

引文格式:党亚民,蒋涛,杨元喜,等.中国大地测量研究进展(2019—2023)[J].测绘学报,2023,52(9):1419-1436. DOI:10.11947/j. AGCS.2023.20230343.

DANG Yamin, JIANG Tao, YANG Yuanxi, et al. Research progress of geodesy in China (2019—2023)[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(9): 1419-1436. DOI:10.11947/j. AGCS.2023.20230343.

中国大地测量研究进展(2019—2023)

党亚民¹, 蒋涛¹, 杨元喜^{2,3}, 孙和平^{4,5}, 姜卫平⁶, 朱建军⁷, 薛树强¹, 张小红⁸, 蔚保国⁹, 罗志才¹⁰, 李星星⁸, 肖云^{2,3}, 章传银¹, 张宝成⁴, 李子申¹¹, 冯伟¹², 任夏^{2,3}, 王虎¹

1. 中国测绘科学研究院, 北京 100036; 2. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054; 4. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071; 5. 中国科学院大学, 北京 100049; 6. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079; 7. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 8. 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079; 9. 中国电子科技集团公司第五十四研究所卫星导航系统与装备科技国家重点实验室, 河北 石家庄 050081; 10. 华中科技大学物理学院, 湖北 武汉 430074; 11. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 12. 中山大学测绘科学与技术学院, 广东 珠海 519082

Research progress of geodesy in China (2019—2023)

DANG Yamin¹, JIANG Tao¹, YANG Yuanxi^{2,3}, SUN Heping^{4,5}, JIANG Weiping⁶, ZHU Jianjun⁷, XUE Shuqiang¹, ZHANG Xiaohong⁸, YU Baoguo⁹, LUO Zhicai¹⁰, LI Xingxing⁸, XIAO Yun^{2,3}, ZHANG Chuanyin¹, ZHANG Baocheng⁴, LI Zishen¹¹, FENG Wei¹², REN Xia^{2,3}, WANG Hu¹

1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China; 2. State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China; 3. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China; 4. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 7. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China; 8. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 9. State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, The 54th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Shijiazhuang 050081, China; 10. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 11. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 12. School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

Abstract: From July 11 to 20, 2023, the 28th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) general assembly was held in Berlin, Germany. According to the tradition of IUGG, the Chinese National Committee for International Association of Geodesy (CNC-IAG) organized dozens of domestic institutions to compile the "2019—2023 China National Report on Geodesy", which summarized the research progress of various branches of geodesy in China from 2019 to 2023. This article summarizes the overall progress of China's geodetic discipline in recent years, focusing on representative progress in six research directions including reference frame, comprehensive PNT and resilient PNT, gravity field and vertical datum, precise GNSS products, multi-source sensor integrated navigation, and marine geodesy. Moreover, in light of the development trends of international geodesy and related interdisciplinary disciplines, several suggestions are proposed for the future development of geodesy in China.

Key words: IUGG; reference frame; PNT; gravity field; vertical datum; navigation and positioning; marine geodesy

摘要: 2023年7月11日至2023年7月20日,第28届国际大地测量学和地球物理学联合会(The International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG)大会在德国柏林举行。按照 IUGG 传统,国际

大地测量协会中国委员会(CNC-IAG)组织国内十余家单位编写了“中国大地测量国家报告(2019—2023)”,分别总结了2019至2023年4年期间的中国大地测量各分支学科研究进展。本文主要归纳和总结了我国大地测量学科近几年的整体进展,侧重各领域代表性研究进展,主要内容包括基准框架、综合PNT与弹性PNT、重力场与垂直基准、GNSS精密产品、多源传感器组合导航和海洋大地测量6个研究方向。此外,结合国际大地测量及相关交叉学科的发展趋势,对我国大地测量学科未来发展提出了几点建议。

关键词: IUGG;基准框架;PNT;重力场;垂直基准;导航定位;海洋大地测量

中图分类号: P227

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2023)09-1419-18

2019至2023年期间,中国大地测量工作者紧盯国家经济发展和国防建设发展需求,顺利完成了多项有影响力的重大工程和研究工作。北斗卫星导航系统于2021年7月31日正式向全球用户提供定位导航定时(PNT)服务和国际搜救服务,向国内用户提供星基精密单点定位(PPP-B2b)服务和星基导航增强服务^[1-2];历尽艰辛,综合运用多种大地测量技术,于2020年12月完成了2020珠峰高程测量^[3];突破系列卫星平台和载荷关键技术,于2021年成功发射了我国第一组低-低跟踪重力测量卫星^[4];于2023年3月成功发射了我国第一组低-低伴飞海洋测高卫星^[5];初步实现了我国海底大地测量基准试验网建设,研制了成套海底信标装备,突破了海洋大地测量基准建设系列关键技术^[6-8];毫米级大地测量坐标基准建设的关键技术攻关取得重要进展^[9-11];为了实现从深空到深海的无缝PNT服务,近两年,我国综合PNT论证取得实质性进展,弹性PNT已经从理论框架逐渐走向了弹性终端研制、弹性观测模型构建和弹性随机模型优化研究等,并取得系列研究成果^[12-15];室内定位导航、复杂环境的定位导航取得丰富的研究成果^[16-17];地球重力场、垂直基准、非线性地球参考框架建设相关理论、大地测量数据处理理论与方法等也取得了有影响力的学术产出^[18-24];智能化大地测量数据处理也进行了初步尝试^[25-26]。本文重点梳理了近4年我国大地测量的主要成就,同时也为中国大地测量未来发展重点提出了建议。

1 非线性地球参考框架构建与维持

高精度地球参考框架(地球基准框架)作为大地测量的空间基准,是国家重要的基础设施。但由于受到与地球物理现象有关的非线性因素的影响,ITRF框架的整体维持精度仍处于厘米级水平。因此,精准刻画出基准站的线性运动、非线性

运动和地心运动的真实轨迹是实现毫米级地球参考框架构建与维持技术的关键。需要指出的是,我国北斗全球卫星导航系统,以及系列甚长基线干涉测量系统和卫星激光测量站的建设,使得建立我国自主可控、高精度的全球/中国区域地球参考框架成为可能。我国区域框架升级至全球化的“新跨越”,将会进一步夯实国家综合PNT体系顶层基准的地基。

1.1 地球参考框架动态维持

研究建立1毫米精度的大地测量坐标基准框架是当前国际大地测量学界的重要挑战,也是我国区域坐标框架建设的目标^[9]。毫米级基准框架的实现需要对应的毫米级的动态维持技术。目前,中国学者在框架维持技术方面侧重研究了基于线性速度的线性维持技术、综合考虑基准站非线性运动和地心运动的非线性维持技术等^[10,18]。通过对全球导航卫星系统(GNSS)测站坐标非线性变化规律及其分布与影响机制研究,表明环境负荷和热膨胀效应是造成基准站的年周期幅度变化的重要原因,周年性系统误差、高阶电离层延迟和噪声模型也会产生一定的影响^[27-28]。当然,毫米级动态基准框架的维持还有系列科学和技术问题需要解决,如GNSS处理模型的进一步精化、地球物理影响机制和基准站坐标时间序列非线性运动模型精度的耦合效应探索、历元基准框架的精度与稳定性提升技术等^[3]。

1.2 区域基准框架维持与垂直形变

高精度区域坐标基准框架是国家经济建设和大型工程建设的基础。目前,我国北斗全球卫星导航系统在构建高精度区域基准框架中与美国全球定位系统(GPS)保持同一水平,融合北斗数据维持区域基准框架,可提升区域基准框架可靠性,进一步促进了GNSS技术在区域基准框架和数据服务的动态监测和维护中的作用,改进了区域参考系维护的理论和方法^[29]。基于GNSS数据

研究了珠峰区域块体模型和三维地壳形变特征^[30-31],结果表明该区域地壳垂直形变由南至北跨喜马拉雅山脉呈明显阶梯型分布特征;2015年尼泊尔震后印度板块与欧亚板块存在加速汇聚趋势,从而导致地壳隆升速率增大。

1.3 CGCS2000 坐标框架的更新与维持

2000 国家大地坐标系(CGCS2000)及其坐标基准框架的更新、维持与应用是大地测量工作者永恒的课题之一,我国学者在中国大陆水平运动速度场模型、板块欧拉矢量运动模型、坐标转换格网模型构建与应用方面取得系列成果^[32-33],为中国动态大地坐标框架最优实现提供了理论与算法支撑;将监督聚类统计理论应用于基准站的优选,同时提出了大规模站网的间距分区法,并用板块运动改正实现 CGCS2000 参考历元的坐标归算。在 CGCS2000 坐标系毫米级精度维持理论中,有学者提出顾及板块运动的坐标框架更新方法,首先将站点坐标对准 ITRF,并考虑到板块的移动,将这些坐标修正到 CGCS2000 框架坐标中;此外,有多位学者利用分析中心提供的无约束平差法方程组合来估计区域控制站精确坐标^[34]。

1.4 中国大陆长期 GNSS 观测数据重新处理

丰富的 GNSS 数据源和顾及大地震同震/震后影响改正的严密数据处理,是保证中国大陆地壳运动速度场精度和可靠性的基础性要素。为此,中国学者基于更新的 Repro3 算法模型对 GNSS 数据进行了统一重处理,以获取更为“干净、可靠”的 GNSS 坐标时间序列,并结合中国大陆地震历史记录,顾及复杂非线性因素(速度、阶跃、周期、同震/震后形变)影响,重新解算了 GNSS 时序模型,并获取高精度中国大陆 GNSS 水平速度场^[35];有学者总结了大规模 GNSS 网数据一体化处理优化原则与质量评估方案^[36],提出了基于改进周期图谱法和整体最小二乘理论的非均匀 GNSS 坐标时间序列分析方法,考虑了观测误差、系数阵误差和虚假谱峰的影响^[37],提升了 GNSS 速度场估计精度;针对非线性震后形变模型,采用附加约束非线性规划自动估计最优地震弛豫时间,提高了时序模型的整体精度^[38];此外,有学者提出了一种基于谱分析和假设检验的时间序列精化模型,可以对基站运动轨迹模型的正确性和各解算参数的显著性进行检验评估^[39]。

1.5 中国大陆现今 GNSS 速度场模型与形变

在精细化构建中国大陆格网速度场模型过程

中,提出了局部无缝 Delaunay 三角网反距离加权法,该模型不仅考虑了站点距离和方位信息,还能刻画出更为精细的局部特征,同时克服了边缘地区整体三角网跨度过大以及块体边缘三角网不连续的缺点^[40];为提高中国大陆区域水平速度场的精度,并精细地刻画其自身的局部运动特征,构建了基于欧拉矢量模型的中国大陆省级块体相对运动模型和部分省内子块体相对运动模型,并利用非监督聚类算法对地壳运动复杂区域的水平速度场进行子块体划分^[41]。基于插值得到中国大陆均匀水平格网速度场,分析了中国大陆平面的应变特征,探索了中国大陆地壳变形的分布特征及其与强震的强相关关系^[35];利用改进的 K-Means 十聚类分析方法将中国大陆划分为 7 个块体,结果表明与现有的地块划分成果符合度较高,具有较强的可靠性与可信度^[35]。

1.6 北斗地心基准框架的初步实现与评估

当前国际和区域坐标基准框架主要以 GPS 观测技术实现,将北斗系统融入区域大地坐标框架维持是中国大地测量工作的主要任务之一。目前,已有学者利用全球 MGEX 站北斗观测数据初步实现并评估了新一代利用 BDS-3 技术构建的全球地心基准框架(CTRF2020),其参考历元为 2020 年 1 月 1 日,主要成果表现形式为一系列框架点与参考历元的高精度坐标和速度^[42]。CTRF2020 的初步实现与评估,为未来实现以 BDS-3 技术为主、多空间大地测量技术为辅的综合性地球参考框架维持提供参考借鉴。

2 综合 PNT 与弹性 PNT

以 GNSS 为代表的天基定位、导航和定时(PNT)技术极大地改变了 PNT 信息传递与服务方式,促进了全球、全天时、全天候的 PNT 基准统一。然而,天基 PNT 存在落地信号弱、易被干扰和遮蔽等问题,美、欧等世界强国(地区)开始重视其他 PNT 手段的发展,我国学者也着手研究更加合理的 PNT 应用和服务模式,以确保用户获取 PNT 信息的连续性、可靠性和安全性^[12]。

2.1 综合 PNT 信息源体系建设

2016 年,中国学者率先提出综合 PNT 概念,与美国 2010 年提出的 PNT 体系的核心差别是强调多物理原理构建的综合 PNT 体系,实现从深空到深海 PNT 服务的无缝覆盖。早期的综合 PNT 是所有 PNT 信息源的简单集成,但并未对

PNT 信息源属性进行精细划分。经过不断的论证,中国学者将综合 PNT 体系分解成综合 PNT 基础设施和综合 PNT 应用体系^[12]。其中,综合 PNT 基础设施主要指经过精心设计和建设的 PNT 信息源基础设施;综合 PNT 应用体系则指基于各类 PNT 基础设施信源和自然界信源的 PNT 集成应用体系,如综合利用脉冲星信号、重力感知、磁力感知、惯导、视觉、声学等 PNT 信源实现的 PNT 应用模式。

综合 PNT 基础设施无疑是综合 PNT 体系建设的核心和基础,其建设应当在国家层面进行统筹和规划,确保资源合理规划和利用,并实现 PNT 信息源从深空到深海的无缝覆盖。综合 PNT 基础设施包括拉格朗日点导航星座、高轨卫星定位系统(GNSS)、低轨导航增强星座、地基长波无线电导航定位系统、地面可用的通信基站网、海面导航定位浮标网、海底声学导航信标网等。目前我国已有远程长波导航台站 6 个,还将继续优化布局,升级改造,扩大覆盖范围;通信基站站网布设广泛,目前已有超过 480 万座通信基站和超过 50 万座 5G 基站,可作为地基 PNT 服务的重要增量,中国移动也发布了全球最大的“5G+北斗”高精度定位平台“One Point”,可以提供亚米级、厘米级甚至毫米级定位服务^[43];地基增强系统建成地面站全国一张网,可向广大用户提供实时米级、分米级、厘米级和事后毫米级高精度定位和增强服务;海底大地基准网建设和水下导航信标装备研制取得突破,研制了适应水下 3000 m 水深的“唤醒式”水下信标装置,并在南海海域布设了海底 PNT 试验信标网,可以实现 10 m 精度的定位导航服务^[6-7]。

2.2 弹性 PNT 应用模式

综合 PNT 基础设施提供了多物理原理的 PNT 信息源,自然界还广泛存在天然 PNT 信息源。为了合理使用 PNT 基础设施信息源、天然 PNT 信息源和用户自感知 PNT 信息源(如惯性导航、光学和图像信息源),实现用户 PNT 应用的最优化,中国学者提出了弹性 PNT 融合应用思想。该思想与国际上其他弹性授时概念、弹性定位导航概念的核心差别在于,中国学者提出的弹性 PNT 包括:PNT 传感器弹性集成、各类 PNT 感知函数模型弹性优化、随机模型弹性调整和多源信息弹性融合等多源 PNT 应用全过程的弹性化。

弹性 PNT 概念自 2018 年提出后,快速成为研究热点,学者们不仅对弹性 PNT 内涵进行了辨析^[7,44],还针对不同应用场景,提出了多种弹性 PNT 模型,并尝试将深度学习和神经网络等智能算法融入 PNT 数据处理^[25]。在水下 PNT 弹性应用方面,中国学者构建了附加周期误差项和分段多项式相结合的弹性观测模型以补偿水声观测系统误差影响^[45-46],构建了随机游走噪声以及抗差估计相结合的声学随机模型^[46-47];在城市 PNT 弹性应用方面,构建了观测先验置信度与贝叶斯最大似然后验估计相结合的观测权重动态更新模型^[48],提出了通过梯度提升与决策树相结合的惯导误差补偿模型^[49]。在室内和地下等非暴露空间场景,Wi-Fi、蓝牙、UWB、伪卫星等无线电信号的弹性融合以及惯导、重磁匹配等自主导航手段的弹性集成取得丰富的研究成果^[16-17]。

3 地球重力场与垂直基准

近年来我国重力卫星任务成功实施,国产重力仪研发工作稳步推进,建立了多个超高阶重力场模型和纯卫星重力场模型,参与了国际大地测量协会(IAG)科罗拉多大地水准面建模试验,首次在珠峰地区实施航空重力测量并实现国际高程参考系统。本节从重力测量、静态和时变重力场、海洋重力场、大地水准面与垂直基准及重力场理论算法和软件等方面总结近年来地球重力场与垂直基准领域的研究进展。

3.1 重力测量

我国建立了一个由 80 多个站点组成的连续观测重力网络,重力仪器包括 GWR 超导重力仪、PET/gPhone、DZW、GS15 和 TRG-1 等各类重力仪,在地球动力学和地球内部构造研究方面发挥了重要作用,特别是我国超导重力观测站,与全球 40 多个站点一起参与全球地球动力学国际合作项目,作出了重要贡献^[50]。中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研制的 CHZII 型海空重力仪和中国航天科技集团公司研制的 SAG 系列重力仪正在逐步走向成熟。2018 年,向阳红 6 号科考船搭载 6 个型号的海洋重力仪(CHZ-II、SAG-2M、SGA-WZ、ZL11、俄罗斯 GT-2M 和美国 LCR)在南海海域开展对比试验,试验结果表明,国产重力仪的精度接近 GT-2M 重力仪,高于 LCR 重力仪^[51];中科院精测院、浙江工业大学、中国船舶重工集团有限公司分别开展了量子绝对

重力仪的研发和试验,解决了冷原子绝对重力仪研制的部分关键问题^[52-53]。

我国第一个卫星跟踪卫星模式的重力卫星系统于2021年底成功发射,该系统采用高-低和低-低卫星跟踪混合测量模式来获取全球重力场及其时变信息。在轨测试结果显示,卫星系统工作状态正常,各项指标满足设计要求,显著提升了我国卫星系统的研制水平和空间微重力测量能力。利用2022年4月1日至2022年8月30日期间的卫星数据反演了60阶次时变地球重力场模型,该模型可以很好地表征全球水文变化,与GRACE FO卫星结果的RMS差值仅为2 cm,可为大地测量、地球物理、地震、水资源管理、冰川学、海洋学和国防安全等提供重要数据支撑^[4]。

3.2 静态重力场和时变重力场

静态重力场建模方面,武汉大学基于椭球谐分析和系数变换理论,综合GOCE重力卫星、卫星测高海洋重力异常和EGM2008模型陆地重力异常数据及卫星模型法方程构建了2190阶重力场模型SGG-UGM-2^[19]。中国测绘科学研究院采用基于椭球谐系数的块对角阵最小二乘方法,利用GOCO06S模型、全球地面重力异常和卫星测高海洋重力异常数据构建了2190阶重力场模型CASM-EGM2020,应用于全球地理信息资源建设工程。武汉大学、同济大学、西南石油大学和广东工业大学分别利用GRACE和GOCE重力卫星数据建立了纯卫星重力场模型WHU-SWPU-GOGR2022S(300阶次)、Tongji-GMMG2021s(300阶次)、SWPU-GRACE2021S(180阶次)和GOSG02S(300阶次)。

时变重力场研究方面,华中科技大学基于动力法和短弧法混合处理策略^[20],使用GRACE L1B和AOD数据,构建了月重力场模型序列HUST-Grace2019和HUST-Grace2020。同济大学利用优化的短弧法构建了GRACE月重力场模型序列Tongji-Grace2018,引入滤波后GRACE质量变化估计作为空间约束,构建了月重力场模型序列Tongji-RegGrace2019,应用时无须再进行滤波处理,与GRACE官方Mascon解精度相当^[54]。武汉大学分别基于动力法和改进能量积分法构建了月重力场模型序列WHU RL02和WHU-GRACE-GPD01^[55]。西南交通大学采用改进参数化策略解算了月重力场模型序列SWJTU-GRACE-RL02p^[56]。西南石油大学利用动力法解

算得到展开至96阶的月重力场模型序列SWPU-GRACE2021^[57]。

海洋重力场研究方面,中国学者验证了HY-2A/GM数据有助于提升海洋重力场反演精度,并联合多源卫星测高和海洋测深数据构建了全球海洋重力异常数据集GMGA1^[58]、GMGA2^[59]和NSOAS22^[60]。新一代宽刈幅干涉测高卫星SWOT能够以高精度和高分辨率进行大范围的海面高度测量,SWOT单周期和多周期数据模拟结果表明,重力场反演精度和分辨率优于传统测高卫星组合^[61-62]。利用SARAL/Altika等多源卫星数据建立了南中国海1'×1'海洋重力异常模型SCSGA V1.0^[63]。利用多源卫星测高数据解算得到全球重力异常Grav_Alti_WHU,联合船测水深数据构建了全球海底地形模型BAT_WHU2020^[64]。

3.3 大地水准面与垂直基准

中国测绘科学研究院参与国际大地测量协会(IAG)科罗拉多大地水准面建模试验,利用谱组合方法联合卫星、地面和航空重力数据构建了大地水准面模型,模型相对于GNSS水准数据的标准差为3 cm^[21,65-66];在2020珠峰高程测量中,首次开展珠峰地区航空重力测量和峰顶地面重力测量,联合地面和航空重力数据建立了精度为3.8 cm的珠峰重力似大地水准面,首次在珠峰地区实现国际高程参考系统,获取了高精度峰顶正高^[3,22,66-67];提出了联合GNSS站网和地表质量负荷数据的区域高程基准框架维持方法。武汉大学联合超高阶重力场模型与中国GNSS水准数据,分别利用异常位法、正常高反算法及高程异常差法确定了中国1985国家高程基准与全球高程基准之间的垂直偏差^[68]。自然资源部大地测量数据处理中心分析了全国一等水准点高程近20年的变化^[23],综合利用国家一等水准网、国家GNSS大地控制网等数据建立了中国大陆垂直运动模型^[24]。自然资源部第一海洋研究所联合利用长期验潮站、卫星测高等多源数据,在山东沿海等海域实现了CGCS2000和1985国家高程基准向海域延伸及陆海垂直基准之间的相互转换^[69]。

3.4 重力场理论算法和软件

中国学者开展了一系列重力场理论算法和软件研究,讨论了两种不同边界面的球近似第二大地边值问题^[70];研究了基于双向卫星时频传递光学原子钟比对观测的重力位测定方法^[71];提出了

基于六边形网格剖分的全球重力场结构,推导了对应的球谐分析和综合算法公式^[72-73];推导了残余地形模型(RTM)大地水准面高的调和改正公式^[74];提出了等角格网和高斯格网的球谐分析算法^[75];提出了一种适用于补偿各类海空重力仪动态效应剩余影响的通用模型,推导了计算地球外部及地面重力异常垂向梯度全球积分模型的分步改化公式,提出了补偿传统改化模型理论缺陷的修正公式^[76-77];研发了高精度重力场逼近与大地水准面计算系统 PAGravf 和地球潮汐负荷效应与形变监测计算系统 ETideLoad^[78]。

4 GNSS 精密产品生成与应用

GNSS 高精度服务通常利用全球广泛分布的参考网数据生成卫星轨道和钟差等精密产品,并将其应用于精密定位等诸多领域。本节介绍了武汉大学 IGS 分析中心与数据中心的发展现状,归纳了 GNSS 非差非组合数据理论与应用的研究进展,总结了精密电离层建模与应用的近期成果,讨论了当前广域实时精密定位的技术水平。

4.1 武汉大学 IGS 分析中心与数据中心建设

武汉大学 IGS 分析中心和数据中心近年来为中国和全球用户提供了更加丰富、精密的 GNSS 数据和产品。自 2019 年起,武汉大学 IGS 分析中心开始提供包括我国北斗在内的多系统 GNSS 最终产品,涵盖卫星轨道、钟差和地球自转参数等产品。自 2022 年起,武汉大学最终产品生成采纳了 ITRF2020 框架并考虑了 IGS 第三次重处理意见,同时实现了非差模糊度固定以提升轨道和钟差产品精度^[79]。除了对数据处理配置的改变,数据处理模型也得到了提升,尤其是针对我国北斗系统,建立了增强的拓展 CODE 轨道模型^[80],校准了卫星天线相位中心偏差和变化,考虑了不同类型卫星的姿态控制模式^[81]。此外,武汉大学分析中心还提供全球电离层产品^[82],并于 2020 年底开始发布实时电离层产品^[83]。武汉大学分析中心自加入 IGS 实时工作组以来,建立了实时卫星钟差滤波模型^[84],为 GLONASS 实时钟差估计提供了频间偏差产品^[85],提供了快速卫星相位偏差产品并开源了 PRIDE PPP-AR 软件^[86]。此外,武汉大学还通过绝对天线校正提供天线相位中心改正产品。上述所有数据和产品均可从武汉大学 IGS 分析中心和数据中心获取(<http://www.igs.gnsswhu.cn/>)。

4.2 GNSS 非差非组合数据处理理论与应用

在当前多频多模 GNSS 背景下,非差非组合数据处理优势明显,逐步成为了主流数据处理方法。中国学者近年来在 GNSS 非差非组合数据处理理论与应用方面取得了丰富的研究成果,主要包括以 PPP 技术为代表的单测站数据处理和以 PPP-RTK 技术为代表的多测站数据处理。PPP 技术利用外部轨道和钟差等产品处理单测站 GNSS 数据以获取高精度位置信息。中国学者将 GPS 单系统 PPP 拓展至北斗、伽利略等多系统 PPP^[87],将双频 PPP 拓展至多频和单频,具备了全频全系统、不同接收机类型兼容的数据处理能力^[88]。此外,打破了传统 PPP 模型的接收机码偏差时不变假设,建立了顾及接收机码偏差变化的改进 PPP 模型^[89]。除卫星轨道和钟差外,PPP-RTK 技术进一步为用户提供卫星相位偏差和大气产品,实现快速精密定位。近年来,为克服北斗二号多路径效应等伪距未模型化误差的影响,建立了仅用相位的 PPP-RTK 模型^[90]。为实现 GLONASS PPP-RTK,提出了频分多址整数可估 PPP-RTK 模型^[91],构建了码分多址和频分多址全频全系统非差非组合 PPP-RTK 数据处理理论体系^[92]。顾及区域电离层延迟特性,建立了电离层加权区域 PPP-RTK 模型^[93],可提高模型强度并提升产品估值精度。为实现广域多测站非差非组合数据处理,提出了全视 PPP-RTK 模型^[94]和分布式数据处理方法^[95],降低了模型复杂度且提升了数据处理效率。

4.3 精密电离层建模与应用

电离层是空间大气的重要组成部分之一。近年来,众多中国学者致力于精密电离层建模与应用,取得了丰硕成果,主要包括:北斗电离层改正模型、实时电离层监测与建模、低轨增强 GNSS 的电离层建模、基于人工智能的电离层预测、电离层扰动监测和消除,以及电离层精密产品有关应用等。北斗三号电离层改正模型利用球谐展开描述全球垂直电离层分布,向用户播发 9 个模型参数,该模型在 98% 的样本中优于 IGS GIM 模型的修正能力 75%^[96-97]。由于 GNSS 监测站的分布不均,部分区域(如海上和极地)电离层建模精度仍十分有限。中国学者近年来利用仿真 LEO 数据和中国风云等实测 LEO 数据建立了增强电离层模型^[98-99],并探索了利用 GNSS、LEO、卫星测高和电离层掩星等多源数据进一步提升电离层

建模精度的方法^[100]。机器学习、深度学习和神经网络等技术也成功应用于电离层预测并取得系列成果^[101-102]。电离层扰动会对用户定位带来不利影响,我国建立了多个电离层扰动监测网,如中国地壳运动监测网络、空间环境地基综合监测网(子午工程二期)和 BDSMART 空间大气监测网等,其电离层监测成果将被广泛用于卫星导航、民用航空、空间天气和太阳活动等诸多行业和科学研究领域。

4.4 广域实时精密定位

精密位置是 GNSS 确定的核心参数之一,同时也是众多其他大地测量参数解算的基础。近年来,GNSS 精密位置服务逐步由区域拓展至广域,由事后发展至实时。众多中国学者针对广域实时精密定位在定轨、钟差估计、模糊度固定、大气建模和系统建设等方面开展了丰富的研究。为实现实时精密定轨,滤波数据处理替换了整体最小二乘解算^[103],非差或双差模糊度固定取代了浮点模糊度估计^[104]。为提升实时钟差估计计算效率和精度,基于 QR 分解的信息滤波^[105]、基于自适应调整的 Kalman 滤波已得到成功应用^[106]。在多频多模背景下,研究生成了双频宽巷、窄巷及超宽巷卫星相位偏差产品^[107],并拓展至每个频率、每种类型的卫星相位偏差产品^[108]。也有学者尝试了利用人工智能进行大气延迟修正,提高了大气建模精度和可靠性^[14,109]。广域实时精密定位服务系统日渐完善,如北斗系统的 BDSBAS 和 PPP-B2b 公开服务^[1-2],以及千寻、六分和中国移动等商业公司的广域实时高精度定位服务。考虑到 GNSS 信号的脆弱性,近期研究初步验证了低轨卫星增强 GNSS 高精度定位的能力^[110]。随着未来成百上千低轨卫星的发射,将实现更加快速可靠的广域实时精密定位服务。

5 多源传感器组合导航

近年来,以数字化、智能化为特征的新技术已经渗透到全场景、实时、高精度定位服务的各个领域。在各类环境感知智能设备、路径规划、行为决策等方面已经取得阶段性成果。为了解决复杂场景下单一定位技术的固有局限性,基于异构传感器相互融合的多源传感器组合导航技术已成为当前研究的热点之一,取得了一系列创新成果。本节侧重从多源传感器组合导航模型和方法、平台和软件、数据集等方面梳理组合导航的重要进展。

5.1 组合导航模型和方法

GNSS/INS 组合导航技术是目前应用最为广泛的组合导航技术之一。近年来,中国学者在组合算法的初始对准,信息融合及运动学约束等方面取得显著突破。在初始对准方面,提出了 GNSS 观测辅助的载体多历元速度优化、GNSS 与 INS 轨迹一致性匹配等方法,实现了面向低成本 MEMS IMU 组合系统的航向角快速初始化技术^[111-114]。在 GNSS 观测信息融合方面,利用惯导设备短时间递推精度较高的特点,辅助 GNSS 数据预处理与模糊度固定,提高 GNSS 信号失所时的定位精度^[115-117]。在信息融合方式上,扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波及因子图优化算法等都得到了较多研究,提高了信息融合的通用性和稳健性^[118-119]。此外学者们针对车辆运动特性,将非完整约束(non-holonomic constraint, NHC)、里程计信息与 GNSS/INS 组合算法相结合,提升了 GNSS 信号中断时的导航精度^[120-122]。

当 GNSS 信号长时间或频繁受遮挡时,如何抑制 GNSS/INS 组合算法误差累积是需要解决的首要问题。视觉传感器以其更高精度和更低成本的优势成为当前 GNSS/INS 组合算法的最佳补充。中国学者在基于特征的视觉导航算法方面做了系统研究,其特征可分为基于点、线、面的自然特征和基于神经网络提取的人工特征^[123-124];在组合方式上可分为松组合和紧组合,其中松组合主要指 GNSS 解算结果与视觉惯性组合解算结果间进行的融合^[125-127],而紧组合主要指 GNSS 伪距和相位观测、IMU 观测和视觉特征基于原始观测层面的组合^[128]。与松组合相比,紧组合可以利用更完整的传感器信息进而获得更为精确的定位结果。视觉传感器高度依赖纹理特征,从而对环境光照和纹理提出了更高要求,相比之下激光雷达作为距离传感器其主要依赖空间结构特征,可以同视觉传感器实现良好互补。中国学者提出了 DRANSAC-RAIM 与多普勒最近点迭代算法,实现了城市环境下 GNSS/INS/LiDAR 组合快速初始化^[129];以扩展卡尔曼滤波为基础,利用雷达点云的平面与边缘特征点实现 GNSS/INS/Vision/LiDAR 的紧组合实时解算,为 GNSS 受限环境提供了亚米级导航定位服务^[130]。除了实时传感器观测之外,高精地图中的车道信息也是智能车辆实现高精度定位的常用选择,与激光雷达云点地图或栅格地图不同,它的保存和

处理更加轻便。中国学者以众包车辆所采集的车道信息为基础,利用空间聚类与逐步拟合算法生成高精地图车道信息。通过车载视觉与高精地图间的车道线匹配,实现车道横向与垂向优于 10 cm 的位置校正^[131-133]。

类脑导航作为多源融合智能导航领域的前沿课题,同样引起了学者们的广泛关注。这种方法以人工神经网络为基础,利用不同的神经机制对空间进行感知与表征,实现对导航细胞的功能和结构的建模。借助于新型神经形态传感器和计算芯片的快速发展,类脑导航研究能够开发出具有类脑性能、甚至超越大脑导航能力的新型仿生智能导航技术。该技术为克服传统导航技术在智能性、稳健性、适应性和能源效率等方面的局限性提供了一条有前景的技术路线。目前中国学者致力于开发导航细胞的计算模型^[26,134-135]、路径整合^[136-138]与地图构建^[139-140],构建了类脑导航相关的神经机制和导航解算的基础体系。

5.2 平台和软件

近年来,除在多源传感器组合导航模型和方法方面取得显著进展外,我国学者在平台和软件开发方面也取得了重大突破。武汉大学测绘学院 GREAT 团队开发了卫星大地测量与多源导航 GREAT 软硬件平台。平台硬件支持 GNSS、IMU、LiDAR、工业相机等传感器弹性配置,采用自研的时间同步技术实现微秒级硬件时间同步,平台软件兼容 Window/Linux 平台,支持基于滤波与因子图的 GNSS/INS 组合、视觉惯性组合、GNSS/Visual/IMU/LiDAR 组合等常见的多源传感器组合算法,能够提供整套多频、多系统的 GNSS 后处理和实时产品,具备全场景、全天候高精度位置服务能力^[141]。武汉大学测绘学院 PLANET 团队自主设计了多传感器融合平台 SmartPNT-mate 和 SmartPNT-mini。该平台集成了 GNSS、IMU、里程计、相机、LiDAR 以及高精度时间同步板卡和嵌入式人工智能计算机。此外,还开发了基于扩展卡尔曼滤波和图优化算法的 GNSS/INS 组合导航系统开源平台,该平台旨在为相关研究者开发和完善 GNSS/INS 组合定位算法提供通用化、模块化、且易于扩展的研究基础框架。上海交通大学开发了 S-Cube 软硬件平台,该平台主要面向 SLAM 算法的开发和测试,搭载了 GNSS 接收机、工业相机、高精度惯性传感器和 LiDAR 等多种传感器。平台所有传感器

均采用自主研发的硬件同步方法,可以实现不同传感器间毫秒级时间延迟。此外,该平台还支持全景相机等其他传感器的接入。

多传感器融合导航技术应用前景广阔,涵盖交通、农业、城建等传统领域以及自动驾驶、无人机、智能机器人等新兴领域,必将促进工业制造 2025、数字孪生、智慧城市的快速发展,推动全球一体化 PNT 在 GNSS 遮挡条件下的连续定位、导航和授时服务性能,实现更加泛在化、融合化、智能化的一体化时空系统和智能定位服务。

6 海洋大地测量

海洋占地球总面积的 71%,加强海洋大地测量学科建设和海洋大地测量基础设施建设是我国大地测量的重要任务之一^[5]。近年来,中国在海洋卫星大地测量和海底大地测量观测技术方面均取得重要突破,海洋大地测量观测模型和算法研究也取得重大进展^[5,142-147]。

6.1 海洋卫星测高和重力测量

精确测绘海面地形、测定海洋重力场、确定大地水准面、反演海底地形等是海洋卫星大地测量的重要内容,也是近年来我国航天测绘的重要任务^[143]。2023 年,我国发射了低-低跟踪海洋测高卫星(同轨跟飞,相距 30 km,轨道高度约 900 km),主要用于开展海洋重力异常测量,为海洋大地水准面精化和海底地形反演提供天基观测手段。该卫星通过测定卫星到海面的距离,进而测定海面高和全球海域格网重力异常。该卫星还创新性地搭载了星载 GNSS-R 测高仪^[5],用于实现传统激光测高和验潮观测的多机理互补海面高观测,也提升了土壤和海洋环境参数反演能力^[148-149]。近年来,我国也在开展激光多波束测高卫星研制,该卫星对于解决海岸带困难区域以及远海海底地形精确测绘具有重要现实意义^[5]。我国还通过多个国家重大工程,实施了海洋重力测量,为国家新一代重力基准、高程基准及南海重力场精化奠定了观测基础,其中建立了精度优于 3 mGal,分辨率为 15 s 的南海局部重力场模型,对应区域的海底地形反演相对精度优于 5%。

近年来,我国多型海空重力仪已经走出实验室,开展了大量比测试验,技术和精度水平大幅提升,例如国产 ZL11-1 重力仪与国外 LCR 和 GT-2M 重力仪比测表明,基于惯性稳定平台的 ZL11-1A 海洋重力仪性能已经达到俄罗斯 GT-2M 同

等水平,超过美国双轴稳定平台 LCR 重力仪^[150]。

6.2 海底大地测量

科学家统计,人类目前对大海的探索仅有 5%^[151],因此,海洋观测就成为人类认识海洋不可或缺的技术手段。海洋科学具有多学科交叉交叉的特点,属于学科交叉的前沿,其研究领域主要集中在海洋物质能量循环、跨圈层流固耦合等方面,而海底大地测量在地壳构造运动及海洋、大气与固体地球多圈层耦合及其复杂动力学过程研究中具有重大支撑作用。“十三五”期间,我国在国家重点研发计划项目的支持下开启了海底大地测量基准研究,在南海 3000 m 深海建立了我国首个海底基准与导航定位试验网^[142],实现了我国海底基准站技术装备“0 到 1”的突破,使我国首次具备了深海基准观测能力。2021 年,我国又研发了海底短基线多换能器海底基准站,并在南海开展了深海试验验证工作^[152],该基准站不仅可以提高海底基准定位精度,也有望实现单站布设条件下的短基线导航。2023 年,我国又开展了多频多模声呐海底基准站信标研制工作,并在南海开展了长距离导航定位试验。

虽然我国近年来在海底大地测量装备、海底大地基准试验网建设以及导航定位服务方面取得了长足发展,但与美国长达半个世纪、日本近 30 年的技术积累与迭代^[153]相比,我国海底大地测量尚处起步阶段,海底基准站长期工作能力有限,尚未发展海底基准低成本、无人化观测维护装备^[5],建议抓住国家综合时空体系建设机遇,进一步加大海底大地基准科技研发和基础设施建设力度,进一步缩短我国与美国、日本等海洋强国在海底大地测量领域的差距。

6.3 海洋观测数据处理

在海洋控制网优化设计方面,提出了海面-海底控制网双对称设计原理^[142],研究了测量船轨迹对海底定位精度和可靠性的影响^[152,154]。海洋声速是影响水下声学定位和导航的关键参数,国内学者提出利用反向传播神经网络算法构建基于空间位置、温度和盐度信息的海洋声速场^[155],并提出了声速场参数增强定位方法以及抗差卡尔曼滤波算法^[47,156]。研究表明,基于静态声速剖面观测的海底定位精度只能达到米级,特别是声速场的时空变化对高程定位影响尤为明显,为此,国内学者发展了顾及变声速误差的弹性声呐定位模型^[145]、削弱环境误差的差分定位模型^[141,149]和时

变声速影响 B 样条补偿模型^[8,157-159]。为了控制声线弯曲影响,通常采用声线跟踪定位模型,但该模型计算效率低,且需要考虑主动式声呐收发位置的差异,为此国内学者提出了双程传播时间声线跟踪算法^[160-161]、高效高阶割线算法^[162]和声线弯曲参数声呐观测模型^[15]。海底主动式双程观测系统除了涉及椭球交会定位原理外^[5,163],还面临精确的 GNSS-声呐换能器臂长误差影响^[164]、海面定位误差影响^[165],从而需要发展基于先验臂长参数以及先验控制点精度约束的海底控制参数贝叶斯估计模型^[166],以及更为精准的海底声呐观测随机模型^[167]。监测海底构造运动是海底大地测量的重要任务,国内学者发展了邻近基准站时序联合分析模型^[168]。需要指出,随着海底观测无人化技术的不断进步(包括无人机、AUV、浮标等),未来海洋大地控制网数据处理还面临实时网解技术以及无声速剖面测量条件下的高精度定位模型构建等问题^[169]。

7 结束语

近年来,我国大地测量在北斗导航卫星系统、国产重力卫星、北斗 GNSS 基准站网及位置服务等方面取得了显著进步,但也应清醒地认识到,我国大地测量在基础理论原始创新、观测系统建设、基准框架更新维持、数据开放共享、标准化产品及应用服务等方面与国际先进水平还存在较大差距。例如,我国 CGCS2000 坐标基准框架是基于 20 多年前的 ITRF97 框架(2000 历元)实现的;2001 年发布的国家似大地水准面模型 CQG2000,已逾 20 年未更新;全国验潮站观测资源缺乏统筹管理和利用,尚未在国家层面开展陆海无缝垂直基准体系建立和维持;大地测量重基础设施建设、轻应用服务拓展,数据产品社会化应用服务能力不足、服务范围窄;投入大量资金建设的大地测量基础设施和数据资源,无法实现开放共享,处于“冬眠”期,且“苏醒”期未知,严重制约大地测量对经济建设和社会发展的基础性支撑作用,这已成为大地测量科技和行业发展的瓶颈问题。

针对以上现状和问题,结合国际大地测量及其相关交叉学科领域的发展趋势,提出以下促进我国大地测量高质量发展的建议:

(1) 以我国大地测量基础设施为核心,兼顾全球大地测量基础设施,构建中国大地测量观测系统(CGOS),为社会提供公益型大地测量基准、

高精度导航定位、自然资源监测管理和地质灾害监测等应用服务。

(2) 基于国际地球参考框架 ITRF2020 建立我国新一代的地心坐标基准框架,为社会提供自主、开放、高精度坐标基准框架服务。

(3) 建立新一代国家似大地水准面模型,定义国家数字高程基准并定期更新,建立我国 1985 高程基准与国际高程基准框架的联接,构建国家陆海无缝垂直基准体系和服务系统。

(4) 依托全国 GNSS 基准站网,建设国家大地测量基准智能化服务平台,实现多源大地测量数据科学管理、共享和融合,发布坐标、高程、重力和深度基准标准化产品,提供高精度大地测量基准、导航定位及其他增值性服务。

(5) 加强人工智能、量子、光学原子钟、物联网和云计算等技术在大地测量方面的研发,拓展大地测量科技在自然资源管理、自然灾害防治和气候变化等方面的应用研究。

致谢:特此向参与“中国大地测量国家报告(2019—2023)” (英文)编写工作的专家,以及过去 4 年致力于大地测量科学研究的中国学者表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] YANG Yuanxi, LIU Li, LI Jinlong, et al. Featured services and performance of BDS-3[J]. Science Bulletin, 2021, 66(20): 2135-2143.
- [2] YANG Yuanxi, DING Qun, GAO Weiguang, et al. Principle and performance of BDSBAS and PPP-B2b of BDS-3[J]. Satellite Navigation, 2022, 3(1): 1-9.
- [3] 党亚民, 郭春喜, 蒋涛, 等. 2020 珠峰测量与高程确定[J]. 测绘学报, 2021, 50(4): 556-561. DOI: 10.11947/j. AGCS.2021.20210034.
- [4] DANG Yamin, GUO Chunxi, JIANG Tao, et al. 2020 height measurement and determination of Mount Qomolangma[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(4): 556-561. DOI: 10.11947/j. AGCS.2021.20210034.
- [5] 肖云, 杨元喜, 潘宗鹏, 等. 中国卫星跟踪卫星重力测量系统性能与应用[J]. 科学通报, 2023, 68(20): 2655-2664.
- [6] XIAO Yun, YANG Yuanxi, PAN Zongpeng, et al. Performance and application of the Chinese satellite-to-satellite tracking gravimetry system[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(20): 2655-2664.
- [7] 中国科学院. 海洋大地测量基准与水下导航[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [8] Chinese Academy of Sciences. Marine geodetic datum and underwater navigation[M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [9] 孙大军, 郑翠娥, 张居成, 等. 水声定位导航技术的发展与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 331-338.
- [10] SUN Dajun, ZHENG Cuie, ZHANG Jucheng, et al. Development and prospect for underwater acoustic positioning and navigation technology[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 331-338.
- [11] YANG Yuanxi, LIU Yanxiong, SUN Dajun, et al. Seafloor geodetic network establishment and key technologies[J]. Science China (Earth Sciences), 2020, 63(8): 1188-1198.
- [12] 刘焱雄, 李梦昊, 刘杨, 等. 海底大地基准建设技术及其研究进展[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4): 684-700.
- [13] LIU Yanxiong, LI Menghao, LIU Yang, et al. Research progress of seafloor geodetic datum construction technology[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(4): 684-700.
- [14] 姜卫平, 李昭, 魏娜, 等. 大地测量坐标框架建立的进展与思考[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1259-1270. DOI: 10.11947/j. AGCS.2022.20220232.
- [15] JIANG Weiping, LI Zhao, WEI Na, et al. Progress and thoughts on establishment of geodetic coordinate frame[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1259-1270. DOI: 10.11947/j. AGCS.2022.20220232.
- [16] 孙付平, 贾彦锋, 朱新慧, 等. 毫米级地球参考框架动态维持技术研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1688-1700.
- [17] SUN Fuping, JIA Yanfeng, ZHU Xinhui, et al. Advances in dynamic maintenance technology of mm-level terrestrial reference frame[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1688-1700.
- [18] 杨元喜, 明锋. 中国时空基准建设现状与未来发展[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(9): 2192-2195.
- [19] YANG Yuanxi, MING Feng. Current status and future development of spatiotemporal datum construction in China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023, 53(9): 2192-2195.
- [20] 杨元喜, 任夏, 贾小林, 等. 以北斗系统为核心的国家安全 PNT 体系发展趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(5): 917-927.
- [21] YANG Yuanxi, REN Xia, JIA Xiaolin, et al. Development trends of the national secure PNT system based on BDS[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023, 53(5): 917-927.
- [22] 明锋, 杨元喜, 曾安敏, 等. 弹性 PNT 概念内涵、特征及其辨析[J]. 测绘通报, 2023(4): 79-86, 176.
- [23] MING Feng, YANG Yuanxi, ZENG Anmin, et al. The conceptual connotation, characteristics and discrimination of resilient PNT[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(4): 79-86, 176.
- [24] YANG Fei, MENG Xiaolin, GUO Jiming, et al. Development and evaluation of the refined zenith tropospheric delay (ZTD) models[J]. Satellite Navigation, 2021, 2(1): 1-9.
- [25] QIN Xianping, YANG Yuanxi, SUN Bijiao. A robust method

- to estimate the coordinates of seafloor stations by direct-path ranging[J]. *Marine Geodesy*, 2023, 46(1): 83-98.
- [16] 杨高朝,王庆,蔚保国,等.基于抗差LM的视觉惯导里程计与伪卫星混合高精度室内定位[J].*测绘学报*, 2022, 51(1): 18-30. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20200251.
- YANG Gaochao, WANG Qing, YU Baoguo, et al. High-precision indoor positioning based on robust LM visual inertial odometer and pseudosatellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(1): 18-30. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20200251.
- [17] 陈锐志,郭光毅,叶锋,等.智能手机音频信号与MEMS传感器的紧耦合室内定位方法[J].*测绘学报*, 2021, 50(2): 143-152. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200551.
- CHEN Ruizhi, GUO Guangyi, YE Feng, et al. Tightly-coupled integration of acoustic signal and MEMS sensors on smartphones for indoor positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(2): 143-152. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200551.
- [18] 邹蓉,孙付平,王啸,等.地球参考框架的发展现状和未来展望[J].*中国地震*, 2020, 36(4): 684-692.
- ZOU Rong, SUN Fuping, WANG Xiao, et al. Development status and prospects of the geodetic terrestrial reference frame[J]. *Earthquake Research in China*, 2020, 36(4): 684-692.
- [19] LIANG Wei, LI Jiancheng, XU Xinyu, et al. A high-resolution Earth's gravity field model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, satellite altimetry, and EGM2008[J]. *Engineering*, 2020, 6(8): 860-878.
- [20] ZHOU Hao, ZHOU Zebing, LUO Zhicai. A new hybrid processing strategy to improve temporal gravity field solution[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(8): 9415-9432.
- [21] JIANG Tao, DANG Yamin, ZHANG Chuanyin. Gravitometric geoid modeling from the combination of satellite gravity model, terrestrial and airborne gravity data: a case study in the mountainous area, Colorado[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, 72(1): 1-15.
- [22] 蒋涛,党亚民,郭春喜,等.国际高程参考系统在珠峰地区的实现[J].*测绘学报*, 2022, 51(8): 1757-1767. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210468.
- JIANG Tao, DANG Yamin, GUO Chunxi, et al. Realization of the international height reference system in the region of Mount Qomolangma[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(8): 1757-1767. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210468.
- [23] 王文利,郭春喜,丁黎,等.全国一等水准点高程近20年变化分析[J].*测绘学报*, 2019, 48(1): 1-8. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20170589.
- WANG Wenli, GUO Chunxi, DING Li, et al. Elevation change analysis of the national first order leveling points in recent 20 years[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(1): 1-8. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20170589.
- [24] 郭春喜,郭鑫伟,聂建亮,等.利用GNSS水准成果融合构建中国大陆垂直运动模型[J].*武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(4): 579-586.
- GUO Chunxi, GUO Xinwei, NIE Jianliang, et al. Establishment of vertical movement model of Chinese mainland by fusion result of leveling and GNSS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(4): 579-586.
- [25] 杨元喜,杨诚,任夏.PNT智能服务[J].*测绘学报*, 2021, 50(8): 1006-1012. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20210051.
- YANG Yuanxi, YANG Cheng, REN Xia. PNT intelligent service[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1006-1012. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20210051.
- [26] HAN Kun, WU Dewei, LAI Lei. Model of generating grid cell based on difference Hebbian learning in brain-inspired navigation[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42: 674-679.
- [27] 朱新慧,傅彦博,蔡富,等.GNSS测站坐标非线性变化影响机制的研究[J].*地球物理学进展*, 2020, 35(1): 79-85.
- ZHU Xinhui, FU Yanbo, CAI Fu, et al. Research on the influence mechanism of the nonlinear variations of GNSS stations' coordinates[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(1): 79-85.
- [28] 贾彦锋,朱新慧,孙付平,等.GNSS垂向坐标时间序列周年项振幅的时变特征及成因分析[J].*地球物理学报*, 2023, 66(1): 162-172.
- JIA Yanfeng, ZHU Xinhui, SUN Fuping, et al. Time-varying characteristics and cause analysis of annual amplitudes of GNSS vertical coordinate time series[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(1): 162-172.
- [29] 蒋光伟,程传录,陈雄川,等.基于BDS-3的定位性能与区域参考框架维持分析[J].*地球物理学进展*, 2021, 36(3): 887-893.
- JIANG Guangwei, CHENG Chuanlu, CHEN Xiongchuan, et al. Positioning performance analysis and maintenance of regional reference frame based on BDS-3[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(3): 887-893.
- [30] 党亚民,程传录,杨强,等.珠峰及周边地区强震影响垂直形变特征研究[J].*武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(1): 26-35.
- DANG Yamin, CHENG Chuanlu, YANG Qiang, et al. Vertical deformation characteristics affected by strong earthquakes in mount Qomolangma and surrounding areas[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 26-35.
- [31] 党亚民,杨强,王伟,等.基于块体模型的青藏高原及邻区地壳三维构造形变分析[J].*测绘学报*, 2022, 51(7): 1192-1205. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220123.
- DANG Yamin, YANG Qiang, WANG Wei, et al. Analysis on 3D crustal deformation of Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas based on block model[J]. *Acta Geodaetica*

- et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1192-1205. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220123.
- [32] 成英燕, 王虎, 许长辉, 等. 基于多技术全球参考框架的维持及应用分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(6): 37-46.
CHENG Yingyan, WANG Hu, XU Changhui, et al. Analysis of application and maintenance of multi-technical based global reference frame[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(6): 37-46.
- [33] CHENG Pengfei, CHENG Yingyan, WANG Xiaoming, et al. Realization of an optimal dynamic geodetic reference frame in China: methodology and applications[J]. Engineering, 2020, 6(8): 879-917.
- [34] CHENG Pengfei, CHENG Yingyan, WANG Xiaoming, et al. Update China geodetic coordinate frame considering plate motion[J]. Satellite Navigation, 2021, 2(1): 1-12.
- [35] WANG Hu, REN Yingying, WANG Ahao, et al. Two-decade GNSS observation processing and analysis with the new IGS Repro3 criteria: implications for the refinement of velocity field and deformation field in continental China [J]. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3719.
- [36] 王虎, 任营营, 连丽珍, 等. 大规模 GNSS 网数据处理一体化方案与中国大陆水平格网速度场模型构建研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(9): 881-887, 897.
WANG Hu, REN Yingying, LIAN Lizhen, et al. Research on an integrational scheme of large-scale GNSS network data processing and establishment of the horizontal grid velocity field model in Chinese mainland[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(9): 881-887, 897.
- [37] REN Yingying, WANG Hu, LIAN Lizhen, et al. A method based on MTLS and ILSP for GNSS coordinate time series analysis with missing data [J]. Advances in Space Research, 2021, 68(9): 3546-3561.
- [38] REN Yingying, LIAN Lizhen, WANG Jiexian. Analysis of seismic deformation from global three-decade GNSS displacements: implications for a three-dimensional earth GNSS velocity field[J]. Remote Sensing, 2021, 13(17): 3369.
- [39] WANG Hu, REN Yingying, HOU Yangfei, et al. The refinement of reprocessed GNSS three-decade displacement trajectory model with spectral analysis and hypothesis test[J]. Advances in Space Research, 2022, 70(7): 1810-1829.
- [40] 任营营, 王解先, 王虎, 等. 基于局部无缝 Delaunay 三角网反距离加权法构建中国大陆速度场[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 1071-1080.
REN Yingying, WANG Jiexian, WANG Hu, et al. Construction of velocity field in Chinese mainland based on local seamless delaunay triangulation with inverse distance weighting method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7): 1071-1080.
- [41] 任营营, 王虎, 王解先, 等. 基于 K-Means++ 的省内子块体划分及中国大陆水平相对运动速度场模型的建立与分析[J]. 地球物理学报, 2020, 63(7): 2516-2533.
REN Yingying, WANG Hu, WANG Jiexian, et al. The sub-block demarcation with K-Means++ in each province's interior and establishment analysis of the relative horizontal velocity field model in China's mainland [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(7): 2516-2533.
- [42] REN Yingying, WANG Hu, HOU Yangfei, et al. The preliminary realization and evaluation of CTRF2020 based on new BDS3 technology[M]//Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 57-69.
- [43] 公海燕. 中国移动发布全球最大的“5G+北斗高精度定位”: 访中移(上海)产业研究院副总经理黄刚[J]. 中国测绘, 2020(11): 60-63.
GONG Haiyan. China mobile releases the world's largest “5G+BeiDou high precision positioning”—interview with HUANG Gang, deputy general manager of China mobile (Shanghai) industrial research institute [J]. China Surveying and Mapping, 2020(11): 60-63.
- [44] 卞鸿巍, 许江宁, 何泓洋, 等. 国家综合 PNT 体系弹性概念[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(9): 1265-1272.
BIAN Hongwei, XU Jiangning, HE Hongyang, et al. The concept of resilience of national comprehensive PNT system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(9): 1265-1272.
- [45] YANG Yuanxi, QIN Xianping. Resilient observation models for seafloor geodetic positioning [J]. Journal of Geodesy, 2021, 95: 79.
- [46] WANG Junting, XU Tianhe, LIU Yangfan, et al. Augmented underwater acoustic navigation with systematic error modeling based on seafloor datum network[J]. Marine Geodesy, 2023, 46(2): 129-148.
- [47] WANG Junting, XU Tianhe, ZHANG Bingsheng, et al. Underwater acoustic positioning based on the robust zero-difference Kalman filter[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2021, 26(3): 734-749.
- [48] 孟蓁, 姜颖颖, 王立辉, 等. 城市峡谷环境多源导航信息弹性融合定位方法[J]. 导航与控制, 2023, 22(2): 16-22.
MENG Qian, JIANG Yingying, WANG Lihui, et al. Multi-source navigation information resilient fusion method under urban canyon scenario[J]. Navigation and Control, 2023, 22(2): 16-22.
- [49] 李彤, 张会兵, 刘丁柯, 等. 面向城市道路的多传感器融合定位导航技术[J]. 测绘通报, 2019(11): 44-50.
LI Tong, ZHANG Huibing, LIU Dingke, et al. Multi-sensor fusion for navigation technology and trajectory prediction under urban roads[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(11): 44-50.
- [50] SUN Heping, CUI Xiaoming, XU Jianqiao, et al. Progress of research on the Earth's gravity tides and its application in geodynamics in China[J]. Pure and Applied Geophysics, 2023, 180(2): 573-589.
- [51] YUAN Yuan, GAO Jinyao, WU Zhaoai, et al. Perform-

- ance estimate of some prototypes of inertial platform and strapdown marine gravimeters[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, 72(1): 1-11.
- [52] 程冰, 周寅, 陈佩军, 等. 船载系泊状态下基于原子重力仪的绝对重力测量[J]. *物理学报*, 2021, 70(4): 040304. CHENG Bing, ZHOU Yin, CHEN Peijun, et al. Absolute gravity measurement based on atomic gravimeter under mooring state of a ship[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(4): 040304.
- [53] 车浩, 李安, 方杰, 等. 基于冷原子重力仪的船载动态绝对重力测量实验研究[J]. *物理学报*, 2022, 71(11): 113701. CHE Hao, LI An, FANG Jie, et al. Ship-borne dynamic absolute gravity measurement based on cold atom gravimeter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(11): 113701.
- [54] CHEN Qiuji, SHEN Yunzhong, KUSCHE J, et al. High-resolution GRACE monthly spherical harmonic solutions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(1): e2019JB018892.
- [55] ZHONG Bo, LI Xianpao, CHEN Jianli, et al. WHU-GRACE-GPD01s: a series of constrained monthly gravity field solutions derived from GRACE-based geopotential differences[J]. *Earth and Space Science*, 2023, 10(4): e2022EA002699.
- [56] YU Biao, YOU W, FAN Dongming, et al. A comparison of GRACE temporal gravity field models recovered with different processing details[J]. *Geophysical Journal International*, 2021, 227(2): 1392-1417.
- [57] SU Y, LI J C, ZOU X C. SWPU-GRACE2021: a new temporal gravity model from GRACE[J]. *GFZ Data Services*, 2022, 10: e001. DOI: 10.5880/icgem.2022.001.
- [58] WAN Xiaoyun, HAO Ruijie, JIA Yongjun, et al. Global marine gravity anomalies from multi-satellite altimeter data[J]. *Earth, Planets and Space*, 2022, 74: 1-14.
- [59] HAO Ruijie, WAN Xiaoyun, ANNAN R F. Enhanced short-wavelength marine gravity anomaly using depth data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1-9.
- [60] ZHANG Shengjun, ZHOU Runsheng, JIA Yongjun, et al. Performance of HaiYang-2 altimetric data in marine gravity research and a new global marine gravity model NSOAS22[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4322.
- [61] JIN Taoyong, ZHOU Mao, ZHANG Huan, et al. Analysis of vertical deflections determined from one cycle of simulated SWOT wide-swath altimeter data[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(4): 1-13.
- [62] YU Daocheng, HWANG C, ANDERSEN O B, et al. Gravity recovery from SWOT altimetry using geoid height and geoid gradient[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 265: 112650.
- [63] ZHU Chengcheng, GUO Jinyun, GAO Jinyao, et al. Marine gravity determined from multi-satellite GM/ERM altimeter data over the South China Sea: SCSGA V1.0[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94: 1-16.
- [64] 胡敏章, 张胜军, 金涛勇, 等. 新一代全球海底地形模型 BATW HU2020[J]. *测绘学报*, 2020, 49(8): 939-954. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190526. HU Minzhang, ZHANG Shengjun, JIN Taoyong, et al. A new generation of global bathymetry model BATW HU2020[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(8): 939-954. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190526.
- [65] WANG Yanming, SÁNCHEZ L, ÅGREN J, et al. Colorado geoid computation experiment: overview and summary[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(12): 1-21.
- [66] 党亚民, 蒋涛, 陈俊勇. 全球高程基准研究进展[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(10): 1576-1586. DANG Yamin, JIANG Tao, CHEN Junyong. Review on research progress of the global height datum[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1576-1586.
- [67] DANG Yamin, JIANG Tao, GUO Chunxi, et al. Determining the new height of Mount Qomolangma based on the international height reference system[J/OL]. *Geo-Spatial Information Science*, 2023 [2023-06-01]. <https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2128901>.
- [68] 赫林, 褚永海, 徐新禹, 等. GRACE/GOCE 扩展重力场模型确定我国 1985 高程基准重力位的精度分析[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(6): 2016-2026. HE Lin, CHU Yonghai, XU Xinyu, et al. Evaluation of the GRACE/GOCE global geopotential model on estimation of the geopotential value for the China vertical datum of 1985[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(6): 2016-2026.
- [69] 冯义楷, 杨龙, 付延光, 等. 山东省沿海高程/深度基准转换模型及其精度评估[J]. *海洋科学进展*, 2023, 41(3): 488-497. FENG Yikai, YANG Long, FU Yanguang, et al. Accuracy evaluation of the coastal vertical datum transformation model in Shandong province[J]. *Advances in Marine Science*, 2023, 41(3): 488-497.
- [70] 魏子卿. 第二大地边值问题引论[J]. *测绘学报*, 2022, 51(6): 797-803. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220067. WEI Ziqing. Introduction to the second geodetic boundary value problem[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 797-803. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220067.
- [71] SHEN Wenbin, SUN Xiao, CAI Chenghui, et al. Geopotential determination based on a direct clock comparison using two-way satellite time and frequency transfer[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2019, 30(1): 21-31.
- [72] LI Xinxing, LI Jiancheng, TONG Xiaochong, et al. The employment of quasi-hexagonal grids in spherical harmonic analysis and synthesis for the Earth's gravity field[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(11): 1-21.

- [73] 李新星, 李建成, 刘晓刚, 等. 球谐旋转变换结合非全次 Legendre 方法的局部六边形网格重力场球谐综合[J]. 地球物理学报, 2021, 64(11): 3933-3947.
- LI Xinxing, LI Jiancheng, LIU Xiaogang, et al. Spherical harmonic synthesis of local hexagonal grid point gravity anomalies with non-full-order Legendre method combined with spherical harmonic rotation transformation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(11): 3933-3947.
- [74] YANG Meng, HIRT C, WU Bin, et al. Residual terrain modelling: the harmonic correction for geoid heights[J]. Surveys in Geophysics, 2022, 43(4): 1201-1231.
- [75] SUN Rong. New algorithms for spherical harmonic analysis of area mean values over blocks delineated by equiangular and Gaussian grids[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95(5): 1-21.
- [76] 黄谟涛, 陈欣, 邓凯亮, 等. 补偿海空重力测量动态效应剩余影响的通用模型[J]. 测绘学报, 2020, 49(2): 135-146. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190010.
- HUANG Motao, CHEN Xin, DENG Kailiang, et al. A general model for compensating remainder dynamic environment effect on marine and airborne gravimetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(2): 135-146. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190010.
- [77] 黄谟涛, 邓凯亮, 吴太旗, 等. 重力异常垂向梯度严密变化模型及应用[J]. 地球物理学报, 2022, 65(12): 4616-4627.
- HUANG Motao, DENG Kailiang, WU Taiqi, et al. A rigorous modification model and its application for computing the vertical gradient of gravity anomaly[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(12): 4616-4627.
- [78] 中国测绘科学研究院. 地球物理大地测量大型科学计算平台[EB/OL]. [2023-08-01]. <https://www.zcyphygeodesy.com/>.
- Chinese Academy of Surveying and Mapping. Scientific computation platform for geophysical geodesy [EB/OL]. [2023-08-01]. <https://www.zcyphygeodesy.com/>.
- [79] GUO Jing, WANG Chen, CHEN Guo, et al. BDS-3 precise orbit and clock solution at Wuhan University: status and improvement[J]. Journal of Geodesy, 2023, 97: 1-17.
- [80] WANG Chen, GUO Jing, ZHAO Qile, et al. Empirically derived model of solar radiation pressure for BeiDou GEO satellites[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(6): 791-807.
- [81] YANG Chao, GUO Jing, ZHAO Qile. Yaw attitudes for BDS-3 IGSO and MEO satellites: estimation, validation and modeling with intersatellite link observations [J]. Journal of Geodesy, 2023, 97(1): 1-15.
- [82] ZHAO Qile, WANG Yintong, GU Shengfeng, et al. Refining ionospheric delay modeling for undifferenced and uncombined GNSS data processing[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(4): 545-560.
- [83] ZHANG Qiang, ZHAO Qile. Analysis of the data processing strategies of spherical harmonic expansion model on global ionosphere mapping for moderate solar activity[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(3): 1214-1226.
- [84] SHI C, GUO S, GU S, et al. Multi-GNSS satellite clock estimation constrained with oscillator noise model in the existence of data discontinuity[J]. Journal of Geodesy, 2018, 93: 515-528.
- [85] ZHANG Zheng, LOU Yidong, ZHENG Fu, et al. ON GLONASS pseudo-range inter-frequency bias solution with ionospheric delay modeling and the undifferenced uncombined PPP[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95(3): 1-29.
- [86] GENG Jianghui, CHEN Xingyu, PAN Yuanxin, et al. PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 1-10.
- [87] LIU Teng, ZHANG Baocheng, YUAN Yunbin, et al. Multi-GNSS triple-frequency differential code bias (DCB) determination with precise point positioning (PPP)[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(5): 765-784.
- [88] ZHAO Chuanbao, ZHANG Baocheng, ZHANG Xiao. SUPREME: an open-source single-frequency uncombined precise point positioning software[J]. GPS Solutions, 2021, 25(3): 1-8.
- [89] ZHANG Baocheng, ZHAO Chuanbao, ODOLINSKI R, et al. Functional model modification of precise point positioning considering the time-varying code biases of a receiver[J]. Satellite Navigation, 2021, 2(1): 1-10.
- [90] HOU P, ZHANG B, YASYUKEVICH Y V, et al. Multi-frequency phase-only PPP-RTK model applied to BeiDou data[J]. GPS Solutions, 2022, 26(3): 76.
- [91] ZHANG Baocheng, HOU Pengyu, ZHA Jiuping, et al. Integer-estimable FDMA model as an enabler of GLONASS PPP-RTK[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95(8): 1-21.
- [92] ZHANG Baocheng, HOU P, ZHA Jiuping, et al. PPP-RTK functional models for mulated with undifferenced and uncombined GNSS observations[J]. Satellite Navigation, 2022, 3: 1-15.
- [93] ZHA Jiuping, ZHANG Baocheng, LIU Teng, et al. Ionosphere-weighted undifferenced and uncombined PPP-RTK: theoretical models and experimental results[J]. GPS Solutions, 2021, 25(4): 1-12.
- [94] ZHANG B, HOU P, ODOLINSKI R. PPP-RTK: from common-view to all-in-view GNSS networks[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(12): 102.
- [95] HOU P, ZHANG B. Decentralized GNSS PPP-RTK[J]. Journal of Geodesy, 2023, 97(7): 72.
- [96] YUAN Yunbin, WANG Ningbo, LI Zishen, et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results[J]. Navigation, 2019, 66(1): 55-69.
- [97] WANG Ningbo, LI Zishen, YUAN Yunbin, et al. BeiDou global ionospheric delay correction model (BDGIM): per-

- formance analysis during different levels of solar conditions[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(3): 1-13.
- [98] LI Wang, ZHAO Dongsheng, HE Changyong, et al. Application of a multi-layer artificial neural network in a 3-D global electron density model using the long-term observations of COSMIC, Fengyun-3C, and digisonde[J]. *Space Weather*, 2021, 19(3): e2020SW002605.
- [99] REN Xiaodong, CHEN Jun, ZHANG Xiaohong, et al. Mapping topside ionospheric vertical electron content from multiple LEO satellites at different orbital altitudes[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(9): 1-17.
- [100] LI Wang, ZHAO Dongsheng, HE Changyong, et al. Spatial-temporal behaviors of large-scale ionospheric perturbations during severe geomagnetic storms on September 7-8 2017 using the GNSS, SWARM and TIE-GCM techniques[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, 127(3): e2021JA029830.
- [101] CHEN Jie, FANG Hanxian, LIU Zhendi. The application of a deep convolutional generative adversarial network on completing global TEC maps[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, 126(3): e2020JA028418.
- [102] SHI Shuangshuang, ZHANG Kefei, WU Suqin, et al. An investigation of ionospheric TEC prediction maps over China using bidirectional long short-term memory method[J]. *Space Weather*, 2022, 20(6): e2022SW003103.
- [103] DAI Xiaolei, LOU Yidong, DAI Zhiqiang, et al. Real-time precise orbit determination for BDS satellites using the square root information filter[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 1-14.
- [104] DAI Xiaolei, GONG Xiaopeng, LI Chenglong, et al. Real-time precise orbit and clock estimation of multi-GNSS satellites with undifferenced ambiguity resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(10): 1-17.
- [105] GONG Xiaopeng, GU Shengfeng, LOU Yidong, et al. An efficient solution of real-time data processing for multi-GNSS network[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(7): 797-809.
- [106] FU Wenju, HUANG Guanwen, ZHANG Qin, et al. Multi-GNSS real-time clock estimation using sequential least square adjustment with online quality control[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 963-976.
- [107] GENG Jianghui, GUO Jiang, MENG Xiaolin, et al. Speeding up PPP ambiguity resolution using triple-frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS data[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(1): 1-15.
- [108] GENG Jianghui, WEN Qiang, ZHANG Qiyuan, et al. GNSS observable-specific phase biases for all-frequency PPP ambiguity resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(2): 1-18.
- [109] REN Xiaodong, CHEN Jun, LI Xingxing, et al. Ionospheric total electron content estimation using GNSS carrier phase observations based on zero-difference integer ambiguity: methodology and assessment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(1): 817-830.
- [110] LI Xingxing, MA Fujian, LI Xin, et al. LEO constellation-augmented multi-GNSS for rapid PPP convergence[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(5): 749-764.
- [111] OUYANG Wei, WU Yuanxin. Optimization-based strap-down attitude alignment for high-accuracy systems: covariance analysis with applications[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(5): 4053-4069.
- [112] ZHANG Quan, LI Shanshan, XU Zhengpeng, et al. Velocity-based optimization-based alignment (VBOBA) of low-end MEMS IMU/GNSS for low dynamic applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(10): 5527-5539.
- [113] HUANG Yulong, ZHANG Zheng, DU Siyuan, et al. A high-accuracy GPS-aided coarse alignment method for MEMS-based SINS[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(10): 7914-7932.
- [114] CHEN Qijin, LIN Huan, GUO Ruonan, et al. Rapid and accurate initial alignment of the low-cost MEMS IMU chip dedicated for tilted RTK receiver[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(4): 1-13.
- [115] 王凌轩, 甘雨, 隋立芬, 等. INS辅助的实时动态 GNSS 单频周跳探测[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(3): 364-370.
- WANG Lingxuan, GAN Yu, SUI Lifan, et al. INS-aided single-frequency cycle-slip detection for kinematic GNSS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(3): 364-370.
- [116] ZHANG Xiaohong, ZHU Feng, ZHANG Yuxi, et al. The improvement in integer ambiguity resolution with INS aiding for kinematic precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 993-1010.
- [117] MA Liye, ZHU Feng, LIU Wanke, et al. VC-LAMBDA: a baseline vector constrained LAMBDA method for integer least-squares estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(9): 1-14.
- [118] YANG Cheng, SHI Wenzhong, CHEN Wu. Robust MM unscented Kalman filtering for GPS/IMU navigation[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(8): 1093-1104.
- [119] WEN Weisong, PFEIFER T, BAI Xiwei, et al. Factor graph optimization for GNSS/INS integration: a comparison with the extended Kalman filter[J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 2021, 68(2): 315-331.
- [120] 刘万科, 农旗, 陶贤露, 等. 非完整约束的 OD/SINS 自适应组合导航方法[J]. *测绘学报*, 2022, 51(1): 9-17. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210122.
- LIU Wanke, NONG Qi, TAO Xianlu, et al. OD/SINS adaptive integrated navigation method with non-holonomic constraints[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(1): 9-17.

- [121] 张小红, 周宇辉, 朱锋, 等. 参数自主学习的车辆运动约束新模型及其惯性推算误差抑制分析[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1249-1258. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2022.20220141.
- ZHANG Xiaohong, ZHOU Yuhui, ZHU Feng, et al. A new vehicle motion constraint model with parameter autonomous learning and analysis on inertial drift error suppression[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1249-1258. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2022.20220141.
- [122] XU Qiaozhuang, GAO Zhouzheng, LÜ Jie, et al. Tightly coupled integration of BDS-3 B2b RTK, IMU, odometer, and dual-antenna attitude[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(7): 6415-6427.
- [123] 赵嘉珩, 罗霄, 钟心亮, 等. 一种融合点线特征的视觉里程计架构设计与定位实现[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(5): 480-485.
- ZHAO Jiaheng, LUO Xiao, ZHONG Xinliang, et al. Design of a visual odometry and localization based on point and line features fusing[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(5): 480-485.
- [124] 吕品, 何容, 赖际舟, 等. 一种基于语义信息辅助的无人机视觉/惯性融合定位方法[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(4): 60-69, 2.
- LÜ Pin, HE Rong, LAI Jizhou, et al. A semantic information aided visual/inertial fusion localization method of UAV[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(4): 60-69, 2.
- [125] HU Jie, ZHU Feng, ZHUO Desheng, et al. Performance evaluation of stereo vision aided loosely coupled GNSS/SINS integration for land vehicle navigation in different urban environments[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(4): 4129-4142.
- [126] NIU Xiaoji, TANG Hailiang, ZHANG Tisheng, et al. IC-GVINS: a robust, real-time, INS-centric GNSS-visual-inertial navigation system[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(1): 216-223.
- [127] XU Qiaozhuang, LÜ Jie, GAO Zhouzheng. Evaluation on low-cost GNSS/IMU/vision integration system in GNSS-denied environments[C]//Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Beijing: IEEE, 2022: 1-6.
- [128] LI Tao, PEI Ling, XIANG Yan, et al. P3-VINS: tightly-coupled PPP/INS/visual SLAM based on optimization approach[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(3): 7021-7027.
- [129] LI Shengyu, WANG Shiwen, ZHOU Yuxuan, et al. Tightly coupled integration of GNSS, INS, and LiDAR for vehicle navigation in urban environments[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(24): 24721-24735.
- [130] LI Shengyu, LI Xingxing, WANG Huidan, et al. Multi-GNSS PPP/INS/Vision/LiDAR tightly integrated system for precise navigation in urban environments[J]. Information Fusion, 2023, 90: 218-232.
- [131] ZHOU Jian, GUO Yuan, BIAN Yaoan, et al. Lane information extraction for high definition maps using crowdsourced data[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(7): 7780-7790.
- [132] XU Qingxu, ZHU Feng, HU Jie, et al. An enhanced positioning algorithm module for low-cost GNSS/MEMS integration based on matching straight lane lines in HD maps[J]. GPS Solutions, 2022, 27(1): 1-15.
- [133] NIU Xiaoji, PENG Yitang, DAI Yuhang, et al. Camera-based lane-aided multi-information integration for land vehicle navigation [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28(1): 152-163.
- [134] GONG Ziyi, YU Fangwen. A plane-dependent model of 3D grid cells for representing both 2D and 3D spaces under various navigation modes[J]. Frontiers in Computational Neuroscience, 2021, 15: 739515.
- [135] WANG Yihong, XU Xuying, PAN Xiaochuan, et al. Grid cell activity and path integration on 2D manifolds in 3D space[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 104: 1767-1780.
- [136] YANG Chuang, XIONG Zhi, LIU Jianye, et al. A path integration approach based on multiscale grid cells for large-scale navigation [J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2022, 14(3): 1009-1020.
- [137] ZENG Taiping, TANG Fengzhen, JI Daxiong, et al. Neuro Bayes SLAM: neurobiologically inspired Bayesian integration of multisensory information for robot navigation [J]. Neural Networks: the Official Journal of the International Neural Network Society, 2020, 126: 21-35.
- [138] ZHAO C, WU D, HAN K, et al. Path integration model based on multi-scale grid cell[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 43(10): 2961-2967.
- [139] ZHAO Dongye, ZHANG Zheng, LU Hong, et al. Learning cognitive map representations for navigation by sensory-motor integration [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(1): 508-521.
- [140] ZOU Qiang, CONG Ming, LIU Dong, et al. Robotic episodic cognitive learning inspired by hippocampal spatial cells[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5573-5580.
- [141] LI Xingxing, HAN Xinjuan, LI Xin, et al. GREAT-UPD: an open-source software for uncalibrated phase delay estimation based on multi-GNSS and multi-frequency observations[J]. GPS Solutions, 2021, 25(2): 66.
- [142] 杨元喜, 刘焱雄, 孙大军, 等. 海底大地基准网建设及其关键技术[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(7): 936-945.
- YANG Yuanxi, LIU Yanxiong, SUN Dajun, et al. Seafloor geodetic network establishment and key technologies[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2020, 50(7): 936-945.

- [143] 杨元喜,王建荣,楼良盛,等. 航天测绘发展现状与展望[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(3): 1-9.
YANG Yuanxi, WANG Jianrong, LOU Liangsheng, et al. Development status and prospect of satellite-based surveying[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(3): 1-9.
- [144] 杨元喜,王建荣. 泛在感知与航天测绘[J]. 测绘学报, 2023, 52(1): 1-7. DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20220405.
YANG Yuanxi, WANG Jianrong. Ubiquitous perception and space mapping[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(1): 1-7. DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20220405.
- [145] YANG Yuanxi, QIN Xianping. Resilient observation models for seafloor geodetic positioning[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95(7): 79.
- [146] XUE Shuqiang, YANG Yuanxi, YANG Wenlong. Single-differenced models for GNSS-acoustic seafloor point positioning[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(5): 1-22.
- [147] ZHAO Shuang, WANG Zhenjie, NIE Zhixi, et al. Investigation on total adjustment of the transducer and seafloor transponder for GNSS/acoustic precise underwater point positioning [J]. Ocean Engineering, 2021, 221: 108533.
- [148] 布金伟,余科根,韩帅. 星载 GNSS-R 海浪有效波高反演模型构建[J]. 测绘学报, 2022, 51(9): 1920-1930. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210284.
BU Jinwei, YU Kegen, HAN Shuai. Construction of spaceborne GNSS-R ocean waves significant wave height retrieval model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(9): 1920-1930. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210284.
- [149] 董州楠. 星载 GNSS-R 信号相干性和土壤湿度反演的研究[J]. 测绘学报, 2023, 52(3): 522. DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20210736.
DONG Zhounan. Signal coherence and soil moisture retrieved from spaceborne global navigation satellite system-reflectionmetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(3): 522. DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20210736.
- [150] 袁园,高金耀,高巍. 基于惯性稳定平台的 ZL11-1A 海洋重力仪性能评估[J]. 海洋测绘, 2021, 41(1): 22-26.
YUAN Yuan, GAO Jinyao, GAO Wei. A new shipborne gravimeter ZL11-1A based on inertial stabilization platform and its performance evaluation[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2021, 41(1): 22-26.
- [151] 吴立新,荆钊,陈显尧,等. 我国海洋科学发展现状与未来展望[J]. 地学前缘, 2022, 29(5): 1-12.
WU Lixin, JING Zhao, CHEN Xianyao, et al. Marine science in China: current status and future outlooks[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(5): 1-12.
- [152] 曾安敏,杨元喜,明锋,等. 海底大地基准点圆走航模式定位模型及分析[J]. 测绘学报, 2021, 50(7): 939-952. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200529.
ZENG Anmin, YANG Yuanxi, MING Feng, et al. Positioning model and analysis of the sailing circle mode of seafloor geodetic datum points[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(7): 939-952. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200529.
- [153] 陈冠旭,刘杨,李梦昊,等. GNSS-声学海底定位的声速误差处理方法综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1349-1363.
CHEN Guanxu, LIU Yang, LI Menghao, et al. Review on the processing methods of sound speed errors in GNSS-acoustic seafloor positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(9): 1349-1363.
- [154] CHEN Guanxu, LIU Yang, LIU Yanxiong, et al. Improving GNSS-acoustic positioning by optimizing the ship's track lines and observation combinations[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(6): 1-14.
- [155] WANG Junting, XU Tianhe, NIE Wenfeng, et al. The construction of sound speed field based on back propagation neural network in the global ocean[J]. Marine Geodesy, 2020, 43(6): 621-642.
- [156] WANG Junting, XU Tianhe, ZHANG Bingsheng, et al. Underwater acoustic positioning based on the robust zero-difference Kalman filter [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2021, 26(3): 734-749.
- [157] 陈冠旭,高柯夫,赵建虎,等. GNSS-声学位置服务中声速误差修正方法[J]. 测绘学报, 2023, 52(4): 536-549. DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20220097.
CHEN Guanxu, GAO Kefu, ZHAO Jianhu, et al. The method of sound speed errors correction in GNSS-acoustic location service[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(4): 536-549. DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20220097.
- [158] 张盛秋,杨元喜,徐天河. 基于 GNSS-A 的海洋声速变化估计及其对定位的影响[J]. 地球物理学报, 2023, 66(3): 961-972.
ZHANG Shengqiu, YANG Yuanxi, XU Tianhe. Estimation of ocean sound velocity variation based on GNSS-A and its influence on positioning[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(3): 961-972.
- [159] 赵爽,王振杰,聂志喜,等. 顾及声速结构时域变化的海底基准站高精度定位方法[J]. 测绘学报, 2023, 52(1): 41-50. DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20210326.
ZHAO Shuang, WANG Zhenjie, NIE Zhixi, et al. Precise positioning method for seafloor geodetic stations based on the temporal variation of sound speed structure [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(1): 41-50. DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20210326.
- [160] 辛明真,葛茂荣,阳凡林,等. 顾及收发分置影响的海洋大地基准声线跟踪定位方法[J]. 地球物理学报, 2022, 65(10): 3809-3817.
XIN Mingzhen, GE Maorong, YANG Fanlin, et al. A

- sound ray tracing positioning method for marine geodetic datum considering the effect of transceiver separation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(10): 3809-3817.
- [161] 闫凤池, 王振杰, 赵爽, 等. 顾及双程声径的常梯度声线跟踪水下定位算法[J]. 测绘学报, 2022, 51(1): 31-40. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210234.
- YAN Fengchi, WANG Zhenjie, ZHAO Shuang, et al. A layered constant gradient acoustic ray tracing underwater positioning algorithm considering round-trip acoustic path [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(1): 31-40. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210234.
- [162] YANG Wenlong, XUE Shuqiang, LIU Yixu. P-order secant method for rapidly solving the ray inverse problem of underwater acoustic positioning[J]. Marine Geodesy, 2023, 46(1): 3-15.
- [163] SUN Dajun, YU Miao, ZHENG Cuie, et al. Improved seafloor geodetic positioning via sound velocity correction based on the precise round-trip acoustic positioning model[J]. Marine Geodesy, 2023, 46(1): 43-61.
- [164] 李景森, 薛树强, 肖圳, 等. GNSS/声呐组合观测臂长改正不确定度评估[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版): 1-12 [2023-08-08]. DOI: 10.13203/j.whugis20220673.
- LI Jingsen, XUE Shuqiang, XIAO Zhen, et al. Uncertainty evaluation on the arm length correction of GNSS-A observation [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University: 1-12 [2023-08-08]. DOI: 10.13203/j.whugis20220673.
- [165] KUANG Yingcai, LU Zhiping, WANG Fangchao, et al. A nonlinear gauss-helmert model and its robust solution for seafloor control point positioning [J]. Marine Geodesy, 2023, 46(1): 16-42.
- [166] 明锋, 杨元喜, 曾安敏. 基于贝叶斯估计的深海 GNSS-A 定位精度[J]. 地球物理学报, 2023, 66(3): 951-960.
- MING Feng, YANG Yuanxi, ZENG Anmin. Positioning accuracy of GNSS-A in deep sea based on Bayesian estimation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(3): 951-960.
- [167] 王薪普, 薛树强, 曲国庆, 等. 水下定位声线扰动分析与分段指数权函数设计[J]. 测绘学报, 2021, 50(7): 982-989. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200424.
- WANG Xinpu, XUE Shuqiang, QU Guoqing, et al. Disturbance analysis of underwater positioning acoustic ray and design of piecewise exponential weight function[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(7): 982-989. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200424.
- [168] 孙悦, 薛树强, 韩保民, 等. 邻近海底基准站坐标时序联合处理模型[J/OL]. 测绘学报: 1-16 [2023-08-08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2089.p.20230601.1503.002.html.
- SUN Yue, XUE Shuqiang, HAN Baomin, et al. Multi-station joint processing model for seafloor geodetic coordinate time series [J/OL]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica: 1-16 [2023-08-08]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2089.p.20230601.1503.002.html.
- [169] ZHAO Jianhu, LIANG Wenbiao, MA Jinye, et al. A self-constraint underwater positioning method without the assistance of measured sound velocity profile[J]. Marine Geodesy, 2023, 46(1): 62-82.

(责任编辑: 张艳玲)

收稿日期: 2023-08-17

修回日期: 2023-08-22

第一作者简介: 党亚民(1965—), 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为大地测量基准、GNSS 精密定位和地球动力学。

First author: DANG Yamin(1965—), PhD, researcher, PhD supervisor, majors in geodetic datum, GNSS precise positioning and geodynamics.

E-mail: dangym@casm.ac.cn

通信作者: 蒋涛

Corresponding author: JIANG Tao

E-mail: jiangtao@casm.ac.cn