

全球时空基准框架构建与精密定位技术研究

魏向辉

石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041

摘要: 随着数字经济与深空探索时代的来临, 全球统一时空基准已成为支撑国家重大战略的新型基础设施。本研究系统阐释了地球系统动力学与量子精密测量理论对时空基准构建的科学驱动, 解析了多源技术融合的精密定位方法体系及其在科学研究与产业转型中的全域服务能力, 揭示了时空基准与定位技术相互促进的协同演化机制。针对当前地球物理效应建模与观测网络安全的双重挑战, 提出基于相对论定位、低轨星座组网与自主模型研发的突破路径, 为构建自主可控的全球时空服务体系提供理论支撑与技术方案。

关键词: 时空基准; 精密定位; 地球参考框架; 相对论定位; 低轨卫星星座

Research on Global Spatiotemporal Reference Framework Construction and Precision Positioning Technology

Wei, Xianghui

Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang, Hebei, 050041, China

Abstract: With the advent of the era of digital economy and deep space exploration, the global unified spatiotemporal reference has become a new type of infrastructure supporting major national strategies. This study systematically explains the scientific driving force of Earth system dynamics and quantum precision measurement theory for the construction of spatiotemporal references, analyzes the precision positioning method system integrating multi-source technologies and its global service capabilities in scientific research and industrial transformation, and reveals the coordinated evolution mechanism of mutual promotion between spatiotemporal references and positioning technologies. In response to the dual challenges of current geophysical effect modeling and observation network security, it proposes breakthrough paths based on relativistic positioning, low-orbit constellation networking, and independent model research and development, providing theoretical support and technical solutions for building an independent and controllable global spatiotemporal service system.

Keywords: Spatiotemporal reference; Precision positioning; Earth reference frame; Relativistic positioning; Low-orbit satellite constellation

DOI: 10.62639/sspis22.20250208

引言

信息时代背景下, 高精度时空基准作为数字经济的底层支撑, 其战略价值已被提升至国家基础设施层面。习总书记“加快构建新型基础设施体系”的论述及中国时空信息集团的成立, 标志着时空基准建设进入国家战略推进阶段。当前全球重大工程协同、地月空间开发等前沿领域对毫米级基准精度与纳秒级时间同步提出迫切需求, 而国际技术竞争与模型依赖态势加剧了发展自主可控体系的紧迫性。本研究旨在系统梳理时空基准与精密定位技术的理论进展与协同关系, 厘清关键技术瓶颈, 探索符合国家战略需求的创新发展路径^[1]。

一、全球时空基准框架的理论基础与构建体系

(一) 时空基准的科学基础

现代大地测量学的发展揭示了地球系统动力学对时空基准的深刻影响。板块构造运动与冰川均衡调整等地表质量迁移过程, 可导致地面观测站产生毫米级的位置漂移, 这一发现促使基准框架构建必须考虑地球物理过程的时变效应。与此同时, 量子精密测量技术的突破性进展, 使得实验室原子钟稳定度达到 10^{-19} 量级, 爱因斯坦相对论关于引力场与运动速度对时间频率的调制效应由此从理论预言转化为可观测的物理现实。这种时空耦合的精密量化能力, 从根本上革新了时频基准的建立原则, 为高精度时空坐标系的动态维持提供了理论支撑。

(二) 基准框架的构成要素

全球时空基准框架的建立依赖于位置、时

(稿件编号: IS-25-8-17001)

作者简介: 魏向辉(1986-), 男, 汉族, 河北石家庄人, 石家庄铁路职业技术学院, 副教授, 测绘工程系办公室主任, 硕士, 研究方向: 主要从事时空基准框架定位技术研究。

基金项目: 2024年度创新能力提升计划科学普及专项项目: “时空基准框架科普视频创作”(题编号: 202440201010398)。

间与高程三大要素的协同精化。在时间维度上, 星载冷原子钟组与光纤时频传递网络的结合, 正推动时间比对精度从20纳秒向亚纳秒级别跨越, 为动力学时空系统提供频率溯源基础^[2]。空间坐标基准的实现则依托全球导航卫星系统(GNSS)与分布式的陆基跟踪站网, 通过多源观测数据的联合平差计算, 实现地表点位坐标的毫米级动态监测。值得关注的是, 高程基准的现代化进程突破了传统几何水准测量的局限, 低轨重力卫星的微重力场反演与激光干涉测高技术融合, 使得垂直方向上的地壳形变监测精度进入纳米量级, 显著提升了海平面变化等地球科学问题的研究能力。

(三) 国际典型框架分析

国际地球参考框架(ITRF)作为全球尺度基准的权威实现, 其最新版本通过综合甚长基线干涉测量、卫星激光测距与GNSS等多技术融合解算策略, 将框架精度提升至毫米水平, 为全球性地壳形变监测和地球质心运动研究提供数据基础。中国国家大地坐标系的现代化建设则呈现差异化发展路径: 在北斗卫星导航系统增强服务的支撑下, 通过区域加密站网与自主数据处理算法的协同优化, 实现国土范围内坐标基准精度从分米级至厘米级的跃迁, 显著提升了国家重大工程建设和高精度位置服务的保障能力。两种框架的技术演进共同印证了多源数据融合与时空建模精细化对基准体系发展的驱动作用。

二、精密定位技术的核心原理与应用体系

(一) 技术原理与关键方法

现代精密定位技术的核心在于对卫星导航信号传播机制的深度解析与误差控制。全球导航卫星系统(GNSS)的定位精度首先取决于信号在大气层与地表复杂环境中的传播建模精度, 其中多路径效应抑制技术通过天线设计与信号处理算法的协同优化, 显著降低了城市峡谷等复杂场景下的定位偏差。在此技术基础上发展的高精度定位方法呈现层级化特征: 精密单点定位(PPP)依托精密轨道钟差产品实现静态厘米级至动态亚米级的广域覆盖, 弥补了传统差分技术对参考站密度的依赖; 而实时动态差分(RTK)则通过本地参考站的载波相位观测值修正, 在工程测量等领域提供厘米级实时定位能力。值得强调的是, 干涉测量技术(InSAR)通过卫星雷达信号的相位相干性分析, 进一步拓展了定位技术的应用维度, 其对地壳形变的毫米级监测能力已成为构造地质学研究不可或缺的工具^[3]。

(二) 多领域应用场景

1. 前沿科学研究

精密定位技术体系为地球系统科学研究提供了前所未有的观测能力。全球导航卫星系统连续观测数据通过揭示板块边界应变积累特征, 使地质学家能够定量分析主要构造单元的年际

运动规律, 这种动态监测能力对地震危险性评估具有重要科学价值。与此同时, 高程基准的现代化进程显著提升了极区环境变化的研究水平, 融合卫星测高与地面观测的冰盖物质平衡监测技术, 能够精确量化南极冰流运动与消融过程, 为全球气候变化研究提供关键数据支撑, 进而推动冰川动力学理论的持续完善。

2. 数字经济赋能

时空基准的统一性正成为数字经济发展的基础性保障。跨国高铁等重大线性工程要求毫米级一致的高程基准控制, 以确保轨道系统在复杂地形条件下的平顺衔接, 这种基础设施标准化需求直接驱动着基准传递技术的创新突破。在技术密集型产业领域, 复杂场景移动平台依赖厘米级实时定位实现自主环境感知, 而金融交易系统则需纳秒量级时间同步保障高频操作的确定性, 两者共同构成数字经济时代的新型基础设施底座, 深刻重塑着传统产业运行范式。

3. 国家安全保障

高精度时空基准在国家安全维度发挥着战略性支撑作用。全球统一坐标框架通过消除区域基准偏差, 使多源卫星遥感影像能够实现像素级地理配准, 大幅提升战场环境感知与目标定位的准确性。随着空间活动疆域拓展, 深空基准体系建设凸显出更深远的意义, 地月空间导航依赖以月球为原点的时空坐标系统实现探测器精密轨道确定, 这种基准延伸能力直接关系到国家深空探测任务的成败, 是维护空间利益的关键技术屏障^[4]。

三、时空基准与精密定位的协同关系

(一) 基准对定位的基础性作用

时空基准体系作为精密定位技术发展的底层支撑, 其统一性与稳定性直接决定空间信息的可靠程度。在时间维度上, 纳秒级精度的时频基准通过协调多源传感器的数据采集时序, 为电力系统广域同步测量等工业应用提供了关键的时间同步保障, 这种跨平台的时间统一性已成为复杂系统数据融合不可或缺的前提条件。空间基准的一致性则深刻影响着大型基础设施的建造精度, 跨国工程实践中桥梁或隧道等结构的精准对接, 必须依赖全球统一坐标基准下的毫米级点位控制, 否则不同国家采用的区域基准偏差将直接转化为工程实体中的结构错位。由此可见, 时空基准的标准化不仅是技术层面的需求, 更是实现全球尺度空间协作的物理基础。

(二) 定位技术对基准的反哺

精密定位技术的进步同时驱动着时空基准体系的动态进化。以卫星导航系统为代表的空间观测技术, 通过持续贡献高频率、广覆盖的实测数据, 显著增强了基准框架的现实性维护能力。例如北斗卫星导航系统基准站网获取的长期连续观测序列, 能够敏感捕捉由地下水开采或构造沉降导致的高程基准变化, 从而支撑国家高程系统的周期性精化。更值得关注的是,

新兴的低轨卫星星座通过星载 GNSS 接收机与激光测距仪的集成设计, 构建起空间增强型观测网络, 其全球均匀覆盖特性有效填补了传统地面跟踪站在海洋与极区的监测空白, 为地球质心运动、低阶重力场变化等基准框架核心参数的解算提供了革命性的数据源。这种技术反哺机制形成了基准与定位相互促进的良性循环。

四、当前面临的挑战与瓶颈

(一) 技术层面挑战

当前时空基准与精密定位领域面临的核心技术瓶颈集中在地球物理效应量化与观测的精度跃迁两大维度。复杂的地球动力学过程如固体潮汐形变持续干扰基准站稳定性, 其多场耦合机制尚未被现有物理模型完整描述, 导致环境改正项残差成为毫米级精度提升的关键制约。与此同时, 从厘米级向毫米级跨越的技术壁垒, 主要源于信号传播路径畸变的高维建模难题, 尤其当卫星信号穿越电离层不规则体或城市多路径环境时, 系统误差补偿的不完备性显著削弱了理论精度潜力^[5]。这些交叉学科难题的突破亟待地球物理学、电磁波传播理论与精密仪器技术的深度协同。

(二) 基础设施与数据安全挑战

全球观测网络的构建正受到地缘政治与核心技术依赖的双重制约。地面跟踪站在战略敏感区域的布设限制导致观测网空间采样不均, 特定区域的数据连续性缺失不仅削弱了全球基准框架的可靠性, 更可能引发跨国工程控制网的系统性偏差。更值得警惕的是, 高精度时空基准建立所依赖的核心环境改正模型(如海潮负荷参数)长期受制于境外机构, 这种基础模型的外部依赖性使国家空间信息安全面临潜在风险, 亟须通过自主观测数据积累与本土化建模技术予以破局。

五、未来发展方向与创新路径

(一) 颠覆性技术突破

时空基准体系的代际跃迁将源于基础物理学与空间测量技术的范式融合。基于广义相对论引力场理论的时频测位机制, 通过精密测定原子钟在重力势梯度中的频移特性, 理论上可解析出厘米量级的地壳垂直形变信号, 这种突破经典力学框架的感知方式为地震前兆监测与水库大坝形变预警提供了全新物理基准。与之形成技术协同的是激光干涉重力卫星系统的革命性进展, 新一代任务采用飞秒光频梳与差分波前传感技术, 将星间距离测量不确定性压缩至纳米量级, 其获取的高时空分辨率地球重力场模型不仅能揭示地幔对流与冰川消融的精细过程, 更从根本上解决陆海高程基准传递中由重力异常引起的系统性偏差, 实现全球垂直基准的统一物理表征。

(二) 新型基础设施布局

近地空间星座的智能化组网正在重塑全球

时空基准的建立范式。融合导航增强、宽带通信与对地观测功能的低轨卫星星座, 依托星间激光链路构建自主时空参考框架, 其轨道高度优势可有效规避对流层延迟建模误差, 在传统地面站难以覆盖的远洋航道与极地科考区提供连续厘米级定位服务, 实质性承担区域基准维持职能。随着人类空间活动向深空延伸, 地月空间经济带开发亟待建立以月球为基准原点的时空坐标系, 这要求发展基于月面激光反射阵列的绝对距离测量与脉冲星角距差分定位技术, 构建跨越地月空间的时空基准传递链条, 为月球基地建设与深空导航提供不可或缺的基础设施支撑。

(三) 中国方案与国际合作

应对全球化挑战需构建自主创新与国际协同并重的双轨路径。北斗全球基准网部署采用“主权区域核心站自主管控+战略通道合作站联合运维”的弹性架构, 通过“一带一路”沿线国家共享观测数据与联合数据处理, 既保障国家空间信息主权又形成跨境灾害监测的协同响应能力。在基础模型的攻关层面, 重点突破海潮负荷形变与极移参数的精细化建模, 整合海洋卫星测高、海底压力观测与南极冰盖物质平衡监测等多源数据, 建立具有完全自主知识产权的环境改正模型体系。通过发起全球大地测量观测网联合定轨计划, 推动我国主导的基准服务融入国际标准体系, 为构建人类命运共同体提供空间技术公共产品。

六、结语

时空基准与精密定位技术的深度融合, 正推动从地球基准向深空基准的跨越式发展。本研究论证了相对论测位、激光重力卫星等颠覆性技术对基准精度跃迁的驱动作用, 阐明了低轨星座与深空基准设施对全球无缝覆盖能力的提升价值, 提出了“自主创新+国际合作”的双轨实施策略。未来需重点突破地球物理效应精密建模、星地一体化观测等关键技术, 构建中国主导的时空基准服务体系, 既支撑数字经济与深空探索的战略需求, 更为全球提供高质量时空信息公共产品。

参考文献:

- [1] 杨阳, 孙建军. 卫星星历参考框架对 GNSS 相对定位解算的影响分析 [J]. 地理空间信息, 2021, 19(01): 35-37+4.
- [2] 魏以宽, 唐晓霏, 吕世充, 等. 基于精密单点定位获取 CGCS2000 坐标的方法 [J]. 地理空间信息, 2020, 18(11): 77-79+7.
- [3] 王虎, 党亚民, 侯阳飞, 等. PPP 网解 UPD 模糊度固定的无基站差分大型 CORS 站整网快速精密解算 [J]. 测绘学报, 2020, 49(03): 278-291.
- [4] 郭凌智, 黄永军, 吕瑛炯, 等. 渤海湾及烟大航路区域 BDS 精密定位服务系统评估 [J]. 导航定位学报, 2019, 7(02): 81-87.
- [5] 陈娜, 尤宝平, 邓孟真, 等. 精密单点定位在建立海岛礁大地基准中的应用研究 [J]. 海洋测绘, 2019, 39(02): 26-29.