

月基观测地球辐射能量和固体潮的作用与潜力

郭华东^{1,2}

1. 可持续发展大数据国际研究中心, 北京 100094;

2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要: 月球是地球唯一的自然卫星, 也是人类目前唯一能到达而且已经到达的星球。将月球作为平台观测地球具有覆盖范围大、平台寿命长、多圈层立体探测等明显优势, 具有观测的长期性、整体性、稳定性、唯一性等特点。在月球上布设多波段、多极化、多模式、主被动传感器对地球进行观测, 可以实现对几乎整个地月空间和地球近月面的、全球尺度上时间一致和空间连续的不间断观测, 获得大气圈、生物圈、水圈、岩石圈等多圈层信息, 取得人类对行星地球的新认识, 有可能真正实现从地球系统科学角度对全球多圈层相互耦合的一系列关键科学问题给出新的解答。本文重点分析地球辐射能量和固体潮的月基观测能力与潜力, 并介绍本研究团队近期的一些研究内容。月基平台有可能开辟全新的对地观测方向, 将是空间对地观测领域的一场重大变革。

关键词: 月基对地观测, 地球辐射能量, 地表形变, 固体潮, 辐射计, 合成孔径雷达, 干涉测量, 地球系统科学

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 郭华东. 2025. 月基观测地球辐射能量和固体潮的作用与潜力. 遥感学报, 29(6): 1305-1313

Guo H D. 2025. The role and potential of Moon-based observations of Earth's radiation energy and solid tides. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 1305-1313 [DOI: 10.11834/jrs.20255182]

1 引言

遥感问世六十多年来, 成功发射了各类对地观测卫星、载人飞船、航天飞机和空间站、深空探测器、日地 L1 点卫星等, 携带传感器工作波段覆盖了自可见光、红外到微波的全波段范围, 实施了大量综合性系列对地观测计划。航天、航空对地观测技术的发展极大地增强了人类对地球的理解, 目前对地观测应用已涉及到地球科学的诸多方面, 包括地球的陆海气等各个圈层, 此外还包括多圈层互相作用和大尺度观测, 例如北半球气候模式与北极冰量减少、地球外部辐射带探测、太阳风与地球磁层等。同时在技术发展方面, 对地观测不断向高空间、高时间、高光谱分辨率的方向发展, 新一代成像光谱、成像雷达、激光雷达等新传感器正在研发, 观测波段进一步细化拓展, 组网观测技术使观测模式多样化。

地球系统科学需要从全球的角度获得地球的长期监测数据。从二十世纪九十年代开始, 不同国家开始陆续提出面向全球环境监测的对地观测计划。美国目前已建立了一套较为全面的对地观测系统, 围绕地球动力学、海洋动力学、气候系统变化、太阳对地球影响、水循环与重力等方面进行观测。美国发射了包括资源和环境系列卫星、陆地卫星、水卫星和冰卫星等在内的多颗卫星。欧空局目前正在系统部署全球地球观测系统, 最初实施的是全球环境与安全监测计划, 该计划对地观测卫星网络第一阶段已经完成。哥白尼计划更加强调促进可持续发展、经济增长和增加就业, 为环境与安全提供一系列关键信息。四十多年来, 中国的卫星对地观测也从无到有, 已形成以气象卫星、资源卫星、环境卫星、海洋卫星和高分辨率卫星为代表的卫星对地观测体系。目前中国重点发展陆地观测、海洋观测、大气观测 3 个系列

收稿日期: 2025-05-28; 预印本: 2025-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41590850, 41590853)

第一作者简介: 郭华东, 研究方向为空间地球科学。E-mail: hduo@radi.ac.cn

对地观测卫星, 构建由系列星座及3类专题卫星组成的对地观测卫星系统, 逐步形成高、中、低空间分辨率合理配置、多种观测技术优化组合的综合高效全球观测和数据获取能力(郭华东, 2016)。

对地观测领域创新和发展的动力源于人们对地球系统认识不断拓展、不断深入的内在需求。随着地球系统科学研究的深入和拓展, 人们对地球系统整体认识的需求提升到了一个新的高度, 尤其在研究宏观地球科学现象以及其在时间空间上的相关性、研究各个圈层之间相互联系和相互影响时, 人们越来越认识到将地球作为一个整体进行综合观测的重要性, 更需要以全球性的系统观和多时空尺度分析方法来研究地球整体行为。这就要求获取的地球物理参数具有全球尺度上的时间一致性和空间连续性(郭华东等, 2013)。目前对地观测卫星主要运行在两种轨道上: 低地球轨道, 轨道低, 视野受限, 时空采样均不连续;

地球同步轨道, 轨道高, 时空连续性较好, 但是观测角度受限。因此人们又发展了一些特殊轨道来提高特定的对地观测能力, 如类似前苏联—俄罗斯 Molniya 系列通讯卫星或中国 SMILE 卫星(Sun 等, 2024)的高扁率轨道, 可以用来增强极地区域的观测能力。然而没有哪种单一平台能解决所有的空间对地观测问题, 发掘新平台的优势从而构建更完整的对地观测系统成为解决这一问题的重要方向。

月球是地球唯一的自然卫星, 是一个巨大的、长期存在的稳定平台。它不仅是人类走出地球, 开拓太空的前哨基地, 也是认识和保护地球的天然卫星, 把月球开拓为一个对地观测平台, 在月球上布设传感器对地球进行全面、持续、长期观测是一种全新概念空间观测手段, 将为全球尺度多圈层整体研究提供新的视角, 有希望对全球多圈层相互耦合的一系列关键的科学问题给出新的解释(Guo等, 2022)。

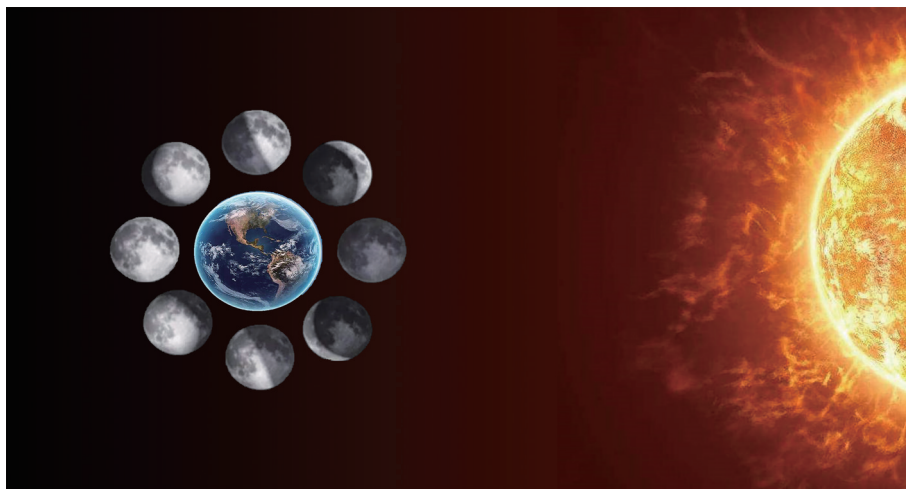


图1 月球是地球的天然卫星,且总有一面一直朝向地球,是空间对地观测的理想平台和全新方向

Fig.1 The moon is a natural satellite of the Earth, with one side always facing towards the Earth, making it an ideal platform and a new direction for Earth observation from space

基于上述, 作者提出建立月基对地观测系统的概念, 指在月球上布设传感器并进一步构建对地观测平台, 对地球进行长期连续观测。月球是一个长期运转的稳定平台, 可以长时间“免费”使用; 月球围绕地球运动, 有一面总是面向地球, 是难得的可进行大尺度、连续性、长期性动态观测的对地观测平台。在月球上建设对地观测系统将能够全面提升对地观测能力, 是对地观测领域的一场革命, 为推动地球系统科学深入研究奠定

坚实的基础。

2 月基对地观测的优势与技术特点

月球是一个长期存在的稳定平台, 地球的空间观测历史是几十年, 在月球平台上对地球进行数十、数百年乃至更长时间的观测, 能为地球系统研究提供强有力的数据与科学支持。相比目前机、星载对地观测平台而言, 月球对地观测平台具有更远的观测距离—38万 km、更大的平台空间—

半径 1730 余 km, 同时是一个天然的具有确定运行规律的自然卫星平台。2009 年, 笔者提出面向全球变化提出月基对地观测的概念, 指出现有的对地观测技术在时空尺度上的限制, 无法满足地球宏观科学现象大尺度观测的需求, 因此, 开拓月基平台成为提升对地观测的能力的一种途径。无论在国内还是国外, 月基对地观测技术都属于前沿领域, 在空间观测领域无疑是一次技术革命。目前, 月基对地观测的基础理论分析和研究框架已初步完成, 其在光学和雷达方面的研究也相继展开。

对于宏观地球科学现象的研究, 月基对地观测具有 4 大特点 (Guo 等, 2018; 郭华东等, 2022): 一是长期性: 人造卫星的寿命一般是数年, 月球却已经存在 46 亿年, 今后也将长期存在, 几乎是一个“永久”的平台。二是整体性: 月基对地观测可以完整覆盖地球近月面, 而且月球广阔的空间可布设多模式、全波段、主被动多种传感器, 实现对地球大气圈、岩石圈、生物圈、水圈、冰冻圈等各个圈层数据的获取, 从而在水平方面和垂直方向上均可实现对地的整体观测。三是稳定性: 研究表明, 月壳缺乏板块构造运动, 因此月震活动远比地震活动弱。月球要比地球稳定得多。与卫星平台相比, 月球一个具有广阔空间的刚性平台, 传感可以形成较长的稳定基线或较大的观测网络, 从而能够完成一些精确的对地测量任务。四是唯一性: 月球质量为, 是地球引潮力的主要来源, 引起的大气、海洋和固体地球潮汐是塑造地球表面环境的重要影响因子。同时月球运动对地震活动也具有一定的触发效应。月球对地球施加的影响主要与月球运动相关, 与月球公转有相同的周期, 因此在月基上观测与这些现象相关的参数能提供独特的、唯一的视角。

月基对地观测平台具有对宏观地球科学现象的观测能力, 蕴藏重大应用潜力。下文围绕地球辐射平衡和地球固体潮两个观测领域进行分析。

3 地球辐射能量的月基观测

3.1 地球辐射平衡观测的科学意义

如果把地球看成一个整体系统, 那么其内部能量的增减却决于系统边界的能量交换差额。在地球科学研究中, 常把大气层顶看作是地球系统

的边界, 而辐射是此处几乎唯一的能量交换形式。因此, 大气层顶入射和出射能量的差额代表了地球气候系统内部能量的增减。一般认为, 太阳辐射到达地球后, 大约 30% 的太阳辐射会以短波的形式被地表及云直接反射出地球系统, 剩余的部分被吸收后转换成各种形式储存在海洋、大气、陆地和冰层等系统中, 并在它们之间传输、转换, 最终以长波的形式向发射出地球系统。地球系统入射能量和出射能量在一定时间尺度内的差值就是地球辐射差额。当地球辐射差额为零时, 地球辐射差额处于平衡状态; 当地球辐射差额不为零时, 地球辐射差额处于不平衡状态。其中, 若入射能量多于出射能量, 地球系统在累计能量, 全球温度趋向升高; 反之, 地球系统在释放能量, 全球温度趋向降低。地球辐射差额是全球变化的根本原因之一, 回答了地球是在累积能量还是在释放能量的基本科学问题。

监测全球气候的变化的最可靠的方法就是研究地球辐射差额的长期变化趋势。因此, 我们需要精确估算两部分辐射能量, 分别是地球接收的入射辐射能量, 即到达大气层顶的太阳短波辐射能量, 以及地球向外辐射能量, 即地表和大气反射的短波辐射能量与地球系统发射的长波辐射能量。相对于地球出射辐射能量的估算, 太阳入射辐射能量较为稳定, 目前的卫星观测技术也更为成熟。而地球向外辐射的空间观测是目前的难点。这是由于地球系统中的反射和散射过程是复杂且各向异性的, 而且陆地、海洋和冰面的不均匀分布以及云层、植被、冰、雪的不断变化, 使得测量地球向外辐射能量存在很大的不确定性。因此, 准确估算地球的向外辐射能量对于理解地球能量差额平衡乃至全球气候变化都至关重要。

3.2 现有地球辐射平衡观测的方法及问题

数十年来各国科学家们一直尝试用直接或间接的方法准确估算地球系统的能量平衡, 空间技术的巨大进步为地球辐射平衡观测提供了强有力的手段。目前, 各国已经建立了多个地球辐射平衡观测系统。地球辐射差额实验 ERBE (Earth Radiation Budget Experiment) 和云和地球辐射差额能量系统 CERES (Cloud and Earth's Radiation budget Energy System) 是典型的低轨卫星平台观测系统, 在卫星运行过程中通过控制运动机构获取

不同位置不同方向地球大气层顶的向外辐射能量(图2),通过长期观测和模型来估算地球全球辐射净通量差额的逐年变化;静止卫星平台以其独特的观测几何可以对观测视场内辐射能量进行扫描或凝视观测,并分析其日变化特性;深空日地L1点平台可对地球太阳光照面进行整体观测。尽管这些卫星计划大大提高了人们对地球能量系统的认识,然而仍然存在很多不足,如低轨星载平台观测位置、视角受限,地球同步轨道平台缺乏可变的观测角度且缺乏极区采样,日地L1点平台无法观测地球夜晚部分等。气候学家主张利用海洋

热容量OHC(Ocean Heat Capacity)变化来估算地球系统内部能量的变化,但该方法极其依赖全球海洋温度的充分时空采样,目前在深海、极区、冰下和边缘等位置仍存在不足,因此用于估计十年以下尺度地球能量平衡误差较大。微光观测(Earthshine)是用地基望远镜观测月球暗部微弱的光,进而估算地球行星反照率的方法。该方法虽精度不高,但是这是目前最早的地球辐射平衡观测方法,也证明月球是观测地球辐射平衡的极佳场所。

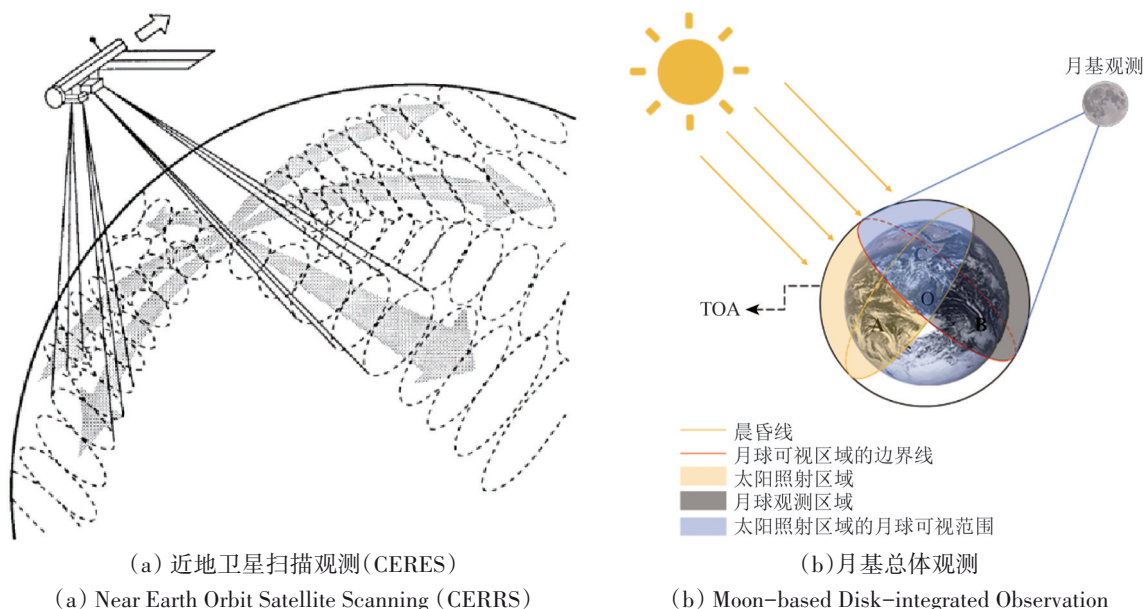


图2 与近地轨道卫星系统对地球“打点”观测相比,月基观测地球辐射能量具有长期连续、整体一致的特征。与我们晚上看到的月相类似,月基能够观测得到“地相”区域的短波向外辐射和整个地球半球的长波向外辐射(Wielicki等,1998;毋杰,2023)

Fig.2 Compared with the “dotting” observation by low Earth orbit satellite systems, moon-based observation of Earth's radiation energy have the characteristics of long-term continuity and global consistency. Similar to the lunar phase we see at night, the moon-based observatory can measure short wave outward radiation in the illuminated “Earth phase” region and long wave outward radiation in the entire Earth's near-moon hemisphere (Wielicki et al., 1998; Wu, 2023)

3.3 月基观测地球辐射能量平衡的特点

从现有空间观测方法的不足可以看出,观测地球辐射能量观测具有两个重要的要求:整体一致性和长期连续性。整体一致性观测能够较为准确地描述地球整体向外辐射能量状态,为研究全球气候变化提供地球净辐射年际间变化的准确依据,但要求观测位置距离地球足够远。只有在足够远的地方观测地球才能抽象为点状辐射源,从而有利于捕捉到地球向外辐射的整体性特征,也

可以降低观测和估算模型的复杂度,减少处理误差。长期连续性要求对地球进行长期连续变角度观测。从这两点来看,月球是观测地球整体向外辐射的极佳平台(图2)。月球距地球足够远,约38万km,是地球半径的60倍左右,月球正面总是朝向地球,在月球上布设传感器可以对地球进行整体、长期连续观测,一天内可以遍历所有地表,一个月内能够遍历所有地相角(太阳光与观测向量的夹角),一年内能遍历所有季节气候条件的组合,可以为整体估计地球辐射差额提供丰富的观

测数据。另外月基观测还能提供长期、一致的辐射强度时间序列观测数据，能直接反映地球出射辐射的长期变化趋势。月基观测地球辐射平衡具

有长期连续、整体一致的特点（表1），是解决目前卫星观测局限性的新思路。

表1 月基平台与其他空间平台观测地球辐射能量的特点对比

Table 1 Comparison of the characteristics of observing Earth's radiation energy from a moon-based observatory and other space platforms				
参数	太阳同步轨道	地球静止轨道	日地 L1 点	月基平台
单次观测范围	数百至上千公里	南北纬 80° 之间 (约地球半球的 40%)	地球阳面 (约地球半球的 50%)	地球近月面 (约地球半球的 49%)
一个重访周期内的全球采样	赤道采样不足 存在间隙	单星无法全球采样	全球采样	全球采样
角度采样	固定太阳角 固定观测角	变化太阳角 固定观测角	固定太阳角 变化观测角	变化太阳角 变化观测角

3.4 月基观测地球辐射能量平衡研究

月基平台搭载面阵多光谱仪与辐射计进行协同观测可以实现地球辐射能量的高精度估算。其中，月基辐射计主要用来获取方向辐射亮度，计算辐射差额，形成时间序列，月基面阵多光谱仪能够获取地球大气层顶的反射太阳辐射的窄波段光谱信息，用于分析地表反射率、云、气溶胶和部分温室气体等快速变化目标的特征。我们研究团队系统研究了月基观测地球辐射平衡的几何模型与辐射模型（Deng 等，2022；Huang 等，2023；Dong 等，2025；Liu 等，2025），设计了相应的传感器技术方案和辐射平衡估算方法（Wu 等，2023；Ye 等，2024，2025），解答了地球辐射平衡在月球上要如何观测的关键科学问题。在长期研究的基础上，团队承担了探月工程四期嫦娥八号月基观测地球辐射能量任务计划，目标是实现高精度、高灵敏度、高效率的地球向外辐射能量探测。团队正在研制月基辐射计和月基面阵多光谱仪，并将同步开展对地成像探测，获取地球整体辐射测量数据和多光谱影像数据，开展地球气候系统辐射差额研究。

4 地球固体潮月基观测

4.1 地球固体潮及观测技术

固体潮是由天体引力对地球产生的影响所引发的地球表面和内部的变形现象。地球固体潮为地球内部结构研究提供了一个宝贵的窗口，通过它，科学家可以间接了解地球内部的结构、物质

分布以及动力学过程。加深对固体潮及其变化机制的理解不仅能推进地球物理学、地震学和板块构造学等学科的前沿学科发展，也能为地震预测、资源勘探等提供重要依据。固体潮观测的本质是通过各类响应数据来获取潮汐因子，潮汐因子反映了地球固体潮的振幅和相位，能够揭示地球内部的物理特征。目前的固体潮观测主要依赖地面台站，但是地面台站不仅分布较为局限，而且受当地环境条件影响不同，制约了潮汐因子的获取精度。仅凭地面台站难以实现大尺度、时间一致且空间连续的固体潮观测，然而空间技术的发展为固体潮宏观观测提供了可能。

空间固体潮观测方法主要基于重力场观测和地面点位移观测，其中地面点位移观测精度较高。地面点位移观测相应技术手段包括全球导航卫星系统（GNSS）、甚长基线干涉测量（VLBI）、卫星激光测距（SLR）以及合成孔径雷达干涉测量（InSAR）等。这些空间技术各具特色，其中一些技术已经在固体潮研究做出了一定贡献。其中 InSAR 技术是唯一的高精度空间广域形变连续观测方法，可以从合成孔径雷达的复杂雷达数据中提取相位信息并对其进行处理，以精确地确定地球表面的三维信息，从而有效地捕获大范围的形变。InSAR 具有其他点观测手段不可替代的优点，如不受地面站数量的限制、具有更好的变形监测精度、空间连续性和点采样密度等。大量研究结果证明，差分干涉 SAR 和时序 SAR 技术在测量地震位移、地面沉降和滑坡等地表变形方面的精度可以达到或超过厘米级。当前 InSAR 技术目前的主要发展

趋势是更加广域、更加精细化,多种新型遥感平台研究,如倾斜同步轨道平台和月基平台,均将广域地壳形变列为任务的重要科学目标。

4.2 月基SAR观测平台的优势

月基SAR平台的优势刚好与固体潮广域观测的需求吻合。首先,月基平台具有较远的观测距离,仅需要 2° 的波束角即可与50%地表通视,不仅可以形成远超近地轨道卫星的超大幅宽,而且观测体制十分灵活,支持多种的成像模式、跟踪模式甚至可以发展新的SAR观测模式(Zhang等, 2024)。大幅宽观测对InSAR广域观测地表形变十分重要。如果因单幅影像幅宽不够而需要使用拼接手段,必将会造成InSAR干涉结果相位不连续,引入相位误差影响形变测量结果。月基SAR具有

实现覆盖半球的超大幅宽的潜力,能有效避免这一问题。其次,月基SAR重放周期短,平均仅需要1天即可实现大部分地球区域的观测重访。通过控制波束观测角度,月基SAR还可以实现每天八小时的连续变角度跟踪;第三,月球地质构造稳定,且地域广阔,不存在近地人造轨道平台摄动、大气阻力等问题,平台的稳定性、寿命以及载荷能力也是人造卫星无法比拟的。最后,从干涉的角度来说,月基SAR超大平台空间提供了超长刚性基线,可实现双天线干涉测量甚至多天线层析成像。稳定的平台和轨道、灵活的观测模式、快速的重放周期和长时间连续跟踪潜力也赋予月基SAR极强的差分和时间干涉能力,为广域固体潮观测提供支撑。

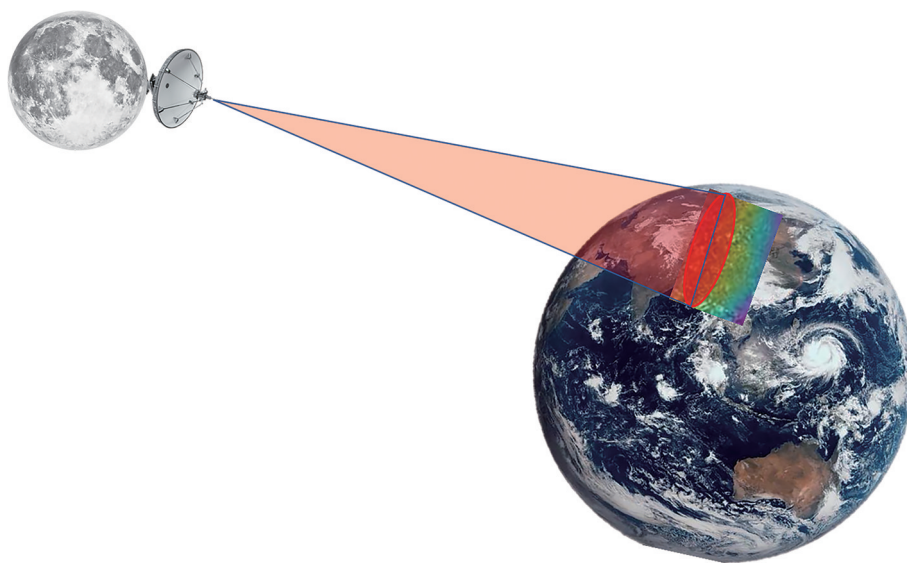


图3 月基对地雷达干涉测量示意图

Fig.3 Moon-based radar interferometry measurement

4.3 月基InSAR观测固体潮研究

成像雷达是主动微波遥感传感器,其系统结构较为复杂,而月基雷达所需的发射功率和天线面积都远大于近地轨道SAR系统。前期研究主要探讨月基SAR的可行性、性能和潜在应用,笔者在2013年提出月基SAR观测固体潮等固体地球科学现象的学术思路(郭华东等, 2013),并指出在太阳、地球、月球3点共线情况下月基观测能提供独特视角(图4)。近年来,虽然月基SAR相关研究仍是成像几何和系统性能方面的工作居多(Chen等, 2023, 2024; Zhang等, 2024),但是也出现

了一些针对科学问题和具体技术问题的研究(Wu等, 2022; 吴凯等, 2023)。近期,我们研究团队一方面开展了植被和海冰等目标的室内仿真实验,对月基SAR长积分时间条件下不稳定散射体聚焦性能进行了评估;另一方面从理论固体潮位移分布的时空变化特征入手,建立了月基InSAR观测固体潮的几何模型并模拟结果得到了一系列月基InSAR观测固体潮的关键参数(吴凯, 2024)。另外,国内近期也开展了一些地基雷达对月观测实验,所获取的数据为月基雷达设计论证提供了新的依据。从目前来看,月基InSAR相关研究已经进入到关键技术研发与验证阶段,系统设计也更加详细。

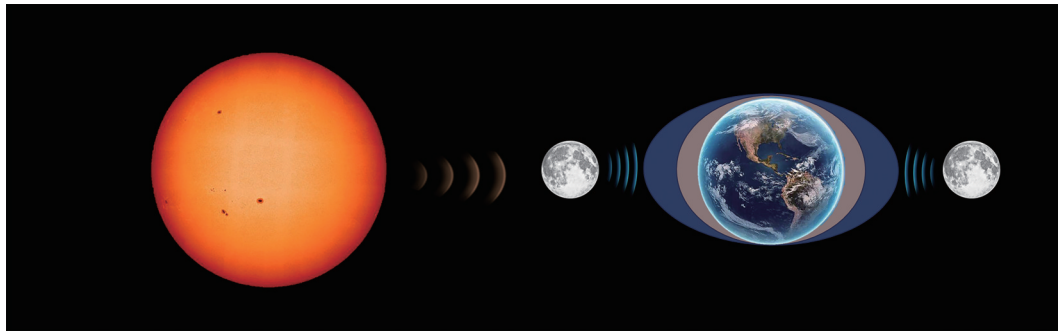


图4 在太阳、地球、月球3点一线情况下,地球固体潮出现极大值。将干涉合成孔径雷达系统部署在月球表面,为观测这种与月球相关的地球科学现象提供了一种独特的视角

Fig.4 When the sun, earth, and moon are collinear, the earth's solid tide reaches its maximum value. Deploying the interferometric synthetic aperture radar system on the surface of the moon provides a unique perspective for observing the geoscience phenomenon related to the moon

5 月基对地观测发展的思考

在国家基金委基金项目等支持下,中国科学家率先提出在月球上建立对地观测系统开展地球宏观科学和全球变化现象观测的概念,系统研究了月基平台观测地球的独特优势,深入开展了月基对地观测的选址工作,建立了完善的月基对地观测几何和成像仿真模型,提出了地球宏观现象观测的科学目标及其月基对地观测方案。中国拟进一步发展在月球布设传感器对地球进行观测的关键技术攻关研究。这些相关研究基础将为未来月基对地观测系统的建立提供了理论基础和技术支撑。

月基对地观测将发展成为地球观测的重要方式,将为地球系统科学研究、地球表面多圈层作用提供不可或缺的大尺度时空连续的观测数据;随着各国的月球基地的逐步建成,大型的观测设备将陆续成功部署于月面,月球作为一个“自然卫星”的资源优势将获得重大应用,从月球基地获得地球多圈层持续、精细、全面、快速的地球观测数据成为可能,开展业务化的对地球监测成为其主要发展趋势;月基观测数据将通过大数据处理方法形成信息,并通过人工智能信息分析产生地球系统的知识库,为中国和世界各国的决策提供地球系统科学的重要支撑。

后续研究应进一步明晰月基对地观测科学目标,包括月基对地观测具体观测对象,获取的指标参数以及与卫星系统相比具有的特点或优势。为明晰这些科学目标需要加深对观测现象的科学理解,通过模拟电磁波辐射传输过程及其与目标

的相互作用,清楚认识月基对地观测机理,探索月基对地观测的潜在价值。重点研究轨道卫星难以观测的科学现象,潜在观测对象包括具有月球耦合效应的地球科学现象、地月空间小行星与人造目标、日地月相互作用现象、地球大气层顶的物质与能量交换。

志 谢 感谢本月基对地观测团队刘广、丁翼星和博士后及研究生叶罕霖、吴凯、黄靖、邓玉、毋杰等对本文工作的支持和贡献。感谢丁翼星在本文整理过程中的贡献。

参考文献(References)

- Chen G Q, Guo H D, Dong J L, Wu W J, Wu K, Liu H Y, Lv M Y, Han C M and Ding Y X. 2023. Theoretical analysis of the spatial baseline for moon-based SAR cross-track interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16: 7315-7326 [DOI: 10.1109/jstars.2023.3292620]
- Chen G Q, Wu W J, Geng Y Q, Chen Q, Ren Y Z, Li S J, Suo Y F, Wu K and Guo H D. 2024. Spatiotemporal coverage capability of moon-based SAR for water dynamic monitoring in global vegetation tipping elements. *International Journal of Digital Earth*, 17 (1): 2334305 [DOI: 10.1080/17538947.2024.2334305]
- Deng Y, Guo H D, Liu G, Huang J, Wang H R, Zhou M X and Ye H L. 2022. Effects of the time sampling interval on the angular combination characteristics of moon-based earth observations. *Remote Sensing*, 14(7): 1623 [DOI: 10.3390/rs14071623]
- Dong R B, Guo H D, Zhou M X, Ye H L and Liu G. 2025. Geolocation uncertainty analysis of moon-based earth observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 22: 6001005 [DOI: 10.1109/LGRS.2024.3500021]
- Guo H D. 2016. Earth system observation from space: from scientific

- satellite to Moonbased platform. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 716-723 (郭华东. 2016. 地球系统空间观测: 从科学卫星到月基平台. *遥感学报*, 20(5): 716-723) [DOI: 10.11834/jrs.20166266]
- Guo H D, Ding Y X and Liu G. 2022. Moon-based Earth observation. *Science Bulletin*, 67(20): 2036-2039 [DOI: 10.1016/j.scib.2022.08.014]
- Guo H D, Ding Y X and Liu G. 2022. Research status and prospect of moon-based earth observation: a review. *Journal of Deep Space Exploration*, 9(3): 250-260 (郭华东, 丁翼星, 刘广. 2022. 月基对地观测研究现状与展望. *深空探测学报(中英文)*, 9(3): 250-260) [DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210080]
- Guo H D, Ding Y X, Liu G, Zhang D W, Fu W X and Zhang L. 2014. Conceptual study of lunar-based SAR for global change monitoring. *Science China Earth Sciences*, 57(8): 1771-1779 (郭华东, 丁翼星, 刘广, 张道卫, 傅文学, 张露. 2013. 面向全球变化探测的月基成像雷达概念研究. *中国科学: 地球科学*, 43(11): 1760-1769) [DOI: 10.1007/s11430-013-4714-2]
- Guo H D, Liu G and Ding Y X. 2018. Moon-based Earth observation: scientific concept and potential applications. *International Journal of Digital Earth*, 11(6): 546-557 [DOI: 10.1080/17538947.2017.1356879]
- Huang J, Guo H D, Liu G and Ye H L. 2023. Characteristics analysis of Earth's reflected radiation viewed from a moon-based platform. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20: 1000305 [DOI: 10.1109/lgrs.2022.3222505]
- Liu G, Dong R B, Jin Y, Zhou M X, Ye H L, Song R, Muller J P and Guo H D. 2025. Analyzing the observational capabilities of a Moon-based platform for monitoring Earth's outgoing radiation. *Geo-Spatial Information Science*, 1-16. [DOI: 10.1080/10095020.2025.2456119]
- Sun T R, Connor H, and Samsonov A. 2024. Preface to the Special Issue on Modeling and Data Analysis Methods for the SMILE mission. *Earth Planet. Phys*, 8(1), 1-4 [DOI: 10.26464/epp2023089]
- Wielicki B A, Barkstrom B R, Baum B A, Charlock T P, Green R N, Kratz D P, Lee R B, Minnis P, Smith G L, Takmeng Wong N, Young D F, Cess R D, Coakley J A, Crommelynck D A H, Donner L, Kandel R, King M D, Miller A J, Ramanathan V, Randall D A, Stowe L L and Welch R M. 1998. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): algorithm overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1127-1141 [DOI: 10.1109/36.701020]
- Wu J. 2023. The Simulation Research of Earth's Outgoing Shortwave Radiation Energy Based on the Moon Observation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (毋杰. 2023. 全球短波向外辐射能量的月基观测模拟研究. 北京: 中国科学院大学)
- Wu J, Pallé E, Guo H D and Ding Y X. 2023. Long-term trends in albedo as seen from a lunar observatory. *Advances in Space Research*, 72(6): 2109-2117 [DOI: 10.1016/j.asr.2023.06.028]
- Wu K. 2024. Research on Moon-based InSAR Observation of Wide-area Solid Earth Tides. Beijing: Aerospace Information Research Institute. Chinese Academy of Sciences (吴凯. 2024. 地球固体潮月基 InSAR 广域观测模拟研究. 北京: 中国科学院空天信息创新研究院)
- Wu K, Guo H D, Liu G, Wu W J, Ding Y X and Chen G Q. 2022. Evaluation of ionospheric delay for moon-based repeat-pass InSAR based on international reference ionosphere model. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15: 6631-6644 [DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3198415]
- Wu K, Ji C, Luo L and Wang X Y. 2023. Comprehensive analysis of wide-area observation development for solid earth tides by space technology. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(10): 2395-2405 (吴凯, 纪策, 骆磊, 王心源. 2023. 面向地球固体潮广域观测的空间技术发展综合分析. *遥感学报*, 27(10): 2395-2405) [DOI: 10.11834/jrs.20210553]
- Ye H, Guo H, Liang D, Xu Z, Jin Y, Liu G. 2025. On the Observational Solid Angle in Estimating the Moon-based Disk-integrated Earth Outgoing Longwave Radiation. *The Astronomical Journal*, 169(123):1-11 [DOI:10.3847/1538-3881/ada4b4]
- Ye H L, Guo H D, Liu G, Huang J and Liang D. 2024. Disk-integrated Earth's outgoing longwave radiation viewed from a moon-based platform: model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(5): e2023JD038908 [DOI: 10.1029/2023JD038908]
- Zhang K, Guo H D, Jiang D, Han C M and Chen G Q. 2024. Preliminary exploration of coverage for moon-based/HEO spaceborne bistatic SAR earth observation in polar regions. *Remote Sensing*, 16(12): 2086 [DOI: 10.3390/rs16122086]

The role and potential of Moon-based observations of Earth's radiation energy and solid tides

GUO Huadong^{1,2}

1. International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: The moon is the only natural satellite of Earth and the only planet that humans have already reached. Using the moon as a

platform to observe the Earth has obvious advantages such as large coverage, long platform lifespan, and multi-layer stereoscopic detection. By deploying multi band, multi polarization, multi-mode, active and passive sensors on the moon to observe the Earth, it is possible to achieve uninterrupted observation of almost the entire Earth Moon space and the Earth's near lunar surface at a global scale, and obtain information from Earth's atmosphere, biosphere, hydrosphere, lithosphere, etc. This article focuses on analyzing the observation capability and potential of Earth's radiation energy and solid tides, and introduces some recent research content of our research team.

The moon-based platform equipped with an array multi-spectrometer and radiometer for collaborative observation can achieve high-precision estimation of Earth's radiation energy. Our research team systematically studied the geometric model and radiation model of moon-based observation of Earth's radiation balance, designed corresponding sensor solutions and radiation balance estimation methods, and answered the key scientific question of how to observe Earth's radiation balance on the moon. On the basis of long-term research, our team has undertaken the Chang'e-8 moon based observation of Earth's radiation energy during the fourth phase of the China's lunar exploration project, with the goal of achieving high-precision, high-sensitivity, and high-efficiency detection of Earth's outward radiation energy. The team is developing a moon based radiometer and a moon based array multispectral spectrometer, and will simultaneously carry out earth observation to obtain overall radiation measurement data and multispectral image data of the Earth, and conduct research on radiation budget in the Earth's climate system.

In recent years, although research on moon-based SAR has mainly focused on imaging geometry and system performance, there have also been some studies on scientific and specific technical issues. Recently, our research team conducted indoor simulation experiments on unstable targets such as vegetation and sea ice to evaluate the focusing performance of unstable scatterers under long-term integration conditions of moon-based SAR. On the other hand, starting from the spatiotemporal variation characteristics of theoretical solid tide displacement distribution, a geometric model for moon-based InSAR observation of solid tide was established, and a series of key parameters for moon based InSAR observation of solid tide were obtained through simulation. In addition, some moon observation experiments by ground-based radars have also been conducted in China recently, and the data obtained provides new basis for the design and demonstration of moon-based radar. From the current perspective, research on moon based InSAR has entered the stage of key technology development and validation, and the system design has become more detailed. Moon based Earth observation will develop into an important way of Earth observation, providing indispensable large-scale and spatiotemporal continuous observation data for the researches on Earth system science and the interaction of multiple layers on the Earth's surface. The moon based platform may open up a new direction for Earth observation, which will be a major revolution in the field of space Earth observation.

Key words: Moon based Earth observation, Earth radiation energy, surface deformation, solid tide, radiometer, synthetic aperture radar, interferometry measurement, Earth system science

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41590850, 41590853)