

月基对地观测研究现状与展望

郭华东^{1,2,3}, 丁翼星^{1,2}, 刘广^{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数字地球重点实验室, 北京 100094;
3. 中国科学院大学, 北京 101408)

摘要: 在月球上布设遥感传感器能实现长期、整体、稳定的对地观测, 完善现有系统的观测能力, 尤其是能从地球系统外部来观测地球系统本身的演化过程, 以及地球系统与外部的相互作用和影响。从科学目标、传感器技术、参数模拟和估算方法以及观测站选址4个方面详细论述了月基对地观测研究进展, 围绕涉及的关键科学问题进行推进, 并总结了针对传感器论证、任务设计、数据处理和信息提取提出的一系列新模型和新方法, 对月基对地观测提出了一些发展建议。

关键词: 月基对地观测; 全球辐射平衡; 固体地球宏观运动; 月球基地选址; 合成孔径雷达

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)03-0250-11

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210080

引用格式: 郭华东, 丁翼星, 刘广. 月基对地观测研究现状与展望[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(3): 250-260.

Reference format: GUO H D, DING Y X, LIU G. Research status and prospect of Moon-based Earth observation: a review[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(3): 250-260.

引言

50多年来, 空间对地观测技术已得到了长足发展。自20世纪60年代起, 国际上成功发射了各类人造地球卫星、载人飞船、航天飞机、空间站、深空探测器、日地L1点卫星等, 并实施了大量综合性系列卫星对地观测计划, 所携带的传感器工作波段也覆盖了自可见光、红外到微波的全波段范围。对地观测应用领域得到进一步拓展, 在气候变化、资源环境、地球动力学等领域发挥了重要作用。但是在地球科学研究中, 人们越来越认识到需要将地球作为一个整体进行综合观测, 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。尤其是在研究发生在地球系统内的大尺度地球宏观科学现象并分析其空间相关性、研究各个圈层之间相互联系和相互影响时, 要求参数具有全球尺度上的时间一致性和空间连续性^[1]。地球宏观科学现象的各个方面在复杂的地球系统中具有紧密联系, 需要一个稳定的可提供星球尺度观测能力的对地观测平台综合多传感器空间信息, 并以地球系统关联的形式进行集成和分析。目前对地观测卫星主要运行在两种轨道上: ①低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO), 轨道低, 视野受限, 时空采样均不连续; ②地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit,

GEO), 轨道高, 时空连续性较好, 但是观测角度受限。人们也发展了一些特殊轨道来提高特定的对地观测能力, 然而没有哪种单一平台能解决所有的空间对地观测问题, 发掘不同平台的优势从而组建完整的对地观测系统成为解决这一问题的重要方法。月球是离我们最近的地外天体, 也是人类目前唯一登上过的星球, 为我们提供了一个独特的对地观测场所, 能从地球系统外部来观测地球系统本身的演化过程, 以及地球系统与外部的相互作用和影响。在月球上能够同时实现长期、全面、稳定的对地观测, 在一定程度上弥补了现有对地观测系统在时间一致性和空间连续性方面的不足, 从而为地球科学研究、社会经济发展提供更有力的支撑。

自1958年以来, 卫星和宇宙飞船已经造访月球100多次。包括前苏联、俄罗斯、美国、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、中国、日本和印度在内的国家和机构都开展了自己的月球探测计划。如ESA提出的“月球村”计划, 其目标是由具有航天能力的国家建立一个在科学、商业、采矿甚至旅游方面进行国际合作的月球基地^[2], 而美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)也开始了新的探月任务“阿尔忒弥斯”

收稿日期: 2021-08-31 修回日期: 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(41950853, 41501403); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDY-SSW-DQC026)

(Artemis)^[3]。中国则倡议以“共商共建共享”为原则建设国际月球科研站,以支持长期、较大规模的月球探测、天文及对地观测、科学与技术实验和资源开发利用等工作^[4]。月球表面的永久基地对科学研究和深空探测具有重要意义。对于地球科学来说,它也将提供一个观测地球的独特场所^[5]。

目前成功布设的月基对地观测传感器主要面向地球等离子体观测。1972年“阿波罗16号”(Apollo 16)登月时宇航员就将一台远紫外相机安装在月球表面,用于观测地球等离子体^[6]。2013年“嫦娥二号”的着陆器上携带了一台由中国科学院长春光机所研制的极紫外相机。成功落月后,该相机对地球等离子体进行了长达1年的观测,积累了大量数据^[7]。面向地球的其他圈层,尤其是面向地球气候系统的月基观测目前还在研究阶段,但是也正成为空间对地观测发展的新方向,相关研究成果不断涌现。Guo等^[8]对月基对地观测的科学内涵进行了长期深入探索。研究表明,月基对地观测是观测地球宏观科学现象的有效手段,也是现有空间对地观测系统的良好补充。尤其在观测地球气候系统对日-地-月相互作用的响应时,月基观测能提供特殊视角。月基传感器可用于监测固体地球宏观运动现象、全球辐射平衡的长期趋势与波动、地球生命信号以及近地空间环境。其中,月基地球辐射平衡测量系统有望在10年内登陆月球表面,为监测气候变化提供全新手段^[9]。它由一个宽波段辐射计和一个面阵列成像光谱仪组成,前者用来测量地球向外的短波辐射和长波辐射,后者用来绘制地球表面状态以及关键大气成分的时空分布。

综合起来,月基对地观测相关研究的主要内容可以总结为以下几个方面:①月基对地观测科学目标,主要包括地球科学现象月基观测的必要性、可行性和具体需求;②月基对地观测传感器的论证、设计与关键技术,目前主要研究对象包括月基远紫外-极紫外相机、月基辐射计、月基面阵光谱仪和月基合成孔径雷达等;③利用月基观测数据估计地球物理参数的相关模型与方法;④关于月基对地观测站建站条件的研究,如月球表面地形环境、对地可视性和太阳光照条件等。本文基于笔者近年来承担的国家自然科学基金委重大项目“宏观地球科学现象的月基研究”,从以上几个方面详细讨论目前月基对地观测获得的成果和结论,以及面临的问题和未来的发展方向。

1 月基对地观测特点

与人造平台不同,月基对地观测最大的特点是月

球是一个自然天体平台。作为地球唯一的自然卫星,也是离地球最近的地外天体,月球对地球环境形成发挥着重要作用。在月球上布设传感器进行对地观测具有如下特点^[8]:

1) 长期性:人造卫星的寿命一般是数年到十几年,月球却已经存在45亿年,今后也将长期存在,几乎是一个“永久”的平台。月基对地观测每天都能覆盖地球绝大部分区域一次,每月能以所有地方时覆盖同一区域至少一次,在月球表面建设对地观测站,实现同一平台数十年甚至上百年的对地观测,可消除不同传感器相互校准误差,形成长期的时间序列数据,为全球变化研究提供新的支持。新的支持。

2) 整体性:月基对地观测可以完整覆盖地球近月面,可以将地球作为一个点源来观测地球系统在各个波段的信号特征。而且月球广阔的空间可布设多种传感器、大型传感器,实现对地球各个圈层数据的综合获取,从而达到一种“三维”整体观测的效果。

3) 稳定性:研究表明,月亮缺乏板块构造运动,因此月震活动远比地震活动弱^[10]。与卫星平台相比,月球是一个具有广阔空间的刚性平台,传感器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。

4) 唯一性:月球质量大,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^[11]。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。

2 月基对地观测科学目标研究

2.1 全球辐射平衡

近年来,极端气候的频繁发生正在对人类的生存环境形成严重的挑战。全球气候变化的影响因素众多,其中既有温室气体排放等人为因素,也有太阳辐射变化的自然因素^[12-14]。但对这两种因素的相对重要性认识仍然存在较大差异。另外,全球多个组织机构用不同的模型对全球气候变化趋势的预测也不尽相同,这表明人类对全球气候变化机制的认识还不完善。

从根本上说,全球气候变化取决于地球辐射收支状况^[15]。然而,无论是太阳辐射(收入)还是地球反射或发射辐射(支出)的准确测量都有赖于空间技术的发展。地球辐射平衡研究的目的是获取大气顶层无偏差的、绝对定标的、全球覆盖的平均太阳短波反射

和长波发射通量。从20世纪70年代末期开始,美国和欧洲先后开展了多个专门用于测量太阳和地球辐射的人造地球卫星观测计划^[16-18],从而大大提高了人们对地球能量系统的认识。但是在地球辐射支出中,太阳短波反射能量与反射率、大气条件等密切相关,它被证明具有明显的各向异性,时空采样的多少直接影响到反演结果的精度^[19-21]。目前,由观测结果反演得到的净辐射量不确定性仍然较大,并且与气候模型、海洋热容量估算结果的长期一致性仍然存在争议^[22-24]。这主要是因为现有地球辐射平衡的空间观测数据主要来自低轨地球轨道卫星,其视场、视角和寿命均受到限制,在多传感器数据的相互校正过程中难免引入误差。地球同步轨道是对地观测卫星常用轨道之一,它能整体覆盖星下点所在的地球半球面,但是在观测地面特定目标时方位角和天顶角均为定值,不利于方向半球反射率(directional-hemispherical reflectance)的计算,在极地区域也缺乏覆盖。

利用月基传感器组观测全球辐射平衡将是人类首次在月球上对地球能量平衡进行观测,为全球变化研究提供新的视角,主要优势体现在:①目前在相近区域还未有任何对地观测系统,因此能够得到一组独立的观测数据集;②利用整体观测和多角度观测估算全球能量平衡能有效地解决目前能量平衡观测系统中数据拼接、参数不同步、多平台校准等问题;③可作为低轨观测数据和微光(Earthshine)观测数据的校准基础,有望解决不同数据之间存在的一致性问题。

2.2 固体地球宏观运动现象

固体潮、板块运动及大陆变形、冰川均衡调整(Glacial Isostatic Adjustment, GIA)是典型宏观尺度的固体地球运动现象。对上述固体地球宏观运动现象进行研究,是高精度大地测量学的基本任务。固体地球宏观运动取决于天体引潮力和地球内部构造,目前相关数据主要采用重力或位移等测量等方法获得^[25]。超导重力仪、全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)等仪器虽然可以准确观测固体地球运动,但是只对部分地区开展了有限的点状观测;机载或星载干涉雷达也只能对较小区域进行局部面状观测。这些方法都难以获得长时间跨度的全球图像,尚不能提供时空连续的固体地球宏观运动现象观测能力。相比人造地球卫星,月球是一个十分稳定的平台,可以为干涉测量提供足够长并且稳定的空间基线以及短至1天的时间基线。另外月球也是引起固体地球潮汐效应的主要原因之一,因此月球也为连续跟踪观测固体地球潮汐提供了独特视角。

2.3 地球生命信号特征

除太阳外,其它恒星距离地球非常遥远。在如此遥远的距离寻找与地球相似的、不发光的行星是非常困难的事情。事实上,大部分银河系恒星都应有一颗类似地球的行星^[26],要确定其是否适合人类居住,不仅要看看其是否处于其母恒星的宜居带中,还要分析其大气成分。类地系外行星的最佳探测方法是用大型地基或空间望远镜对其进行直接观测^[27]。一般来说,恒星直射光是非偏振的,而行星反射光通常是偏振的,因此可以通过分析像素中的偏振信号来获取关于行星表面和大气特征的信息^[28]。

地球作为已知的唯一具有生命的行星,是我们最了解的星球,其大气和表面特征已经得到了充分的研究,是研究地外行星生命信号的理想样本。模拟地球单像素信号的模型和方法很多^[29-30],但是真实的单像素信号数据却很缺乏。因此需要像观测系外行星一样对地球进行长期观测。相关研究表明,进行这类观测并建立基准数据集的最佳位置就是月球表面^[27],可以实现整个半球单像素观测,覆盖不同的地相(不同的观测角和太阳角)、覆盖不同季节(不同地表反照率和天气条件)。

2.4 大尺度海陆气相互作用

地球是一个整体系统,其中各个圈层之间、不同区域之间存在复杂的耦合关联。同时,地球宏观科学现象大多具有大尺度且快速变化的特征。传统的卫星遥感,无论是极轨卫星还是静止卫星都无法兼顾地球系统整体性和变化瞬时性的观测,这在很大程度上制约了科学家对地球系统和星际尺度全球变化现象的理解。月基平台的基本特征决定了它在整体理解大尺度海陆气相互作用方面具有无可替代的优势,探索月基对地观测的科学意义之一就是发掘这种潜力。大尺度海陆气相互作用,包括全球海气相互作用、陆气相互作用和边界层大气过程、海陆关联变化和海岸带过程等。这里特别关注地球系统过程的区域分异、累积性变化、空间遥相关、时滞相关、尺度关联等。

2.5 近地空间及地-月空间目标探测

对空间小型自然天体、人造航天器等空间目标进行探测、跟踪、识别和编目,有助于提高人造航天器运行的安全性,也能够及时预警行星撞击等灾难事件。目前部署在地球表面和近地轨道的各种光学、雷达探测器一定程度提高了空间目标监测能力,但是也存在一定的局限性。如地基探测系统往往受到地球大气层的影响,如大气损耗、电离层效应和云雾遮挡

等,而且还有一定的检测盲区。天基系统虽然受地球大气影响较小,但是其寿命和载荷十分受限,监测能力较弱。由于月球表面几乎没有大气层,月基空间目标监测系统传输损耗较小,而且没有大气窗口限制,波段选择更加灵活。月球表面的微重力,使得各种大口径的望远镜和天线更容易设计安装,从而能有效提高对空间目标的监测能力。

2.6 近地空间环境观测

人们发现太阳风的高价粒子与来自地球的中性粒子电荷交换,可以产生软X-射线辐射^[31],能量主要集中在0.2~5 keV。可以以月球为平台,利用软X-射线成像仪对磁层空间进行成像观测,克服单点或多点的就地探测不足,从全球尺度上研究太阳风-磁层相互作用及其变化规律^[32]。

等离子体层是围绕地球的一个低能量等离子体区域,其分布和变化对电离层和磁层产生重要影响。He⁺是地球等离子体层内具有发射光谱的含量最高的粒子,利用He⁺对太阳30.4 nm极紫外辐射的共振散射,可以对等离子体层成像。月基设备能够对等离子体层开展连续观测,从而捕捉到等离子体层在磁暴活动期间的完整动力学过程^[33]。

3 月基对地观测传感器研究

常用的对地观测遥感传感器大致可以分为主动类和被动类。被动类遥感传感器(如加速度计、辐射计、垂直探测仪等非成像型和成像光谱仪、成像辐射计等)主要探测由地球表面反射的太阳辐射或其自身发射辐射。结合月基对地观测科学目标,目前建议选用的传感器有月基宽波段辐射计、月基偏振成像光谱仪以及月基紫外相机。而主动类遥感传感器(如雷达、激光雷达、激光高度计、测距仪、散射计和回波探测器等)需要发射电磁波,经过地球表面目标的反射或散射,再由接收器接收。由于地-月距离较远,一般的主动类传感器会存在发射功率高、系统载荷大和回波信号弱等限制。而合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)在成像处理中引入的距离和方位向压缩可以使信噪比大幅提升,再加上提高发射功率和增加天线增益等进一步手段,成为能够在月球表面布设的少数主动类遥感传感器之一。

利用SAR和成像光谱仪从月球上观察地球在技术上都是可行的。考虑到成本、尺寸、重量和能耗,月基对地观测传感器的参数选择范围并不太宽泛,设计时限制条件比较多,还有很多技术问题需要进一步研究。Guo等^[8]对多种传感器在月基上实现的可行性进行

了讨论,提出月基被动光学对地观测传感器、月基SAR、月基微波辐射计等可以放在月球表面实现月基对地观测。

3.1 月基合成孔径雷达

在对地观测传感器中,SAR是一种主动探测传感器,具有全天时、全天候探测的优点,部分学者对在月球上布设合成孔径雷达的可行性进行了一些探索。Moccia等^[34]和Fornaro等^[35]分别以双天线干涉测图和重轨差分干涉形变测量为主要应用目标提出了月基SAR的系统参数,并简单讨论了长合成时间引起不稳定散射体散焦和位置偏移的问题。Moccia等^[34]提出了采用抛物面天线的X、C和L 3个波段月基干涉对地测图系统,指出其具有高空间分辨率和时间分辨率的特点,并比较了条带模式、聚束模式下的系统表现。Fornaro等^[35]提出采用矩形天线的3个波段SAR系统,对比分析了星载SAR与月基SAR在重轨交轨干涉和顺轨干涉上的系统性能差异。Guo等^[36]提出了面向全球变化观测的月基SAR系统,认为限制SAR在全球变化研究中应用的主要因素是现有的SAR数据幅宽较小,在大区域覆盖时存在明显的时空不一致性。通过分析月基SAR的时空对地覆盖特点后,指出月基SAR更适合宏观尺度地球科学现象的研究,并提出了一个L波段月基SAR实例。李德伟等^[37]也进行了SAR系统关键参数分析与仿真,并提出采用多波束工作模式使测绘带宽达到上千km的观测方案。

在此基础上,近年来出现了一系列关于月基SAR技术问题的研究,包括月基SAR成像问题、月基SAR零多普勒导引、月基SAR覆盖特性等方面。在月基SAR成像方面,Xu和Chen^[38]做了系统性研究。首先,他们提出在月基SAR长积分时间内,任何地球和月球相对运动的不均匀性都会引起距离曲线的变化,而传播过程中的长时间延迟也使得传统机载星载成像中的“停-走”假设不再有效。基于泰勒四阶分解,他们首次建立了月基SAR回波信号模型,并推导了简化条件下的回波二维谱^[39]。后续研究又根据等效速度和等效斜视角,提出了一种扩展双曲线距离方程,并建立了相应的信号模型,为实现月基SAR点目标聚焦奠定了坚实的理论基础。此外,地-月的不规则运动和大气对电磁波传播的影响也会引起回波信号的变化。研究进一步定量分析了地球曲率与月球公转^[40]、地球不规则自转^[41]、时变电离层^[42]以及月球轨道拱线进动^[43]对月基SAR成像的影响。零多普勒中心导引是提高SAR成像质量和降低信号处理难度的重要步骤。星载SAR的零多普勒导引是通过偏航控制来实现的,而月基

SAR的平台是一个自然天体,无法人为改变月球的姿态来补偿SAR的多普勒中心频率。因此,需要从月基SAR的成像几何出发,提出适用于月基SAR的零多普勒导引方法。Dong等^[44]提出了一种计算零多普勒中心的方法,研究了零多普勒线的时空分布。Xu等^[45]通过理论推导月基SAR的多普勒中心频率表达式,系统研究了月基SAR的多普勒特性,在此基础上提出一种在不旋转平台的情况下最小化多普勒中心的导引方法。

目前,月基SAR在数据采集和处理方法上研究较为深入,但还是存在一些问题。例如现阶段模拟以点目标为观测对象,而对分布式目标的模拟及仿真成像计算量巨大,需要发展相应的快速算法。另外,如何在月球上建立起一个巨大的雷达系统也是亟待研究的问题。可以预见的是月基SAR的工程实施对于目前人类的技术水平来说将是一个巨大的挑战,未来需要依托永久并且具有一定规模的月球载人基地才能逐步完成设计。目前可以开展一些前瞻性研究,包括月面环境对仪器设备的影响、月表大型温控装置、月表大功率供能系统等,为月基SAR的详细设计提供理论和技术支持。

3.2 月基宽波段辐射计和月基偏振多光谱仪

光学传感器是对地观测的重要手段,用于对地球大气和地表相关参数的观测和研究。从月基角度对地球进行光学观测的优势在于其视场角能够覆盖大部分的半球区域,并且提供长时间稳定的实时大气和地表参数。实时观测半球区域对于研究很多快速变化的大尺度地表和大气现象有重要的意义,例如对地球径向的能量传输、南北极区域海冰和气温的研究、大气顶层辐射和全球能量平衡等。

针对全球辐射平衡的观测目标,一个由宽波段辐射计和月基偏振多光谱仪组成的传感器组将在未来降落到月球表面开展工作^[9]。辐射计主要用来获取特定波段的方向辐射亮度。通过与多光谱成像仪的协作,辐射计观测到的辐射亮度可以用于估算大气顶层和地表的辐射通量,以及地球能量收支。光谱仪主要用来同步观测地表反射率、云、气溶胶和部分温室气体。国内一些研究机构已经开展了部分与月基传感器组设计相关的工作,如Duan等^[46-47]利用各向同性模型计算了辐射计入瞳处的辐照度,并基于此给出了一些合适的传感器参数;Yuan等^[48]探索了月基微波辐射计的可行性,并以地表温度反演为应用目标对月基微波辐射计的参数进行了初步设计;Li等^[49]研究了光学图像的成像模式和图像处理问题。其它相关研究还包括月基光谱仪成像分辨率^[50]、外方位元素对定位精度的影响^[51]、

时间采样间隔的选择^[52]等问题。

在月球上架设这两个传感器已无明显技术障碍,在数据采集和处理方法上也可以借鉴星载系统成熟的总体思路。然而,仪器的测量精度、稳定性、采样率等指标与应用需求的理论关系还不清楚,这直接影响到辐射计测量数据能否反映地球向外辐射的长期波动与变化趋势,以及该数据能否用于估算可靠的地球辐射收支差额数据。因此相关的理论建模与精度分析将是下一步的研究重点。

3.3 月基紫外相机与软X射线成像仪

“阿波罗16号”任务期间在月球表面的三脚架上放置了一台施密特相机,其主要目标之一是获得50~160 nm波长范围内的地球大气和地冕光谱和图像^[53]。这个远紫外波段包含了地球大气和地冕中大多数原子和分子的共振谱线。相机孔径7.5 cm,既可以直接对地球拍照,也可以利用一个光栅作为光谱仪使用。“嫦娥三号”任务中的月基极紫外相机安装在月球着陆器的顶部,对地球等离子体层He⁺共振散射的30.4 nm辐射进行成像。中国的极紫外相机在登月之前也做了大量的设计工作^[54-55]。相机中心波长30.4 nm,波段宽4.6 nm,视场角为14.7°,角分辨率为0.08°。郭亦鸿等^[32]初步设计了月基软X射线成像仪,采用宽视场软X射线望远镜,可以对太阳风电荷交换过程产生的软X射线进行动态成像。

4 月基观测相关模型与地球物理参数的估算方法研究

4.1 月基对地观测几何模型

开展月基对地观测研究首先要厘清传感器和观测目标及其与太阳光照方向之间的几何关系。针对不同的应用,对几何关系模型的精度要求也不同,我们将其分为简化模型、一般模型和高精度模型3个层次。简化模型主要用于传感器的需求分析和初步设计,一般模型主要用于传感器详细设计、选址和研发数据处理方法,高精度几何模型主要用于月基SAR成像和传感器运行指向分析等方面。

与月基对地观测相关的很多研究都在不同程度上涉及到了观测几何模型。Fornaro等^[35]利用简化几何模型分析了月基SAR系统性能。该简化模型只考虑了地-月相对运动中的地球自转分量,这是由于地球自转加速度约为月球公转角速度的27倍,因此月基SAR的多普勒带宽主要来自于地球自转。Guo等^[36]也利用简化模型对月基SAR的多普勒带宽进行了分析。Moccia等^[34]利用ELP2000和IAU章动理论建立了一个半解析的简化

几何模型用于月基SAR系统分析。该模型假设月球轨道在黄道面内并且月球自转轴与轨道平面垂直。何飞^[56]利用理想轨道模型和月球平均运动参数为计算传感器指向建立了几何模型。丁翼星等^[57-58]用喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的DE星历建立了用于SAR对地观测的几何模型,并在考虑光行差效应的情况下建立了高精度几何模型。Liu等^[59]分析了椭球条件下月基对地观测的一些几何特性。另外,利用月基对地观测几何模型分析月基传感器的时空覆盖特征也研究得较为深入。Sui等^[60]研究了月基对地观测的南北极覆盖特性,Liu等^[61]以南北极海冰为观测目标讨论了月基观测极地冰盖的可行性,Ye等^[62]分析了光学传感器的指向变化特点,Shen等^[63]建立了一个月基对地观测几何关系模拟系统。其它相关研究还包括文献^[64~69]。总体来说,月基对地观测几何模型是最早的研究方向之一,研究较为深入,也为其它各项月基对地观测研究提供了坚实的基础。

4.2 地球辐射平衡的月基估算方法

地球大气顶层向外辐射,特别是短波辐射,具有显著的各向异性特征。地球大气顶层向外辐射的各向异性,可以通过地球向外辐射的角度分布函数来表述。但是,之前的地球辐射角度分布函数都是基于已有的卫星观测数据,对地球的局部区域进行观测获得的。为了发挥月基整体观测的优势,需要建立一个不同于卫星的估算方法。基于此思路,Shang等^[70]将地球视作一个各向异性的点辐射源,通过卫星数据和再分析数据计算了地球整体的各向异性因子,并模拟建立了一个全球角度分布模型,可以将月基观测到的地球大气顶层向外辐射亮温转换成辐射通量。通过月基观测数据的不断积累,可以实现各向异性因子的不断更新优化,最终得到真实的全球角度分布模型。另外,地球向外辐射的各向异性与视场内地球的光照面积、海陆分布、云覆盖等参数密切相关,因此研究它们对全球各向异性的影响是保证估算结果精度的关键。

4.3 固体地球大尺度运动的月基InSAR反演方法

固体地球大尺度运动可以用月基InSAR方法来提取。Dong等^[71-72]给出了其时-空基线和有效空间覆盖的计算方法,分析了时-空基线的分布特点。李德伟等^[73]利用固体潮位移理论模型,根据InSAR测量基本原理和Sentinel-1卫星成像参数,模拟了固体潮位移InSAR相位,发现固体潮位移对InSAR广域地表形变监测存在较大影响。Wu等^[74]则以固体潮汐为观测目标,在比较各种观测模式后,选择了单站重轨差分干涉进行模拟,主要考虑了3种信号带宽下观测几何对月基

InSAR的限制,为传感器的设计提供了参考。当前研究主要基于初步模拟,很多影响因子在分析时被简化了,例如没有针对不同系统参数进行分析,未考虑电离层与大气层水汽对不同波段的影响、回波信噪比差异引起的误差等,这些都需要通过进一步模拟分析来解决。

4.4 地表温度的月基估算方法

地表温度变化是全球变化的直接表达,获取全球地表温度数据是对地观测的最基本任务之一。月基观测提供了一种快速获取地表温度的方法,同时对于建立全球角度分布函数来说也十分重要。Nie等^[75]提出了一种模拟月基观测地球表面温度数据的方法。他们采用改进的陆地表面昼夜温度循环法,利用中分辨率成像光谱仪(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)地表温度产品获得任意协调世界时月基视角下的全球地表温度数据。Yuan等^[76]发展了一种适合于宽观测天顶角的从被动微波数据中反演地表温度的方法,通过分析各种大气和电离层参数,可以同时估计地表温度和发射率。Liao等^[77]发展了一种热红外波段的月基对地观测成像模拟方法,用于研究月基热红外成像过程。该方法包括3个部分:基于月球的成像覆盖估计、入射光瞳处辐射强度的获取以及基于月球的热红外传感器的模拟图像输出。地表温度的月基反演相关研究主要集中在数据模拟方面,而数据应用、精度分析和传感器设计等研究较少。

5 月球对地观测选址研究

与星载地球观测不同的是,月基对地观测需要在月球表面确定一个观测位置。目前关于选址的综合性研究不多,但是针对选址影响因子的研究较为丰富。影响月基对地观测选址的因素有很多,大致可以分为4大类:观测条件、光照条件、地形条件和环境地质条件。

观测条件是最重要的选址条件,这里主要是指月基对地观测的可视性。月基对地观测可视性要求传感器能够一直观测整个地球近月面,能够连续、完整地接收整个半球的数据。由于潮汐锁定,月球有一面几乎总是朝着地球(月球近地面),因此在月球近地面除去边缘地带的绝大部分区域,均能符合可视性要求。目前,仅有的两次月基对地观测实验均将设备放置在此区域内。一次是美国“阿波罗16号”的远紫外相机,放置于月面(15.50°E, 8.96°S)处;另一次是中国的极紫外相机,放置在月面(19.51°W, 44.12°N)处。此外,月面位置也会对月基传感器设计运行造成一些影响,如运行指向^[58, 62]、雷达多普勒参数^[57]、零多

普勒导引^[44-45]等。由于一般的传感器指向装置采用方位-俯仰二维转台设计,因此月基传感器尽量不放置在过于靠近月面中心的位置,以免造成方位向旋转机构承受较大的负荷^[58]。

关于月面光照分布的研究较多,中低纬度的光照分布差异不大,而极区由于地形影响较为特殊。通过对18.6年一个物理天平动长周期内的光照条件进行演化计算,在月球两极未发现永久光照区,但存在永久阴影区^[78]。光照可以为仪器设备提供能源,但是也会引入大量热噪声,从而影响数据质量。可以认为,在早期任务中,太阳光照能够为任务实施带来一定便利,但是对于长期永久性的月基对地观测站来说,长期阴影区更适合于获取长期稳定的数据。

地形不仅影响可视性和光照条件,其本身也是关乎设备着陆、运输和架设的重要影响因子。将月基对地观测传感器或月基对地观测站建立在地形较为平缓的区域,如月海、环形坑底部或月面高地上比较平缓的区域,将有利于工程实现。

月表的环境地质条件对月基仪器的布设和运行也有一定影响,如月壤的稳定性、月尘及辐射对仪器的损害、月球电离层等对观测数据的影响等。另外,稳定的热环境对设备的正常运行也很重要。

在综合选址原则方面,中国科学院国家天文台研究团队在月基对地观测需求和现有工程任务能力基础上,提出了中国月基对地观测选址技术流程、选址原则及评价标准^[79]。在后续研究中,又针对光学对地观测提出了虹湾(Sinus Iridum)(31.67°W, 45.1°N)、酒海(Mare Nectaris)(34°E, 16°S)和沙克尔顿(Shackleton)撞击坑边缘(129.2°E, 89.7°S)3个候选区。

另外,针对不同的观测任务和传感器,选址标准具有一定区别。对于小型的被动光学类设备,限制条件较少,选址较为灵活。对于大型合成孔径雷达系统,需建在较为平坦的区域,如月球正面的月海区域。如果需要形成多天线干涉雷达系统,还需要考虑基线在月球表面的位置。

6 月基对地观测研究展望

月基对地观测在地球科学领域的很多方面都展现了其特殊价值,下一步的研究工作可以考虑从以下几个方面继续深入。

1) 加强月基对地观测科学目标的探索

首先应该关注月基对地观测的科学目标,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,如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-月相互作用现象等。

2) 研究月基对地观测相关新技术

积极跟踪新传感器技术的发展,开拓技术视野,不仅要研究现有技术发展水平所能提供的月基对地观测能力,而且需要考虑未来20~30年、技术大突破以及技术理论极限所能够给予月基对地观测的支持。相关技术包括先进传感器技术、月基超远距离成像技术、地-月通讯技术、月面能源供给技术、Gbit数据超远距离传输技术、月基甚长基线干涉测量技术、月面仪器防护技术等。

3) 拓展月基对地观测概念

将月基对地观测概念延伸至月球轨道、绕月轨道、地-月拉格朗日点观测。地-月拉格朗日点能与月基组成对地球全覆盖的观测网络,同时也能形成长基线编队飞行,从而丰富任务链。建议未来以月基多传感器对地观测站为基础,结合月球轨道飞行器、地-月拉格朗日点飞行器及绕月轨道飞行器及其它对地观测新型平台,形成具有同时全球覆盖能力和独特观测方法的广义月基对地观测系统。

4) 确定近、中、长期发展目标并制定相应规划

做好月基对地观测发展规划,厘清近期、中期和远期研究内容的发展目标。需要国家战略与国家大科学计划相结合,特别是与国家探月工程、空间基础设施发展和载人航天结合,建立长远发展规划,制定逐步实现路线图。在实施上,应考虑技术成熟的、容易实现的传感器先布设,而大型的、技术或成本过高的传感器要根据人类科技水平的发展再做探讨。

5) 加速研究,引领国际合作

加快月基对地观测相关研究,在国际上率先提出该领域的国际合作计划,争取国际领导地位。加强官方和民间的国际合作,从更顶层的视野来考虑相关问题。

参 考 文 献

- [1] ROSENQVIST A, SHIMADA M, CHAPMAN B, et al. The global rain forest mapping project—a review[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(6-7): 1375-1387.
- [2] WOERNER J, FOING B. The “Moon village” concept and initiative[C]// Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis

- Group. Columbia: [s. n.], 2016.
- [3] NASA. What is artemis?[EB/OL]. (2019-07-26)[2021-08-31]. <https://www.nasa.gov/feature/what-is-artemis/>.
- [4] 裴照宇,刘继忠,王倩,等.月球探测进展与国际月球科研站[J].科学通报,2020,65(24):2577-2586.
- PEI Z Y, LIU J Z, WANG Q, et al. Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(24): 2577-2586.
- [5] 欧阳自远.我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J].地球科学进展,2004,19(3):351-358.
- OUYANG Z Y. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy[J]. *Advance In Earth Sciences*, 2004, 19(3): 351-358.
- [6] CARRUTHERS G R, PAGE T. Apollo 16 far-ultraviolet camera/spectrograph: Earth observations[J]. *Science*, 1972, 177(4051): 788-791.
- [7] FENG J, LIU J, HE F, et al. Data processing and initial results from the CE-3 extreme ultraviolet camera[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(12): 1664.
- [8] GUO H, LIU G, DING Y. Moon-based Earth observation: scientific concept and potential applications[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018, 11(6): 546-557.
- [9] XU L, ZOU Y L, JIA Y Z. China's planning for deep space exploration and lunar exploration before 2030[J]. Chinese Journal of Space Science, 2018, 38(5): 11-12.
- [10] 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.
- [11] COCHRAN E S, VIDALE J E, TANAKA S, et al. Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes.[J]. *Science*, 2004, 306(5699): 1164-1166.
- [12] HANSEN J, SATO M, KHARECHA P, et al. Earth's energy imbalance and implications[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(9): 27031-27105.
- [13] WILD M, D FOLINI, SCHAER C, et al. The global energy balance from a surface perspective[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 40(11-12): 3107-3134.
- [14] HARTMANN D L, OCKERT-BELL M E, MICHELSEN M L. The effect of cloud type on Earth's energy balance: global analysis[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(11): 1281-1304.
- [15] SCHUCKMANN K V, PALMER M D, TRENBERTH K E, et al. An imperative to monitor Earth's energy imbalance[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 138-144.
- [16] ANDERSON D E, CA HALAN R F. The Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) mission for the NASA Earth Observing System (EOS)[J]. *Solar Physics*, 2005, 230(1-2): 3-6.
- [17] WIELICKI B A. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): algorithm overview[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 36(4): 1127-1141.
- [18] TRÉMAS T L, KAROUCHE N, ROSAK A, et al. ScaRaB: first results of the scanner for radiative budget on board the Indo-French satellite Megha-Tropiques[C]// SPIE Optical Engineering + Applications. San Diego: SPIE, 2012.
- [19] WIELICKI B A, WONG T, YOUNG D F, et al. Differences between ERBE and CERES tropical mean fluxes: ENSO, climate change or calibration?: 19990064101[R]. [S. l.]: NASA Langley Technical Report Server, 1999.
- [20] FRÖHLICH C. Total solar irradiance observations[J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(3-4): 453-473.
- [21] FRÖHLICH C, LEAN J. The Sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(23): 4377-4380.
- [22] LOEB N G, WIELICKI B A, DOELLING D R, et al. Toward optimal closure of the Earth's top-of-atmosphere radiation budget[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 748-766.
- [23] TRENBERTH K E, FASULLO J T. Tracking Earth's energy[J]. *Science*, 2010, 328(5976): 316-317.
- [24] LOEB N G, LYMAN J M, JOHNSON G C, et al. Observed changes in top-of-the-atmosphere radiation and upper-ocean heating consistent within uncertainty[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(2): 110-113.
- [25] 许厚泽,张赤军.我国大地重力学和固体潮研究进展[J].地球物理学报,1997,40(S1):192-205.
- XU H Z, ZHANG C J. Development of the studies on geodetic gravity and Earth tides in China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(S1): 192-205.
- [26] CASSAN A, KUBAS D, BEAULIEU J P, et al. One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations[J]. *Nature*, 2012, 481: 167-69.
- [27] KARALIDI T, STAM D M, SNIK F, et al. Observing the Earth as an exoplanet with LOUPE, the lunar observatory for unresolved polarimetry of Earth[J]. *Planetary & Space Science*, 2012, 74(1): 202-207.
- [28] SPARKS W B, HOUGH J, GERMER T A, et al. Detection of circular polarization in light scattered from photosynthetic microbes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(19): 7816-7821.
- [29] TINETTI G, MEADOWS V S, CRISP D, et al. Detectability of planetary characteristics in disk-averaged spectra. I: the Earth model[J]. *Astrobiology*, 2006, 6(1): 34-47.
- [30] KALTENEGGER L, TRAUB W A, JUCKS K W. Spectral evolution of an Earth-like planet[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 658(1): 598-616.
- [31] BHARDWAJ A, ELSNER R F, RANDALL G G, et al. X-rays from solar system objects[J]. *Planetary and Space Science*, 2007, 55(9): 1135-1189.
- [32] 郭亦鸿,王赤,韦飞,等.月基软X射线成像仪——对地球磁层的全景观测[J].中国科学:地球科学,2021,51(7):1009-1017.
- GUO Y H, WANG C, WEI F, et al. A Lunar-based Soft X-ray Imager (LSXI) for the Earth's magnetosphere[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(7): 1026-1035.
- [33] 何飞,陈波,张效信.月基观测地球等离子体层极紫外辐射特性[J].光学精密工程,2010(12):2564-2573.
- HE F, CHEN B, ZHANG X X. Moon-based imaging of Earth plasmaspheric extreme ultraviolet radiation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010(12): 2564-2573.
- [34] MOCCIA A, RENGA A. Synthetic aperture radar for Earth observation from a lunar base: performance and potential applications[J]. *IEEE T Aero Elec Sys*, 2010, 46: 1034-1051.
- [35] FORNARO G, FRANCESCHETTI G, LOMBARDINI F, et al. Potentials and limitations of Moon-borne SAR imaging[J]. *IEEE T*

- Geosci Remote Sens*, 2010, 48: 3009-3019.
- [36] 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]. *Science China: Earth Sciences*, 2013(11): 1760-1769.
- [37] 李德伟, 江利明, 蒋厚军, 等. 月基SAR对地观测系统参数分析[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(4): 66-72.
LI D W, JIANG L M, JIANG H J, et al. System parameters analysis of the Moon-based SAR Earth observation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(4): 66-72.
- [38] XU Z, CHEN K S, GUO H. Doppler estimation with “Non-Stop-and-Go” assumption in Moon-based SAR imaging[C]// 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE, 2018.
- [39] XU Z, CHEN K S. On signal modeling of Moon-based Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging of Earth[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 486-511.
- [40] XU Z, CHEN K S. Effects of the Earth's curvature and lunar revolution on the imaging performance of the Moon-based synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 5868-5882.
- [41] XU Z, CHEN K S, ZHOU G. Effects of the Earth's irregular rotation on the Moon-based synthetic aperture radar imaging[J]. *IEEE Access*, 2019, 99: 155014-155027.
- [42] XU Z, CHEN K S, GUO H. Effects of temporally-varying tropospheric path delay on the imaging performance of Moon-based SAR[C]// 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - Fall). Xiamen: [s. n.], 2019.
- [43] XU Z, CHEN K S, LI Z L, et al. Apsidal precession effects on the lunar-based synthetic aperture radar imaging performance[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(6): 1079-1083.
- [44] DONG J, SHEN Q, JIANG H, et al. Spatio-temporal distribution of the zero-Doppler line of lunar-based SAR[J]. *Remote Sensing Letters*, 2020, 12(2): 165-173.
- [45] XU Z, CHEN K S, ZHOU G. Zero-Doppler centroid steering for the Moon-based synthetic aperture radar: a theoretical analysis[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(7): 1208-1212.
- [46] DUAN W T, HUANG S P, NIE C W. Entrance pupil irradiance estimating model for a Moon-based Earth radiation observatory instrument[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 583-600.
- [47] DUAN W T, HUANG S P, NIE C W. Conceptual design of a Moon-based Earth radiation observatory[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(18): 5834-5849.
- [48] YUAN L, LIAO J. A physical-based algorithm for retrieving land surface temperature from Moon-based Earth observation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 1856-1866.
- [49] LI T, GUO H, ZHANG L, et al. Simulation of Moon-based Earth observation optical image processing methods for global change study[J]. *Frontier of Earth Science*, 2020(1): 236-250.
- [50] 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), 41(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)*, 41(10): 96-102.
- [51] GUO H, YE H, LIU G, et al. Error analysis of exterior orientation elements on geolocation for a Moon-based Earth observation optical sensor[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018, 13(11): 374-392.
- [52] YE H, GUO H, LIU G, et al. Temporal sampling error analysis of the Earth's outgoing radiation from a Moon-based platform[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(17-18): 6975-6992.
- [53] CARRUTHERS G R. Apollo 16 far-ultraviolet camera/spectrograph: instrument and operations[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(10): 2501-2508.
- [54] 李朝辉. 月基对地观测极紫外相机光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2352-2356.
LI Z H. Optomechanical design of lunar based EUV camera for mapping the Earth[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(10): 2352-2356.
- [55] 王智, 李朝辉. 月基极紫外相机光机结构设计[J]. 光学精密工程, 2011(10): 125-131.
WANG Z, LI M H. Design of optical-mechanical structure for lunar-based extreme ultraviolet camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011(10): 125-131.
- [56] 何飞. 月基地球等离子体层极紫外观测与图像反演方法研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2011.
HE F. Moon-based extreme ultraviolet observations of the Earth's plasmasphere and image inversion methods[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2011.
- [57] 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.
- [58] DING Y, GUO H, LIU G, et al. Constructing a high-accuracy geometric model for Moon-based Earth observation[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(22): 2611.
- [59] LIU G, GUO H, HANSEN R F. Characteristics analysis of Moon-based Earth observation under the ellipsoid model[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(23): 9121-9139.
- [60] SUI Y, GUO H, LIU G, et al. Analysis of long-term Moon-based observation characteristics for Arctic and Antarctic[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2805.
- [61] LIU H, GUO H, LIU G, et al. An exploratory study on Moon-based observation coverage of sea ice from the geometry[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(16): 6089-6098.
- [62] YE H, GUO H, LIU G, et al. Looking vector direction analysis for the moon-based earth observation optical sensor[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(11): 4488-4499.
- [63] SHEN G, GUO H, LIU G, et al. Geometry numerical simulation and analysis for Moon-based Earth observation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 3381-3393.
- [64] ZHANG L, GUO H, JIAO H, et al. A polar coordinate system based on a projection surface for Moon-based Earth observation images[J].

- Advances in Space Research*, 2019, 64(11): 2209-2220.
- [65] XU Z, CHEN K S, LIU G, et al. Spatiotemporal coverage of a Moon-based synthetic aperture radar: theoretical analyses and numerical simulations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(12): 8735-8750.
- [66] REN Y, GUO H, LIU G, et al. Simulation study of geometric characteristics and coverage for Moon-based Earth observation in the electro-optical region[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(6): 2431-2440.
- [67] YE H, GUO H, LIU G, et al. Observation duration analysis for Earth surface features from a Moon-based platform[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 62(2): 274-287.
- [68] HUANG J, GUO H, LIU G, et al. Spatio-temporal characteristics for Moon-based Earth observations[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2848.
- [69] WANG H, GUO Q, LI A, et al. Comparative study on the observation duration of the two-polar regions of the Earth from four specific sites on the Moon [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(1): 339-352.
- [70] SHANG H, DING Y, GUO H, et al. Simulation of Earth's outward radiative flux and its radiance in Moon-based view[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(13): 2535.
- [71] DONG J, SHEN Q, JIANG L, et al. An analysis of spatiotemporal baseline and effective spatial coverage for lunar-based sar repeat-track interferometry[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(9): 3458-3469.
- [72] 董景龙, 江利明, 沈强, 等. 月基SAR 重复轨道干涉测量时-空基线分析[J]. *测绘学报*, 2019, 48(7): 849-861.
DONG J L, JIANG L M, SHEN Q, et al. Spatio-temporal baseline analysis of lunar-based repeat-track SAR interferometry[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 849-861.
- [73] 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.
- [74] WU K, JI C, LUO L, et al. Simulation study of Moon-based InSAR observation for solid Earth tides[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 123.
- [75] NIE C, LIAO J, SHEN G, et al. Simulation of the land surface temperature from Moon-based Earth observations[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(2): 826-839.
- [76] 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*, 2020(14): 430-445.
- [77] LIAO J, YUAN L, NIE C. A simulation method for thermal infrared imagery from Moon-based Earth observations[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 7736-7747.
- [78] 张吉栋, 孟治国, 平劲松, 等. 基于LOLA数据的Aristarchus高原光照特性初步研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(2): 171-177.
ZHANG J D, MENG Z G, PING J S, et al. Preliminary study of illumination characteristics of Aristarchus plateau using LOLA data[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(2): 171-177.
- [79] 贾瑛卓, 邹永廖. 月基对地观测对月球基地选址需求分析[J]. *航天器工程*, 2016, 25(6): 116-121.
JIA Y Z, ZOU Y L. Research on lunar site selection for lunar based Earth observation[J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(6): 116-121.

作者简介:

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。
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 Status and Prospect of Moon-Based Earth Observation: A Review

GUO Huadong^{1,2,3}, DING Yixing^{1,2}, LIU Guang^{1,2}

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

2. Key laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: The deployment of remote sensing sensors on the Moon can realize long-term, overall and stable Earth observation and improve the observation ability of the existing system. In particular, from the outside of the Earth system, the Moon-based remote sensors can observe the evolution process of the earth system and the interaction and influence between the earth system and its exterior. This paper discusses the research progress of Moon-based earth observation in detail from four aspects: scientific objectives, sensor technology, parameter simulation and estimation methods and observatory location. The key scientific problems are analyzed, and a series of new models and methods are summarized. At the end of this paper, some suggestions for the development of Moon-based Earth observation are put forward.

Keywords: Moon-based Earth observation; Earth's radiation budget; large scale motion of solid Earth; site selection of Moon base; synthetic aperture radar

Highlights:

- Moon-based Earth observation is characterized by long-term, integrity, stability and uniqueness.
- The Moon-based interferometric radar is expected to be the only method to continuously observe the macroscopic motion of the solid Earth.
- The Moon-based wide-band radiometer and array spectrometer provide a new perspective for Earth's radiation budget balance observation.
- Exploring new scientific objectives and developing new space and Earth observation technologies are the main directions of future Moon-based Earth observation research.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]