - \frac{\Delta R^2}{2RB}\right)\right) \end{aligned} \quad (5)$$

在计算像点坐标和干涉相位过程中, 均采用牛顿迭代法实现, 即对式(3)、式(5)进行线性化, 在给定初值的基础上, 通过迭代计算改正量并逐步精化初值, 当改正量均小于给定限差时, 停止迭代并输出计算结果。对相应干涉相位进行模糊运算。

令符号 $\lfloor A \rfloor$ 表示对 A 进行向下取整运算, 则相应像点处干涉相位 ϕ 的模糊运算公式为

$$\phi = \phi_a - 2\pi \left\lfloor \frac{\phi_a}{2\pi} \right\rfloor \quad (6)$$

2 月面SAR干涉图像仿真试验

2.1 月面实测数据简介

本文采用LRO获取的LOLA DEM作为月球形貌数据输入。LOLA DEM是NASA LRO任务中通过LOLA获得的DEM^[21]。LOLA收集了超过65亿次月球表面高程测量值, 其垂直精度约为10 cm^[22]。LOLA DEM的分

分辨率随着纬度增加而提升,在极区高纬度地区分辨率可达5 m,但LOLA DEM在月球极区由于LOLA姿态不确定性造成了较大的几何误差^[23]。为了避免误差对仿真结果的影响,本文采用月球赤道附近LOLA DEM作为仿真输入,其格网间距为118 m。

为了验证仿真结果的正确性,本文将仿真SAR幅度影像与光学DOM进行对比验证。本文中使用的光学DOM是由LRO搭载的广角相机(Wide Angle Camera, WAC)获取的影像制作而成,其网格间距为100 m。

2.2 仿真参数设置

1) 绕月飞行轨道及基线参数设置

以月球质心为坐标原点,在月球赤道面内,选取平均地球方向为 X' 轴,按照右手法则选取赤道面内与 X' 轴垂直的方向作为 Y' 轴,与月球赤道面垂直指向北极的方向作为 Z' 轴。

月球参考椭球选为正球体,半径 R 为1 737.4 km。绕月飞行轨道及基线参数设置如表1所示,SAR平台轨道偏心率 e 取值为0,轨道面倾角 i 取值为 90° ,升交点赤经 Ω 取值为 0° ,近地点角距 ω 取值为 0° ,SAR卫星过近地点时刻 t 取值为0 s,相对航高 H 取值可变,对应的绕月飞行轨道长半径 a 取值为 $R+H$,基线长度取值可变,基线角度取值为 0° 。

表1 绕月飞行轨道及基线参数设置

Table 1 Lunar orbit and baseline parameter settings			
参数类别	参数名称	参数符号	参数取值
轨道参数	长半径	a	$R+H$
	偏心率	e	0°
	轨道面倾角	i	90°
	升交点赤经	Ω	0°
	近地点角距	ω	0°
基线参数	近地点时刻	t	$0''$
	基线长度	B	可变
	基线角度	α	0°

2) SAR成像观测参数设置

根据SAR系统设计原理,主要设置的参数包括:波长、距离向采样间隔、近距端侧视角。同时在SAR幅度图像仿真中,假定月球表面材质均一,其表面各点的后向散射系数 β 处处相等,仿真中设置各后向散射系数均为: $\beta = 0.5$ 。

2.3 SAR干涉图像仿真结果与分析

从LOLA DEM中截取如图3~4所示的2个区域DEM进行了仿真试验,相应的光学DOM分别如图3(b)、图4(b)所示,其DEM参数如表2所示。仿真试验中采用的SAR成像观测参数如表3所示,仿真的SAR幅度图像如图5所示,根据不同基线长度仿真的干涉图分别如图6~7所示。

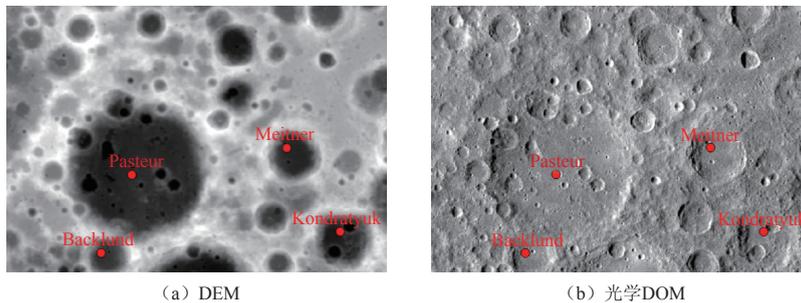


图3 仿真所用月表区域1

Fig. 3 Simulated lunar surface region 1

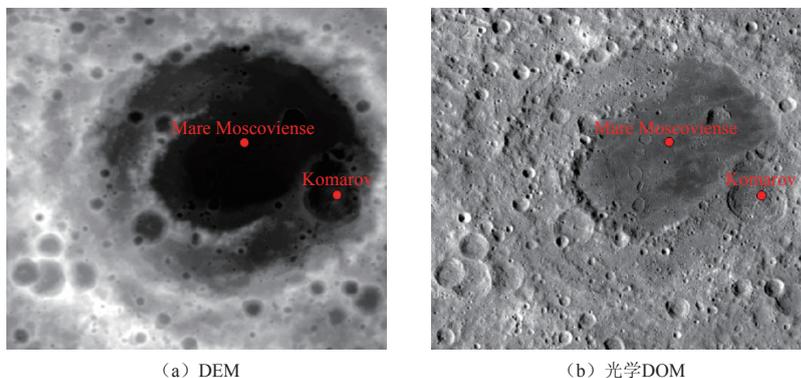


图4 仿真所用月表区域2

Fig. 4 Simulated lunar surface region 2

表 2 DEM参数

Table 2 DEM parameters

参数类型	参数值
区域1宽度/点	5 120
区域1高度/点	3 585
区域2宽度/点	4 864
区域2高度/点	4 353
方位向格网间距/m	118
距离向格网间距/m	118

表 3 SAR成像观测参数

Table 3 SAR imaging observation parameters

参数类型	参数值
轨道相对航高/km	100
基线长度1/m	26
基线长度2/m	58
波长/m	0.126
距离向采样间隔/m	118
近距端侧视角/ (°)	30

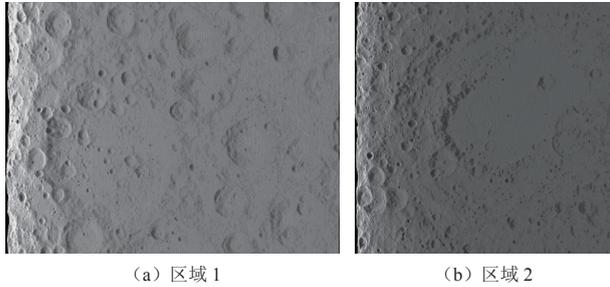


图 5 仿真的SAR幅度图像
Fig. 5 Simulated SAR amplitude image

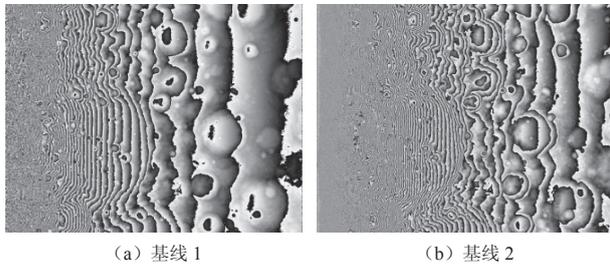


图 6 区域1的仿真干涉相位
Fig. 6 Simulated interferometric phase of region 1

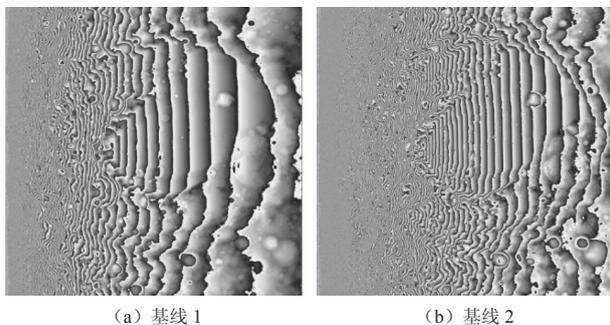


图 7 区域2的仿真干涉相位
Fig. 7 Simulated interferometric phase of region 2

仿真结果验证了本文仿真方案的有效性, 对比仿真的SAR图像与光学DOM, 可以看出, 仿真的SAR幅度图像, 在近距端近距压缩现象严重, 相对几何畸变较大, 图像色调较亮; 由于月表地形的影响, 在近距端出现了因地形起伏造成的阴影(黑色区域); 在干涉相位图中, 近距端条纹密集, 远距端条纹稀疏; 相对而言, 基线短时条纹稀疏, 基线长时条纹密集。在绕月SAR干涉成像观测参数设计时, 需根据月表形貌数据特点, 采用适合的基线长度、测绘带宽、波长、分辨率等参数。

3 结 论

本文提出并实现了一种利用月球形貌数据的SAR干涉图像仿真方法, 可以利用已有的月表DEM数据进行SAR干涉图像仿真, 获取SAR幅度图像和干涉相位图。该方法可采用合适的用于月球SAR成像观测的任务规划论证, 可用于侧视角、基线等SAR月球成像观测参数的分析优选, 也可分析实测结果与仿真结果的差异, 从而为区分不同区域月表材质奠定基础。

本试验中采用的是全月球118 m格网间距LOLA DEM, 其格网间距较大, 无法进行高分辨率、精细化的SAR干涉图像仿真, 仿真中相关参数的合理性和适应性尚需要进一步论证与优化。后续研究将结合中国探月工程获取的高分辨率DEM进行仿真研究与试验, 以提高仿真效果, 为月球SAR观测系统设计与仿真应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] 徐青, 周杨, 王栋, 等. 深空行星形貌测绘的理论技术与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] 徐青, 耿迅, 蓝朝桢, 等. 火星地形测绘研究综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2014, 1(1): 28-35.
XU Q, GENG X, LAN C Z, et al. Review of Mars topographic mapping[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 28-35.
- [3] 徐青, 耿迅. 地外天体形貌测绘研究现状与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(3): 300-310.
XU Q, GENG X. Recent advances and prospects in extraterrestrial planets mapping[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(3): 300-310.
- [4] 耿迅, 徐青. 一种线阵推扫式行星遥感影像摄影测量快速处理方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(3): 348-356.
GENG X, XU Q. A Fast Photogrammetric processing method for linear pushbroom planetary remote sensing images[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(3): 348-356.
- [5] 邱凯昌, 刘斌, 辛鑫, 等. 月球轨道器影像摄影测量制图进展及应用[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1562-1574.
DI K C, LIU B, XIN X, et al. Advances and applications of lunar photogrammetric mapping using orbital images[J]. Acta Geodaetica et

- Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1562-1574.
- [6] NOZETTE S, RUSTAN P, PLEASANCE L, et al. The clementine mission to the Moon: scientific overview[J]. *Science*, 1994, 266(5192): 1835-1839.
- [7] ROBINSON M, BRYLOW S, TSCHIMMEL M, et al. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LR-OC) instrument overview[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150: 81-124.
- [8] GRIEGER B, FOING B, KOSCHNY D, et al. Coverage and pointing accuracy of SMART-1/AMIE images[C]//Proceedings of Lunar and Planetary Institute Science Conference. League City, Texas, États-Unis: [s. n.], 2008.
- [9] PHILLIPS J, ADAMS G, BROWN W, et al. The Apollo 17 lunar sounder[C]//Proceedings of the Lunar Science Conference. USA: [s. n.], 1973.
- [10] 柳钮滔, 施贤正, 徐丰, 等. 月球永久阴影区着陆点选取要求的高分辨率极化SAR数据分析[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(1): 42-52.
- LIU N T, SHI X Z, XU F, et al. Analysis of high resolution SAR data and selection of landing sites in the permanently shadowed region on the Moon[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(1): 42-52.
- [11] 张颌. 探月雷达方法技术研究及嫦娥三号雷达数据解释[D]. 吉林: 吉林大学, 2019.
- ZHANG L. Methodological research on lunar penetrating radar and interpretation of Chang'e 3 radar data[D]. Jilin: JILIN University, 2019.
- [12] ARAKI H, TAZAWA S, NODA H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry[J]. *Science*, 2009, 323(5916): 897-900.
- [13] GOSWAMI J, ANNADURAI M. Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the Moon[J]. *Current Science*, 2009, 96(4): 486-491.
- [14] CHOWDHURY A, SAXENA M, KUMAR A, et al. Orbiter high resolution camera onboard Chandrayaan-2 orbiter[J]. *Current Science*, 2020, 118(4): 560-565.
- [15] KOBAYASHI T, OYA H, ONO T. B-scan analysis of subsurface radar sounding of lunar highland region[J]. *Earth Planets and Space*, 2002, 54(10): 983-991.
- [16] FA W, XU F, JIN Y. SAR imaging simulation for an inhomogeneous undulated lunar surface based on triangulated irregular network[J]. *Science in China*, 2009, 52(4): 559-574.
- [17] 夏伟杰. 合成孔径雷达回波仿真与图像模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- XIA W J. Simulation of raw signal and image of synthetic aperture radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [18] LIU N, JIN Y Q. Pol-SAR image simulation of the lunar surface with data analysis of Chandrayaan-2 and Mini-RF[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023(16): 10301-10310.
- [19] LIU N, JIN Y Q. InSAR Simulation and speeded-up robust features algorithm for terrain relative navigation in PSRs on the Moon[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023(17): 1131-1337.
- [20] 靳国旺, 张红敏, 徐青. 雷达摄影测量[M]. 北京: 测绘出版社, 2015.
- [21] SMITH D E, ZUBER M T, NEUMANN G A, et al. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA)[J]. *Geo-physical Research Letters*, 2010, 37(18): 2-9.
- [22] MAZARICO E, ROWLANDS D D, NEUMANN G A, et al. Orbit determination of the Lunar Reconnaissance Orbiter[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(3): 193-207.
- [23] SMITH D E, ZUBER M T, NEUMANN G A, et al. Summary of the results from the lunar orbiter laser altimeter after seven years in lunar orbit[J]. *Icarus*, 2017(283): 70-91.

作者简介:

张昊(1989-), 男, 助理研究员, 主要研究方向: 雷达摄影测量与数据智能处理。

通信地址: 北京市朝阳区民族园路8号(100000)

电话: (0371) 81623244

E-mail: isfetz@126.com

靳国旺(1977-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向: 雷达摄影测量、InSAR处理技术与应用。**本文通信作者。**

通信地址: 河南省郑州市高新区科学大道62号

电话: (0371) 81623244

E-mail: guowang_jin@163.com

Simulation of SAR Interferometric Images Based on Lunar Topography

ZHANG Hao^{1,2}, JIN Guowang^{1,2}, YE Hao¹, QIN Yongzhi³

(1. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. National Key Laboratory of Intelligent Spatial Information, Beijing 100000, China;

3. 61206 Troops, Beijing 100042, China)

Abstract: In order to understand the SAR imaging characteristics of the lunar surface and assist in the design of SAR imaging observation systems around the moon using existing data, a simulation scheme for lunar surface SAR images based on lunar topographic data is proposed. In this scheme, given the circumlunar trajectory and baseline parameters, the corresponding off-nadir angles are calculated based on the existing lunar Digital Elevation Model (DEM) data and the set SAR imaging parameters. The local incidence angles for each point on the lunar surface are then calculated, and the simulation is performed based on the RD model and interferometric height measurement principle, using the set backscattering coefficients. This process generates simulated SAR amplitude images and interferometric phases. The effectiveness of the simulation scheme was verified by simulating lunar surface SAR images under different baseline conditions using the LOLA DEM with a grid spacing of 118m.

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR); SAR interferometric image simulation; lunar; digital elevation model

Highlights:

- A lunar SAR image simulation scheme was designed based on lunar topographic data.
- The SAR image simulation experiments and results validation were conducted using LOLA DEM and optical DOM with a grid spacing of 118 m.
- The lunar SAR amplitude images and interferometric phase simulations were conducted under different baseline conditions.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]