

面向地球固体潮广域观测的空间技术发展综合分析

吴凯^{1,2}, 纪策^{1,2}, 骆磊¹, 王心源¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 地球固体潮的观测和研究一直是地球科学研究的重点内容。地面台站分布稀疏且不均匀, 且不同台站的观测结果受局地环境影响, 难以实现大尺度时间一致空间连续的固体潮观测, 固体潮广域观测需要依赖空间技术的发展。本文通过理论模型模拟得到了固体潮全球尺度下的时空分布特征, 并从这些特征出发讨论了与固体潮观测相匹配的空间技术, 主要包括重力卫星数据解算时变地球重力场能力以及 InSAR 技术的广域地面点位移动监测能力。然后就 InSAR 技术在时间基线和测绘带宽度上的需求, 对低轨、倾斜同步卫星轨道、月基 3 种对地观测平台进行模拟, 定性和定量地对比分析了各平台的优势与不足。结果表明, 新一代重力卫星组网和新的遥感对地观测概念平台均具备固体潮广域观测潜力, 其中月基 InSAR 可以发展成为最理想手段, 各类空间技术的发展可以为月基平台失相干时段提供一定补充, 实现优势互补。

关键词: 地球固体潮, 空间技术, 轨道星历, 广域观测, 地球科学

中图分类号: P312.4/P2

引用格式: 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

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 [DOI: 10.11834/jrs.20210553]

1 引言

地球固体潮是一种由日、月和其他天体对地球的引力作用所导致的地球内部和表面周期性形变的现象。该形变在中低纬度地表沿半径方向分量可达 40—50 cm, 产生的地面重力潮变化可以达到 200—350 μGal (10^{-8} m/s^2) (Dehant 等, 1999; 许厚泽, 2010)。固体潮是众多地球物理现象中唯一拥有明确力源和一定周期性的宏观固体地球运动, 现代天文学可以精确预测引潮位的大小 (许厚泽和张赤军, 1997)。理论上, 地球的潮汐形变是引潮力作用下的受迫运动, 满足最基本的牛顿运动定律, 而地球引力位的扰动满足泊松方程, 二者构成的地球潮汐基本运动方程结合地球介质的本构关系以及固体潮观测数据, 就可以为地球内部界面分布、内部介质分层以及基本物理参数的分布提供新的约束条件。因此, 作为一门联系

天文学、大地测量学和地球物理学的重要交叉学科, 固体潮的观测和研究意义重大 (方俊, 1984)。

重力仪、倾斜仪及应变仪是目前观测和研究地球固体潮的主要仪器, 它们分别通过测量重力变化、地面点垂线偏差以及潮汐应变来获取固体潮信息。随着科学技术的发展, 这些观测仪器均分别达到了较高的精度, 可以满足固体潮地面观测的需求。其中, 超导重力仪已被国际同行公认是连续性和稳定性最好的仪器, 精度可以达到 0.05 μGal 甚至更高 (周江存 等, 2009; 陈晓东, 2003; Goodkind, 1999)。然而, 这些测量手段存有共同的局限性, 它们获取的只是某个站点的固体潮变化情况, 需要较为密集的地面台站协同工作来获取广域地壳状态, 例如要实现全球 100 km 空间分辨率的固体潮观测需要上万个台站, 多台站协同解算难度与台站数量成正比, 这种程度的人力物力以及地面资源消耗并不可行。目前固体

收稿日期: 2021-01-06; 预印本: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41590854); 国家重点研发计划 (编号: 2022YFB3902100); 中国科学院前沿科学重点研究计划 (编号: QYZDY-SSW-DQC026)

第一作者简介: 吴凯, 研究方向为月基对地观测 SAR 传感器理论。E-mail: scwukail@163.com

通信作者简介: 王心源, 研究方向为空间考古、数字自然与文化遗产保护与固体地球月基对地观测等。E-mail: wangxy@aircas.ac.cn

潮台站在全球分布稀疏且不均匀,不同台站的观测环境及条件相差很大,测得的潮汐因子中包含着较强的局部环境因素影响(许厚泽,2010)。尤其在沿海地区,海洋负荷潮对重力值的影响可达固体潮的10%,实际潮汐因子分布更为复杂,无论是经典的Wahr模型还是各国使用的经验值模型都不能很好地反映潮汐因子实际情况,实测值改正非常关键(李建国等,2012;许厚泽等,1982)。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,固体潮广域观测需要依赖空间技术的发展。

空间技术中与固体潮有关的观测手段包括重力场观测和地面点位移观测,目前拥有相应观测能力的技术手段主要有重力卫星、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InSAR等。其中一些技术已经在固体潮研究做出了一定贡献,例如利用超过十年的VLBI或SLR测距资料解算部分分潮波勒夫数(彭碧波等,2000;Mitrovica等,1994),利用GPS技术对重力固体潮观测中的非对称大气残差进行校正(Watson等,2006;Penna等,2007)等。不同空间技术的信息获取侧重点有所区别,各种空间技术的组合应用可望获取固体潮响应本身的广域信息。对于重力场观测,卫星跟踪、测高、重力、地面观测或船测等数据结合可以提升时空分辨率和观测精度(宁津生等,2013)。而对于地面点位移观测,合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术与GNSS、VLBI、SLR等空间测距手段进行结合,既可以发挥测距技术高精度的优势又可以发挥InSAR全天时全天候高点位密度等优势,同时克服了GNSS等技术的空间取样不足与InSAR技术干涉相位信噪比、基线估算精度、水平变形敏感度等方面的问题(乔海波等,2004)。InSAR技术目前的主要发展趋势是更加广域、更加精细化,并且要面向解决科学问题(姚鑫等,2020;李广宇等,2018;李德伟等,2019),目前提出的多种新型遥感平台,如倾斜同步轨道平台和月基平台,均提到了广域地壳形变监测的科学目标,特别是固体潮现象引起的地壳形变(Guo等,2014;Bruno和Hobbs,2010)。固体潮现象的广域观测作为一个重要科学问题正面临着巨大的挑战,探讨不同观测技术的发展潜能意义重大。

本文立足现有的地球固体潮汐理论,根据固

体潮信息分布时空特征归纳总结了固体潮广域观测在时空分辨率、精度以及观测范围等方面的需求指标。然后从分析得出的广域观测需求出发,结合所涉及的技术手段特点以及空间平台发展,探讨了不同技术和平台的优势与不足。在观测技术上,重点探讨了重力卫星解算时变地球重力场以及InSAR技术与测距手段结合的广域地面点位移监测的发展潜力;在观测平台上,就InSAR技术的时间基线和测绘带宽度发展需求,对低轨、倾斜同步卫星轨道、月基3种空间平台轨道进行模拟。分析后得出新一代空间技术具有不同程度的固体潮宏观观测潜力,其中,月基InSAR所展现出的超宽测绘带、隔日重访能力、以及月球平台本身的特点,可以有效规避一些重要问题,如图像拼接相位误差、载荷以及寿命上的限制、轨道稳定性与时空采样不足等。再加上月球作为固体潮现象的主要力源,该视角拥有最佳的观测效果,如始终可以观测到梯度最大的固体潮形变区域,多角度观测获取水平形变效果最佳,可以方便地将耦合的日月潮汐分开等,使其可以发展为固体潮广域观测最理想手段。倾斜同步轨道卫星平台和新一代重力卫星编队技术发展可以为月基InSAR失相干时段提供一定补充,多种技术平台的相互配合可以更加有效地进行固体潮现象的广域观测。

2 固体潮时空分布特征与广域观测需求分析

2.1 固体潮时空分布特征

本研究使用理论值模型来获取固体潮时空分布特征,所涉及勒夫数及重力潮汐因子均采用国际地球自转加参考架服务组织(IERS)提供的地面点精密潮汐改正规范标称值(<https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/TechnicalNotes.html> [2021-01-06])。该理论计算模型已考虑到地球椭率、自转、地幔非弹性、非流体静力平衡和横向不均匀性等诸多因素的影响。

图1为本文使用的固体潮理论值模型算法流程。首先根据基于时间域的引潮位算法,得到不同经纬度和固定时间下的引潮位信息,然后通过勒夫数以及重力潮汐因子标称值计算出非自转、球型分层、各向同性、理想弹性(SNREI)地球模型下的固体潮响应信息,最后通过IERS协议的精

密潮汐改正就可以得到三向固体潮点位移以及重力固体潮分布。所涉及的引潮位、三向位移以及重力潮算法核心如下（许厚泽，2010）：

$$\begin{cases} W = \sum_{j=1}^{\infty} W_j = \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{Gm_j}{r_j} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{r}{r_j} \right)^n P_n(\cos z_j) \right) \\ \delta \mathbf{r} = \sum_{n=2}^3 h_n \frac{W_n}{g_0} \mathbf{e}_r + l_n \frac{\partial W_n}{g_0 \partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi + l_n \frac{\partial W_n}{g_0 \cos \varphi \partial \lambda} \mathbf{e}_\lambda \quad (1) \\ \delta g = - \sum_{n=2}^3 \delta n \frac{\partial W_n}{\partial r} \Big|_{r=R} \end{cases}$$

式中， j 为天体编号， n 为勒让德多项式的阶次， G 为万有引力常量， m_j 为天体质量； r 表示地面点到地心的距离， r_j 表示天体到地心的距离； z_j 为天体的地心天顶距， W_n 为引潮位， g_0 为地表重力的平均值， \mathbf{e}_r 、 \mathbf{e}_φ 、 \mathbf{e}_λ 分别为固体潮位移沿径向、经度方向和纬度方向的单位矢量。

计算过程中涉及的天文参数均通过天文历表计算得到。在SNREI地球模型的固体潮位移基础上，分别在时间域频率域加入如下3种改正，即可满足IERS规范的要求：（1）勒夫数由于地球的扁率和自转的科里奥利力引起的纬度依赖性和微小的频段间变化的影响；（2）在周日频段，由于周

日自由摆动共振导致的很强的频率依赖性以及来自地幔非弹性的其他频率依赖性（在长周期频段最为显著）；（3）来自地幔非弹性及自由摆动导致的离心力摄动，使得勒夫数具有滞后于引潮位作用的虚数部分（Dehant等，1999）。

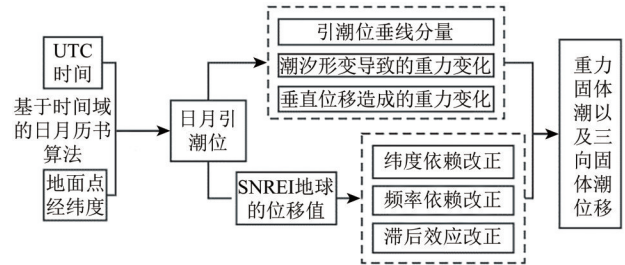


图1 固体潮模型算法流程

Fig. 1 The flow of solid earth tides model

图2是以2020年10月1日0时为例的固体潮分布效果，对应矩阵的经纬度密度为 $30' \times 30'$ ，可以较大程度地保留固体潮分布梯度信息。图中位移单位为毫米，重力潮的单位为微伽，值的大小用不同的颜色区分，位移分布图中的箭头代表固体潮水平位移的方向。

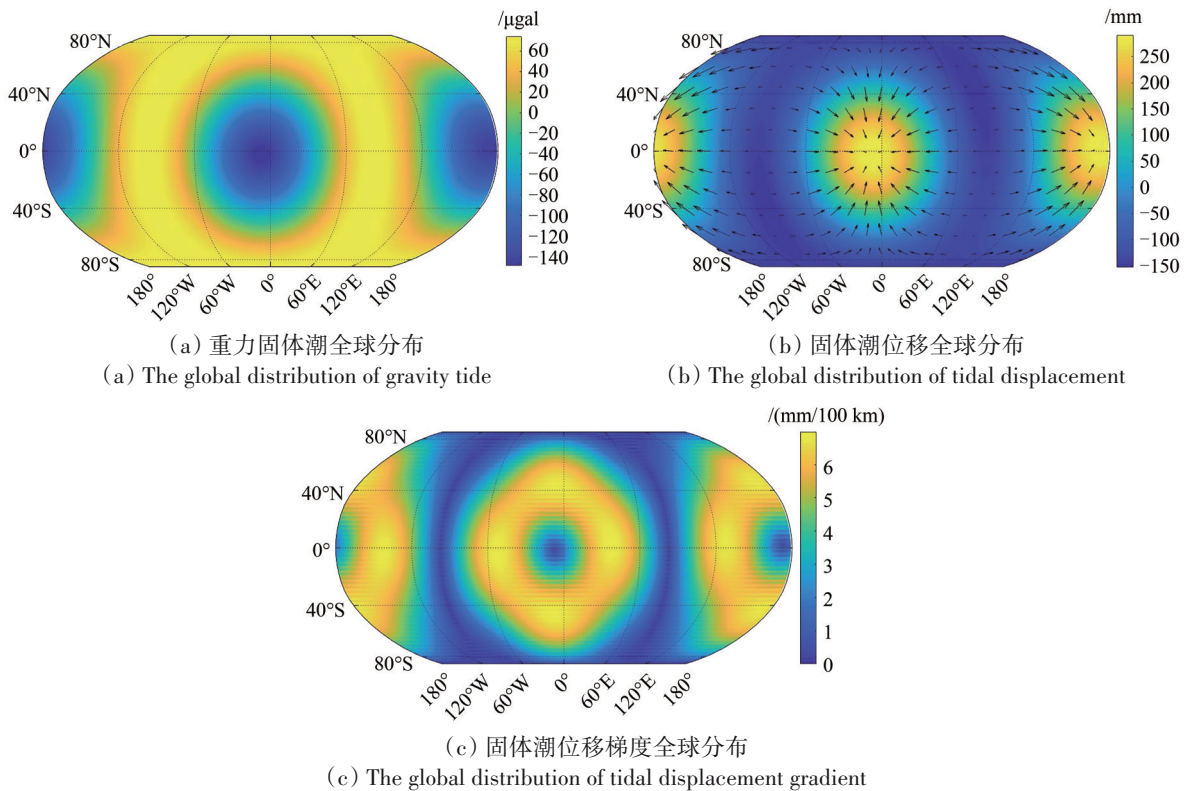


图2 全球尺度固体潮信息特征

Fig. 2 Characteristics of global scale solid earth tides information

固体潮分布极值点往往出现在月球星下点附近的一个位置以及该位置的对跖点处，而分布梯度相对较大的区域为与极值点相距约2500—7000 km的环形范围。固体潮整体位移分布梯度较小，最大值约在4 mm/100 km—10 mm/100 km的范围随时间发生周期变化，如图3。

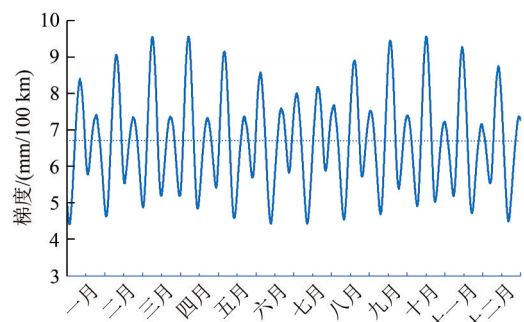


图3 2020年位移梯度最大值时间序列(1小时采样)
Fig. 3 Time series of maximum gradient of displacement distribution in 2020 (1-hour sampling)

2.2 固体潮广域观测需求分析

对于南北纬80°—90°的区域，引潮力变化较小，固体潮状态稳定，因此观测范围需求为南北纬80°之间。要利用空间技术进行固体潮广域观测，百公里甚至更高的空间分辨率才更能体现出相对于地面台站的优势。

重力观测时，重力场中的固体潮部分可达200—350 μGal，大气潮的影响约为固体潮的1%，海洋负荷潮的影响约为固体潮的10%，要想去除固体潮观测中的大气及海洋的部分，需要的重力观测精度为微伽级。形变监测时，InSAR技术获取的是卫星过境时刻相当于之前某次过境参考时刻的相对结果，形变范围为0—50 cm，厘米级的测量精度可以满足需求。

现今的InSAR应用中，形变类型主要特点是范围小，形变梯度适中，如沉降、地震、滑坡等。这些应用的研究区内固体潮位移在整个区域的状态趋于一致，并不会影响形变条纹分布，因此一般无需考虑固体潮形变的影响。如果将固体潮形变作为观测对象，则需要提高观测范围使得测绘带内存在稳定的固体潮形变相位变化，参照理论固体潮位移梯度变化，至少需要千公里级的测绘带宽度才可以稳定地从干涉相位中提取出固体潮的部分。对于时间分辨率需求，一方面希望观测期间除固体潮以外其他类型的重力、地表形变尽

可能少，另一方面要考虑空间技术的重复观测能力的发展极限。固体潮分布体现出半日、周日、半月以及更长的周期变化特性，结合相应空间技术的特点以及发展前景，时变重力场的时间分辨率至少需达到1天至数天，而InSAR技术涉及到有效干涉组合的选取，时间分辨率需优于重力测量，倾斜同步卫星和月球两个新型遥感平台均将隔日干涉作为发展目标。表1汇总了重力测量和形变测量分别的固体潮广域观测需求。

表1 固体潮广域观测需求表

Table 1 The index of macro observation demand for SET		
要素名称	重力测量	形变测量
观测范围	80°S—80°N	80°S—80°N
空间分辨率	百公里级	百公里级
精度	微伽级	厘米级
时间分辨率	1天至数天	1天
测绘带	N/A	千公里级

3 相应观测技术的发展潜力分析

3.1 时变重力场与InSAR

重力卫星的主要任务是反演高精度、高分辨率的地球重力场模型。该技术是根据卫星位置、星间距离和速度相对于卫星参考轨道的线性摄动量，利用动力学法、能量守恒法以及短弧积分等方法建立线性观测方程获取参考轨道并解算重力场模型。以GRACE卫星为例，可以确定15—30天时间尺度上的重力场时变特征，重力场空间分辨率为275 km时，重力场异常误差约为0.02 mgal（王长青，2015；吴庭涛等，2020）。InSAR技术是通过主动发射微波，并利用回波信号斜视成像来获取多个时相地表的相位信息。通过干涉处理即可得到两个时刻的相对相位变化，从产生的干涉条纹中提取一定宽度测绘带的地表形变，以Sentinel-1的双星干涉为例，超宽幅模式的测绘带宽度为400 km，分辨率可以达到20 m×40 m，6天的重访周期映射全球一次（王腾和廖明生，2018）。

目前想要通过重力卫星数据解算的时变重力场来获得重力潮变化还较为困难，无法满足精度和时空分辨率的需求，日月重力潮往往作为保守力使用理论模型获得。新一代重力卫星观测计划是要实现100 km空间分辨率、1天至数天的时间分

分辨率且精度要提升一个数量级（沈云中，2017），结合重力卫星编队技术的发展（朱广彬等，2019；郑伟等，2013；邹斌，2017），给重力固体潮观测提供了可能。卫星轨道的数值积分精度、重力卫星编队系统构型的完善均可以有效提高重力场观测精度及时空分辨率，使其满足固体潮观测所需。将固体潮作为观测目标，要面临的另一个重要问题是如何从观测结果中分离出重力固体潮信号。首先，大气阻力、太阳光压、地球反照辐射等非保守力摄动，仍可以通过加速度计测量精确获取。非保守力中，非球形引力与三体摄动是最大的摄动来源，且计算模型中不包含任何潮汐因子，可以通过理论模型进行改正（Montenbruck和Gill，2002；GTDS，1989），而对于海潮、极潮及大气潮汐负荷的摄动，利用固体潮现象在内陆地区的特定纹理特征来分区域解算是一种解决思路。

InSAR技术受限于测绘带宽度和重访周期目前还没有固体潮观测的案例。参照固体潮的时空分布变化特征，当观测时刻相对参考时刻的位移梯度方向相反时，形变梯度在8 mm/100 km—20 mm/100 km范围变化。InSAR技术可以在精度和分辨率上满足固体潮广域观测的需求，但由于形变梯度较小，导致低轨InSAR平台在多数情况下的测绘带内距离向的固体潮形变状态一致，难以提取固体潮相位。虽然在方位向可以形成上千公里的影像，但是由于初始固体潮相位和时间基线较难控制。如果通过图像拼接来进行全球观测，必将会造成InSAR干涉图的相位不连续，从而导致形变测量误差，对于固体潮形变这种在大尺度空间下具有特定纹理分布特征的现象，拼接方式难以有效实施广域观测。倾斜同步卫星轨道和月基平台两种概念平台均具备隔日重访和超宽幅测绘带的能力，灵活的时间基线选择和大尺度的空间覆盖为固体潮形变的广域观测提供了可能。相比重力卫星解算球谐系数然后进一步解算单点重力的形式，InSAR技术是通过成像方式获取固体潮观测结果，更容易反映面状信息。下文对比了低轨卫星、倾斜同步轨道卫星和月球3种InSAR平台的优势与不足。

3.2 空间平台位置获取

要对比不同平台传感器对广域固体潮信息的获取能力，一方面需要得到相应平台的轨道特征、

观测周期以及空间分辨率等信息，还需要将不同空间平台的参考坐标进行统一，并将其与对应时空下的固体潮分布特征相结合。低轨卫星平台及倾斜同步卫星平台的运行轨迹可以通过轨道参数模拟得到（张云彬和张永生，2001），这种方式得到的卫星位置用地理经纬度表示，加上卫星的高度信息，就得到了地理参考系（GRS）的坐标。月基平台的运行轨迹用月心位置近似代替，月心的坐标可以通过美国喷气推进实验室（JPL）提供的DE430星历获取。该星历包含了1550年1月1日至2650年1月22日太阳系内主要天体的位置、速度以及加速度信息，通过这种方式就可以获取月球在地心天球参考系（GCRS）下的三维矢量。

GRS坐标转化到GCRS参考系统，首先需要将GRS坐标转化到国际大地参考系（ITRS）中，并把地球考虑为椭球体；然后考虑岁差、章动并进行一个时间相关的旋转。具体转化过程如下式所示（Ren等，2017；Ye等，2018；Sui等，2019）：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X_{\text{GCRS}} \\ Y_{\text{GCRS}} \\ Z_{\text{GCRS}} \end{bmatrix} = [\mathbf{M}][\mathbf{N}][\mathbf{P}][\mathbf{E}] \begin{bmatrix} X_{\text{ITRS}} \\ Y_{\text{ITRS}} \\ Z_{\text{ITRS}} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_{\text{ITRS}} \\ Y_{\text{ITRS}} \\ Z_{\text{ITRS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N_e + h) \cos \phi_{\text{GRS}} \cos \psi_{\text{GRS}} \\ (N_e + h) \cos \phi_{\text{GRS}} \sin \psi_{\text{GRS}} \\ ((1 - e^2) N_e + h) \sin \phi_{\text{GRS}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中， N_e 表示基准椭球体的卯酉圆曲率半径， ϕ_{GRS} 、 ψ_{GRS} 分别表示地理纬度和地理经度， h 表示卫星的高度，旋转矩阵 $[\mathbf{M}]$ 、 $[\mathbf{N}]$ 、 $[\mathbf{P}]$ 、 $[\mathbf{E}]$ 分别来自对地球极移、章动、岁差以及自转的考虑，它们均可以通过IERS提供的地球定向参数（EOP）得到。

固体潮的位移矢量是沿径向、沿经度方向和沿纬度方向，其指向与站心坐标系（ENU）相同，而InSAR是通过斜视成像的方式获取视线向形变，需要将位移矢量归算到传感器所在方向。可以通过下式得到的位移矢量（Wu等，2020）：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X_{\text{SET}} \\ Y_{\text{SET}} \\ Z_{\text{SET}} \end{bmatrix} = [\mathbf{R}] \begin{bmatrix} X_{\text{ENU}} \\ Y_{\text{ENU}} \\ Z_{\text{ENU}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{u}_{\text{sensor}} = \begin{bmatrix} X_{\text{SET}} \\ Y_{\text{SET}} \\ Z_{\text{SET}} \end{bmatrix} \cos \Theta = \begin{bmatrix} X_{\text{SET}} \\ Y_{\text{SET}} \\ Z_{\text{SET}} \end{bmatrix} \mathbf{S} \end{cases} \quad (3)$$

式中， X_{ENU} 、 Y_{ENU} 、 Z_{ENU} 分别是位移在经度方向、纬度方向、径向的分量， $[\mathbf{R}]$ 是与地理经纬度有关

的旋转矩阵 Θ 为传感器矢量与位移矢量的夹角, S 为传感器位置的单位矢量。由于位移的方向和大小是一定的, 该转换仅仅是矢量在不同坐标系中的表示, 因此只需进行旋转即可得到传感器视线向的固体潮位移量。

图4展示了这3种平台分别运行一周的星下点轨迹, 时间均为2018年1月1日。其中低轨卫星选用 Sentinel-1 卫星的轨道参数, 轨道倾角 98.18° , 侧视角 $20^\circ-45^\circ$, 轨道周期 99 min (图4中仅展示了绕地一周的轨迹); 倾斜同步卫星的轨道倾角选择为 60° , 升降交点经度为 23.94° , 重访周期为 24 小时 (Bruno 等, 2006); 月基平台轨道固定, 伴随月球公转, 赤纬变化的完整周期为 18.6 年, 小周期为 27.3 d, 而进行对地观测时, 星下点移动的主要原因来源于地球自转, 重访周期为 24.84 小时 (Fornaro 等, 2010)。

3.3 InSAR 技术的3种平台对比

提高轨道高度可以有效增大 InSAR 技术的测

绘带幅宽。倾斜地球同步轨道卫星的轨道高度约 3.6 万 km, 3 颗卫星可以覆盖全球; 月基平台的轨道高度约为 38 万 km, 仅 2° 的观测立体角可以覆盖半个地球。SAR 系统成像存在入射角范围的要求, 入射角太大会造成雷达后向散射能量的衰减, 使得信噪比大幅降低, 再加上由雷达侧视成像机制决定的星下点固有盲区, 实际的可观测范围要小一些 (Guo 等, 2014)。将入射角范围设定在 $10^\circ-66^\circ$, 分别计算 3 种平台的瞬时可观测区域, 结果如图5所示。

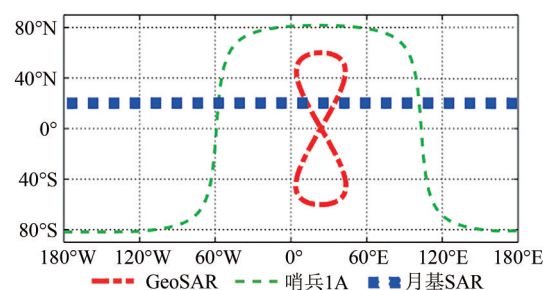


图4 3种平台的星下点轨迹对比

Fig. 4 The comparison of the trajectories of three platforms

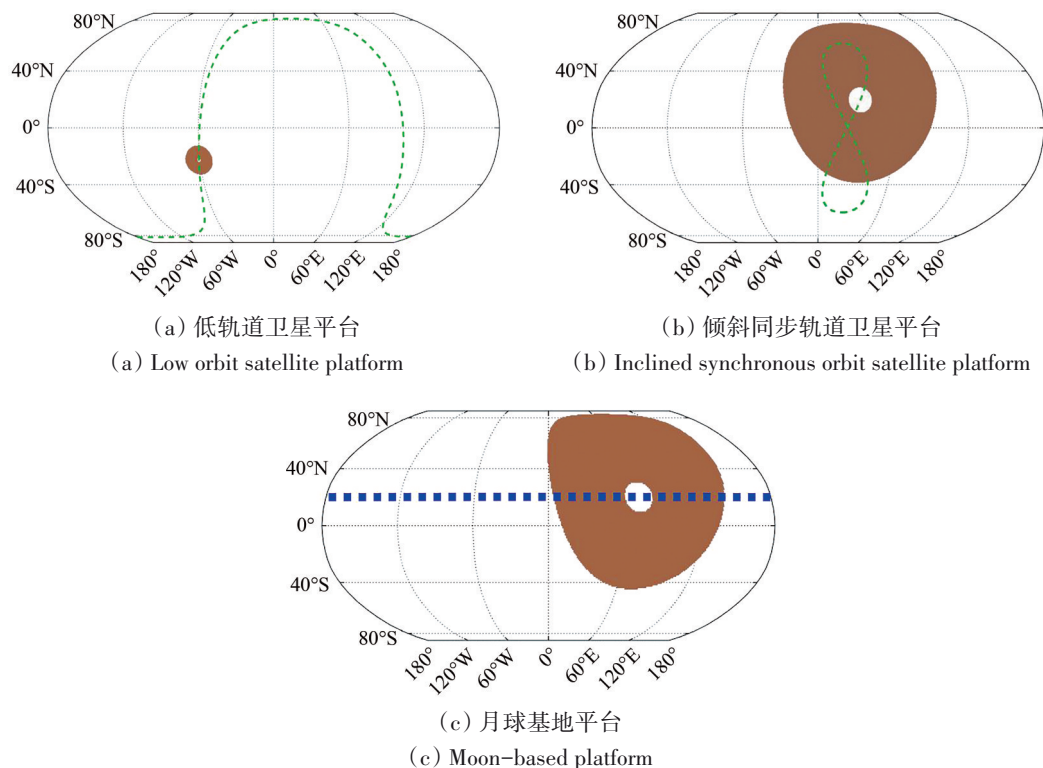


图5 3种平台瞬时可观测区域

Fig. 5 Instantaneous observable area of three platforms

除入射角的限制外, 低轨 SAR 还会受到波束展宽的限制 (徐慧 等, 2007), 实际条带宽度更小, 而倾斜同步轨道卫星 SAR 和月基 SAR 分别仅

需 7° 左右和 0.5° 左右的距离向波束展宽, 因此基本不会受到该限制。

考虑式4所表示的雷达天线高度 L 和斜距测绘

带宽度 W_s 之间的关系, 以及时间延迟、脉冲重复频率 (PRF)、多普勒带宽 B_d 和方位向分辨率 ρ_a 之间的关系 (Curlander 和 McDonough, 1991), 可知方位向分辨率和距离向测绘带宽存在固有矛盾。倾斜同步轨道卫星 SAR 在经纬度上均不是均匀覆盖, 方位向和距离向的固体潮相位变化明显, 而月基 SAR 观测的固体潮相位分布在方位向变化较小 (Wu 等, 2020), 所以就固体潮广域观测而言, 倾斜同步轨道卫星 SAR 在方位分辨率上的需求要高于月基 SAR。也就是说, 要实现同水平的大测绘带幅宽, 倾斜同步轨道卫星面临的 SAR 系统设计难度相对更大。

$$\begin{cases} W_s = \theta_r \cdot R_s = \frac{\lambda \cdot R_s}{L_r} \\ \frac{V}{\rho_a} = B_d < PRF < \frac{c}{2W_s} \end{cases} \quad (4)$$

倾斜同步卫星的轨道倾角与合成孔径时间成反比, 与天线尺寸成正比 (例如: 轨道倾角 60° 时, 需要 30 m 的天线和 10 min 的孔径合成时间; 轨道倾角为近同步轨道时, 孔径合成时间可以达到 12 h)。降低轨道倾角会造成有效覆盖范围的降低, 同时较长的合成孔径时间相当于一个滤波器, 使得固体潮这类时变信号可能变为背景噪声被过滤掉 (Bruno 等, 2006)。因此, 要保证足够大的轨道倾角就必须面临如何将庞大的天线和供能子系统搭载在人造卫星平台上的问题, 这也是倾斜同步卫星轨道 SAR 要面临的挑战。

图 6 分别模拟了 2018 年 1 月 1 日 3 种平台相邻重访时的固体潮形变相位分布, 测绘带宽度均参照现有研究, 倾斜同步轨道卫星 SAR 和月基 SAR 的测绘带宽度设定为 4000 km 和 5000 km (Madsen 等, 2001; 李德伟 等, 2020)。

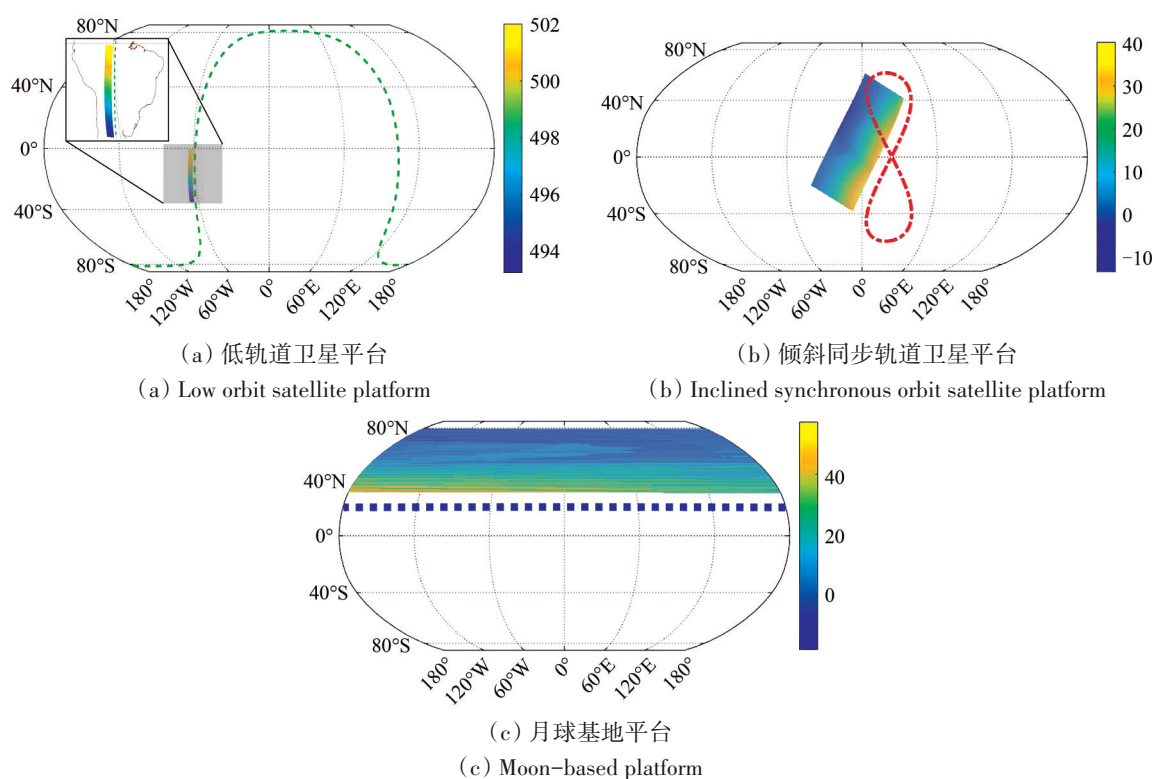


图 6 3 种平台获取固体潮形变相位模拟

Fig. 6 Simulation of tidal deformation phase obtained by three platforms

倾斜同步轨道卫星 SAR 和月基 SAR 均具备隔日干涉的能力, 前者在 L 波段的极限基线可以达到 90 km, 通过轨道控制很容易避免几何失相干, 因此有效干涉组合是最多的; 而月球轨道不可控, 月球赤纬绝对值较大时, 赤纬日变化趋近于 0, 当月球赤纬接近 0 时, 日变化可以达到 5° , 对应的基

线长度可达 35000 km, 引起严重的几何失相干。因此, 在月球赤纬接近赤道的时间段, 对重轨干涉十分不利, 即使选用 L 波段的大带宽组合, 这些参考时段的有效干涉组合也较少, 最邻近有效干涉组合往往需要一个赤纬变化小周期, 大约为第 26 或 27 次重访。

低轨卫星重访时刻固体潮形变相位可以达到500 mm,但由于测绘带宽度不够,大部分情况下整个测绘带内的固体潮相位变化低于10 mm,干涉图内固体潮状态趋于一致,难以提取;而对于两种新型概念平台而言,虽然重访周期接近固体潮变化周期,使得形变相位有所减小,使得隔日重访固体潮形变相位最大不超过200 mm,但测绘带内稳定存在明显的相位变化,固体潮形变可以被提取出来,观测效果仍然远优于低轨卫星。其中,倾斜同步卫星平台测绘带内相位变化可达15—70 mm,而月基平台为50—100 mm。月基平台优于倾斜同步卫星平台的主要原因是由于月球作为固体潮现象主要引力源,正侧视观测时,始终可以观测到固体潮梯度最大的位置。

表2罗列了3种平台与固体潮广域观测效果相关的平台特点。

表2 3种平台的固体潮宏观观测对比
Table 2 Comparison of macro observation of earth tide on three platforms

平台	低轨卫星	倾斜同步卫星	月基平台
高度/km	693	约36000	约380000
测绘带宽度/km	400	4000	5000
重访周期	6 d	24 h	24.84 h
平台个数	双星星座	三颗覆盖全球	单基站
均匀覆盖能力	纬度均匀	不均匀	经度均匀
全球时空连续性	差	优	优
成像孔径合成时间	亚秒	10 min—12 h	分钟级
稳定性与寿命	一般	一般	好
固体潮相位变化	不稳定存在	较稳定存在	稳定存在
几何去相干程度	中等	较低	较高
时间去相干程度	较高	较低	较低

月基平台拥有强大的载荷能力,相比倾斜同步卫星轨道更容易进行SAR系统设计,且平台寿命长,轨道误差小。随着赤纬的变化,月基平台可以实现全球的连续角度观测,能从斜距中提取高精度的水平位移,而60°倾斜同步卫星轨道的多角度观测区域仅为月基平台的三分之一,升降交点对应陆地区域存在固有盲区。月球作为固体潮现象的主要力源,可以方便我们利用日月黄经差将耦合的太阳潮太阴潮分开。从观测效果和平台特性综合考虑,若解决登月相关的一系列关键问题(如供能、温度控制、数据传输、材料运输、

月尘环境等),月基平台或可发展成为固体潮观测的最理想平台。而多种平台的相互配合可实现绝大部分区域低于一天时间分辨率的固体潮宏观观测。

4 结 论

本文从固体潮广域观测的需求出发,分析了现有空间观测技术在重力观测和地表位移观测上的发展潜力。针对InSAR技术在时间分辨率和测绘带宽度上的需求,参照固体潮广域观测模拟结果,定性和定量地对比讨论了3种InSAR平台特点。研究最终得出了相应观测方法的优势与不足,并罗列了一些亟待解决的技术问题,综合评价了空间技术对固体潮的广域观测潜能。

研究结果表明:(1)新一代重力卫星组网、倾斜同步卫星轨道和月基平台均可以发展成为固体潮广域观测的有效手段;(2)月球作为固体潮现象的主要力源,使得月基InSAR兼顾了轨道高度、视角、平台、SAR成像及观测效果等多方面的优势,可以发展成为固体潮广域观测的最理想平台;(3)各类观测方法可以为月基InSAR低赤纬所对应参考时段提供补充,实现部分区域低于一天时间分辨率的固体潮广域观测。

利用空间技术来观测固体潮存在很大的潜力,多种技术相互配合可以更好地实现固体潮高分辨率、高时空一致的广域观测,解决各类技术发展所面临问题是实现固体潮广域观测需要努力的方向。

参考文献(References)

Bruno D and Hobbs S E. 2010. Radar imaging from geosynchronous orbit: temporal decorrelation aspects. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(7): 2924-2929 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2042062]

Bruno D, Hobbs S E and Ottavianelli G. 2006. Geosynchronous synthetic aperture radar: concept design, properties and possible applications. *Acta Astronautica*, 59(1/5): 149-156 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2006.02.005]

Chen X D. 2003. Preprocessing and Analytical Results of the Tidal Gravity Observations Recorded with a Superconducting Gravimeter at Jiufeng Station, Wuhan. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (陈晓东. 2003. 武汉九峰台超导重力仪固体潮观测资料的预处理和分析结果. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所)

- Curlander J and McDonough R. 1991. *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. New York: Wiley
- Dehant V, Defraigne P and Wahr J M. 1999. Tides for a convective Earth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B1): 1035-1058 [DOI: 10.1029/1998JB900051]
- Fang J. 1984. *The Solid Earth's Tides*. Beijing: Science Press (方俊. 1984. 固体潮. 北京: 科学出版社)
- Fornaro G, Franceschetti G, Lombardini F, Mori A and Calamia M. 2010. Potentials and limitations of Moon-Borne SAR imaging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(7): 3009-3019 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2041463]
- Goodkind J M. 1999. The superconducting gravimeter. *Review of Scientific Instruments*, 70(11): 4131-4152 [DOI: 10.1063/1.1150092]
- 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 [DOI: 10.1007/s11430-013-4714-2]
- Hsu H T, Chen Z B and Yang H B. 1982. The effect of oceanic tides on the gravity tidal observations. *ACTA Geophysica sinica*. 25(2): 120-129 (许厚泽, 陈振邦, 杨怀冰. 1982. 海洋潮汐对重力潮汐观测的影响. *地球物理学报*, 25(2): 120-129)
- Li D W, Jiang L M, Jiang H J, Dong J L and Wang H S. 2019. InSAR phase simulation of solid earth tide and its influence on surface deformation monitoring at wide-area scale. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(12): 4527-4539 (李德伟, 江利明, 蒋厚军, 董景龙, 汪汉胜. 2019. 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. *地球物理学报*, 62(12): 4527-4539)
- Li D W, Jiang L M, Jiang H J, Dong J L and Wang H S. 2020. System parameters analysis of the Moon-based SAR Earth observation. *Systems Engineering and Electronics*, 42(4): 792-798 (李德伟, 江利明, 蒋厚军, 董景龙, 汪汉胜. 2020. 月基 SAR 对地观测系统参数分析. *系统工程与电子技术*, 42(4): 792-798) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2020.04.08]
- Li G Y, Zhang R, Liu G X, Yu B, Zhang B, Dai K R, Bao J W and Wei B W. 2018. Land subsidence detection and analysis over Beijing-Tianjin-Hebei area based on Sentinel-1A TS-DInSAR. *Journal of Remote Sensing*, 22(4): 633-646 (李广宇, 张瑞, 刘国祥, 于冰, 张波, 戴可人, 包佳文, 韦博文. 2018. Sentinel-1A TS-DInSAR 京津冀地区沉降监测与分析. *遥感学报*, 22(4): 633-646) [DOI: 10.11834/jrs.20187196]
- Li J G, Zhang H W, Wang Y J, Xiao F and Ji L D. 2012. The Adjustment of the Earth Tide in Gravimetry Calculation. *Beijing Surveying and Mapping*, 5:1-5 (李建国, 张宏伟, 王应建, 肖凡, 纪立东. 2012. 重力计算中的潮汐改正分析. *北京测绘*, 5:1-5)
- Long A C, Cappellari J O, and Velez C E. 1989. *Goddard Trajectory Determination System*
- Madsen S N, Edelstein W, DiDomenico L D and LaBrecque J. 2001. A geosynchronous synthetic aperture radar; for tectonic mapping, disaster management and measurements of vegetation and soil moisture//*Proceedings of the IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Sydney: IEEE: 447-449 [DOI: 10.1109/IGARSS.2001.976185]
- Mitrovica J X, Davis J L, Mathews P M and Shapiro I I. 1994. Determination of tidal Love number parameters in the diurnal band using an extensive VLBI data set. *Geophysical Research Letters*, 21(8): 705-708 [DOI: 10.1029/94GL00630]
- Montenbruck O and Gill E. 2002. *Satellite Orbits: Models, Methods and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer
- Ning J S and Wang Z T. 2013. Progress and present status of research on earth's gravitational field. *Journal of Geomatics*, 38(1):1-7 (宁津生, 王正涛. 2013. 地球重力场研究现状与进展. *测绘地理信息*, 38(1):1-7)
- Peng B B, Wu B and Xu H Z. 2000. Determination of displacement Love numbers from SLR data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 29(2): 305-309 (彭碧波, 吴斌, 许厚泽. 2000. 应用人卫激光测距技术测定潮汐形变勒夫数. *测绘学报*, 29(2): 305-309) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2000.04.005]
- Penna N T, King M A and Stewart M P. 2007. GPS height time series: short-period origins of spurious long-period signals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B2): B02402 [DOI: 10.1029/2005JB004047]
- Qiao S B, Sun F P, Zhu X H, Li J and Cong M R. 2004. Applications of GPS/VLBI/SLR/InSAR combination to geodynamics. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 24(3): 92-97 (乔书波, 孙付平, 朱新慧, 李健, 丛明日. 2004. GPS/VLBI/SLR/InSAR 组合在地球动力学研究中的应用. *大地测量与地球动力学*, 24(3): 92-97) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2004.03.019]
- Ren Y Z, Guo H D, Liu G and Ye H L. 2017. Simulation study of geometric characteristics and coverage for Moon-Based earth observation in the Electro-Optical region. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(6): 2431-2440 [DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2711061]
- Shen Y Z. 2017. Algorithm characteristics of dynamic approach-based satellite gravimetry and its improvement proposals. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1308-1315 (沈云中. 2017. 动力学法的卫星重力反演算法特点与改进设想. *测绘学报*, 46(10): 1308-1315) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170380]
- Sui Y, Guo H D, Liu G and Ren Y Z. 2019. Analysis of Long-Term Moon-Based observation characteristics for arctic and Antarctic. *Remote Sensing*, 11(23): 2805 [DOI: 10.3390/rs11232805]
- Wang C Q. 2015. *Time-Variable Gravity Field Determination from GRACE Mission and Some Related Issues*. Beijing: Chinese Academy of Sciences (王长青. 2015. *重力场反演与相关问题研究*. 北京: 中国科学院大学)
- Wang T and Liao M S. 2018. Coseismic displacement derived from Sentinel-1 data: latest techniques and case studies. *Journal of Remote Sensing*, 22(S1): 120-127 (王腾, 廖明生. 2018. Sentinel-1

- 卫星数据提取同震形变场: 最新技术及震例. 遥感学报, 22(S1): 120-127 [DOI: 10.11834/jrs.20187480]
- Watson C, Tregoning P and Coleman R. 2006. Impact of solid Earth tide models on GPS coordinate and tropospheric time series. *Geophysical Research Letters*, 33(8): L08306 [DOI: 10.1029/2005GL025538]
- Wu K, Ji C, Luo L and Wang X Y. 2020. Simulation study of Moon-Based InSAR observation for solid earth tides. *Remote Sensing*, 12(1): 123 [DOI: 10.3390/rs12010123]
- Wu T T, Zheng W, Yin W J, Zhang H W, Zhang G Q and Zhang W S. 2020. Review of earth's gravity field model and application from satellite. *Science Technology and Engineering*, 20(25): 10117-10132 (吴庭涛, 郑伟, 尹文杰, 张捍卫, 张刚强, 张文松. 2020. 地球卫星重力场模型及其应用研究进展. 科学技术与工程, 20(25): 10117-10132) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.25.001]
- Xu H, Li J X and Hu M C. 2007. Research on beam widening of space-borne SAR. *Journal of Electronics & Information Technology*, 29(3): 540-543 (徐慧, 李建新, 胡明春. 2007. 星载 SAR 波束展宽研究. 电子与信息学报, 29(3): 540-543) [DOI: 10.3724/SP.J.1146.2005.00985]
- Xu H Z. 2010. *Solid Earth Tides*. Wuhan: Hubei Science and Technology Press (许厚泽. 2010. 固体地球潮汐. 武汉: 湖北科学技术出版社)
- Xu H Z and Zhang C J. 1997. Development of the studies on geodetic gravity and Earth Tides in China. *Acta Geophysics Sinica*, 40(S1): 192-205 (许厚泽, 张赤军. 1997. 我国大地重力学和固体潮研究进展. 地球物理学报, 40(S1): 192-205)
- Yao X, Deng J H, Liu X H, Zhou Z K, Yao J M, Dai F C, Ren K Y and Li L J. 2020. Primary recognition of active landslides and development rule analysis for Pan Three-River-Parallel territory of Tibet Plateau. *Advanced Engineering Sciences*, 52(5): 16-37 (姚鑫, 邓建辉, 刘星洪, 周振凯, 姚佳明, 戴福初, 任开瑀, 李凌婧. 2020. 青藏高原泛三江并流区活动性滑坡 InSAR 初步识别与发育规律分析. 工程科学与技术, 52(5): 16-37) [DOI: 10.15961/j.jse.202000529]
- Ye H L, Guo H D, Liu G and Ren Y Z. 2018. Observation duration analysis for Earth surface features from a Moon-based platform. *Advances in Space Research*, 62(2): 274-287 [DOI: 10.1016/j.asr.2018.04.029]
- Zhang Y B and Zhang Y S. 2001. Calculation of subsatellite track of remote sensing satellite in nearly round orbit. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 18(4): 257-259 (张云彬, 张永生. 2001. 近圆轨道遥感卫星下点轨迹的计算. 测绘学院学报, 18(4): 257-259) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6338.2001.04.007]
- Zheng W, Hsu H T, Zhong M, Liu C S and Yuan M J. 2013. Precise and rapid recovery of the Earth's gravitational field by the next-generation four-satellite cartwheel formation system. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(9): 2928-2935 (郑伟, 许厚泽, 钟敏, 刘成恕, 员美娟. 2013. 基于下一代四星转轮式编队系统精确和快速反演 FSCF 地球重力场. 地球物理学报, 56(9): 2928-2935) [DOI: 10.6038/cjg20130907]
- Zhou J C, Xu J Q and Sun H P. 2009. Accurate correction models for tidal gravity in Chinese continent. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(6): 1474-1482 (周江存, 徐建桥, 孙和平. 2009. 中国大陆精密重力潮汐改正模型. 地球物理学报, 52(6): 1474-1482) [DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.06.008]
- Zhu G B, Chang X T, Zou B and Cao H D. 2019. Simulation analysis of GRACE-type gravity satellite formation. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 47(3): 421-427 (朱广彬, 常晓涛, 邹斌, 曹华东. 2019. 重力卫星串联编队仿真分析. 同济大学学报(自然科学版), 47(3): 421-427) [DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.03.017]
- Zou B. 2017. *Configuration Design and Simulation Analysis of the GRACE-Type Gravity Satellite Formation*. Qingdao: Shandong University of Science and Technology (邹斌. 2017. 重力卫星串联编队构型设计分析研究. 青岛: 山东科技大学)

Comprehensive analysis of wide-area observation development for solid earth tides by space technology

WU Kai^{1,2}, JI Ce^{1,2}, LUO Lei¹, WANG Xinyuan¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The observation and research for solid earth tides (SETs), which have always been the focus of earth science, can provide an important basis for understanding the structure of the earth's interior. However, unavoidable limitations exist when observations are operated to capture the global-scale SET information only with ground instruments. At present, the distribution of ground stations is sparse and uneven. Moreover, the observations of different stations are affected by the local environment. Thus, achieving large-scale, time-consistent, and space-continuous SET observation is difficult. SET observation must rely on the development of space technology. In this study, the temporal and spatial distribution characteristics of the SET are obtained using the theoretical model. This model considers the earth's

ellipticity, rotation, inelasticity of the mantle, nonhydrostatic equilibrium, and lateral inhomogeneity. Combined with the lunar ephemeris, the space – time coordinate system and the influence factors, such as precession, polar shift, nutation, and lunar libration, are considered. After the optimization of the model accuracy and efficiency, the theoretical model of the millimeter accuracy is obtained. Based on these characteristics, the macroscopic observation potential of space technology is discussed. It mainly includes the wide-area displacement monitoring ability by combining InSAR technology and ranging technologies, such as GNSS, VLBI, and SLR. The time-varying gravity acquisition ability solved from the gravity satellite data is also included. According to the requirements of InSAR technology on time baseline and swath width, three kinds of platforms, namely, low Earth orbit satellite, inclined geosynchronous satellite, and moon-based platform, are simulated. The advantages and disadvantages of various platforms are also analyzed. Results showed that the network of new gravity satellites and the new conceptual platform of remote sensing have the macro-observation potential for SETs. Compared with inclined geosynchronous satellite orbit, the moon-based platform can easily design the SAR system. The moon-based SAR has long service life and small orbit error. Given the change in declination, the moon-based platform can realize global continuous angle observation. It can also extract high-precision horizontal displacement from the deformation in line of sight. The multiangle observation area of the inclined geosynchronous satellite orbit is only one-third of that of the moon-based platform. Moreover, the land area corresponding to the ascending and descending nodes for inclined geosynchronous satellites has an inherent blind area. As the main force source of SETs, the moon can be used to separate the coupled solar and lunar tides. Given the observation effect and platform characteristics, the moon-based platform can become the best platform for earth tide observation if a series of key problems related to lunar landing, such as energy supply, temperature control, data transmission, material transportation, and dust environment, are solved. Given the cooperation of multiple platforms, the macro-observation of the earth tide in most areas can be realized with a temporal resolution lower than 1 day. Moreover, space technology development can supplement the spatial decorrelation period of the moon-based platform and realize complementary advantages.

Key words: solid earth tides, space technology, orbit ephemeris, wide-area observation, earth science

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41590854); the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB3902100); the Key Research Program of Frontier Sciences CAS (No. QYZDY-SSW-DQC026)