引文格式:李星星,付元辰,张柯柯,等.基于全球大地测量观测系统的地球参考框架建立:现状、机遇、挑战[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(8):1597-1610.DOI:10.13203/j.whugis20260117

Citation: LI Xingxing, FU Yuanchen, ZHANG Keke, et al. Review of Terrestrial Reference Frame Establishment Based on Global Geodetic Observing System: Status, Opportunities, and Challenges[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(8):1597-1610.DOI:10.13203/j.whugis20260117

基于全球大地测量观测系统的地球参考框架建立:现状、机遇、挑战

李星星[1] 付元辰[1] 张柯柯[1] 袁勇强[1] 邹贤才[1] 李颖喆[1]
张 岩[1] 程毅凡[1]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:地球参考框架是支撑现代人类活动与社会发展的重要基础设施。全球大地测量观测系统(global geodetic observing system,GGOS)为现代地球参考框架的构建提供核心技术支撑。首先阐述地球参考框架的建立现状,系统梳理GGOS的组成体系,剖析全球导航卫星系统、卫星激光测距、甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry,VLBI)、多普勒无线电定轨定位系统四大核心大地测量技术对地球参考框架的贡献,总结多技术融合建立地球参考框架的并置观测方法与不同层次的融合策略;其次,归纳当前GGOS在数据利用不充分、各技术存在系统误差、过度依赖全球地基观测等方面的发展瓶颈,并针对上述瓶颈探讨新一代GGOS的建设可行性,重点分析大型低轨星座、空间基准卫星、空间VLBI卫星对提升地球参考框架精度的新机遇;最后,展望建设新一代GGOS的关键挑战。

关键词:地球参考框架;全球大地测量观测系统;大型低轨星座;空间基准卫星;空间VLBI卫星

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-05-06

DOI:10.13203/j.whugis20260117 **文章编号**:1671-8860(2026)08-1597-14

Review of Terrestrial Reference Frame Establishment Based on Global Geodetic Observing System: Status, Opportunities, and Challenges

LI Xingxing[1] *FU Yuanchen*[1] *ZHANG Keke*[1] *YUAN Yongqiang*[1] *ZOU Xiancai*[1]
LI Yingzhe[1] *ZHANG Yan*[1] *CHENG Yifan*[1]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objective**: The terrestrial reference frame (TRF) constitutes the fundamental basis for global, regional, and national geodetic networks, and it is necessary for the quantitative investigations of Earth system processes. To meet the stringent requirements of geoscientific studies concerning small-scale variations of the Earth system, the global geodetic observing system (GGOS) has established target accuracies of 1 mm in position and 0.1 mm/a in stability for the TRF. As the most accurate realization of the TRF, the international terrestrial reference frame (ITRF) is generated through the integrated processing of multiple space geodetic techniques within GGOS. However, the latest realization, ITRF2020, still falls short of the 1 mm accuracy goal, owing to technique specific systematic errors and uncertainties in local tie measurements at co-location sites. This paper aims to review the current status of TRF establishment within the framework of GGOS, identify opportunities to advance TRF accuracy toward the 1 mm level, and summarize the key scientific and technical challenges facing the next generation GGOS. **Methods**: We first review the present status of ITRF realization and the architecture of GGOS, analyzing in detail the contributions of the four space geodetic techniques, namely global navigation satellite system (GNSS), satellite laser ranging (SLR),

基金项目:国家自然科学基金(42425401,42404019,42388102)。

第一作者:李星星,博士,教授,研究方向为GNSS精密数据处理.xxli@sgg.whu.edu.cn

very long baseline interferometry (VLBI), and Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite, to the combined solution. The principal limitations of the current GGOS infrastructure are then examined. On this basis, we discuss the prospective architecture of the next generation GGOS, including low Earth orbit (LEO) satellite constellations, co-location geodetic satellites, and space VLBI (SVLBI) satellites, together with their potential contributions to ITRF realization. **Results**: The review shows that ITRF2020 has benefited from considerable progress in all four space geodetic techniques, including the expansion of global station networks, advances in instrumentation, and the refinement of data processing models and strategies. Nevertheless, several factors continue to prevent the ITRF from reaching the 1 mm accuracy target, most notably insufficient exploitation of available observations, technique specific systematic errors, and excessive reliance on ground based local ties. The next generation GGOS, represented by space-based observations, can expand the existing observation system and provides an effective means to overcome these limitations. LEO satellite constellations can provide abundant observations linking GNSS satellites with ground stations, thereby strengthening geocenter determination within the GNSS observation. Co-location geodetic satellites enable the integration of GNSS, SLR, and VLBI through onboard space ties, improving the accuracy of key geodetic parameters such as Earth orientation parameters (EOP) and geocenter coordinates relative to any single technique solution. SVLBI satellites can substantially extend baseline lengths within regional VLBI networks. Incorporating SVLBI observations enables the Chinese VLBI network to determine EOP with an accuracy comparable to that of the global network. **Conclusions**: The ITRF has progressed substantially through the multifaceted development of GGOS, yet reaching the 1 mm accuracy target requires more advancement. The next generation GGOS, built upon multiple complementary space missions, is expected to provide richer observations, more reliable inter technique ties, and a means of overcoming the constraints of ground-based networks, thereby advancing ITRF accuracy toward the 1 mm level. To realize this vision, several urgent challenges must be addressed, including precise orbit determination for large constellations and complex satellite platforms, the development of rigorous theoretical frameworks for multiple technique combination, and the design of high-performance software capable of processing large scale and heterogeneous geodetic observations.

Key words: terrestrial reference frame (TRF); global geodetic observing system (GGOS); low-Earth-orbit (LEO) satellite constellations; co-location geodetic satellites; space-VLBI satellites

深入研究与理解地球系统的变化过程及其相互作用机制,需精准描述地球表面的几何位置变化与内部物质的质量迁移,因此构建并维持高精度、高时空分辨率且长期稳定的地球参考系统至关重要[1]。作为描述地球系统质量分布与运动状态的统一空间基准,高精度地球参考系统是地震灾害预警、全球海平面变化监测、高精度地球重力场反演及地球深部动力学机制研究等前沿科学的基础支撑[2-3]。随着联合国全球大地测量参考框架相关决议的通过,其重要性进一步提升至全球可持续发展层面,在深空探测、卫星导航、航空航天、智能交通及智慧城市建设等国防与国民经济关键领域发挥决定性作用[4-5]。

地球参考系统明确了大地测量的起算基准与尺度标准,定义了坐标原点、长度单位、坐标轴指向及参考椭球,并包含相应的理论实现方法[6]。国际地球参考系统的原点为包含大气和海洋的整个地球系统质心,坐标轴指向与国际时间局1984.0历元给出的方向一致,长度单位采用国际单位制中的米[1]。在实际应用中,该理论系统需通过地球参考框架(terrestrial reference frame,TRF)进行物理实现,即通过全球分布的地面观测站坐标及其速度场具体表征[7]。地球参考框架的建立依赖于全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)、卫星激光测距(satellite laser ranging,SLR)、甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry,VLBI)、多普勒无线电定轨定位系统(Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite,DORIS)4种空间大地测量技术。由于各类技术对地球参考框架参数的敏感度存在差异,且单一技术无法独立解算所有参数[8],因此基于多源观测数据的融合解算是目前构建高精度地球参考框架的主流方法。

为满足海平面变化、冰后回弹及板块构造等地

球系统微小变化探测的科学需求,地球参考框架需达到位置精度优于1 mm、速度精度优于0.1 mm/a的稳定性指标[9]。为此,国际大地测量协会(international association of geodesy,IAG)于2003年发起建立全球大地测量观测系统(global geodetic observing system,GGOS),旨在整合各类大地测量观测技术与分析方法,明确提出上述1 mm精度建设目标[10]。目前,国际公认精度最高、应用最广泛的地球参考框架为IAG推动建立的国际地球参考框架(international terrestrial reference frame,ITRF),其最新版本ITRF2020通过严密的数学模型融合了GNSS、SLR、VLBI、DORIS数十年的观测数据,并精细化建模非线性季节性变化和震后形变,代表了当前地球参考框架构建的最高水平[11]。但评估结果显示,ITRF2020的坐标原点精度约为5 mm,长期稳定性约为0.5 mm/a[12],与GGOS设定的1 mm精度目标仍存在显著差距,尚无法完全满足全球变化监测等高精度科学应用的需求。

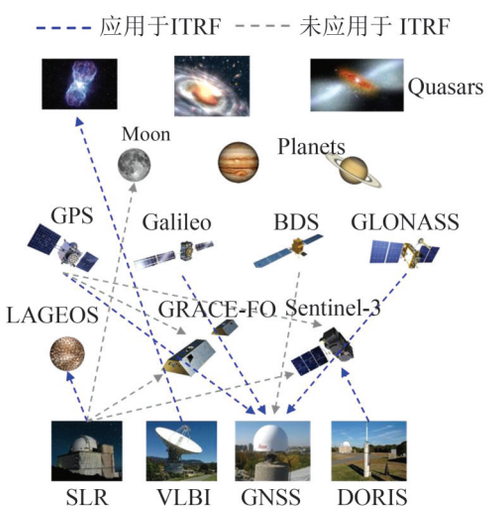
基于上述背景,本文围绕基于GGOS的高精度地球参考框架建立这一核心议题展开综述,首先介绍GGOS的基本架构与核心要素,剖析当前地球参考框架建立的关键技术进展及精度局限;其次分析新一代GGOS建设的技术新机遇;最后展望其建设面临的关键挑战,并提出相应的研究思路与技术路径。

1　地球参考框架建立现状

1.1　全球大地测量观测系统组成

GGOS下设管理委员会、执行委员会、协调办公室、科学委员会、网络和观测局、产品与标准局以及针对特定科学问题的多个工作组,与IAG下属的国际GNSS服务(international GNSS service,IGS)、国际激光测距服务(international laser ranging service,ILRS)、国际VLBI服务(international VLBI service for geodesy and astrometry,IVS)、国际DORIS服务(international DORIS service,IDS)等大地测量服务机构协同工作,统筹各类大地测量观测数据的收集,保障大地测量产品的精度与稳健性[10]。目前,GGOS的观测体系涵盖河外射电源、行星体、高轨卫星、低轨卫星、地面观测设施5个层次,如图1所示。地球参考框架的建立主要依托GNSS、SLR、VLBI、DORIS 4种核心空间大地测量技术[13]。

GGOS全球测站网络共包含1 800余个观测站点[14],为ITRF的构建提供测站坐标与地球定向参数(earth orientation parameters,EOP),其中EOP包括极移分量(X_{pole}、Y_{pole})、世界时(universal time,UT)分量(dUT1=UT1−UTC)与章动分量(dX、dY),不同技术对EOP的敏感性不同。GGOS全球测站网络分布如图2所示,各核心技术测站规模与观测贡献如下:GNSS观测网络由全球1 350个GNSS基准站构成,为地球参考框架提供测站坐标及极移与日长变化(length of day,LOD);同时因GNSS测站分布最广、数量最多,成为不同技术间并置观测的核心手段,目前几乎所有SLR与VLBI测站均开展与GNSS的并置观测[12],且GNSS解算连续性强、观测数据密集,可生成参考框架所需的震后弹性形变模型,并通过并置手段将该形变模型应用于其他技术的测站坐标改正[15]。VLBI观测网络由全球160个测站构成,其观测精度与基线长度正相关,网络规模越大,EOP的观测精度越高[16];VLBI可为地球参考框架提供测站坐标及完整的EOP,是ITRF建立中确定EOP dUT1与章动分量的唯一技术。SLR观测网络由全球149个测站构成,为地球参考框架提供测站坐标、极移与LOD[17],其是目前确定ITRF长期原点的唯一技术。DORIS观测网络由全球222个地面站构成,为地球参考框架提供测站坐标及极移。



注:BDS(BeiDou navigation satellite system):北斗卫星导航系统;LAGEOS(laser geodynamic satellite):激光地球动力学卫星;GRACE-FO(gravity recovery and climate experiment follow-on):重力恢复与气候实验后继卫星。

图1　GGOS多层次观测示意图

Fig. 1　Multiple Levels of Geodetic Observations in GGOS

1.2　核心空间大地测量技术及其贡献

1.2.1　GNSS

GNSS技术具有高精度、全天候、实时性的优

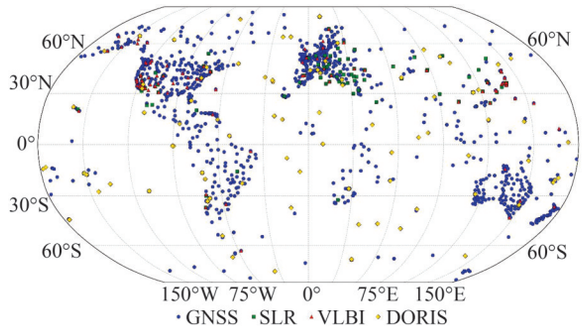


图2 GGOS全球测站网络

Fig. 2 Global Distribution of Stations in the GGOS Network

势,利用伪距与载波相位观测值,通过后方交会原理确定地面接收机的精确三维坐标。由GPS、GLONASS、Galileo和BDS等系统构成的GNSS星座,可持续监测全球海量基准站,生成厘米至毫米级精度的坐标时间序列与速度场,并参与极移与日长变化的解算。为协调全球观测资源、生成高质量且一致性的数据分析产品,IGS于1994年成立,其整合全球海量永久跟踪站与多家分析中心,制定统一的数据处理标准,系统性发布精密星历、钟差等产品[18]。

为提升GNSS建立地球参考框架的精度,IGS面向ITRF2020开展了第三次数据重处理。在力学模型方面,多数分析中心采用箱翼模型作为先验光压模型以弥补不同GNSS系统光压建模的不足,有效吸收大部分太阳辐射压摄动,显著提升了地心参数Z方向与SLR解算结果的一致性[19]。在尺度基准方面,由于长久以来GNSS卫星天线相位中心地面标定值无法获取,使得GNSS技术不具备独立确定尺度的能力,其尺度长期依赖VLBI和SLR等外部技术约束[12];随着Galileo官方天线相位中心偏差(phase center offset, PCO)标定值及地面多系统接收机天线标定数据的发布,VILLIGER等[20]首次实现了基于GNSS的独立框架尺度解算。此外,第三次重处理还更新了长期地极模型、高频EOP潮汐模型、海洋潮汐负载模型及时变重力场模型等,进一步削弱了时间序列中的模型误差。在数据处理规模上,第三次重处理首次纳入Galileo观测数据,73%的测站参与了超过1 000天的解算,较以往明显增加[18]。最终估计的测站坐标精度在东向、北向和高程方向分别为1.2、1.2、3.4 mm,极移精度达到15~30 μas,LOD精度达到5~10 μs/d,较ITRF2014均有显著提升[18];同时GNSS基于Galileo卫星PCO标定首次实现了独立尺度确定,在2015历元GNSS尺度与ITRF2020尺度差异为0.682×10^{-9},尺度速率为0.018×10^{-9}/a[12]。

1.2.2 SLR

SLR技术具有高精度优势,且观测值不受模糊度、电离层与钟差的影响,长期以来应用于确定地球参考框架的原点、尺度与EOP。ILRS于1998年成立,主要负责协调全球SLR测站网络运行与数据处理。通过分析SLR观测数据,可获取高精度的测站坐标及速度场、地球重力场的静态与时变分量、极移与日长变化以及精确的月球历表等科学产品[21]。

为提升SLR确定地球参考框架的精度,ILRS从测站建设、硬件升级和系统误差建模3个方面开展了大量技术优化工作[22]。在测站建设方面,ILRS计划在阿根廷、印度、挪威等国增设测站,以弥补南半球、赤道区域及高纬度地区的观测空白。在硬件升级方面,现代SLR系统引入单光子探测器与高频重复率激光器等新技术,实现千赫兹级常规观测,将单次测量精度提升至毫米级[23];事件计时模式的应用进一步将激光飞行时间和发射时刻的测量精度提升至皮秒级,有效降低了系统硬件延迟与计时非线性误差[24]。在系统误差建模方面,ILRS评估了卫星体制、激光频率及观测模式等因素的影响,为LAGEOS、Etalon等卫星建立了站星质心精化模型,将核心站系统偏差控制在5 mm以内[25];在此基础上进一步估计光电系统测距偏差,形成站星对测距偏差改正模型,显著提升了SLR与VLBI尺度估计的一致性[24]。在ITRF2020的构建中,ILRS提供了7家分析中心重新解算的27年周解序列。得益于上述技术优化,SLR解算精度显著提升:核心测站平均精度达3.7 mm,较ITRF2014提升32.7%;卫星质心与测距偏差的精准建模使SLR与VLBI尺度一致性首次达到0.15×10^{-9},较ITRF2014尺度系统误差减小约1×10^{-9};地心解算精度为5 mm;极移解算精度约为0.2~0.4 mas,日长变化解算精度达60 μs/d[26]。

1.2.3 VLBI

与GNSS、SLR、DORIS等基于人造卫星的观测技术不同,VLBI以遥远的河外射电源为观测目标。这一技术特性使VLBI能够直接测定天球参考框架与TRF之间的转换参数,即EOP;在当前GGOS体系中,VLBI是唯一能够长期、稳定、高精度测定EOP参数全部分量的技术[27]。IVS于1999年正式成立,统筹全球观测站与分析中心[28],采用24 h常规大地测量观测和1 h UT1加强观测两种核心模式开展VLBI联测。

面对GGOS提出的1 mm精度目标,传统S/X

频段VLBI系统在观测精度与时效性方面逐渐显现瓶颈,IVS据此提出VLBI2010方案并构建了新一代VLBI全球观测系统(VLBI global observing system,VGOS)。VGOS采用小口径高转速天线与宽频带接收机技术,利用线性极化和相位延迟观测量有效解决了电离层延迟改正与大气湍流等系统误差问题,数据采集率较传统系统显著提升[29]。自2020年正式运行以来,VGOS网络已包含12个测站并计划于2030年扩展至40个[30],实测评估表明其在6 000 km基线上的基线测量精度已达4 mm,高程方向坐标重复性较S/X频段系统提升约50%[31],未来有望实现每3 h发布一次高精度EOP成果,满足实时导航与灾害预警等对EOP时效性的迫切需求[29]。在ITRF2020的构建中,IVS下属分析中心处理了跨度达42年的VLBI观测数据,VLBI独立提供UT1和日长变化参数,与SLR联合定义框架尺度。在后续更新评估中,传统S/X频段测站坐标精度在东向、北向和高程方向分别为4.3、4.6、10.6 mm,EOP估计精度X_{pole}、Y_{pole}、dUT1分别为97 μas、136 μas、9 μs;VGOS测站坐标精度东向、北向和高程方向分别达到2.8、3.1、5.0 mm,EOP估计精度X_{pole}、Y_{pole}、dUT1分别为111 μas、140 μas、9 μs,尽管测站数量远少于S/X频段网络,其EOP确定精度已与之相当[31]。

1.2.4　DORIS

DORIS是基于单向双频多普勒测量的空间大地测量技术,其通过全球分布的地面信标网络向低轨卫星发射双频载波信号、星载接收机测量信号的多普勒频移,基于频移变化解算卫星与测站间的精密距离变化率[32]。为整合全球DORIS观测资源,IDS于2003年正式成立,主要负责协调全球多个分析中心,统一数据处理标准与流程,并组织开展数据重处理工作,生成长期DORIS站坐标时间序列与极移产品[33]。

IDS在历次ITRF构建中持续优化技术与模型:ITRF2008构建中首次整合多分析中心长期解算结果,显著提升了站坐标精度[34];ITRF2014时期通过引入新一代卫星数据、改进天线相位中心与地球重力场模型,有效消除了尺度跳变等问题[35]。与此同时,各分析中心在对流层延迟校正、太阳辐射压建模及非潮汐负载改正等关键模型方面的持续优化,通过应用全新的天线相位中心模型与改进的卫星非保守力方法,进一步抑制了地心等参数中的系统误差[36]。在ITRF2020的构建中,IDS提供了1993—2021年的重处理周解序列,平均测站坐标精度在东向、北向和高程方向分别达6.6、4.9、5.8 mm,极移精度X_{pole}、Y_{pole}分别达192、172 μas,较ITRF2014显著提升[37]。

1.3　多技术融合建立TRF

1.3.1　全球大地测量观测系统的并置观测

GNSS、SLR、VLBI、DORIS 4种空间大地测量技术对地球参考框架构建的参数敏感性与技术优势各有差异,多技术融合是构建高精度地球参考框架的必要手段。实现多技术有效融合的关键在于建立技术间的并置观测。目前主流的并置观测方法主要分为三类:一是基于地面台站的地基并置,通过高精度地面测量实现不同技术测站间的局部连接;二是基于卫星平台的星基并置,通过多技术载荷的在轨并置实现多技术的空间连接;三是基于公共参数的虚拟并置,通过联合解算共性物理参数建立技术间的约束关系。

1)地基并置是指在同一站点或相邻站点布设两种及以上空间大地测量技术观测设备并开展同步观测,是目前多技术融合的基础技术手段[38]。不同技术仪器参考点间的三维位置向量,即局部连接,可通过全站仪、GNSS等高精度测量方法测定。现代全站仪测角精度可达0.5″,测距精度可达±0.6 mm+$1\times10^{-6}\cdot D$,GNSS静态或双差观测精度亦可达毫米级[39],在理想条件下,局部连接测量精度能够满足1 mm精度要求。基于局部连接成果与各技术解算的测站坐标,可对并置站施加技术间约束以实现不同技术框架的统一[40-41]。

ITRF2020共纳入101个并置测站,但全球分布极不均衡,主要集中于欧洲、北美及部分亚洲区域,南半球并置站数量稀缺。共采用415条局部连接观测数据,GNSS与其他技术的连接占比达60.9%,是局部连接的核心技术载体。局部连接的实际观测受参考点定义偏差、观测环境差异、观测时效性等多重因素影响[41],多数局部连接的实测精度仅为2~10 mm,精度优于5 mm的局部连接占比不足50%,与1 mm精度目标差距显著[12]。

2)星基并置传统地球参考框架的构建高度依赖地基并置的局部连接,但该方式存在参考点难以精准测定、易受地面环境干扰、全球分布不均等固有缺陷,已成为制约GGOS实现1 mm精度参考框架的瓶颈[42]。学界提出星基并置的技术理念,即将多种空间大地测量技术的观测载荷集成于同一航天器平台,通过星上载荷的精密标定与在轨协同观测实现不同技术间的空间连接。与地基并置相比,星基并置具有显著优势:星上各传感器间的几何关系可在发射前于实验室内完成亚毫米级精密标定,从源头降低并置误差;卫星在轨运行环境相对稳定,

有效规避了地面复杂环境对测量的干扰;卫星的全球覆盖特性可弥补地面并置站南半球分布稀缺的不足,实现全球范围的多技术连接[8]。

目前,星基并置的技术可行性已在现有卫星任务中得到初步验证。GPS、GLONASS、Galileo及BDS卫星均搭载激光反射器阵列,实现了GNSS与SLR的空间连接,为检核GNSS轨道精度、统一两者尺度提供了数据基础[43];低地球轨道(low earth orbit,LEO)卫星作为星基并置的理想平台,展现出巨大应用潜力,现有测高卫星与重力卫星部分同时搭载GNSS星载接收机与SLR角反射棱镜[44]。研究表明,基于低轨卫星的星基并置能够有效连接多大地测量技术,在地心运动监测、EOP解算及尺度传递方面发挥关键作用,成为地基并置的重要补充[45-46]。

受限于非专用设计,现有卫星的载荷配置与星上标定精度仍存在不足,难以充分发挥星基并置的技术优势。为此,国际大地测量界提出一系列以星基并置为核心的专用卫星任务,如美国航空航天局的空间大地参考天线计划(geodetic reference antenna in space,GRASP)、欧洲空间局的E-GRASP计划等[47-48]。其中最具代表性的是欧洲空间局2023年正式批准的GENESIS计划,该任务计划发射一颗多技术并置的空间基准卫星,同时搭载GNSS、SLR、DORIS及VLBI 4种技术载荷,通过精密标定实现1 mm精度的空间连接,核心目标是推动1 mm精度地球参考框架建立,并实现10×10^{-12} s精度的时间传递[49]。

3)其他并置手段除地基、星基并置外,利用不同空间大地测量技术对同一物理参数的共同观测特性,在平差模型中引入公共参数约束实现的虚拟并置,是多技术融合的重要补充,按公共参数属性分为全局连接、大气连接、钟连接三类。

全局连接以不同技术共同解算的EOP作为公共约束,实现各技术子网在旋转基准上的统一[50],由于卫星技术解算的dUT1与日长变化易受轨道系统误差影响,极移是目前最常用的全局约束量,通常采用分段线性模型对极移进行严格约束,同时对卫星技术的LOD施加宽松约束或偏差校正,该策略不仅统一了各技术的定向,还能借助GNSS全球均匀分布的观测网络提升VLBI的EOP解算精度[51]。大气连接指的是对并置站内不同技术的对流层参数施加约束。其物理前提是同一并置站的GNSS、VLBI、DORIS等微波设备观测信号穿过的对流层物理环境基本一致,各技术解算的对流层天顶延迟及梯度参数间存在物理联系[52]。SLR工作于光学波段,大气折射机制与微波技术截然不同,通常不参与大气连接。对于微波技术,不同天线处的天顶对流层延迟差异主要由天线参考点的高度差决定,通过引入高精度气象数据或经验模型可构建各技术间对流层参数的约束方程[53],研究表明,大气连接可降低VLBI对流层参数与测站高的相关性,显著改善VLBI的垂向坐标精度[54]。钟连接通过硬件或软件手段统一并置站内不同技术的频率基准,实现钟差参数的协同解算,理想情况下,若GNSS接收机与VLBI连接至同一高稳定性外部原子钟,两者可共享相同的钟差模型,大幅减少待估钟参数数量,增强解算的稳健性。但实际应用中GNSS与VLBI之间的钟差表现出明显的时变特征,且易受温度波动影响[55],随着光钟技术的发展及站内光纤时频传递技术的成熟,未来有望实现亚皮秒级的精密钟连接。

1.3.2 多技术融合方法

多技术融合方法按融合层次分为参数层面、法方程层面与观测值层面3种模式,各模式信息利用深度、复杂度及解算效果不同,适用于不同场景。

参数层面融合是当前国际地球参考框架构建的主流方法,通过最小二乘法或卡尔曼滤波,整合各技术解算的测站坐标、速度场等成果及方差-协方差矩阵得到组合解[12]。其优势是实施简便,无需统一原始数据处理流程,但其不足在于各技术成果中固化的先验信息难以消除,参数化与基准定义不统一会影响融合精度。

法方程层面融合通过叠加各技术法方程与常数项统一解算,保留参数间完整相关性,可减弱先验约束影响。但需严格统一参数化方式,剔除技术特有参数,避免冗余,且无法完全消除系统误差,对标准化处理要求高[56]。

观测值层面融合基于统一模型与流程对原始观测值进行一体化建模解算,可联合估计共性参数,跨技术粗差探测,削弱系统偏差[57]。但其对软件与计算资源要求极高,目前,针对多大地测量技术的原始观测值层面融合,中国开发了多个专业软件平台,如PANDA、GSTAR、GREAT等[58-60]。

1.4 现有全球大地测量观测系统的发展瓶颈

ITRF2020通过精细化建模测站非线性运动、震后形变及地心季节性运动,实现了地球参考框架精度的历史性提升,但其精度与GGOS设定的1 mm精度目标仍有显著差距。GGOS虽长期统筹国际

大地测量基础设施建设,但当前系统面临瓶颈,制约了地球参考框架精度的进一步提升。

1)观测资源利用不充分。在GNSS领域,GPS和GLONASS长期为ITRF构建提供数据支撑,Galileo观测值虽已首次纳入ITRF2020,但BDS观测值仍未参与框架构建[61],大量LEO星载GNSS数据同样未被利用[45]。在SLR领域,随着BDS、Galileo卫星及大量低轨卫星加入ILRS联测,可用数据量大幅增长,但ITRF2020仅采用了LAGEOS和Etalon卫星数据,占全部SLR观测值的比例不足10%[62]。此外,随着BDS系统与大型低轨星座建设的推进,星间链路技术已实现工程化应用,但尚未纳入地球参考框架构建流程,其对基准维持的贡献仍有待深入研究[63]。

2)系统偏差与模型误差未彻底消减。尽管ITRF2020将SLR与VLBI的尺度差异从ITRF2014的1.4×10^{-9}缩小至0.15×10^{-9},但各技术仍存在难以消除的残余系统误差。GNSS虽依托Galileo卫星PCO标定具备独立确定尺度的能力,但其估计尺度与ITRF尺度仍存在显著差异,且光压模型的不完善会在地心序列中引入虚假信号,导致其无法参与ITRF原点定义[64];SLR虽通过测距偏差建模提升了与VLBI的尺度一致性,但受对流层建模、标准点算法及多卫星测距偏差建模不足等因素影响,框架参数解算精度尚未达到1 mm精度目标[65];VLBI的解算质量直接受对流层建模精度制约,大型天线长期运行后的相位中心标定误差若未及时校准,也将引入系统性偏差[66];DORIS受天线相位中心标定问题困扰,其长期地心和尺度确定结果与ITRF2020存在明显系统偏差,目前仅能参与极移参数的定义[67]。

3)多技术并置过度依赖地基观测。当前GGOS的观测数据均由地面站获取,多技术融合所需的局部连接也全部通过地面台站测量实现,星载GNSS、星间链路等星基观测手段尚未应用于ITRF构建。基于地基并置的局部连接在数量、精度及更新频率上均难以满足1 mm精度参考框架的构建需求。对地基观测的过度依赖导致参考框架精度受地面测站分布的影响显著。建设与维护成本较高的SLR、VLBI测站集中于北美、欧洲和亚洲,南半球分布极为稀疏[22]。这种南北半球测站分布的严重不对称使全球观测网的参数估计结果缺乏稳健性,南半球并置站的系统偏差将对地球参考框架参数解算引入显著误差。

2　新一代全球大地测量观测系统

针对上述瓶颈,新一代全球大地测量观测系统的建设将以星基观测为核心增量,联合地基并置充分整合高中低轨观测资源,其中大型低轨星座、空间基准卫星、空间VLBI(space VLBI,SVLBI)卫星成为提升地球参考框架精度的重要技术方向,为GGOS建设带来全新机遇。

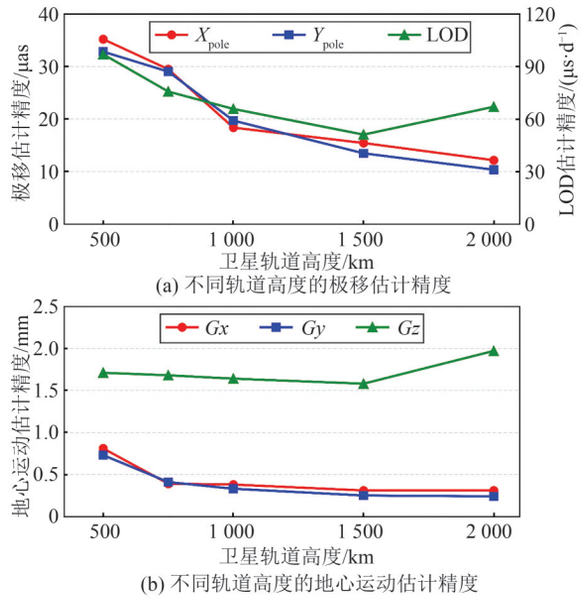
2.1　大型低轨星座

大型低轨星座能提供下行导航信号、星间链路等新体制观测数据,为高精度地球参考框架的构建带来全新契机。根据《北斗卫星导航系统2035年前发展规划》,中国计划于2035年完成下一代北斗系统建设,形成高中低轨混合星座,全面提升时空基准维持精度与自主运行能力。低轨星座中卫星分布于不同倾角和不同高度的轨道面,其地面接收信号强度高、几何构型变化快的技术优势与GNSS星座形成互补,可为GGOS提供多层次的海量观测数据,有望进一步突破地球参考框架的精度瓶颈。

为探讨大型低轨星座对地球参考框架的贡献,本文基于仿真实验对比了不同轨道高度的大型低轨星座采用下行信号估计地球参考框架参数的性能。图3给出了不同轨道高度的大型低轨星座的极移、LOD与地心各分量(Gx,Gy,Gz)的估计精度。随着轨道高度的增加,星下点覆盖范围增大,可提供的下行信号观测量增多,但卫星对地心等参数的敏感性随之降低。观测量与参数敏感性共同影响地球参考框架参数的估计性能。极移估计精度随轨道高度的增加而持续提高。日长变化估计精度在500~1 500 km范围内随轨道高度增加而提高,但轨道高度进一步增加后精度反而下降。在地心参数方面,各分量表现出一致的变化特征:估计精度在500~1 500 km范围内随轨道高度增加而提高,但2 000 km时较1 500 km时有所下降。上述结果表明,不同地球参考框架参数对观测量和轨道高度的敏感性存在差异。极移参数对观测量更为敏感,而日长变化及地心参数的估计精度受观测量和参数敏感性的共同影响,在1 500 km较好地平衡了两方面因素,实现了较优的估计性能。

基于对轨道高度的仿真验证,进一步设计轨道高度为1 500 km、倾角为75°的大型低轨星座。选取全球分布的150个GNSS测站,仿真大型低轨星座与GNSS卫星下行数据,验证GNSS联合大型低轨星座的地球参考框架参数估计性能。参数估计精度如图4所示。

由于LEO星座轨道高度较低,其极移估计精度略低于GNSS星座,LOD估计精度存在显著不足。GNSS+LEO联合解算可显著增加观测值数量,优

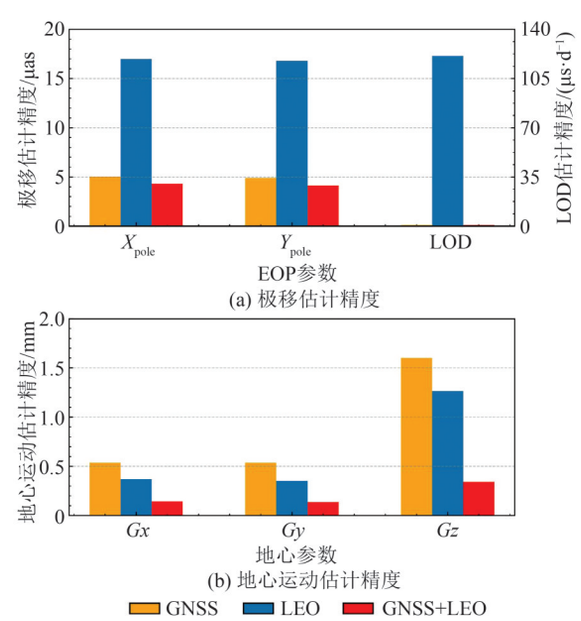


(a) 不同轨道高度的极移估计精度

(b) 不同轨道高度的地心运动估计精度

图3 大型低轨星座轨道高度对地球参考框架参数估计精度的影响

Fig. 3 Accuracy of Geodetic Parameters Derived from LEO Constellations at Different Orbital Altitudes



(a) 极移估计精度

(b) 地心运动估计精度

图4 不同方案下地球参考框架参数解算结果

Fig. 4 Accuracy of Geodetic Parameters Derived from GNSS, LEO, and GNSS+LEO Solutions

化几何构型,较GNSS结果极移X_{pole}、Y_{pole}分量估计精度分别提升14.2%、16.6%,LOD估计精度提升7.9%。由于轨道高度低,LEO星座对地心参数的敏感性显著优于GNSS星座,在Z方向优势明显。GNSS+LEO联合解算进一步提升了地心参数估计精度,较GNSS在Gx、Gy、Gz分量上精度分别提升73.1%、74.0%、78.5%。上述结果表明,LEO星座与GNSS星座对地球参考框架参数的解算敏感性存在互补性,大型低轨星座的加入可极大丰富现有GNSS观测资源,显著增强对地心参数的敏感性,通过联合解算实现地球参考框架参数估计精度的整体提升。

2.2 空间基准卫星

GNSS与低轨科学卫星的组合已初步验证了星基并置的可行性,但传统低轨科学卫星受限于非专用设计,难以充分发挥星基并置的技术优势。为此,国际大地测量界相继提出一系列以高精度星基并置为核心的空间基准卫星计划,推动实现1 mm精度参考框架。目前,空间基准卫星计划均处于论证阶段,相关可行性研究主要依托仿真数据开展。在卫星精密定轨方面,针对GENESIS卫星的GNSS信号接收特性及定轨性能已开展了系统性分析,结果表明,该卫星装备多方向GNSS天线后具有实现1 cm精度轨道确定的技术潜力[68-69]。在多卫星协同观测方面,仿真实验证实多颗空间基准卫星的VLBI联合观测能够显著提升地面站坐标的解算精度[70]。针对空间连接的精度,当各星载设备参考点精度达到1 mm时,依托该卫星观测数据解算的地面站三维坐标精度可控制在毫米级,框架长期稳定性优于0.1 mm/a[71]。针对空间基准卫星近场VLBI观测策略,应平衡河外射电源与卫星的观测时长,以保证UT1—UTC精度并满足多技术空间连接的需求,卫星观测间隔需大于5 min[72]。现有仿真研究从定轨精度、多星协同、框架实现及观测策略等多个维度初步验证了空间基准卫星在提升地球参考框架精度与一致性方面的可行性,为后续工程实施奠定了理论基础。

为进一步评估空间基准卫星对地球参考框架的贡献,本文参考GENESIS卫星轨道参数开展仿真验证[49]。设置单技术解算GNSS(G)、SLR(S)、VLBI(V)与多技术联合解算(GSV)两组方案,对比分析EOP与地心参数的估计精度。其中G方案采用地面与空间基准卫星星载GNSS观测数据,S方案采用空间基准卫星SLR观测数据,V方案采用河外射电源与空间基准卫星信标的VLBI观测数据,GSV方案通过空间基准卫星的星基并置将GNSS、SLR、VLBI数据进行联合处理。

图5比较了各方案EOP估计精度。不同技术对EOP参数的敏感性存在差异:GNSS观测全球覆盖均匀且数据量充足,极移参数估计精度最高;VLBI不依赖卫星观测,避免了卫星轨道参数与dUT1及LOD参数之间的耦合效应,对dUT1和LOD参数的估计精度最高;SLR受限于观测数量较少且测站

分布不均匀,EOP参数估计精度显著低于GNSS与VLBI。基于空间基准卫星星基并置可实现多技术间的优势互补,获得优于单技术的EOP估计精度:相较于VLBI单技术解算,基于星基并置的多技术融合使dUT1和章动参数精度分别提升38.2%和14.4%;相较于GNSS单技术解算,基于星基并置的多技术融合削弱了卫星轨道参数与EOP参数间的相关性,极移参数精度提升3.4%。图6进一步比较了各方案地心估计精度,相较于单技术解算,基于星基并置的多技术联合解算提升了地心的估计精度,其中地心 Gz 分量精度相较于GNSS结果提升了5.9%。

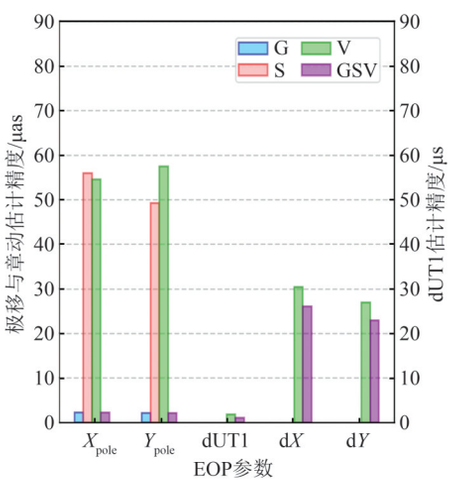


图5　不同技术EOP参数解算结果

Fig. 5　Accuracy of EOP Derived from Different Technique Solutions

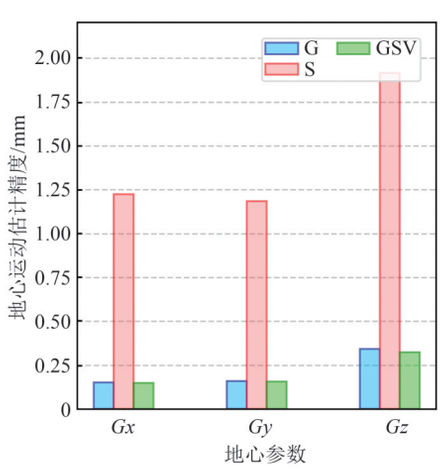


图6　不同技术地心参数解算结果

Fig. 6　Accuracy of Geocenter Derived from Different Technique Solutions

2.3　SVLBI

VLBI是目前唯一能测定EOP参数全部分量的空间大地测量技术,其EOP解算精度直接取决于地面测站网络的基线长度与分布。在区域观测条件下,地面测站网的基线长度有限、几何构型不佳,难以解算出高精度EOP参数。SVLBI技术将VLBI天线搭载于卫星平台,与地面测站开展协同干涉测量,形成地空长基线,可以有效突破地面测站网的地理范围限制,为区域条件下的高精度EOP解算提供了全新技术路径。

SVLBI的构想最早可追溯至1963年,历经数十年技术发展已开展多项实验与卫星任务:1986年美国航空航天局利用跟踪与数据中继卫星系统开展首次SVLBI实验,验证了其技术可行性;1997年日本发射搭载8 m口径射电天线的VLBI空间天文台计划卫星(VLBI space observatory programme,VSOP),在L波段和C波段与地面望远镜协同观测,其数据已应用于大地测量研究;2011年俄罗斯发射配备10 m口径望远镜的射电天文卫星(RadioAstron),运行于远地点达35万km的大椭圆轨道,覆盖P、L、C、K 4个频段,实现了超长基线观测并应用于相对论效应检验[73];2024年中国发射鹊桥二号月球轨道VLBI试验卫星,搭载4.2 m抛物面天线,可与地面测站构成最长约38万km的基线,已成功实现与上海65 m天线的相干观测实验,为中国SVLBI的大地测量应用奠定了基础[74]。SVLBI虽最初为天文学观测设计,但其大地测量应用潜力早已受到关注,基于VSOP卫星和RadioAstron卫星的仿真研究已验证了SVLBI对卫星轨道及EOP的可估性[75-76],WEI等[77]基于嫦娥一号卫星轨道的仿真分析进一步表明SVLBI可有效提升全球VLBI测站网的极移估计精度,但上述研究多基于全球测站网开展且未对dUT1参数进行仿真解算,能否依靠SVLBI及中国区域VLBI测站实现独立自主的高精度EOP确定仍有待深入探究。

为分析SVLBI增强区域测站网解算EOP的效果,选取喀什、乌鲁木齐、三亚、上海、吉林、哈尔滨6个中国VLBI网测站构建区域测站网,仿真一颗SVLBI卫星开展协同观测,其轨道高度设计为6 000 km,轨道倾角设计为95.5°。图7比较了空地VLBI基线与区域站VLBI基线的长度,由于SVLBI卫星的运动,天地基线的长度随时间快速变化,优化了VLBI观测的几何构型。对于基线长度,目前中国国内最长基线长度为4 119.3 km,而空地基线的长度始终大于5 000 km,最长超过15 000 km,超过了全球VLBI观测的最大理论基线长度(地球直径)。相较于区域站地基VLBI,空地VLBI基线在几何构型上具有显著优势。

进一步设置全球站、区域站、SVLBI+区域站3组实验,对比分析24 h观测条件下的EOP解算性能,各方案的参数相关性如图8所示。在区域站条

件下,受观测几何限制,dUT1参数与极移参数存在显著相关性,相关系数最大可达0.86。参数间的强相关性制约了EOP的高精度确定,且由于区域条件下基线几何分布受限、基线长度有限,仅依靠地面站难以有效解决该问题。而SVLBI观测的加入显著改善了区域条件下的参数相关问题,dUT1与极移的相关系数降至0.15以下,表明空地基线的几何构型优势有效实现了区域条件下EOP各分量的解耦。

进一步分析不同条件下的EOP估计精度,结果见图9。全球站的EOP估计精度X_{pole}、Y_{pole}、dUT1分别为42 μas、54.2 μas、3.2 μs;区域测站网的最长基线仅4 119.3 km,约为国际最长VLBI地面基线的1/3,观测几何构型不佳导致dUT1参数与极移参数存在明显相关性,EOP估计精度显著下降,X_{pole}、Y_{pole}、dUT1分别仅为193 μas、323 μas、15 μs。加入SVLBI观测后,区域测站网的观测几何构型得到显著改善,估计精度显著提升。SVLBI+区域站的EOP估计精度X_{pole}、Y_{pole}、dUT1分别降至35 μas、37 μas、2 μs。上述仿真结果表明,SVLBI的加入使高精度EOP确定摆脱对全球地面测站网的依赖,仅依靠区域测站网即可实现与全球测站网相当的EOP估计精度。

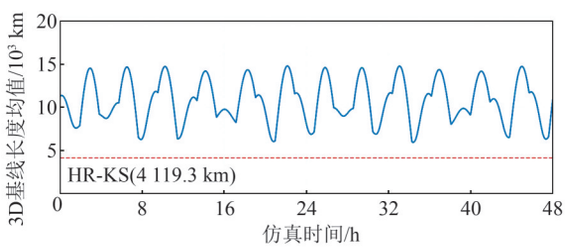


图7 空地VLBI基线长度分析

Fig. 7 Analysis of Baseline Length for Space-Ground VLBI Baselines

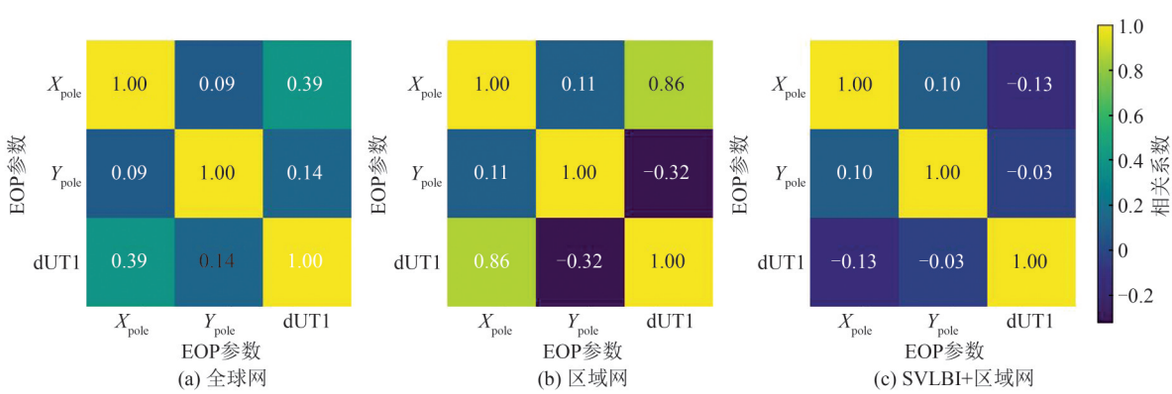


图8 不同测站网EOP参数相关性分析

Fig. 8 Parameter Correlation of EOP from Different VLBI Networks

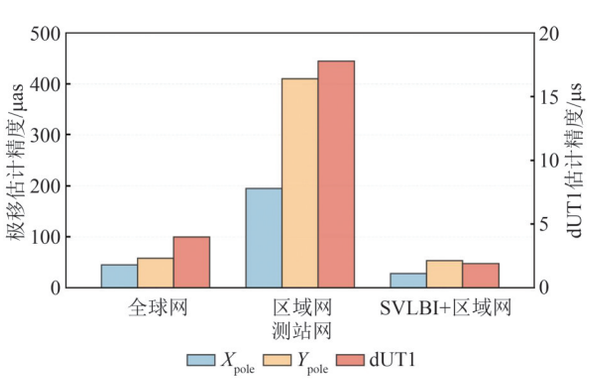


图9 不同测站网EOP参数解算结果

Fig. 9 Accuracy of EOP Derived from Different VLBI Networks

3 建设新一代大地测量观测系统的挑战

伴随着大型低轨星座、空间基准卫星、SVLBI等新技术体制的快速兴起,以及对地球参考框架精度、自主可控性、数据处理效率等方面的要求不断提升,新一代大地测量观测系统的建设面临着一系列亟待突破的技术瓶颈与现实挑战。这些挑战贯穿于系统设计、轨道确定、并置观测、数据处理等多个核心环节,成为制约新一代大地测量观测系统高效建成与稳定运行的关键因素,亟需开展针对性的研究与攻关。

1)新一代大地测量观测系统的整体方案设计。传统大地测量观测系统主要依赖于地面测站网络,相应的地球参考框架建立理论与方法也围绕着地基观测开展。如何充分发挥卫星平台的高动态特性与全球覆盖优势,设计不同轨道高度、载荷配置及测量技术体制的新一代大地测量观测系统,是亟待解决的问题。

2)基于多源数据的复杂卫星网络精密轨道确定。空间基准卫星、SVLBI卫星等新型航天器的复杂构型与多样化任务需求,为轨道确定带来了新的技术挑战。如何综合利用上下行伪距与

载波相位观测值、星间链路测量数据以及SVLBI观测量等多源异构数据,实现复杂卫星网络的高精度轨道确定,值得深入研究。

3)地基与星基并置观测的综合误差模型构建。空间基准卫星为GNSS、SLR、VLBI引入了星基并置观测。星基并置与地基并置在技术手段、观测精度与观测数量上均存在差异,如何评判并削弱地基与星基并置的差异,构建地基与星基并置观测的综合误差模型并合理确定两者的随机模型,是未来多技术融合建立地球参考框架的关键问题。

4)高性能大地测量软件平台的研制与开发。高性能并行软件平台是实现多源大地测量技术联合处理的基础。为充分发挥新一代GGOS的优势,需实现GNSS、SLR、VLBI、DORIS、LEO、SVLBI等技术原始观测值层面的融合处理。目前,GNSS、SLR、VLBI、LEO原始观测值层面的融合处理已在GREAT等软件中初步实现[60]。但面向未来低轨多技术、多星座融合发展所带来的观测数据量爆发式增长,仍需进一步构建适应高中低轨卫星与地面测站多源数据联合处理的高性能并行解算模型,完善相应的软件平台。

4　结　语

全球大地测量观测系统是维持现代人类活动,促进社会发展的重要基础设施。基于GNSS、SLR、VLBI、DORIS技术的融合,国际大地测量学界建立了地球参考框架,并推动其向着1 mm的精度水平迈进。但是,现有大地测量观测系统面临着数据利用不充分、系统误差未根除、过度依赖地基观测等问题,制约了地球参考框架的精度提升。针对该问题,新一代大地测量观测系统将以大型低轨星座、空间基准卫星、SVLBI卫星为重要增量,支撑建立独立自主的高精度地球参考框架。该系统的建设与应用既能为卫星导航、深空探测、智慧城市等国防与国民经济领域提供高精度时空基准支撑,也能满足气候演化监测、地震灾害预警、板块运动分析等地球系统科学研究对高精度地球运动监测的需求,对推动大地测量学科发展、保障国家重大战略实施具有重要的科学意义与工程应用价值。

致谢:本文的数值计算得到了武汉大学超级计算中心的计算支持和帮助,在此表示感谢!

参　考　文　献

[1] 刘经南, 魏娜, 施闯. 国际地球参考框架(ITRF)的研究现状及展望[J]. 自然杂志, 2013, 35(4): 243-250.
LIU Jingnan, WEI Na, SHI Chuang. Status and Prospects of the International Terrestrial Reference Frame (ITRF)[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(4): 243-250.

[2] 秘金钟,李振鹏,白振栋,等. 人工智能大地测量现状与趋势研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026. https://doi.org/10.13203/j.whugis20260027.
MI Jinzhong, LI Zhenpeng, BAI Zhendong, et al. Current Status and Trends of Artificial Intelligence Geodesy[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026. https://doi.org/10.13203/j.whugis20260027.

[3] 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.
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.

[4] 陈俊勇. 大地坐标框架理论和实践的进展[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(1): 1-6.
CHEN Junyong. Progress in Theory and Practice for Geodetic Reference Coordinate Frame[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(1): 1-6.

[5] 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 TerrestrialReference Frame[J]. *Earthquake Research in China*, 2020,36(4):684-692.

[6] 程鹏飞, 成英燕. 我国毫米级框架实现与维持发展现状和趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1327-1335.
CHENG Pengfei, CHENG Yingyan. The Current Status and Tendency of China Millimeter Coordinate Frame Implementation and Maintenance[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1327-1335.

[7] 杨元喜. 中国大地坐标系建设主要进展[J]. 测绘通报, 2005(1): 6-9.
YANG Yuanxi. Main Progress of Geodetic Coordinate System in China[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2005(1): 6-9.

[8] MÄNNEL B. Co-location of Geodetic Observation Techniques in Space[M]. München: Schweizerische Geodätische Kommission, 2016.

[9] 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.
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.

[10] 党亚民, 陈俊勇. GGOS和大地测量技术进展[J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 131-133.
DANG Yamin, CHEN Junyong. GGOS and Advances in Geodetic Techniques[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(1): 131-133.

[11] 明锋, 杨元喜, 曾安敏, 等. 国际地球参考框架ITRF2020简介与评析[J]. 地球科学进展, 2023, 38(11): 1186-1199.
MING Feng, YANG Yuanxi, ZENG Anmin, et al. Introduction and Review of the International Terrestrial Reference Frame ITRF2020[J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(11): 1186-1199.

[12] ALTAMIMI Z, REBISCHUNG P, COLLILIEUX X, et al. ITRF2020: An Augmented Reference Frame Refining the Modeling of Nonlinear Station Motions[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(5): 47.

[13] 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.
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.

[14] ALTAMIMI Z, REBISCHUNG P, COLLILIEUX X, et al. ITRF2020-u2024[DS/OL]. IERS ITRS Center Hosted by IGN and IPGP, 2025. https://itrf.ign.fr/en/solutions/itrf2020-u2024.

[15] ALTAMIMI Z, COLLILIEUX X. IGS Contribution to the ITRF[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3): 375-383.

[16] PLANK L, LOVELL J E J, MCCALLUM J N, et al. The AUSTRAL VLBI Observing Program[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(7): 803-817.

[17] ZAJDEL R, SOŚNICA K, DROŻDŻEWSKI M, et al. Impact of Network Constraining on the Terrestrial Reference Frame Realization Based on SLR Observations to LAGEOS[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2293-2313.

[18] REBISCHUNG P, ALTAMIMI Z, MÉTIVIER L, et al. Analysis of the IGS Contribution to ITRF2020[J]. *Journal of Geodesy*, 2024, 98(6): 49.

[19] MA Y F, REBISCHUNG P, ALTAMIMI Z, et al. Assessment of Geocenter Motion Estimates from the IGS Second Reprocessing[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 55.

[20] VILLIGER A, DACH R, SCHAER S, et al. GNSS Scale Determination Using Calibrated Receiver and Galileo Satellite Antenna Patterns[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(9): 93.

[21] PEARLMAN M, ARNOLD D, DAVIS M, et al. Laser Geodetic Satellites: A High-Accuracy Scientific Tool[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2181-2194.

[22] PEARLMAN M R, NOLL C E, PAVLIS E C, et al. The ILRS: Approaching 20 Years and Planning for the Future[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2161-2180.

[23] WILKINSON M, SCHREIBER U, PROCHÁZKA I, et al. The Next Generation of Satellite Laser Ranging Systems[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2227-2247.

[24] LUCERI V, PIRRI M, RODRÍGUEZ J, et al. Systematic Errors in SLR Data and Their Impact on the ILRS Products[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2357-2366.

[25] RODRÍGUEZ J, APPLEBY G, OTSUBO T. Upgraded Modelling for the Determination of Centre of Mass Corrections of Geodetic SLR Satellites: Impact on Key Parameters of the Terrestrial Reference Frame[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(12): 2553-2568.

[26] PAVLIS E, LUCERI V. The ILRS Contribution to ITRF2020[C]//The 23rd EGU General Assembly, Online, 2021.

[27] NOTHNAGEL A, ARTZ T, BEHREND D, et al. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry: Delivering High-Quality Products and Embarking on Observations of the Next Generation[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(7): 711-721.

[28] SCHUH H, BEHREND D. VLBI: A Fascinating Technique for Geodesy and Astrometry[J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 61: 68-80.

[29] 孙中苗, 范昊鹏. VLBI全球观测系统(VGOS)研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1346-1353.
SUN Zhongmiao, FAN Haopeng. Research Progress of VLBI Global Observing System (VGOS)[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1346-1353.

[30] SOJA B, KEHM A, BEHREND D, et al. IVS Contribution to the Second ITRF2020 Update[C]//IAG Scientific Assembly, Zurich, Switzerland, 2025.

[31] BACHMANN S, MODIRI S, WALENTA A, et al. IVS Contribution to ITRF2020 Update[C]//IVS 2024 General Meeting, Tsukuba, Japan, 2024.

[32] TAVERNIER G, SOUDARIN L, LARSON K, et al. Current Status of the Doris Pilot Experiment and the Future International Doris Service[J]. *Advances in Space Research*, 2002, 30(2): 151-156.

[33] TAVERNIER G, FAGARD H, FEISSEL-VERNIER M, et al. The International DORIS Service[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(3): 333-341.

[34] ALTAMIMI Z, COLLILIEUX X. Quality Assessment of the IDS Contribution to ITRF2008[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 45(12): 1500-1509.

[35] MOREAUX G, LEMOINE F G, CAPDEVILLE H, et al. The International DORIS Service Contribution to the 2014 Realization of the International Terrestrial Reference Frame[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 58(12): 2479-2504.

[36] SEITZ M, BLOßFELD M, ANGERMANN D, et al. DTRF2014: DGFI-TUM's ITRS Realization 2014 [J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(6): 2391-2420.

[37] MOREAUX G, LEMOINE F G, CAPDEVILLE H, et al. The International DORIS Service Contribution to ITRF2020 [J]. *Advances in Space Research*, 2023, 72(1): 65-91.

[38] National Research Council. Precise Geodetic Infrastructure: National Requirements for a Shared Resource [M]. New York:National Academies Press, 2010.

[39] RIVERA J, BETTADPUR S, GRIFFIN J, et al. Measuring 1-mm-Accurate Local Survey Ties over Kilometer Baselines at McDonald Geodetic Observatory[J]. *Journal of Geodesy*, 2024, 98(6): 46.

[40] ALTAMIMI Z, COLLILIEUX X, REBISCHUNG P, et al. The ITRF: Three Decades of Research and Development, Usages and Applications [C]//International Workshop for the Implementation of the Global Geodetic Reference Frame (GGRF) in Latin America, Buenos Aires, Argentina, 2019.

[41] GLASER S, KÖNIG R, NEUMAYER K H, et al. On the Impact of Local Ties on the Datum Realization of Global Terrestrial Reference Frames[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(5): 655-667.

[42] RIEPL S, MÜLLER H, MÄHLER S, et al. Operating Two SLR Systems at the Geodetic Observatory Wettzell: From Local Survey to Space Ties [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(11): 2379-2387.

[43] BURY G, SOŚNICA K, ZAJDEL R, et al. Geodetic Datum Realization Using SLR-GNSS Co-location Onboard Galileo and GLONASS [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126 (10): e2021JB022211.

[44] ZHANG K K, LI X X, ZHANG W, et al. Potential of Terrestrial Reference Frame Scale Transfer Using GNSS and SLR Co-location Onboard LEO Satellites[J]. *GPS Solutions*, 2025, 29(1): 50.

[45] ZHANG K K, LI X X, JIANG W P, et al. Geocenter Motion Derived from Multi-LEO Precise Orbit Determination Based on GNSS Observations and Dynamic Force Models[J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 8.

[46] FAN L, LI B, GUO S W, et al. Global Geodetic Parameter Determination Using GPS-SLR Space Ties Onboard LEO Satellites [J]. *GPS Solutions*, 2026, 30(1): 58.

[47] BAR-SEVER Y E, HAINES B, BERTIGER W, et al. The Geodetic Reference Antenna in Space (GRASP) —A Mission to Enhance Space-Based Geodesy[C]//COSPAR Colloquium: Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Program, Padua, Italy, 2009.

[48] BIANCALE R, POLLET A, COULOT D, et al. E-GRASP/Eratosthenes: A Mission Proposal for Millimetric TRF Realization[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts, Vienna, Austria, 2017.

[49] DELVA P, ALTAMIMI Z, BLAZQUEZ A, et al. GENESIS: Co-location of Geodetic Techniques in Space[J]. *Earth, Planets and Space*, 2023, 75(1): 5.

[50] GLASER S, KÖNIG R, AMPATZIDIS D, et al. A Global Terrestrial Reference Frame from Simulated VLBI and SLR Data in View of GGOS[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(7): 723-733.

[51] WANG H, REN Y Y, CHEN M, et al. Reprocessing of Three-Decade GNSS Observations: Millimeter-Level Nonlinear Terrestrial Reference Frame, Global Velocity Field and Plate Motion Model Refinement[J/OL]. *Geo-spatial Information Science*, 2025. https://doi.org/10.1080/10095020.2025.2541073.

[52] WANG J G, GE M R, GLASER S, et al. Improving VLBI Analysis by Tropospheric Ties in GNSS and VLBI Integrated Processing[J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(4): 32.

[53] TEKE K, BÖHM J, NILSSON T, et al. Multi-technique Comparison of Troposphere Zenith Delays and Gradients During CONT08[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(7): 395-413.

[54] BALIDAKIS K, NILSSON T, ZUS F, et al. Estimating Integrated Water Vapor Trends from VLBI, GPS, and Numerical Weather Models: Sensitivity to Tropospheric Parameterization[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(12): 6356-6372.

[55] HOBIGER T, OTSUBO T. Combination of GPS and VLBI on the Observation Level During CONT11—Common Parameters, Ties and Inter-Technique Biases[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88 (11): 1017-1028.

[56] SEITZ M, BLOßFELD M, GLOMSDA M, et al.

DTRF2020: The ITRS 2020 Realization of DGFI-TUM[J]. *Journal of Geodesy*, 2026, 100(2): 15.

[57] HAINES B, BERTIGER W, DESAI S, et al. A Global Combination of Geodetic Techniques at the Observation Level: New Perspectives on the Terrestrial Reference Frame[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2024, 129(12): e2024JB029527.

[58] 施闯, 赵齐乐, 楼益栋, 等. 卫星导航系统综合分析处理软件PANDA及研究进展[J]. 航天器工程, 2009, 18(4): 64-70.
SHI Chuang, ZHAO Qile, LOU Yidong, et al. PANDA: Comprehensive Processing Software for Satellite Navigation Systems and Its Research Progress [J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(4): 64-70.

[59] SHI C, GUO S W, FAN L, et al. GSTAR: An Innovative Software Platform for Processing Space Geodetic Data at the Observation Level[J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 18.

[60] LI X X, HUANG J D, LI X, et al. GREAT: A Scientific Software Platform for Satellite Geodesy and Multi-source Fusion Navigation[J]. *Advances in Space Research*, 2024, 74(4): 1751-1769.

[61] 卢鋆, 武建峰, 袁海波, 等. 北斗三号系统时频体系设计与实现[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1340-1348.
LU Jun, WU Jianfeng, YUAN Haibo, et al. Design and Implementation of Time and Frequency Architecture for BeiDou-3 System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(8): 1340-1348.

[62] LI X X, FU Y C, ZHANG K K, et al. Improving Multiple LEO Combination for SLR-Based Geodetic Parameters Determination Using Variance Component Estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 2024, 98(8): 71.

[63] 施闯, 魏娜, 李敏, 等. 利用北斗系统建立和维持国家大地坐标参考框架的方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1635-1643.
SHI Chuang, WEI Na, LI Min, et al. Approaches to Realize and Maintain National Terrestrial Reference Frame Based on BDS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1635-1643.

[64] LI Z N, LIU X H, GUO S W, et al. Galileo-Derived Geodetic Parameters by the Combination of GNSS and SLR Techniques on the Observation Level[J]. *GPS Solutions*, 2024, 29(1): 20.

[65] DROŻDŻEWSKI M, SOŚNICA K. Tropospheric and Range Biases in Satellite Laser Ranging[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(9): 100.

[66] WANG J G, GE M R, GLASER S, et al. Impact of Tropospheric Ties on UT1—UTC in GNSS and VLBI Integrated Solution of Intensive Sessions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(11): e2022JB025228.

[67] ŠTĚPÁNEK P, FILLER V. Cause of Scale Inconsistencies in DORIS Time Series[J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2018, 62(4): 562-585.

[68] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, THOELERT S, et al. GNSS Visibility and Performance Implications for the GENESIS Mission[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(10): 96.

[69] KUR T, SOŚNICA K, KALARUS M. Prospects of GENESIS and Galileo Joint Orbit and Clock Determination [J]. *Journal of Geodesy*, 2024, 98(6): 51.

[70] GLASER S, AMPATZIDIS D, KÖNIG R, et al. Simulation of VLBI Observations to Determine a Global TRF for GGOS[C]//International Association of Geodesy Symposia, Kunming, China, 2018.

[71] POLLET A, COULOT D, BIANCALE R, et al. GRGS Numerical Simulations for a GRASP-Like Mission[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(5): 45.

[72] SCHUNCK D, MCCALLUM L, MOLERA CALVÉS G. On the Integration of VLBI Observations to GENESIS into Global VGOS Operations [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(17): 3234.

[73] ZAKHVATKIN M V, ANDRIANOV A S, AVDEEV V Y, et al. RadioAstron Orbit Determination and Evaluation of Its Results Using Correlation of Space-VLBI Observations[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(2): 798-812.

[74] HONG X Y, WU W R, LIU Q H, et al. Lunar Orbital VLBI Experiment: Motivation, Scientific Purposes and Status[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2025, 69(1): 219511.

[75] FEJES I, KAWAGUCHI N, MIHÁLY S. Space VLBI Geodesy: Background of an Experiment Proposal[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1996, 239(2): 275-280.

[76] KULKARNI M N, ÁDÁM J, FEJES I, et al. Recent Developments in Space VLBI Geodesy Demonstration Experiment (GEDEX)[C]// International Association of Geodesy Symposia, Kanazawa, Japan, 2002.

[77] WEI E H, YAN W, JIN S G, et al. Contribution of Simulated Space VLBI to the Chang'E-1 Orbit Determination and EOPs Estimation[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 46: 256-263.