

· 研究进展 ·

现代大地测量及其地学应用研究进展

孙和平^{1,2*} 徐建桥¹ 江利明¹ 刘根友¹ 郑勇¹
闫昊明¹ 鲍李峰¹ 胡小刚¹ 周江存¹

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

[摘要] 本文基于国家自然科学基金创新研究群体项目综述现代大地测量及其地学应用研究方面的进展情况, 内容包括地表和空间现代大地测量观测技术(如美国全球定位系统(GPS)、北斗系统、卫星重力、绝对和超导重力、海洋重力、卫星测高、合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)等)在地学不同领域(如导航、定位、重力场、地震、冰川、地表水、地球内部结构及其动力学等方面)的科学应用成果。

[关键词] 现代大地测量; 导航与定位; 重力场; 区域构造运动; 内部结构; 地震监测

固体地球(包括岩石圈、地幔、地核)、大气和海洋的运动变化, 与人类生存环境密切相关。地球的环境变化除了人类活动影响外, 主要受地球各圈层相互作用以及所在空间环境影响。地壳形变、地球重力场、地球自转变化等与大气、海洋和地震的活动密切相关, 是地球各圈层运动的重要表征。近年来, 大地测量学技术有了突飞猛进的发展, 全球导航定位系统(GNSS)等空间大地测量技术测定的地壳运动和地球自转变化已达到毫米级; 地表重力测量(包括绝对和相对重力)可检测到随时间变化的微伽级信号, 超导重力仪检测到的重力场变化可达更高量级; 由国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)组织的国际地球动力学合作计划(GGP)观测与研究项目基于国际上最高精度的超导重力仪观测, 把地球的核幔耦合动力学、内核的核模重力信号检测作为重要内容; 近年内发展起来的 InSAR 技术在地壳形变监测方面开创了地震大地测量的新领域。测高卫星在监测与全球气候变化相关的海平面变化、海洋环流方面取得了较大突破; 新一代的冰遥感卫星 ICESat 以前所未有的精度监测陆地和海洋冰的几何变化; 重力卫星的成功应用为检测全球重力场的变化提供了有效途径, 从而为探测和研究与地球各圈

层运动及相互作用有关的地球系统物质异常和分布、物质循环和能量交换研究展示出广阔的应用前景。在国家自然科学基金(简称科学基金)项目支持下, 我们利用先进的现代大地测量观测技术, 开展了地球科学(地表水质量变化、电离层效应变化、构造和地震机制、潮汐变形和核幔耦合等)大跨度交叉、渗透融合研究, 取得了一些重要的成果。

1 全球导航定位系统技术及其应用

如何提升多模多频的 GNSS(包括北斗卫星导航系统(简称北斗系统, BDS)、GPS、俄罗斯斯格洛纳斯系统(GALILEO)和欧盟伽利略定位系统(GLO-NASS))现代大地测量技术定位定轨精度和监测地球各圈层变化信息的能力是目前国际科学界和公众都非常关心的重大科学问题。针对 BDS 建设, 我们(中国科学院测量与地球物理研究所, IGG)提出了电离层模型与卫星差分码偏差(DCB)处理方法^[1-2], 生成的相关产品通过了 GNSS 领域最权威学术组织——国际 GNSS 服务组织(IGS)的长期测评, 产品精度处于国际同类先进水平。在此基础上, 分别建立了国际 IGS 电离层和 DCB 分析中心; 建立了改进的新一代 GNSS 电离层模型^[3-5], 解决了 BDS 在

以我国境内布设运控站为主时难以精确估算电离层信息及卫星频间偏差的技术瓶颈,为 BDS 建设任务的顺利实施提供了技术支撑与服务保障;构建了高精度 BDS/GNSS 对流层高效计算模型^[6-7];构建了适用于 BDS 的先验太阳光压模型,并研制了精密定轨软件系统,提升了卫星轨道定轨精度^[8]。

GNSS 的 DCB 是获取电离层延迟修正信息时必须扣除的硬件误差,同时也是实现 GNSS 精密定位中需要精确处理与控制的系统性误差。我们提出了“两步法”(IGDCB)数据处理策略来确定美国 GPS、GLONASS、BDS 及 GALILEO4 个系统的 DCB 参数(图 1)^[1]。与德国航空航天中心(DLR)方法相比,该方法通过逐测站建立局部电离层总电子含量(TEC)模型,在保证 DCB 参数估计精度与可靠性的同时,避免了原方法中对外部电离层信息(如全球电离层模型 GIM)及全球/区域电离层 TEC 建模依赖于大量基准站的缺点,克服了 BDS 地面监测站以境内布站为主的技术难题。自 2015 年 10 月中旬开始,多模 GNSS 差分码产品正式成为继 DLR 之后全球第二家被 IGS 向 GNSS 用户公开例行发布。图 1 给出欧洲定轨中心(CODE)GPS 产品作为参考,IGG 产品与 DLR 产品的比较结果。

当前国际通用的导航卫星 ECOM 光压模型是

基于 GPS 卫星动偏姿态控制模式建立的,该模型参考了 GPS 卫星的表面几何及光学参数,而我国北斗卫星采用了零偏航姿态控制模式(IGSO 与 MEO 每半年出现 2 次零偏航姿态控制模式)。综合上述两点,国际 ECOM 模型并不完全适用于北斗卫星系统,需要对北斗卫星光压摄动进行分析并建立适用于北斗卫星的精确太阳光压摄动力模型。针对上述现状,我们构建了一种能相对更好地描述北斗卫星在轨所受太阳光压摄动力的解析型先验模型 IGGB-SPM^[8],试验表明该模型与 ECOM 经验型模型组合,显著提高了北斗卫星(尤其在零偏期间)的定轨精度及稳定性。

根据上述最新研究成果以及长期的相关研究积累,我们研制了一套 BDS /GPS/ GLONASS/ GALILEO 综合数据处理与分析软件平台,能够精确计算并提供多模 GNSS 精密卫星轨道、电离层、对流层、地球定向参数、测站坐标等八大地学产品信息,基于研制的软件平台为承建国际 GNSS 全球连续监测评估系统(iGMAS)任务提供了重要保障。目前该平台也是首批被授权的国家分析中心之一。将利用自主的分析软件平台获得的 BDS 卫星定轨结果与卫星激光测距(SLR)结果检核比较,结果见表 1。

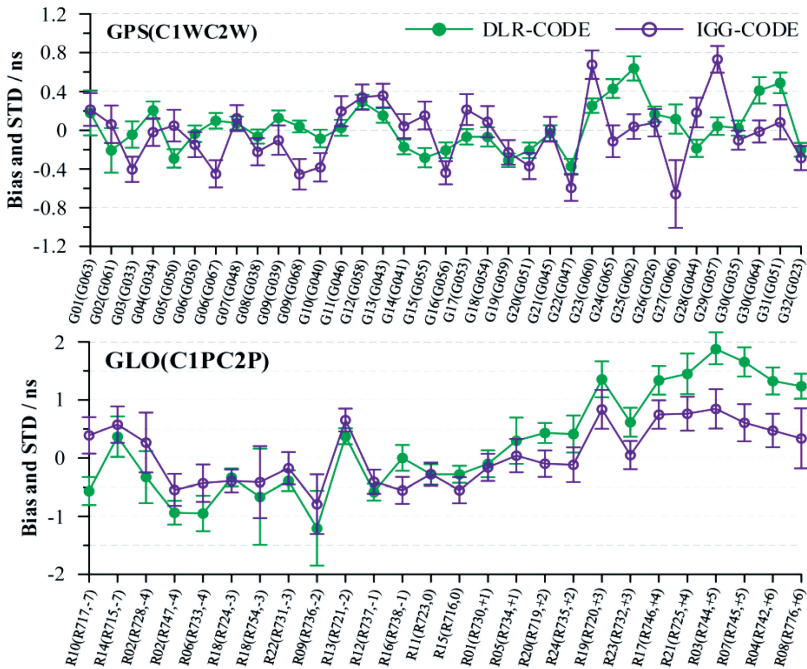


图 1 IGG 与 DLR 分别估计的 C1WC2W(GPS)及 C1PC2P(GLONASS)产品和 CODE 对应产品之间的偏差和标准差(2013—2014 年)

表 1 BDS 卫星定轨结果与卫星激光测距(SLR)结果的检核比较

(单位:cm)

卫星类型	GEO01				MEO03			
	零偏		动偏		零偏		动偏	
	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差	平均偏差	均方根误差
光压模型								
ECOM	-23.01	24.26	-16.68	18.64	-3.51	10.37	-1.64	6.18
IGGBSPM	-14.96	16.53	-13.61	15.27	-2.13	6.32	-1.25	4.88
提高百分比	35%	32%	18%	18%	39%	39%	24%	21%

2 陆海统一重力场模型的建立与水下重力匹配导航

围绕我国高程基准现代化建设中的若干关键科学问题,通过建立我国高程基准现代化基本理论体系,我们构建了以似大地水准面为参考面的我国陆海统一的高程基准框架。系统开展了陆海一致的多源重力场数据融合研究,局部与全球高程基准统一理论与方法研究,重力场数据处理、(似)大地水准面计算的精密理论和精化技术方法的研究。综合地面重力观测、海面测高重力场数据、(超)高阶全球重力场模型、船测重力数据以及高分辨地形数据,基于迭代法实现多源重力数据的融合,构建了超高阶陆海统一地球重力场模型(图 2)^[9]。

为提高陆海似大地水准面解算精度,基于椭球面采用 Tesseroid 单元体计算地形改正,避免了不同基准面给地形改正造成的误差影响;建立 Molodensky 二阶项及高阶项对高程异常影响的模型。考虑

高分辨率重力场模型的短波地形信息,克服了传统“移去—恢复”技术两次考虑部分地形质量的缺陷,从而提高大地水准面精化的精度^[10]。研究中,还将方差分量估计法应用于局部似大地水准面拟合研究;利用方差分量估计法获得各类观测值的单位权中误差,不仅可以精确估计观测值的随机模型误差并能合理确定各类观测值的权比,有效地提高了似大地水准面精化的精度^[11]。

以惯性/重力异常/重力梯度组合导航系统的信息融合技术为主线,针对国内重力辅助导航的最新发展趋势和相关瓶颈问题,深入研究了重力场辅助水下导航涉及的多项关键技术。利用重力场辅助导航所需高精度、高分辨率基础数据(重力异常、重力垂直梯度),结合海上科考年度测量重力数据,建立了重力辅助导航基础数据库,开展了重力匹配辅助导航工作原理、关键技术、重力异常/重力梯度匹配算法、航线设计以及系统研制等攻关。

在 INS/重力水下组合导航系统中,精确、稳定和可靠的导航定位方法可使载体航行时所测重力信号与导航数据库准确匹配。实现重力匹配的导航定位是组合导航系统的最关键技术之一。在现有重力匹配定位算法基础上,我们提出了一种基于相对位置约束的 INS/重力组合导航定位方法(RPCM 算法)。该方法具有更好的适用性和稳定性,仿真实验表明,相比传统的匹配定位方法,匹配成功率和定位精度有显著提高。另外以地形轮廓匹配算法(TERCOM)为基础,我们提出了一种新的重力匹配辅助导航算法(最小均方误差旋转拟合法)。基于最小均方误差原则,寻找重力场背景图中平行于惯导系统指示航迹的某条匹配路径,使之绕该匹配路径的位置质心以一定的角度间隔顺时针(逆时针)旋转,在一定角度范围内进行搜索以寻找最佳匹配路径,并与周围次佳匹配路径加权拟合,以拟合后匹配路径的终点位置为最优匹配位置。仿真试验结果表明,相比 TERCOM 算法和 SITAN 算法,该算法能实时获得载体的最优位置,匹配定位精度提高约 35%,

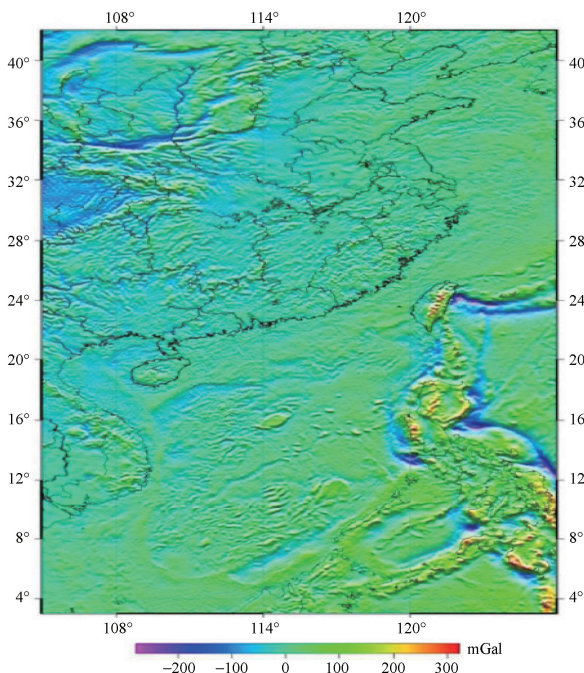


图 2 陆海统一区域重力场

达到 1.05 n mile, 对提高现有重力场辅助导航的定位成功率和定位精度具有重要意义。

3 卫星重力检测地表流体质量变化及重力反演

全球环境和气候变化是目前科学界和公众都非常关心的科学问题和社会问题, 我们长期致力于应用多种量化的空间大地测量观测技术手段, 例如卫星重力、卫星测高、GPS 等和多种地面观测及模式数据相结合, 不断发展高时空分辨率的数据处理技术和反演方法。

利用卫星重力资料, 我们发现华北地区(包括北京、天津、河北和山西)地下水储量在 2003 至 2010 年大约以 2.5 cm/yr 的速率下降, 与华北地区 40 口水井监测结果相符^[12]。定量计算的结果说明该地区每年损耗约 71 ± 10 亿吨地下水, 这一结果是早期基于浅层地下水统计结果的 3 倍多。两者之间的巨大差异表明, 深层地下水损耗远大于浅层地下水损耗。以前可能大大低估了目前面临的严重地下水危机。此外, 华北地下水减少最明显的地区主要在石家庄、保定等太行山山前平原区和北京、天津等地。研究还发现, 由于近年来降雨的增加, 华北地下水自 2012 年以来呈快速恢复状态。另外, 我们还成功发现华北地区地下水储量的年际变化信号特征。

利用 GRACE 卫星重力数据, 我们成功获得红海地区的季节性海水质量变化信号, 并发现海水质量变化是该地区的平均海平面变化的主因^[13]。利用卫星重力和扣除比容的卫星测高这两种独立的大

地测量技术, 监测发现红海地区海水质量变化的周年振幅近 18 cm, 并在每年的冬季(1—2 月)达到最大。该区域并址的洋底压力计观测也显示出了这种显著的周年变化, 与卫星重力结果一致。进一步的分析表明, 印度洋季风的季节性变化是导致红海海水季节性变化的主要因素。冬季, 红海南部的东南季风使得印度洋的海水侵入红海, 并导致了红海海水质量的累积。夏季, 盛行的西北季风则驱动红海的海水进入印度洋, 导致红海海水质量的减少。

利用 GRACE 卫星资料, 定量估计了 2002—2011 年南极冰盖质量变化。通过应用新的 Forward Modeling 方法, 提高了 GRACE 卫星资料在该区域的空间精度, 得到了更加精确的南极冰盖变化特征^[14]。数值结果表明, 在 2006—2008 年间, 有 2 次明显的冰盖加速融化和聚积, 西南极的冰盖质量在 2009—2011 年增速消融, 而东南极的冰盖则由于冰雪累积而呈现增加的趋势。整个南极冰盖消融对全球海平面变化的贡献是 0.18 mm/yr, 且南极区域的冰川消融是区域气候变化的原因。此外, 我们还提出了正则化的新方法, 利用 GRACE 数据给出了更加精准的南极和格陵兰岛冰雪消融速率的空间分布, 精化了冰雪消融的区域变化(图 3)^[15]。

基于 GRACE 重力卫星观测数据, 利用短弧长积分的重力反演方法, 成功解算出全球时变重力场模型(IGG—CAS), 达到了国际同类解算精度。在此基础上, 提出了基于功率谱半解析方法、方差—协方差对角张量原理方法等反演卫星重力场的多项技术方案, 并利用动力学方法建立 GRACE 的 K 波段

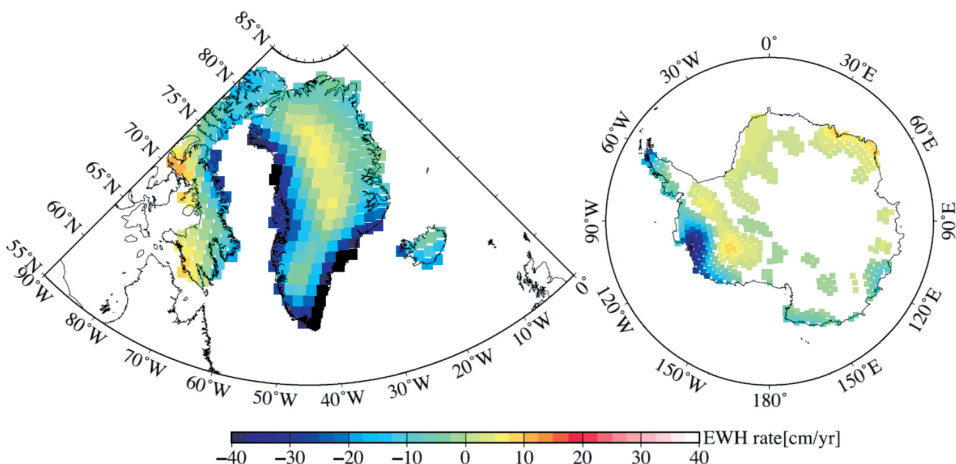


图 3 格陵兰岛和南极区域在 2003—2012 年的质量线性变化速率(不考虑 GIA 的影响)

距离变率观测、轨道观测与重力场系数的观测方程,成功解算出月时变的 IGG 时变重力场模型^[16]。结果表明,在全球、中国及周边地区质量异常趋势变化、异常均方差、阶位系数差以及亚马逊流域和撒哈拉沙漠等典型区域平均质量异常等方面,其数值与国际知名机构(CSR、JPL 和 GFZ)解算的 RL05 结果一致。我们利用撒哈拉沙漠地区的平均质量异常做反演精度评定,结果表明,其平均质量异常均方差都在 1 cm 量级,表明 IGG-CAS 解算结果达到了国际同一精度。此外,我们还采用全潮汐分量改正方法来提高重力场的反演精度^[17]。

4 大地测量约束的地震破裂与地球内部结构

近年来,相继发生的汶川、玉树、芦山、鲁甸、尼泊尔等破坏性强震均造成了巨大的人员伤亡和财产损失,加强地震震源性质和破裂过程研究是科学界关注的重大科学课题。传统的地震同震破裂和震后形变研究主要靠地震学技术实现,但由于近场资料缺失或者误差大,导致反演的同震破裂模型分辨率低,存在不唯一性。另外,地震方法难以得到长期的形变状态,从而无法确定地震的闭锁和震后形变状态。近年内发展起来的空大地测量(特别是 GNSS 和 InSAR 等)技术由于不受近场资料限幅影响,能在基线漂移小的前提下准确记录地表位

移,为解决以上问题提供了关键补充,特别是近场和中长期形变资料的约束。这大大加深了对地震断层破裂及震间震后形变的约束,从而为准确确定震源破裂过程、震后形变以及应力场提供了关键性技术。

我们发展了综合大地测量资料和地震波资料研究地震震源破裂过程的方法,采用有限断层破裂模型,以地震学获取的动态波形资料、静态 GPS 和 InSAR 获取的静态形变资料,以及高频 GPS 给出的动态位移资料,准确获得了地震的震源性质和破裂过程,相比于单纯采用地震波资料,其分辨率和准确性要高得多。图 4 给出了 2015 年尼泊尔地震研究中,联合采用大地测量和地震学资料确定的震源破裂模型和应力场分布,可以看到,结合了大地测量和地震波资料之后,其可靠性和分辨率得到了根本性的提高,与余震的分布有良好的一致性,并能够给出未来地震的危险性预测。从而证明了大地测量技术在地震波研究中的可靠性和重要性^[18]。

基于大地测量与地震观测的联合反演,我们对芦山地震、日本 Tohoku 地震、智利 2015 年大地震、哥斯达黎加地震、尼泊尔地震等国内外大地震进行了系统研究,获得了这些地震的准确的破裂过程模型,以及发震构造,为认识这些大地震的孕震环境、地震灾害,以及未来地震危险性提供了关键性的依据。

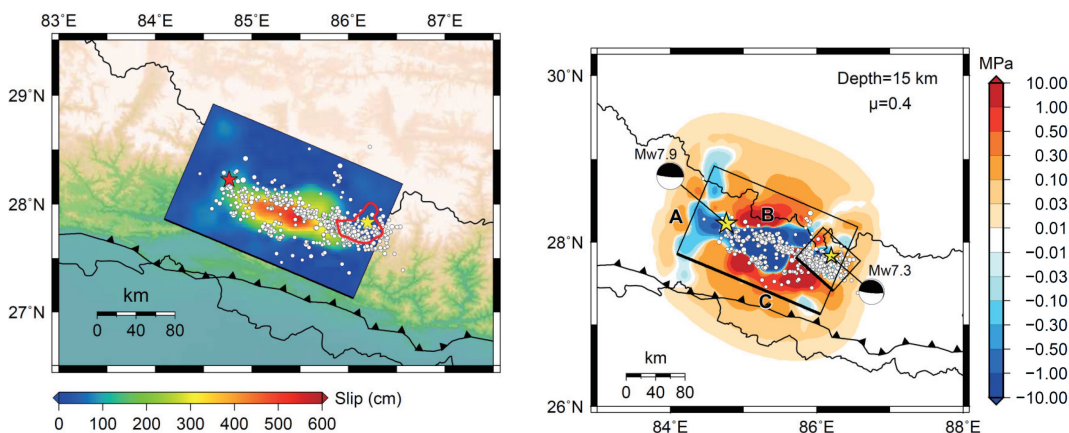


图 4 2015 年尼泊尔 Mw7.9 级地震震源反演中,联合地震和大地测量资料确定的震源破裂模型以及其与余震分布的关系

左为近场资料(包括静态和高频 GPS、强震仪台站、InSAR)和远震资料确定的地震破裂模型,及其余震分布,红色圈出的区域为 Mw7.3 破裂区域,可以看到两者有良好的互补性。右图为基于破裂模型计算的库伦破裂应力场,及余震分布图,可以看到 Mw7.3 级强余震分布在主震的应力增强区,并且能够勾画出 A、B、C 3 个危险区

断层闭锁状态及其地震应力场是判定断层的危险区域,以及未来地震大小和危险性的关键。传统上,对于断层闭锁区间的判断主要通过地震空区等方法来实现。然而,该方法存在着判定准确性低、难以对未来地震大小及区域进行准确评估的问题。针对这一问题,我们发展了利用 InSAR 观测数据反演地震震间闭锁状态的方法,利用近 10 年的 InSAR 升轨和降轨资料,得到土耳其伊斯坦布尔地区平均地壳形变场。扣除伊兹米特地震震后粘弹性松弛的影响,得到断层闭锁引起的形变。结果显示伊斯坦布尔南部 10 km 的王子岛断层处于明显闭锁状态,结合上次地震发生时间,暗示这一断层已积累了一定的断层应变,具有发生强地震可能,为判断断层的闭锁状态和危险性提供了关键性的约束^[19]。

地震发生后,特别是当地震发生在地质结构复杂的区域时,用不同方法计算得到的震源参数会出现较大的差异。我们发展了一种由高精度超导重力仪检测到的地球自由振荡参数约束点源震源机制解(走向、倾角、滑动角、 M_0)方法。即通过不同震源机制解理论模拟的自由振荡参数与实际超导重力仪器观测结果的比较,获得震源机制解参数振幅比。数值结果说明,重力低阶振型 ${}_0S_0$ 参数能有效实现约束震源机制解。图 5 给出了不同震源机制解计算的 ${}_0S_0$ 振幅谱与超导重力观测值的比较,选取了武汉台、拉萨台、和中山站三个台站。4 种颜色别代表了全球矩心矩张量(GCMT)、美国地质调查局 W 震相矩张量(USGS W_{phase})、法国斯特拉斯堡地球研究所 W 震相矩张量(IPGS-W_{phase})、美国地质调查局矩张量(USGS CMT)的震源机制解得到的 ${}_0S_0$ 振幅谱,虚线是实际观测值。

5 成像大地测量技术监测青藏高原冰川变化

针对重轨合成孔径雷达干涉(InSAR)失相干导致冰川地形及冰川表面变化难以精确提取等关键技术难题,提出了一种基于 X 波段地形 SAR 卫星的数字高程测量姊妹星(TanDEM-X)双站 InSAR 的冰川地形及冰川表面变化探测新方法^[21,22]。该方法利用零秒的时间基线等双站干涉测量优势,并引入外部 DEM 相位差分策略,在双站模拟相位和地理编码过程中考虑到双站几何结构和零时间多普勒时间参数,显著提高了相位解缠的效率及冰川地形及厚度变化提取的精度。

以青藏高原祁连山西部山地冰川为例,首次获取了该地区 10 m 空间分辨率、高程精度 0.7 m 的冰川地形及冰川表面高程变化结果(图 6),利用高精度 GPS 观测技术进行精度评估,精度达到了高分辨率地形信息三等标准数字高程模型(HRTI-3 DEM)要求,验证了该方法在地形复杂区域冰川 DEM 及冰厚变化测量的能力,为该地区冰川动力学及物质平衡的研究提供了重要基础资料。

Landsat-7 机载扫描行校正器(Scan Line Corrector, SLC)失效后的 ETM+影像(SLC-OFF 影像)约 22% 的数据缺失,严重限制了该影像在冰川学中的应用,特别是对长期缺乏高质量遥感影像的高亚洲地区的冰川运动连续监测产生了较大影响。因此,修复 SLC-OFF 影像并应用于冰川运动监测具有重要意义。我们提出了一种基于 Landsat-7 SLC-OFF 数据的山地冰川流速提取方法,运用局部线性直方图匹配算法(localized linear histogram match, LLHM)和加权线性回归算法(the weighted liner regression, WLR)修复 SLC-OFF 影像缺失数

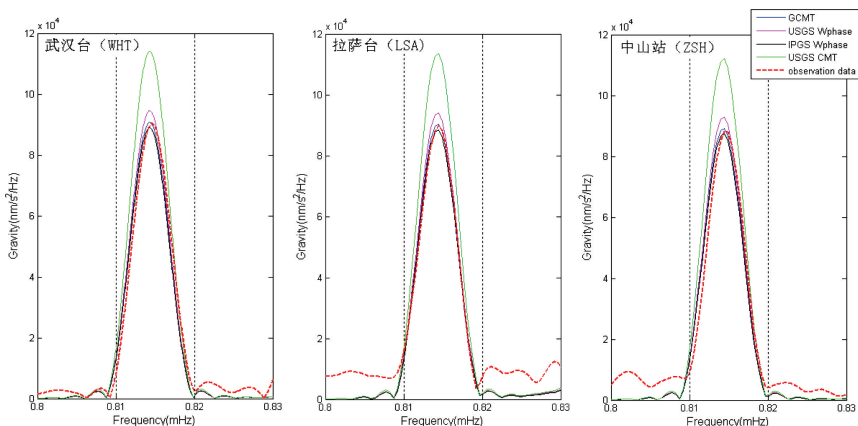


图 5 不同震源机制解计算的 ${}_0S_0$ 振幅谱与超导重力观测值的比较

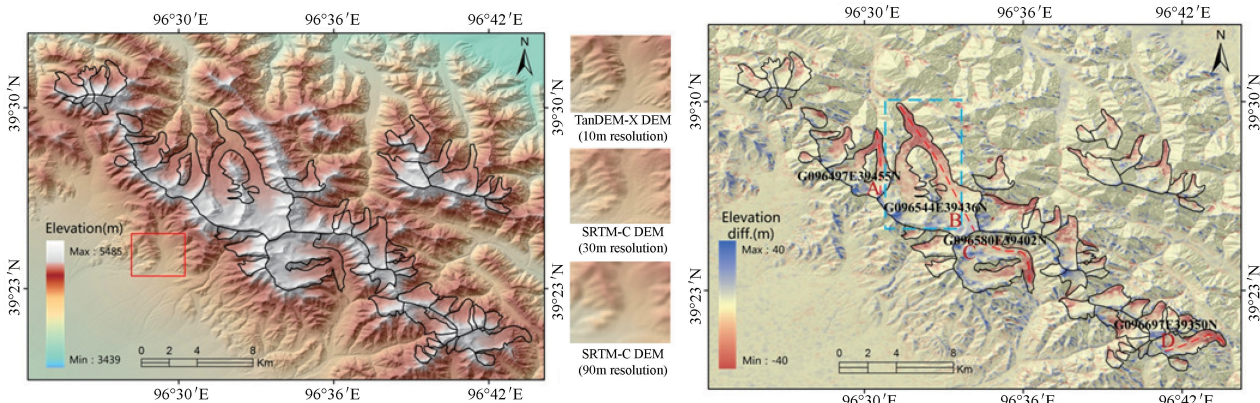


图 6 基于 TanDEM-X 双站 InSAR 的祁连山西部地区冰川
(左:地形重建;右:2000—2013 年冰川表面高程变化)

据,并利用亚像元互相关方法对修复后的影像进行冰川表面流速估算。以喀喇昆仑山脉中部区域锡亚琴冰川为例,选取 2009、2010 年获取的两景 SLC—OFF 影像提取冰川流速^[23]。结果表明,LLHM 和 WLR 两种方法均能有效修复冰川区 SLC—OFF 影像,其冰流估算结果与同期 Landsat-5 TM 影像的冰流结果较为一致,三者冰川流速估算精度分别为 5.9 m/yr、6.3 m/yr 和 4.0 m/yr,验证了 Landsat-7 SLC—OFF 影像在山地冰川流速监测中的应用潜力,这为 2003 年之后冰川监测提供新的数据源,对于长期、连续监测山地冰川运动具有重要意义。

6 青藏高原的重力变化及其超导重力技术的地球动力学应用

基于“中国地壳运动观测网络”项目 1998—2008 年共 5 期地面重复重力观测数据,利用分段线性动态平差方法对 5 期数据进行整体动态平差计算^[24]。数值结果(图 7)表明,青藏高原东部呈现明显的重力负变化,这与高原下地壳物质东流、地表明显上升有关;高原中西部呈明显的重力正异常变化,与 GRACE 结果得到的该地区质量增加信号相吻合;柴达木盆地呈现明显的重力负变化,反映该地区地壳垂直抬升,与该地区 GPS 结果较为一致;而塔里木盆地由于测点都布设在盆地边缘,对盆地实际重力变化反映有限;另外在龙门山断裂带附近存在一个明显的重力变化高梯度带,这与 2008 年汶川地震的孕震有关。观测的重力变化与均衡重力异常间存在的相关性表明在该区域均衡调整作用强于构造力作用。

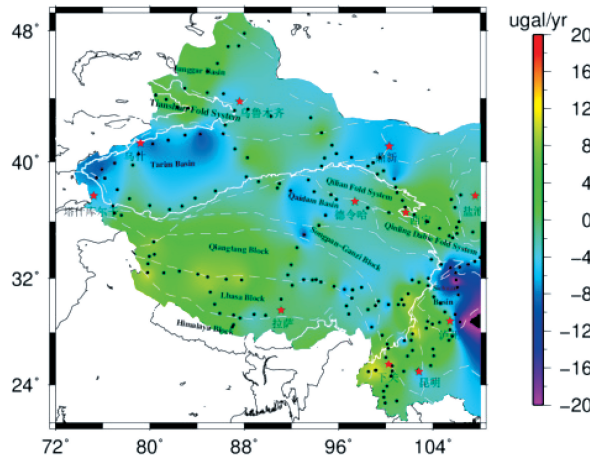


图 7 青藏高原及邻区重力场变化(1998—2008 年)

地球内部结构和核幔耦合是了解地球内部动力学过程的重要基础,利用各类高精度地表重力观测网络资料,研究了重力场潮汐和非潮汐变化特征及其动力学意义,结合地球自由振荡异常谱峰分裂和液态地核自由章动理论模拟,在提取地球内部动力学信号的同时(如地球液态地核的运动特征),获得了地球内部结构参数和核幔耦合特征的直接证据。

基于 GGP 推荐的计算地震频段噪音水平的方法,研究了拉萨和武汉九峰台站超导重力仪台站地震噪音等级(SNM)和亚地震等级(SSNM)的功率谱^[25-26]。对照地震学中新低噪音模型(NLNM),说明拉萨和武汉重力台站在地震和亚地震频段具有稳定的低背景噪音水平,具有优质的观测数据质量。

以往的地球物理研究忽视了小尺度横向不均匀

结构对长周期简正模耦合的显著影响。我们重点分析了青藏高原、台湾、赤道岛屿、地球南北极等局部区域的地球自由振荡观测记录,研究结果表明:小尺度显著的横向不均匀结构,主要是方位各向异性结构,可导致长周期简正模振动的偏振异常,从而导致球形简正模和环形简正模的耦合(图8)。在简正模早期观测记录中(18—36 h),可观测到局部区域横向不均匀结构产生的强烈长周期简正模耦合信号,其强度远超过地球自转科里奥利力引起的结果^[27]。我们还研究了日本深源地震激发的地球自由振荡信号,在径向和切向检测到了 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 、 ${}_0S_4$ 、 ${}_0S_5$ 、 ${}_0T_4$ 、 ${}_1S_2$ 、 ${}_3S_1$ 等振型的谱峰分裂现象,并且成功观测到了纯内核振型 ${}_2S_2$ 。同时,也观测到不同振型之间的耦合现象,如径向的 ${}_2S_0$ 振型和切向的 ${}_7S_2$ 振型之间的耦合,这有可能为我们提供有关地球内核顶部的新信息,相关研究仍在继续。

根据全球地球动力学计划观测网提供的全球超导重力观测资料和联合国国际甚长基线干涉量度法(VLBI)服务组织提供的章动观测资料,我们发展了全球超导重力资料的叠积技术,并引进贝叶斯算法,获得了更加精确的地球自由核章动(FCN)参数,还结合角动量 FCN 理论模型,对核幔边界的粘滞系数

等地球深内部物理参数进行了有效约束^[28,29]。数值结果表明,液核顶部的粘滞系数应该在 $6.6 \times 10^2 \sim 2.6 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,这与根据地球章动、液核自由章动及日长变化等的实际观测得到的粘滞系数非常吻合。地幔底部的电导率需要达到 $2.6 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^7 \text{ Sm}^{-1}$ 才能符合实际观测的 FCN 品质因子量级。耗散耦合对 FCN 本征周期的影响仅为 1—2 恒星日。

7 展望与讨论

相比于传统的地面大地测量技术,目前融合最新科学和技术的空间大地测量观测技术具有高精度、全球覆盖以及实时观测的优点,极大地促进了对地球科学的研究。各种观测手段的融合为我们研究特定的科学问题创造了条件。

以下六个方面的内容值得继续深入研究:

(1) 北斗/GNSS 多模系统联合精密定轨定位及大气反演研究。目标:适应我国卫星导航系统兼容互操作发展需求,深入研究北斗/GNSS 多模系统实现事后/实时联合精密定轨/钟差解算的模型与算法,探讨利用多模 GNSS 观测信息建立高精度电离层/中性大气反演新模型,研究基于多模 GNSS 系统的非组合精密定位算法,为我国北斗卫星导航系统建设及其产业化推广应用、航天任务实施、环境与灾害监测等提供高性能位置信息、空间环境信息与支撑技术服务。

(2) 多传感器信息融合的水下定位与导航。目标:联合惯性导航、重力、海底声学信标、GNSS 浮标等多传感器信息,构建适合海洋多源传感器观测数据的自适应融合导航方法,实现快速、高精度、高可靠性的水下目标定位导航,形成多源传感器国家自主海洋导航定位系统。为提高我国水下潜器在不同海洋环境、特定区域以及远程/长时下导航定位提供技术支持。

(3) 地表流体时空变化的多技术反演及其卫星重力载荷设计。目标:以区域 GPS 观测结合时变卫星重力场、陆地水文模式、InSAR、测井、地表重力等资料,联合反演特定区域地表流体变化时空特征。在此基础上,通过对区域中小尺度地表流体特征的分析,为下一代重力卫星提供载荷设计的科学目标,模拟设计高时空分辨率重力场确定的卫星轨道参数。

(4) 区域构造运动与地震大地测量。目标:通过综合利用大地测量学和地震学资料,建立研究地

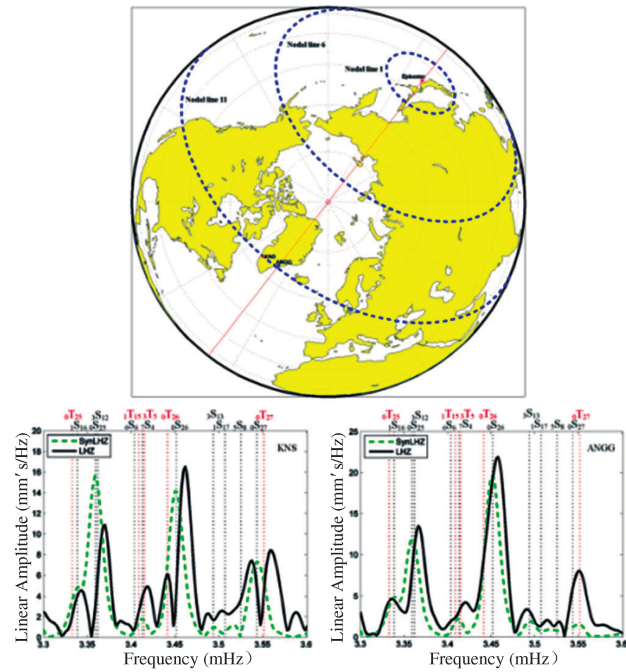


图8 2011年3月11日日本Mw9.0大地震后,在格陵兰岛台站KNS和ANGG观测简正模的结果

图中蓝色虚线是简正模 ${}_0S_{27}$ 的节线。在KNS台站,环形简正模 ${}_0T_{26}$ 和 ${}_0T_{27}$ 显示显著偏振异常,并有 ${}_0S_{26} \sim {}_0T_{26}$ 和 ${}_0S_{27} \sim {}_0T_{27}$ 强烈耦合信号。在ANGG台站未观测到偏振异常和强烈耦合的信号

震周期过程和应力场方法和模型,在此基础上分析地震的触发机制和地震危险性。同时利用数值模拟方法模拟中国大陆和周边的动力学变形,了解其形变机理。

(5) 华北平原含水层参数及地下水变化 InSAR 反演。目标:研究区域尺度地面沉降 InSAR 监测算法,获取华北平原地面沉降结果;厘清深层地下水变化与地面沉降耦合关系,构建顾及含水层迟滞排水的深层地下水储量变化估算模型,结合地下水资料反演华北平原含水层参数,主要包括弹性释水、非弹性释水系数、压缩时间常数等。

(6) 重力场时间变化及其对地球内部结构的约束。目标:获得观测台站的背景噪声水平和及其频谱特征;建立震后形变特征与地幔粘滞度之间的联系,为从地表观测反演地幔粘滞度提供理论基础;获取地球自由振荡参数及谱峰分裂特征,对大地震震源参数和地球各向异性提供有效约束;获得简正模谱峰分裂函数,对地幔波速结构和密度分布进行约束。探究核幔电磁耦合对 FCN 的定量影响,从而约束核幔耦合机制及核幔边界附近介质的物理参数。

致谢 本研究得到国家自然科学基金创新研究群体项目(批准号:41021003)及第一次延续(批准号41321063)、第二次延续(批准号41621091)的连续资助。

参 考 文 献

- [1] Wang N, Yuan Y, Li Z, et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(3): 209—228.
- [2] Li M, Yuan Y, Wang N, et al. Estimation and analysis of Galileo differential code biases. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(3): 279—293.
- [3] Wang N, Yuan Y, Li Z, et al. Improvement of Klobuchar model for GNSS single-frequency ionospheric delay corrections. *Advances in Space Research*, 2016, 57(7): 1555—1569.
- [4] Wang NB, Yuan YB, Li ZS, et al. An examination of the Galileo NeQuick model: comparison with GPS and JASON TEC. *GPS Solutions*, 2017, 21(2):605—615.
- [5] HuoX, Yuan Y, Ou J, et al. A new ionospheric tomographic algorithm taking into account the variation of the ionosphere. *Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition*, 2016, 59(7):2393—240.
- [6] Zhang HX, Yuan YB, Li W, et al. Assessment of three tropospheric delay models (IGGtrop, EGNOS and UNB3m) based on precise point positioning in the Chinese region. *Sensors*, 2016, 16(1): 122; doi:10.3390/s16010122.
- [7] Li W, Yuan YB, Ou JK, et al. New versions of the BDS/GNSS zenith tropospheric delay model IGGtrop. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(1): 73—80.
- [8] Tan B, Yuan Y, Zhang B, et al. A new analytical solar radiation pressure model for current BeiDou satellites: IGGB-SPM. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32967; doi: 10.1038/srep32967.
- [9] 郭东美, 鲍李峰, 许厚泽. 基于 EIGEN-6C2 重力场模型反演青藏高原地壳结构. *地球科学*, 2015(10):1643—1652.
- [10] 郭东美, 许厚泽. 中国大陆厘米级大地水准面的地形影响分析. *武汉大学学报(信息版)*, 2016, 41(3):342—348.
- [11] Guo D, Xu H. Application of variance components estimation to calibrate geoid error models. *SpringerPlus*, 2015, 4(1):434.
- [12] Feng W, Zhong M, Lemoine J-M, et al. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements. *Water Resource Research*, 2013, DOI: 10.1002/wrcr.20192.
- [13] Feng W, Lemoine J-M, Zhong M, et al. Mass-induced sea level variations in the Red Sea from GRACE, steric-corrected altimetry, in situ bottom pressure records, and hydrographic observations. *J Geodyn*, 2014, 78:1—7; DOI: 10.1016/j.jog.2014.04.008.
- [14] Peng P, Zhu Y, Zhong M, et al. Ice mass variation in Antarctica from GRACE over 2002—2011. *Marine Geodesy*, 2016; DOI: 10.1080/01490419.2016.1145609.
- [15] Mu D, Yan H, Feng W, et al. GRACE leakage error correction with regularization technique: case studies in Greenland and Antarctica. *Geophys Int J*, 2017, 208(3): 1775—1786; DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw494>.
- [16] 王长青, 许厚泽, 钟敏, 等. 利用动力学方法解算 GRACE 时变重力场研究. *地球物理学报*, 2015, 58(3):756—766.
- [17] 王长青, 许厚泽, 钟敏, 冉将军, 周江存. 海潮误差对 GRACE 时变重力场解算的影响. *研究地球物理学报*, 2015, 58(9):3072—3079.
- [18] Liu C, Zheng Y, Xiong X, et al. Rupture processes of the 2012 September 5 M_w 7.6 Nicoya, Costa Rica earthquake constrained by improved geodetic and seismological observations. *Geophysical Journal International*, 2015, 203(1): 175—183.
- [19] Diao FQ, Walter TR, Solaro G, et al. Fault locking near Istanbul: indication of earthquake potential from InSAR and GPS observations. *Geophys J Int*, 2016, 205(1): 490—498.
- [20] Jiang Y, Hu XG, Liu CL et al. Constraining the focal mechanism of the Lushan earthquake with observations of the Earth's free oscillations. *Science China Earth Sciences*, 57(9): 2064—2070.
- [21] 孙亚飞, 江利明, 柳林, 等. TanDEM-X 双站 SAR 干涉测量及研究进展. *国土资源遥感*, 2015, 27(1):16—22.
- [22] 孙亚飞, 江利明, 柳林, 等. TanDEM-X 双站 InSAR 地形提取及精度评估. *武汉大学学报*, 2016, 41(1):100—105.

- [23] 孙永玲, 江利明, 柳林, 等. 基于 Landsat-7ETM+SLC-OFF 影像的山地冰川流速提取与评估—以 Karakoram 锡亚琴冰川为例. 冰川冻土, 2016, 38(3): 596—603.
- [24] 隗寿春. 青藏高原及邻区重力时变特征及动力学意义. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, pp122.
- [25] Zhang MM, Xu JQ, Sun HP, et al. OSG-057 superconducting gravimeter noise levels in Lhasa (China). *Terr Atmos Ocean Sci*, 2016, 27(6): 807—817.
- [26] Zhang MM, Xu JQ, Sun HP, et al. Comparison of noise levels of the new iGrav-007 superconducting gravimeter and the SG-065 superconducting gravimeter in Wuhan (China). *Bulletin d'information des Marees Terrestres (BIM)*, 2014, 148: 11987—12000.
- [27] Hu XG. Observations of the azimuthal dependence of normal mode coupling below 4 mHz at the South Pole and its nearby stations; Insights into the anisotropy beneath the Transantarctic Mountains. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2016, 257: 57—78.
- [28] Cui XM, Sun HP, Rosat S, et al. Investigation of the time variability of diurnal tides and resonant FCN period. *Journal of Geodynamics*, 2014, 79: 30—38.
- [29] 崔小明, 孙和平, 徐建桥, 等. 利用 VLBI 和超导重力资料研究自由核章动周期时变特征. *地球物理学报*, 2014, 57(2): 384—391.

Research progress of the modern geodesy with its application in Geosciences

Sun Heping^{1,2} Xu Jianqiao¹ Jiang Limin¹ Liu Genyou¹ Zheng Yong¹
 Yan Haoming¹ Bao Lifeng¹ Hu Xiaogang¹ Zhou Jiangcun¹

(1. *Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430077;*
 2. *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

Abstract Based on the research project of the national nature science foundation, the research progress situation of the modern geodesy with its application in geosciences are summarized in this paper, the contents include the science application achievements by using the ground and space based modern geodesy techniques (such as GPS, Beidou system, absolute and superconducting gravity, oceanic gravity, satellite altimetry, InSAR and so on) in the various Earth science domains (such as navigation, positioning, gravity field, earthquake, glacier, ground surface water, interior structure and geodynamics of the Earth and so on).

Key words modern geodesy; navigation and positioning; gravity field; regional tectonic movement; interior structure; seismic monitoring