

月基SAR对地观测时空特性研究

陈国强¹, 郭华东¹, 梁达², 丁翼星¹, 吕明阳¹, 刘广¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室, 北京 100080)

摘要: 月基雷达能对地表目标进行长时间大尺度范围的观测。根据美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)星历数据, 分析了月基合成孔径雷达微波(Synthetic Aperture Radar, SAR)平台在不同场景时对地球在时间上和空间上观测性能的差异, 结合实际地月相对运动的空间关系完成了月基SAR回波的仿真。结果表明: 通过月基SAR平台, 可以找到位于地表的零多普勒面交线, 并以此为基础实现较长时间、较大地面范围的周期性观测, 用SAR回波仿真验证了其可行性。通过研究月基SAR的观测, 可以为后续研究诸如地表潮汐运动、极区海冰回弹提供基础。

关键词: 月基对地观测; 合成孔径雷达; 空间关系; 零多普勒面

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)03-0261-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210076

引用格式: 陈国强, 郭华东, 梁达, 等. 月基SAR对地观测时空特性研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(3): 261-268.

Reference format: CHEN G Q, GUO H D, LIANG D, et al. Research on spatio-temporal characteristics of Moon-based SAR Earth observation[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(3): 261-268.

引言

被地球引力潮汐锁定的大范围月表为在月表布设如光学、微波传感器来对地球进行观测提供了可能^[1-4]。相比于成熟的星载对地观测方式, 月基平台能以更加稳定、更长周期、更大范围的宏观性、整体性、一致性的优势实现对地球目标的观测^[5]。

在已有的月基研究相关文献中, 研究人员利用“阿波罗15”(Apollo-15)计划中的传感器数据进行研究, 获得了地球气候系统变化的部分信息^[6]。对于光学观测方式, 通过对大气组成、地表构成、冰面覆盖、植被分布等分析, 可以定性得到月基光学对地观测的一些优势与不足^[7]。利用热红外传感器的观测方式, 可以实现由月球对地球部分目标区域进行灾害遇险评估, 实现对地表重点区域的长期关注^[8]。利用月球观测地球辐射平衡或球面反演的最大优势是可以实现多种观测方法的折中^[9]。

相较于被动微波方式, 主动式的合成孔径雷达微波(Synthetic Aperture Radar, SAR)可以不受光照、云层因素的影响, 实现对地物目标全天候全天时的监视观测^[10-11]。进入21世纪, 越来越多学者提出以月球为平台建设月基雷达基地的概念^[12], Fornaro等^[13]分析了月基雷达对地观测的优势与不足, 指出功率的配置是

其准确成像的主要限制。与传统低中高轨SAR相比, 月基SAR的成像距离长, 其多普勒参数估计方法也不同于前者, 丁翼星等^[14]发现随着月基SAR的波束角沿轨不断调整, 天线放置的位置会对多普勒参数产生明显影响。如果对月基雷达平台观测青藏高原和亚马逊平原进行仿真, 结果表明月基雷达可以对青藏高原实现百分之百的区域观测, 对亚马逊平原实现一半以上区域的观测, 这验证了月基雷达的大面积、全时段和稳定的对地观测性能^[15]。在月表搭设雷达平台, 可以较小的波束宽度对地表进行凝视。月球相对于地表位置稳定的重访周期, 使其可以进行稳定的重轨干涉或者双基干涉测量^[16-17], 从而实现通过月基雷达平台对地表干涉形变的观测和研究^[18-19]。

本文首先从不同位置的月基SAR平台对地观测性能出发, 着重分析了平台在时间和空间上对地观测性能的特点, 表明通过月基SAR平台, 可以较小的天线距离向、方位向宽度角实现对地表较大范围及周期性的覆盖, 其次通过单一场景的仿真, 证实月基SAR超远距离仿真成像的可行性。

1 月基SAR对地观测特性

月基SAR平台有着不同于星载SAR平台的安放位

置,为减少地月运动对SAR成像的影响,需要分析不同月基SAR的多普勒中心变化。通过研究月基SAR航迹速度的变化可得出地表是否存在多普勒中心为零的区域。本文中经过姿态引导后的月基SAR为正侧视类型,通过研究与SAR波束形态相关的角度参数,可得出波束在地表的时间空间覆盖特性。而后通过距离压缩的方式,可以对正侧视状态下的中心波束点进行压缩仿真。在进行月基SAR分析中,首要任务是明晰月基SAR平台与对应地表目标之间的位置速度等几何关系,涉及分别以地月质心为中心的坐标系平移、旋转变换处理^[20-25]。

与人造卫星相比,作为天然卫星的月球被地球潮汐锁定,使月球在绕地公转时,总有固定的半个球面始终朝向地球,这让月球的正面成为一个能够布设雷达探测器的超大场所^[26]。Radarsat雷达卫星的近地点高度为788 km,远地点高度为794 km,每24 d覆盖全球一次^[27],而从月心至地心的平均距离约为 3.8×10^5 km,约为地球半径平均60倍,这意味着月基雷达任何微小的抖动和误差都有可能不能接收到理想回波。月球的半径为1 737 km,理论上月球不应被视为普通的质点,需要对月面正面区域的每个位置点进行分析。月球公转过程中,始终存在自由天平动和受迫天平动^[28],这使月球正面边界区域对地球呈现周期性的可视性遮挡。同时月表存在大量不规则的撞击坑,也可能造成对雷达波束的遮挡^[29]。在本文中,为了减少计算量,将月球视为光滑的球体,忽略月表复杂地形对月基SAR天线姿态引导的影响。

在SAR研究中,一个比较关键的步骤是确定雷达波束的零多普勒平面,这影响着雷达信号的多普勒频率特性。面对中心波束相较于多普勒平面的偏移,需要通过天线姿态多轴调整方法将其调整至零多普勒平面,以将多普勒中心频率降至零。多普勒频率的计算如式(1)

$$f_d = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{dR}{dt} = -\frac{2 \cdot (\mathbf{R}_{mp}^{ecr} - \mathbf{R}_{ep}^{ecr}) \cdot (\mathbf{V}_{mp}^{ecr} - \mathbf{V}_{ep}^{ecr})}{\lambda \cdot \|\mathbf{R}_{mp}^{ecr} - \mathbf{R}_{ep}^{ecr}\|} \quad (1)$$

对式(1)进行化简,可以得到式(2)和式(3)

$$A = \frac{\mathbf{R}_{mp}^{ecr} - \mathbf{R}_{ep}^{ecr}}{\|\mathbf{R}_{mp}^{ecr} - \mathbf{R}_{ep}^{ecr}\|} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{V}_{mp}^{ecr} + \mathbf{R}_{mp}^{ecr} \times \mathbf{W}_e \quad (3)$$

其中: f_d 为多普勒频率; λ 为波长; \mathbf{R}_{mp}^{ecr} 、 \mathbf{R}_{ep}^{ecr} 、 \mathbf{V}_{mp}^{ecr} 、 \mathbf{V}_{ep}^{ecr} 分别为月基SAR平台(mp)、地表目标(ep)在地球质心旋转坐标系(the Earth Central Rotational

coordinate system, ECR)中的位置矢量和速度矢量; \mathbf{W}_e 为地球自转角速度矢量。运算符“ $\|\cdot\|$ ”表示二范数标量,运算符“ \times ”表示两向量之间的叉乘。 A 为初始波束指向; B 为月基SAR平台的航迹速度。

表1是在一个恒星年时间周期内,月表正面不同纬度线上航迹速度与该纬度线上月基SAR至地心连线夹角的最大值、平均值和最小值,可以发现对于表1中7条纬度线,夹角平均值基本为 90° ,最大值与最小值均在 90° 附近波动,且两者间的差值不超过 1° ;并且对于整个月表正面,在该时间周期内,其夹角的最大值为 90.17° ,最小值为 89.82° ,也都是 90° 附近极小区间内的角度值。

表1 月表正面不同纬度线上,航迹速度与月基SAR至地心连线角度的最大值、平均值和最小值

Table 1 The maximum, average and minimum value of the angle between track speed and vector from Moon-based SAR (on the near side of moon surface) to earth center in different latitude lines in a sidereal year

纬度线	最大值/ ($^\circ$)	平均值/ ($^\circ$)	最小值/ ($^\circ$)
80°N	90.016	90°	89.985°
60°N	90.005	90	89.995
30°N	90.019	90	89.982
0°	90.011	90	89.989
30°S	90.015	90	89.985
60°S	90.016	90	89.985
80°S	90.011	90	89.990

在单个恒星月周期内,月心环绕地心的运动速度约在 $960 \sim 1\ 100$ m/s间变动,月球赤道区域最大自转速度约为 4.6 m/s,月球轨道偏心率约为 0.054 ,近乎标准圆。因此,在月球正面不同位置建立SAR平台,月面位置自转速度对天线指向造成的影响有限,仅能造成天线姿态校正之间的微小差别,并能确保月表正面位置的天线始终能被引导在地表的零多普勒面割线上。姿态引导方式选择双维,即两轴旋转方式,在排除月表曲率遮挡因素下,就可有效地将月面位置点的中心天线指向调整至零多普勒平面,此时在地表与多普勒平面交线上的各目标点,其多普勒中心频率将变为最小。其中,零多普勒平面与地表的割线几乎与地球经线平行,并自西向东运行。

当天线中心固定指向地心方向时,对于地面目标,其处于正下视的状态,或处于一个极微小的斜视的状态。月基SAR平台相较于地面目标点的多普勒频率可由式(1)化为式(3)~(4)。

$$f_d^m = \frac{-2}{\lambda} \cdot \frac{\langle \mathbf{V}_{mp}^{ecr}, \mathbf{R}_{mp}^{ecr} - \mathbf{R}_{ep}^{ecr} \rangle}{\|\mathbf{R}_{mp}^{ecr} - \mathbf{R}_{ep}^{ecr}\|} \quad (4)$$

$$f_d^e = \frac{-2}{\lambda} \cdot \frac{\langle \mathbf{W}_e, \mathbf{R}_{mp}^{ecr} \times \mathbf{R}_{ep}^{ecr} \rangle}{\|\mathbf{R}_{mp}^{ecr} - \mathbf{R}_{ep}^{ecr}\|} \quad (5)$$

$$f_d = f_d^e + f_d^m \quad (6)$$

其中: 运算符“ $\langle \rangle$ ”表示两向量之间的内积标量; f_d^m 和 f_d^e 分别表示由于月球平台相对于地球运动、地球自转产生的多普勒频率。在恒星月或者恒星年的仿真时间中, 月球正面区域对沿地球质心指向上有不等多普勒中心频率均值。图1表示了在一个恒星年中, 1.5 GHz的L波段时, 月球正面区域对地球质心指向上的多普勒中心频率均值。此时, 在月表正面零经度线附近, 多普勒中心频率可降为零。

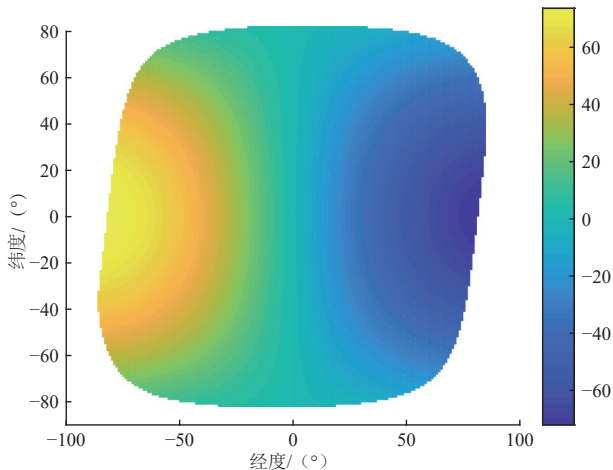


图 1 一个恒星年中月球正面的多普勒中心频率均值/Hz (天线指向地球质心)

Fig. 1 Average Doppler frequency in a sidereal year (the antenna points to the centroid of the Earth)

2 时间空间覆盖特性

由于星下点的回波在地面处几乎成镜面反射, 会对SAR图像造成严重的模糊影响, 因此为避免引入较强的星下点回波, 月基SAR平台的中心波束指向应避免指向星下点。

由于月基SAR至地心的距离相对于地球平均半径的倍数在56.1~63.8倍之间波动, 地球圆盘相对于月面平台的半视角差在1°附近波动, 因此不同于机载或者星载SAR平台, 月基SAR平台的下视角指向, 以及由方位向、距离向天线长度确定的方位向、距离向天线宽度角均不应过大, 否则会造成SAR回波信号不能被有效接收。

月基SAR平台的不同下视角指向、方位向、距离

向天线宽度角会产生不同的波束地面覆盖范围。在本文中, 可以用波束近距离端与远距离端对地心形成的张角大小描述地面覆盖范围。如图2所示, 表示在方位向宽度角为0.5°时, 一定时间段、下视角区间内, 不同的距离向宽度角下, 波束在距离向上地面覆盖区域的地心纬度值。对于SAR波束面, 方位向和距离向组成了两个相互垂直的相位面, 一般情况下, 相同的下视角下, 距离向宽度角越大, 覆盖区域的地心纬度值越大。随着月球位置在近地点与远地点之间循环, 覆盖区域的地心纬度也呈现大小相间的波动形式。因为经过姿态引导后的零多普勒面与地表的割线几乎与地表经度线平行, 故用波束入射角作为SAR回波约束条件, 并进而表示SAR波束在地表的覆盖区间是可行的。

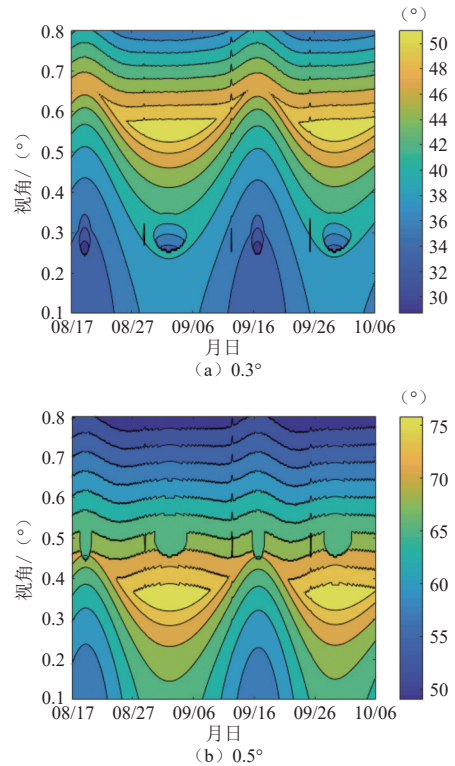


图 2 不同距离向宽度角下的波束地心纬度大小 (°)
Fig. 2 Geocentric latitudes (deg) in different range angles, such as 0.3° and 0.5°

不仅波束形态中的宽度角因子会对波束覆盖范围产生较大影响, SAR波束的地面入射角大小也会对覆盖范围产生影响。如图3所示, 表示在不同入射角情况下波束覆盖的地心纬度大小。

在图3中, 入射角最小值为1°, 随着入射角最大值与最小值的差值, 即入射角区间的变大, 覆盖范围所对应的地心纬度夹角也相应的增大, 在接近18.6 a的章动周期中, 覆盖夹角呈现随时间变化的周期性震动。但由于地月之间远地点与近地点距离差异相对于地月

平均距离仅约为10%，月球在轨道近地点与远地点周期性变动时，地心纬度夹角也会呈现周期性的变化，但变化差异不大。

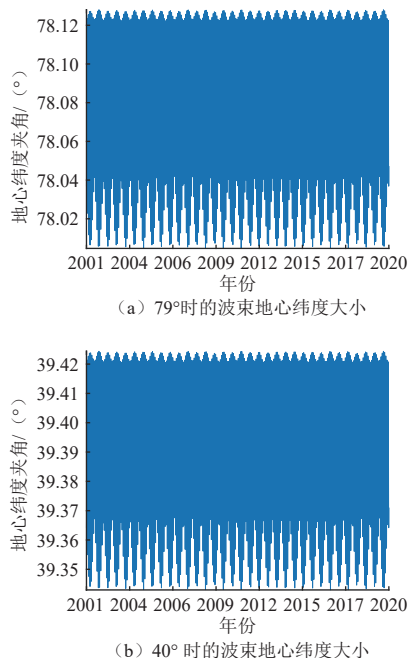


图3 不同最大入射角时的波束地心纬度大小 (°)

Fig. 3 Geocentric latitudes (deg) in different maximum incident angles, such as 79° and 40°

为了将不同形态的波束对地覆盖情况具象化，表2列出了若干种不同形态波束对地覆盖的具体情况。其中方位向和距离向宽度角都可以由各自方向上的天线长度表示，均表现为在波长不变的情况下，天线的长度越大，宽度角越小。随着两个宽度角的增大，波束在地面的覆盖范围也逐渐增大，随着下视角的增大，SAR波束可以达到大洲级别的覆盖。若考虑到SAR平台有两个侧视方向，则总覆盖范围应在单侧视的两倍。为了使SAR平台有效地接收回波，入射角不应过大，在表2中，入射角的最小值为1°，最大值为70°，通过调整SAR平台的天线宽度以及信号频率，可以调整波束观测范围。

表2 不同SAR波束在地表的覆盖情况
Table 2 Coverage of different SAR beams

下视角/ (°)	方位向宽度 角/ (°)	距离向宽度 角/ (°)	覆盖 百分比/%	近似面积 (万km ²)
0.1	0.05	0.05	0.075	38.25
0.3	0.05	0.05	0.079	40.29
0.3	0.2	0.1	0.64	326.44
0.4	0.2	0.1	0.67	341.74
0.4	0.35	0.35	4.41	2 249.38
0.5	0.48	0.48	8.45	4 310.04

图2和图3分别从SAR波束形态因素和入射角因素对覆盖的空间情况进行简要的介绍。发现通过调整SAR波束的形态因子，可以有效调整波束在地面的覆盖分布，相对于星载平台，月基SAR可以在空间上实现对地表目标的广域覆盖。

同时，在时间尺度上，月基SAR对地表不同纬度区域的目标也有不同的观测时间。如图4所示，在一个恒星年中，不同下视角的SAR波束对全球覆盖的时长，单位为小时数。当下视角较小，例如为0.4°时，月基SAR观测区域主要集中于地表中低纬度区域，在一年中对部分区域可以实现超过1 200 h的观测。随着下视角的增大，例如增大到0.6°时，月基SAR平台在地表的覆盖区域逐渐由中低纬度区域向两级扩展，在一年中对部分区域可以实现超过2 500 h的观测，并最终达到时间上的全球广域覆盖。

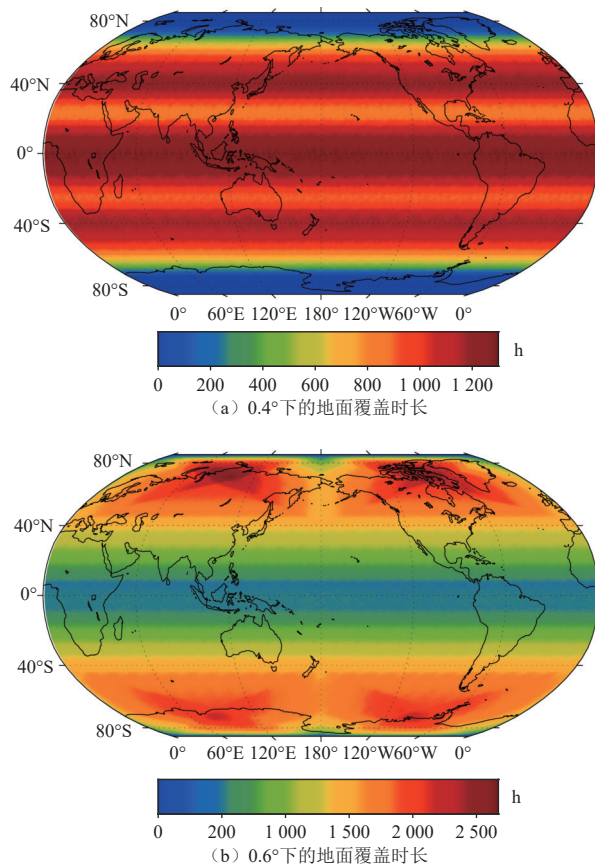


图4 不同下视角下的地面覆盖时长 (h)

Fig. 4 The time (hour) of coverage in different side angles, such as 0.4° and 0.6°

如上，通过月基SAR对地进行观测，可以在空间上实现对地表目标的广域覆盖，也可以在时间上实现对地表目标的广域覆盖。

3 实例回波仿真

相较于星载或机载SAR平台, 月地之间的超长距离使“走-停”模型不再适用于月基SAR平台, 同时, 也不能将地面目标视为静止状态, 而应该将月球的自转、公转与地球的自转同时考虑。如图5所示, 在一个恒星月中无地球自转和有地球自转时, 月基SAR平台与地面目标之间的距离。当忽略地球的自转时(如图5绿线所示), 平台与地物目标之间的距离为光滑且类似正弦函数的曲线, 当考虑地球自转时(如图5黑线所示), 月基SAR平台与地物目标之间的距离呈现周期性增减的震荡趋势。

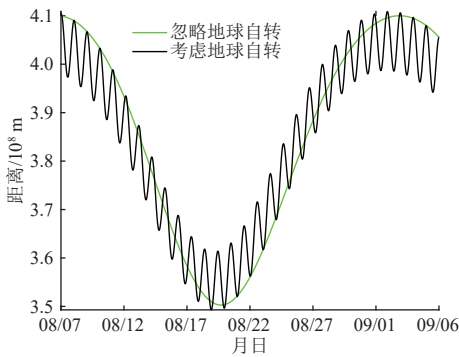


图5 月基SAR平台与地面目标之间的距离

Fig. 5 Distance between Moon-based SAR and corresponding earth target

若将月基SAR平台天线姿态引导到零多普勒平面, 以此时中心天线与地表交点为地物目标点, 并以此时刻为中心时刻点, 可以用 10^{-9} s的时间精度迭代计算月基SAR脉冲发射至地物目标的下行传输时间 τ_1 , 与经过地物目标返回至月基SAR的上行传输时间 τ_2 , 相较于传统星载或机载模型的走停计算方式, 本文在JPL DE430数据的基础上采用的迭代计算方式更能准确逼近月基SAR的实际距离历程。而实际的月表广泛分布着形状不一的撞击坑, 具有复杂的地形, 在实际地月相对运动关系中, 复杂的地形也会使月基SAR与地面目标间的距离历程产生误差, 而月球表面高程最大值与最小值的差异在19 km内, 该差异不足地月平均距离的1%, 同时也是为了降低仿真计算的复杂度, 本文在计算月基SAR与地面目标之间的距离历程时, 不考虑复杂地形的影响。在分别计算出下行和上行传输时间后, 则总的传输时延为 $\tau = \tau_1 + \tau_2$, 在仿真中, 以中心时刻点为时间零点, 在传统的机载或低轨星载的传输时延曲线中, 以中心时刻为时间零点的时延曲线一般是对称曲线, 而对于月基SAR对地观测的实际场景, 经过SAR天线姿态校正后的双程时延时间计算

中, 由于受到地球自转、月球公转、月球自转的影响, 在相同的时间间隔内, 传输时延曲线的实际中心时刻与初始仿真中设定的中心时间零点不重合, 会产生不同程度的偏移。

表3中, 第一列表示月基SAR平台的位置, 用其在月面的经纬度表示; 第二列表示该平台天线的下视角; T_a 表示合成孔径时间; τ_{min} 表示回波双程传输时延的最小值; “Time span”表示在 T_a 中, τ_{min} 与合成孔径时间端点的最小距离。在相同的月面位置, 随着下视角的增大, 双程传输时延的最小值增大, 同时 T_a 中有效的近似双曲线对称区间缩小, 此时可以通过增大 T_a , 来增大对称时间区间; 若月基SAR位置偏离月表正面中心区域, 近似双曲线对称区间也将缩小, 伴随着斜视角的增大, 这种区间缩小的趋势将更加明显。这表明当前 T_a 时间段中, 原先将中心天线姿态引导后的时刻作为中心时刻点已经不是真实的中心时刻点, 即不是真实的双程时延最短位置。

表3 不同场景的双程延迟时间
Table 3 Delay time for different scenarios

纬度/(°), 经度/(°)	下视角/(°)	T_a/s	τ_{min}/s	Time span/s
(0, 0)	0.1	100	2.335 6	44.98
(0, 0)	0.2	100	2.336 2	39.03
(0, 0)	0.3	150	2.337 2	63.14
(10, 10)	0.1	150	2.336 1	32.62
(10, 10)	0.1	250	2.336 1	82.62
(10, 10)	0.2	250	2.336 7	81.43

通过适当增加 T_a , 可以弥补由于中心时刻点偏移造成的实际合成孔径时间较短的不足。此处, 假设月基SAR平台位于月表近地侧的中心位置, 即经纬度为(0°, 0°)的位置, 其下视角为0.1°, T_a 为150 s, 则实际的合成孔径时间为126.28 s, 月基SAR的部分参数如表4所示。

表4 仿真部分参数
Table 4 Part of the simulation parameters

参数	符号	数值
载频	f_0/Hz	2.3×10^{10}
距离向调频率	$Kr/(Hz \cdot s^{-1})$	10^{13}
脉冲持续时间	T_p/s	8×10^{-6}
合成孔径时间	T_a/s	100
方位向采样率	PRF/Hz	100
方位向天线尺寸	L_a/m	20
距离向天线尺寸	L_r/m	4

以表4中的数据作为月基SAR单一点目标压缩仿真的参数,其结果如图6所示,这表明对于月基SAR,在经过天线姿态引导校正后,对地表目标进行成像仿真是有效可行的。

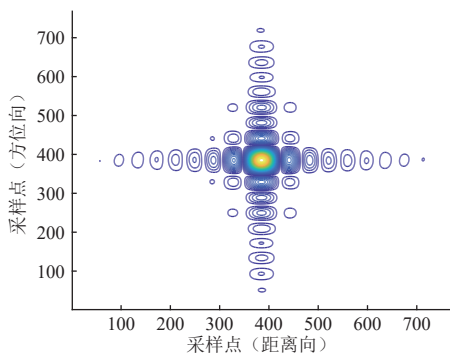


图6 单目标点压缩图像

Fig. 6 Single target image after compression

对图6所示的成像结果进行切片分析,可以得到图7所示的距离向、方位向一维切片图,结果表明方位向和距离向都得到了较好的压缩,其中,在行切片中,PLSR为 -11.81 dB, ISLR为 -9.61 dB;在列切片中,PLSR为 -12.58 dB, ISLR为 -9.69 dB。

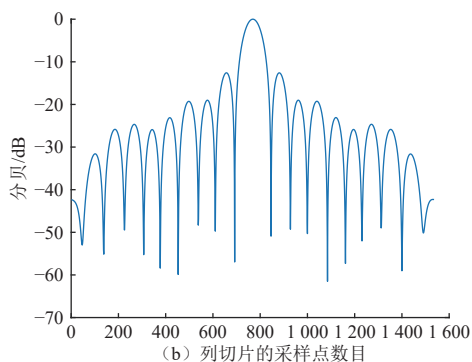
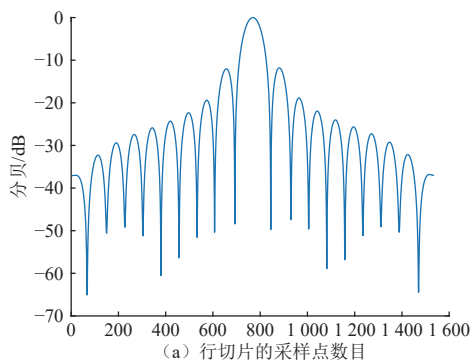


图7 单目标点行切片和列切片

Fig. 7 Row slice and column slice of the image

4 结论

本文通过调用JPL星历以及EOP数据,在接近于实

际情况的地月相对运动场景中,分析了月基SAR对地观测的多普勒特性以及时空覆盖特性,并进行了月基SAR回波仿真的模拟。月球表面实际分布着大小、深度不同的撞击坑,具有复杂的地形,为了降低计算的复杂度,本文在分析月基SAR多普勒特性以及后续通过迭代方式计算距离历程时,将月球视为由平均半径表示的自然天体,忽略了月表地形对月基SAR天线姿态引导的影响,也忽略了月表地形对距离历程产生的误差影响。

研究认为:

1) 由于月球轨道较小的偏心率,月球自转速度远小于其绕地球公转速度的性质,在月表正面布设SAR观测平台(排除月表曲率遮挡),总能将天线姿态引导至与地表有交线的零多普勒面上。

2) 同时对于月表近地侧,总能以较小的方位向、距离向宽度角实现较大地球纬度的范围覆盖。这表明通过月基SAR平台,可以实现对地面目标进行大尺度范围的观测需求。

3) 而通过调整SAR天线的指向参数,也可以对地面目标进行不同时间长度的观测,具体表现在,随着月基SAR天线视角有限度的增大,在一个恒星月或恒星年的周期中,地球低中高不同纬度均有不同时段的机会被观测到,这也表明通过月基SAR平台,可以实现对地面目标进行长时间尺度的观测需求。

4) 在月基SAR点目标的实例仿真分析中,以迭代的方式而不是传统的走停方式计算回波距离历程,其成像结果表明以月基SAR平台进行对地观测成像是可行的。

本文研究对月基SAR平台对地观测特性进行了必要的阐述,其结论为月基SAR平台进行重轨或双基干涉观测提供了便利。

参 考 文 献

- [1] 丁翼星,郭华东,刘广. 面向全球变化探测的月基对地观测覆盖性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014(10):96-102.
DING Y X, GUO H D, LIU G. Coverage performance analysis of Earth observation from lunar base for global change detection[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014(10): 96-102.
- [2] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京:中国宇航出版社,2005.
- [3] YUAN L, LIAO J. Exploring the influence of various factors on microwave radiation image simulation for Moon-based Earth observation[J]. Frontiers of Earth Science, 2019, 14(2): 430-445.
- [4] RENGA A, MOCCIA A. Preliminary analysis of a Moon-based interferometric SAR system for very high resolution Earth remote sensing[C]//Proceedings of the 9th ILEWG International Conference on Exploration and Utilisation of the Moon. Sorrento, Italy: [s. n.], 2007:

- 22-26.
- [5] HUANG S P. Surface temperatures at the nearside of the Moon as a record of the radiation budget of Earth's climate system[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(11): 1853-1860.
- [6] GRIFFITH D. Near infrared remote sensing of atmospheric trace gases from ground and space[C]//*Optics & Photonics for Energy & the Environment*. [S. l.]: Optics & Photonics for Energy & the Environment, 2015.
- [7] MADSEN S N, EDELSTEIN W, DIDOMENICO L D, et al. A geosynchronous synthetic aperture radar; for tectonic mapping, disaster management and measurements of vegetation and soil moisture[C]//*IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*. [S. l.]: IEEE, 2002.
- [8] PALLE E, GOODE P R. The lunar terrestrial observatory: observing the Earth using photometers on the Moon's surface[J]. *Adv Space Res*, 2009, 43: 1083-1089.
- [9] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 郭华东, 张露. 雷达遥感六十年: 四个阶段的发展[J]. *遥感学报*, 2019, 23(6): 1023-1035.
- GUO H D, ZHANG L. 60 years of radar remote sensing: four-stage development[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2019, 23(6): 1023-1035.
- [11] 郭华东. 地球系统空间观测: 从科学卫星到月基平台[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 716-723.
- GUO H D. Earth system observation from space: from scientific satellite to Moon-based platform[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2016, 20(5): 716-723.
- [12] XU Z, CHEN K S. On signal modeling of Moon-based Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging of Earth[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 486.
- [13] 丁翼星, 郭华东, 刘广. 基于JPL星历的月基SAR多普勒参数估算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1): 71-76.
- DING Y X, GUO H D, LIU G. Method to estimate the Doppler parameters of moon-borne SAR using JPL ephemeris[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(1): 71-76.
- [14] 郭华东, 丁翼星, 刘广, 等. 面向全球变化探测的月基成像雷达概念研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013(11): 1760-1769.
- GUO H D, DING Y X, LIU G, et al. Conceptual study of lunar-based SAR for Global Change Monitoring[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2013(11): 1760-1769.
- [15] 董景龙. 月基重轨InSAR关键参数研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [16] JIANG H, DONG J, JIANG L, et al. Moon-based SAR for Earth observation and its spatial baseline decorrelation in repeat-pass interferometry[C]//*IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. [S. l.]: IEEE, 2019.
- [17] 马成龙. 月基InSAR观测地球大尺度形变能力研究——以固体地球垂向潮汐形变为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [18] 李德伟, 江利明, 蒋厚军, 等. 固体潮位移InSAR相位模拟及对广域地表形变监测的影响初探[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(12): 4527-4539.
- LI D W, JIANG L M, JIANG H J, et al. InSAR phase simulation of solid Earth tide and its influence on surface deformation monitoring at wide-area scale[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(12): 4527-4539.
- [19] 陈国强, 阮智星, 郭华东, 等. 月基平台对地观测数据传输链路方案设计及其分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(4): 820-827.
- CHEN G Q, RUAN Z X, GUO H D, et al. Moon-based platform data transmission link scheme design and analysis[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(4): 820-827.
- [20] 赵秉吉, 张庆君, 戴超, 等. 一种新的GEOSAR快速零多普勒中心二维姿态导引方法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(4): 763-769.
- ZHAO B J, ZHANG Q J, DAI C, et al. A new prompt 2-D attitude steering approach for zero Doppler centroid of GEOsynchronous SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 763-769.
- [21] PARK R S, FOLKNER W M, WILLIAMS J G, et al. The planetary and lunar ephemerides DE430 and DE431[EB/OL]. [2021-10-14]. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/abd414/meta#>.
- [22] 郝晓宁. 月球探测器轨道动力学及其设计[M]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2000.
- [23] PETIT G, LUZUM B. IERS conventions (2010)[J]. *Iers Technical Note*, 2010(4): 1-8.
- [24] RAMBAUX N, WILLIAMS J G. The Moon's physical librations and determination of their free modes[J]. *Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy*, 2011, 109(1): 85-100.
- [25] ECKHARDT D H. Theory of the libration of the Moon[J]. *Moon & the Planets*, 1981, 25(1): 3-49.
- [26] MOONS M. Analytical theory of the libration of the Moon[J]. *The Moon and the Planets*, 1982, 27(3): 257-284.
- [27] 周辉, 杨文涛. 合成孔径雷达卫星的特点与发展[J]. *航天器工程*, 2005, 14(4): 69-74.
- [28] LIU Z Q, DI K C, LI J, et al. Landing site topographic mapping and rover localization for Chang'e-4 mission[J]. *Science China (Information Sciences)*, 2020, 63(4): 170-181.
- [29] 欧阳伦曦, 李新情, 惠凤鸣, 等. 哨兵卫星Sentinel-1A数据特性及应用潜力分析[J]. *极地研究*, 2017, 29(2): 286-295.
- OUYANG L X, LI X Q, HUI F M, et al. Sentinel-1 A data products' characteristics and the potential applications[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2017, 29(2): 286-295.
- 作者简介:
陈国强(1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 月基对地观测。
 通讯地址: 北京市海淀区西北旺镇邓庄南路9号空天信息创新研究院(100094)
 E-mail: chengq@radi.ac.cn
郭华东(1950-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士、俄罗斯科学院外籍院士、芬兰科学与人文院外籍院士、发展中国家科学院院士。主要研究方向: 遥感信息机理、雷达对地观测、数字地球科学。**本文通讯作者**。
 通讯地址: 北京市海淀区邓庄南路中国科学院空天信息创新研究院(100094)
 电话: (010)82178000
 E-mail: hdguo@radi.ac.cn

Research on Spatio-Temporal Characteristics of Moon-Based SAR Earth Observation

CHEN Guoqiang¹, GUO Huadong¹, LIANG Da², DING Yixing¹, LV Mingyang¹, LIU Guang¹

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: With the rapid development of lunar exploration, the concept of moon-based observation of earth has received more and more attention. The synthetic aperture radar (SAR) deployed on the moon for earth observation can obtain continuous observations of large areas on earth surface, and realize a single wide-area observation mode which makes up for the deficiency of space-borne SAR. Based on the JPL ephemeris data, in this paper the observation difference of moon-based SAR in different scenarios such as time domain and space domain was analyzed, and the simulation of SAR echo was completed using the actual earth-moon spatial relationship. The results show that the moon-based SAR can always find the intersection line of zero Doppler plane on earth surface, and long-term, large-scale periodic observations can be achieved. The SAR echo simulation verifies its feasibility. The study of moon-based SAR observations can provide a basis for follow-up studies such as surface tidal movement and polar sea ice rebound.

Keywords: Moon-based observation of Earth; synthetic aperture radar; spatial relations; zero Doppler plane

Highlights:

- In the analysis of Moon-based SAR Earth observation, the Moon is no longer deemed as a point, but as a celestial body with an average radius.
- An analysis of Doppler characteristics is made in the hemisphere area of near side of the Moon, showing that on the near-Earth Moon surface, antenna attitude can be steered into the corresponding zero Doppler plane.
- An analysis of Moon-based SAR Earth observation's coverage in spatio-temporal domain shows that Moon-based Earth observation has characteristics of long term and large-scale coverage.
- Through echo point compression simulation example and the iterative calculation method in distance history instead of the traditional 'stop-and-go' method, the feasibility of Moon-based SAR Earth observation is verified.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]