

· 科学论坛 ·

精密(量子)测量时代下时空基准研究中的 关键科学问题和核心技术*

孙和平^{1**} 杨元喜² 叶朝辉¹ 闫昊明¹ 管桦¹
彭鹏¹ 张宝成¹ 侯明强¹ 程惠红³ 于晟³

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430077
2. 西安测绘研究所, 西安 710054
3. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085

[摘要] 基于第316期双清论坛“精密(量子)测量时代下时空基准研究”会议内容, 本文总结了我国在精密(量子)测量时代下时空基准研究所面临的国家重大需求, 回顾了时空基准在国际国内的发展历程以及我们面临的挑战, 凝练了该领域未来5~10年的重大关键科学问题和核心技术, 建议在时空基准理论与方法、关键技术和设备研发、时空基准应用等相关领域重点攻关, 并就自然科学基金重点资助项目给出了建议。

[关键词] 量子; 精密测量; 时空基准; 发展战略; 资助项目建议

随着空间观测技术的持续发展以及时间频率E-18量级相对测量精度的实现, 人类对时空的认知和探索达到了一个前所未有的高精度, 进入精密量子测量时代, 传统的时空基准将面临理论延拓与技术突破需求。在此背景下, 2023年3月15日—16日, 国家自然科学基金委员会计划和政策局、地球科学部、数理科学部和交叉科学部联合召开了主题为“精密(量子)测量时代下时空基准研究中”的第316期双清论坛, 来自国内28家科研院所和高校的40余名专家学者应邀参加了本次论坛。

本次论坛立足不同学部、学科之间的协同和交叉研究, 旨在探讨精密(量子)测量时代下的时空基准研究关键科学问题, 围绕精密时空基准建设、时空基准建立与维持技术、时空基准重大应用等领域的前沿性与应用性问题进行了广泛讨论, 以期实现重大原创性的科学发现, 推动多学科交叉融合创新。与会专家对时空基准研究现状与发展趋势、未来主要研究方向和科学问题进行了梳理, 并提出了相关领域的国家自然科学基金资助战略。



孙和平 中国科学院院士, 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员, 中国科学院大学教授。国家杰出青年科学基金获得者, 中国科学院百人计划入选者。主持科技部国际合作重点项目、国家自然科学基金重点项目和国家自然科学基金创新研究群体项目等。任 *Geodesy and Geodynamics* 期刊主编, *Earth and Planetary Physics*、《地球物理学报》和《测绘学报》等期刊编委。研究方向包括地球微小形变与动力学的高精度重力信号检测、理论模拟和力学机制探索等。

1 精密时空基准研究面临的重大机遇与挑战

时空基准是人类活动、国家基础设施建设和自然科学发展的基础, 是智能化社会发展的基石, 是国家安全的重要保障, 是科技强国必争的战略高地。时空基准建设与发展水平反映了一个国家的综合科技实力, 是国民经济建设高质量发展的重要支撑。习近平总书记明确指出“2035年前建设完善更加泛

收稿日期: 2023-07-31; 修回日期: 2023-11-22

* 本文根据第316期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: heping@whigg.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(42242015, 42192535, 42394114)的资助。

在、更加融合、更加智能的综合时空体系”。

近年来国际形势复杂多变,时空基准建设相关领域呈现出不同以往的新动态。例如,2022年1月,美国国家大地测量局联合行业内专家全面分析了大地测量学科在高科技行业,包括国防、太空和国家发展与经济建设等领域的重要作用,明确提出了未来发展战略规划与实施细则,以保持美国在该领域的领先地位。

近几十年,我国在时空基准相关领域建设上取得了较多成绩和进步,受到了国际相关科研机构的重点关注。但与欧洲、美国、俄罗斯等国家和地区相比,我国在该领域还存在明显差距,尤其在自主可控的全球和区域时空基准建设和维持方面,仍需下大力气补短板,确保时空基准的核心竞争力和保障力,为国家经济发展、社会稳定运行、国家安全提供重要技术支撑。

1.1 精密时空基准发展现状与问题

时空基准主要由时间基准和空间基准组成,是人类对时间和空间进行有效量度的根本标准。1967年第13届国际计量大会(Conférence Générale des Poids et Mesures/General Conference of Weights and Measures,CGPM)确定了以铯原子辐射为基础的秒长定义,即:在零磁场下铯¹³³原子基态的两个超精细能级间跃迁辐射 $9\,192\,631\,770$ 周所持续的时间为原子秒,并把它规定为国际单位制时间单位。至此,时间计量由天文时进入到原子时。原子时属于积分时间,由原子钟导出。为了保证时间基准的稳定性、可靠性和准确性,采用守时钟和基准钟两种类型的原子钟来产生和维持原子时。守时过程中,守时钟需要连续运行,需要具有很高可靠性和稳定性,以保证原子时的连续性、稳定性,目前用于国际原子时(International Atomic Time,TAI)计算的守时钟有商品铯原子钟、氢原子钟、铷原子喷泉钟;基准钟需要具有最高复现秒定义的能力,用于校准守时原子钟的频率准确性,起着决定原子时频率准确性的作用。目前国际上通用的协调世界时(Coordinate Universal Time,UTC)和TAI是由国际计量局(Bureau International des Poids et Mesures,BIPM)利用全世界约80个时间实验室的约400台守时原子钟和若干台基准钟之间的比对资料每月计算并发布一次。UTC/TAI的频率准确度是由若干台基准钟的性能决定的。UTC/TAI是事后计算得到的“纸面”时间,不是实时、物理的时间,不能直接用于时间服务。为了满足实际应用对时间

的需求,全世界各个国家的时间实验室都保持自己的时间基准(地方原子时)。这些地方原子时是各个国家时间服务的基础,它由时间实验室内的若干台原子钟共同产生和保持、与TAI/UTC进行连续比对的实时的物理时间。当前TAI产生过程中采用的基准钟主要为铯喷泉原子钟,其频率不确定度为 $1\text{E-}16$,已接近其技术极限,成为限制时间基准性能提高的主要因素。随着新型原子钟技术的快速发展,光频原子钟(光钟)的频率不确定度进入了E-19量级,远优于铯喷泉钟E-16的水平。为此,国际上制定了秒定义变革路线图,拟在2030年或之后进行秒的重新定义。在时间基准上,当前的主要问题是高精度和高稳定度的光钟研制和产品化、全球高精度(1 cm级)的大地水准面模型建立和局部重力场观测修正、时频比对及测位等问题。在E-18量级的时间测量上,空间重力场效应(大地水准面高度变化)已经成为时间测量必须考虑的核心要素之一。

时间基准除了要有高精度的原子钟和光钟外,还需要进行守时、授时一体化建设,这也是国家战略需求。当前,美国已经把时间安全上升为国家法律,英国成立了国家授时中心发展陆基授时系统,我国也建有全球最为完整的授时体系架构。但我国守时系统相对分散,时间基准的统一存在差距;北斗卫星导航系统(以下简称“北斗系统”)授时、网络授时、通信授时等还未形成合力,长波授时没有实现全国土覆盖,无法满足室外室内、深海深空全覆盖要求,且抗干扰能力差。

地面的空间基准通常由地球参考系定义,由地球参考框架(Terrestrial Reference Frame,TRF)表征和实现。它是为描述空间点的几何和物理大地测量参数而建立的一种全球(或区域)统一的度量体系;包括以几何性质为主的水平基准和以物理性质为主的垂直基准(包括高程基准、深度基准和重力基准)。从1988年至今,国际地球参考框架(International Terrestrial Reference Frame,ITRF)一共发布了14个版本,当前最新版本是ITRF2020,其坐标实现精度是厘米量级。2003年国际大地测量协会(International Association of Geodesy,IAG)提出了全球大地测量观测系统(Global Geodetic Observing System,GGOS)工作项目,其目标是形成地球表面的几何形状和运动状态、地球方位和自转、地球重力场及其时变特征等新一代大地测量产品,在点位精度上达到毫米量级,且正在把地球动力学

时变效应加入到该体系中^[1]。

我国 2000 国家大地坐标系(CGCS 2000)所采用的参考椭球参数为赤道半径(a)、椭球扁率(f)、地心引力常数(GM)和地球自转速度(ω),其中 a、f 和 ω 值与 1980 全球参考系统(GRS 1980)相应参数一致,GM 值与美国“世界大地坐标系 1984”(WGS-84)的椭球参数值一致^[2]。与 CGCS 2000 对应的坐标框架 CTRF 2000 是一个区域静态参考框架,缺乏及时的动态更新,地球动力学效应(地心运动、板块运动、地表形变等)等非线性时变因素对 CTRF 2000 的影响没有得到改正。在空间基准维持与服务方面,随着我国北斗系统全球服务的实现,CGCS 2000 的服务能力得到极大改善,但在基准站点全球布设方面依旧存在困难。

海洋基准是高程或深度数据归算的基础,需具有稳定性和准确性。20 世纪 80 年代开始,加拿大、澳大利亚、英国、美国等国都建立了各自的区域海洋垂直基准^[3],精度在 10 厘米量级。我国在海洋基准建设上起步较晚,虽然海底大地坐标框架建设核心技术已基本解决,并建立了局域海底基准试验网,精度在 10 厘米量级,但是,无论是海域覆盖还是基准精度均不能满足当前建设海洋强国的需求。此外,由于海底基准试验网需要建立在海床上,建设和维持难度极大,且受海水、风、洋流等影响,时间和位置信号传递误差较大,目前仍存在系列科学和技术问题亟待解决。

深空基准是国家时空基准体系的重要组成部分,是规划和实施空间活动的基础,对行星科学研究、黑洞、银河系演化、低频引力波探测等具有重要战略意义。深空基准源于对深空星体的定位定向,主要包括天球参考架和地球定向参数等深空基准构建理论、方法和技术等。天球参考架的具体实现包括太阳系行星历表、恒星星表、射电星表、脉冲星星表。当前,深空基准的各种星表和参考框架确立主要以欧美国家为主,我国在甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)深空探测、太阳系历表和恒星星表、脉冲星探测等方面进行了卓有成效的工作,但离自主可控还有一定距离。研究深空基准的理论技术还存在不足,建设深空基准的设施设备不多,面向深空基准的统筹统建不强。

我国高程起算面是位于青岛的黄海平均海平面,中华人民共和国成立后,进行过 3 次一等水准观测,有效支撑了国家相关经济建设和科学研究。

例如,珠峰高程测定,南水北调实施等都应用了高精度的水准测量。当前一般采用更方便的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)高程测量来代替传统水准测量,需要事先知道精确的厘米级大地水准面。为确定全国范围内 1 厘米精度大地水准面,实现利用 GNSS 替代高等级水准测量,需构建高精度和高空间分辨率的大地水准面模型。此外,由于各个国家的大地水准面起算点不同,其在全球意义上造成了不同高程系统的系统误差,这种差异可以达到米级甚至更多。随着超高精度光钟技术的发展与进步,可望开展基于相对论框架下的时频测位方法进行全球高程基准统一研究。

随着量子时代的到来,我国已经开始研制多种相关量子感知传感器,诸如原子钟、量子重力仪、量子梯度仪、量子陀螺仪、量子磁力计等,但是,大多数量子感知传感器仍属于实验室仪器产品,商品化程度相对较低。

除了上述相关硬件的建设和实施,我国在地球坐标框架、海洋坐标框架、深空基准等空间基准的软件系统、目标动态监测、数据处理和数据共享等多个方面,也缺乏完全的自主性,存在跟踪式研究多于原创性研究等问题。

此外,我国在该领域研究队伍力量分散,统合性不够,协调性差,缺乏时空基准领域的顶层规划协调组织和机制。此外,主导全球基准观测系统的科研分支机构与人员主要是欧美的科研机构与科学家,我国学者在国际上该领域的话语权不够,相关国际组织任职较少,国际影响力不足。

1.2 精密时空基准的发展机遇与挑战

新的国际秒定义变革,为我国大力发展高精度光钟技术,并在 TAI 实现中贡献更大的权重带来了不可多得的发展机遇。我国在原子钟研发上与国际水平相当,但应用产品相对滞后,基准守时设备国产化率较低。因此,新一代光学频率基准钟研究需要从大到强的转变,秒定义变革需要多家单位的广泛和实质性合作。

此外,在时频研究与大地测量学学科交叉方面,优于 $1E-18$ 不确定度的光钟可应用于守时和高精度高程传递等,同时为两个学科的发展都带来了机遇^[4]。但是,量子新技术的发展在两个学科的深度应用还处于较低水平,这是我们面临的又一挑战。

在国家授时体系上,随着光纤和光钟技术的快

速发展,为更好地完善覆盖全国土的授时体系提供了良好机遇。当前我国时间标准核心技术自主可控,从而为授时提供了准确源头。在长波授时上,将通过增建部分地区的增强型长波授时台实现信号全国土覆盖。我国在水下和深空时频传递技术上还存在明显不足,是未来授时系统的重大挑战。

空间基准是反映物质空间位置的基础,其建设受到世界各国和国际组织的高度重视,我国空间基准的最大挑战之一是如何实现全球高精度(毫米级)空间基准统一。主要包括地球空间基准精化;多源空间大地测量数据融合,建立统一的地球瞬时历元基准框架;室内/地下空间、水下、海洋、外空间等特殊区域泛在全空间基准构建与维持;大数据背景下智能化区域空间基准维持与服务等等。

在深空基准上,面临更大机遇,也存在更严峻的挑战。深空基准首先涉及多学科交叉和多技术结合,需要优化顶层设计,制定深空基准观测体系建设规划;需要自主构建太阳系行星历表和脉冲星星表等,建设专用大口径射电望远镜,开展常态化运行观测,并开展理论模型和软件系统的研究和开发;需要注重原子无线电和量子陀螺等新技术的发展,为精密(量子)测量时代下,我国自主构建深空基准提供强有力支撑。

在高程基准和重力基准方面,最大的挑战依旧是高精度(厘米乃至亚厘米级)和高空间分辨率(公里级)的全球地球重力场模型建立。厘米级大地水准面可以为相关科学提供强有力技术支撑,而高精度的光钟和时频比对技术则有助于全球高程基准统一。

总之,在时空基准建设上,需要抓住当前机遇,从理论研究、(量子)技术、观测设备、观测运行、人员配置、软件系统、数据处理、数据融合、学科交叉、国际合作等多角度、多层面来具体实施,最终构建和维持我国高精度动态时空基准体系,支撑相关科学研究和国家安全,并服务于国民经济建设。

2 量子时代下精密时空基准研究主要进展和建议

2.1 时间基准与原子钟

原子钟是时间基准产生和保持的基础。原子钟的精度和原子钟的测量精度是影响 TAI 维持精度的主要因素。时间基准包含频率基准和时标基准,国际上只有包括我国在内的少数几个国家可以研制出允许驾驭 TAI 的铯喷泉基准钟^[5]。频率基准又

称为秒长基准,以铯原子基态超精细跃迁为基础的原子秒,当前最优不确定度已经达到了 $1\text{E}-16\sim 3\text{E}-16$ 的水平^[6-9],接近其技术极限。新的基础研究和相关应用需要更高精度的时间基准,冷原子喷泉钟^[9-13]、光钟^[14]等将推动驾驭 TAI 的新进程。当前,最好的中性原子光钟不确定度达到了 E-18 量级^[15-18],最好的离子光钟不确定度进入了 E-19 量级^[19]。新的秒定义对光钟不确定度要求优于 $2\text{E}-18$,两种光钟之间的比率测量要求优于 $5\text{E}-18$ ^[20],但国际上尚未实现。在这个不确定度上,要求光钟的引力红移修正也达到 E-18 量级或者更高,进而要求大地水准面高度测量达到厘米甚至毫米量级^[21]。新型原子钟的发展,成为各个国家时间基准和原子钟研究的重点之一,并为本国应用提供新的时标基准。目前,我国光钟研制技术已经达到了国际先进水平,多家单位实现了不确定度进入 E-18 量级的光钟^[18, 22, 23],并参与了 TAI 数据报送^[6, 24-27]。

建议针对“不同物理效应对钟跃迁频率的影响极限(光晶格/离子光钟的研制)”“激光频率稳定度热噪声极限(超稳激光研究)”“不同光钟频率比值一致性影响因素(超高稳定度时频信号驾驭传递技术)”等关键科学问题(技术)开展联合攻关,从激光冷却原子/离子技术、微弱光信号探测技术、低噪声低漂移激光腔锁定、激光稳频控制技术、隔声隔振技术、差分/同步光谱技术、光钟可搬运和自动化控制等方面加强顶层设计,推动国内实验室型光钟不确定度达到新的秒定义变更要求,做好光钟比对测量规划,加强光钟比对平台建设,加强时频领域和大地测量领域的交叉研究,实现高精度时间基准。

此外,光钟驾驭氢钟、新型守时钟(包括冷原子技术守时钟)、光频守时钟(产生纯粹的高性能光时标)等也是主要研究方向,相应地,卫星链路不确定度评估、新传递比对手段等也需要深入研究。时空基准的质量控制和安全性、可靠性是永恒的研究主题,需要开展各时空基准装备和时空基准体系质量控制理论方法研究,提升各类软实力技术水平,推动相关标准规范、管理条例出台,形成高质量发展态势。

2.2 天地一体授时系统

天地一体自主授时体系是国家战略需求。2018 年,美国总统通过签署《国家安全与弹性授时法案》,把授时安全上升为国家法律^[27, 28],并不断大力推进高精度地基授时系统建设;英国在 2020 年成立了国

家授时中心发展陆基授时系统^[29],作为GNSS的重要备份。我国目前建设有全球最为完整的授时体系架构,包括长波、短波、低频、电话、卫星、光纤、网络、广播、卫星授时等,较好地满足了经济社会、国家安全、科学研究应用的需求^[30],但仍缺乏一体化完备性与系统性。

对于天地一体授时系统,建议融合多种时频信号资源和时频传递技术,构建空天地统一的综合弹性时频系统。加强空间守时系统基础理论研究^[31],注重发展高性能守时型原子钟,围绕时间单位“秒”定义变更的洲际频率比对等技术,实现守时、授时技术突破。此外,还要加快空间站、卫星、深空等空基守时和授时体系建设,加强水下海基时频传递新兴技术的发展,更好地服务应用于空间科学、深空探测、航天航空等。

2.3 地球坐标参考框架的建立与维持

无论是地面点还是空间卫星等位置的精确确定,都离不开高精度的地球参考坐标系统(Terrestrial Reference System, TRS)。TRF是TRS的具体实现,是其它观测的参照基准。TRF通过固连在地球表面的一系列高精度连续监测基准站实现,进而实现基准站点在对应TRF下某一历元的高精度坐标测定,并检测其随时间的变化^[32-36]。其中ITRF 2005、ITRF 2008和ITRF 2014是最具代表性的三个参考框架,标志着多源技术手段的综合处理,逐步实现了坐标框架点从线性变化表征到非线性变化表征^[37]。

地球内部动力学和近地表流体负荷质量迁移等引起的地表形变、板块运动、潮汐形变等因素都会引起地面基准观测点的空间位置变化,导致由这些基准点所确定的坐标参考框架发生改变^[38]。当前,地球坐标框架仅模型化了季节运动及大地震造成的非线性位移,其长期精度为厘米级。我国现行的CTRF 2000参考框架是一个区域、静态框架,整体精度相对偏低,也仅为厘米级^[39]。由于CTRF 2000相应的坐标框架更新不及时,很难满足我国测绘基准现代化建设,不能满足北斗系统对高精度全球、动态参考框架的需求,也难以满足监测毫米级地球系统整体和区域变化等科学研究需求。因此具备全球、动态、三维、高精度的毫米级地球坐标框架建立和维持、陆海统一的地球空间基准,既是当前大地测量领域的新任务和新挑战,也是国际大地测量学界本世纪的奋斗目标,更是服务我国航天强国战略的重要支撑^[40-42]。

2.4 高程基准和地球重力场

平均海平面和固体地球的局部地球重力场是不断变化的,因此,大地水准面在全球和局域都是变化的。各个国家间由于采用了不同区域的平均海平面作为高程起算面,使得全球高程基准不统一,各个国家之间存在明显的高程系统差异^[43-45]。因此,如何将不同区域高程系统统一为全球的高程系统就成为当前大地测量研究的一个国际热点问题^[46]。建立厘米级高精度全球物理和几何高程系统,实现全球一致性和长期稳定性的全球垂直参考系统,也是IAG实行的GGOS计划中明确提出的目标^[47]。

高程基准离不开高精度的重力场支撑,我国建立了1957、1985和2000三个不同时期的国家重力基本网^[41],为满足我国厘米级大地水准面建设提供了重要数据支持,并通过多种数据融合,建立了我国高精度地球静态重力场,为高程基准的全球统一提供了有效依据^[48]。当前,高速发展的GNSS高程测量是代替传统水准高程测量的有效手段^[49],要实现全球毫米级的GNSS高程观测,离不开毫米级的大地水准面支撑,因此,需要在地面建立网格更密集和观测更精确的重力网络,进而建立一个新的重力参考框架,以满足未来基础研究(例如相对论大地测量的需求)。特别是新近发展起来的光纤时频信号测位法以及GNSS时频信号测位法,是全新的测定重力位的方法,可用于统一区域高程基准和全球高程基准,引起了国内外学者的广泛关注,是未来重要发展方向之一。

另外,在涉及国家重大需求的海洋研究领域,建议在综合定位、导航、授时(Positing Navigating Timing, PNT)体系框架下,通过声学、量子等手段更快更好地建立海底基准网^[50],精化全球静态和时变重力场,抓住我国双星跟飞测高卫星发射的机遇,在双星跟飞卫星测高原理、原始数据处理、自主气象海洋环境数据改正、海面高精标定、数据融合等关键技术上进行攻关,从而构建全球 $1' \times 1'$ 分辨率厘米级精度海洋大地水准面,并在陆海交界区域通过航空、地面、船载数据融合实现大地水准面精化^[51, 52],并实现平均海平面模型、海洋潮汐模型和时变大地水准面模型精化,为水下重力匹配导航提供支撑^[53]。

2.5 深空基准、VLBI与脉冲星

深空基准是指通过观测深空目标,结合其动力学和运动学特性实现的国际天球参考系统。主要包括国际天球参考架、行星/月球历表、射电星表、脉冲

星星表和恒星星表。深空基准是其它非惯性局域空间基准建立与维持、溯源与转换的基础,是空间科学、航天技术、宇航器测控的基础,是推动行星演化、黑洞、引力波探测等基础前沿学科研究的重要基础。

国际上射电天球参考架主要通过河外射电源 VLBI 观测实现,并由国际地球自转服务(International Earth Rotation Service, IERS)机构发布。美国、俄罗斯、欧洲和我国都参与 VLBI 的观测和数据处理,但以欧美国家为主。太阳系历表和恒星星表分别通过对太阳系天体和银河系天体的微波、红外、光学等观测实现,目前美国、欧洲、俄罗斯具备实现能力,在我国,中国科学院紫金山天文台开展了恒星历表(Purple Mountain Observatory Ephemeris, PMOE)编制工作。脉冲星星表通过对自转稳定的毫秒脉冲星的地面射电和空间 X 射线持续计时观测实现,用于构建脉冲星导航系统^[54-58],建立综合脉冲星时、探测低频引力波等,目前主要由美国、欧洲、澳大利亚主导。我国从 20 世纪 90 年代开始脉冲星观测研究和脉冲星星表构建试验观测。

当前,我国的深空基准建设相对滞后,不能完全满足未来深空航天器测运控需求。我国在核心技术、理论模型、算法实现、观测设备等方面与国外存在较大差距^[59]。

建议制定深空基准观测体系建设规划,系统开展自主深空基准建设工作,以自主构建行星历表和脉冲星星表为突破口,建设专用大口径射电望远镜,整合已有设施,构建观测网络,形成观测机制,开展常态化运行观测。在此基础上,系统开展深空基准建立维持理论技术研究,研发具有自主知识产权的理论模型和软件系统,关注和推进原子无线电、量子陀螺等在深空基准服务方面的技术革新。

2.6 量子新技术与空间基准

量子精密测量技术的特点是超高精度。美国、欧洲等从 2014 年就推出了系列关于量子技术发展的战略、倡议和计划,其中美国在 2022 年发布的《将量子传感器付诸实践》,是其第一个关于量子精密测量的国家战略计划。我国在 2022 年由国务院发布了《计量发展规划(2021—2035)》,其中“量子度量衡”计划,是突破量子传感和芯片级计量的标准技术。

在时空基准维持与传递方面,量子技术将在精密感知时空变化方面发挥重要作用,并将在新的时

空框架构造方面发挥作用。此外,在广义相对论(等效原理)检验和时空测量的量子极限探索方面仍存在重大理论和科学问题。量子感知设备当前主要有激光干涉和原子干涉重力仪、原子干涉重力梯度仪、高精度冷原子钟、量子陀螺、量子磁力计等,可以用来高精度的测量时间、转动、加速度、重力、磁场等。因此,量子感知技术可广泛应用于 PNT 及其相应的时空物理场测量^[60-64]。

建议加强相关仪器重要部件的基础研究支持力度,加快国产化实现进程。发展精密时空信息量子感知技术,构建千公里尺度光钟网络和自由空间量子时间同步技术,发展厘米级重力等位面测量技术,构造高精度相对论时空参考系统,示范演示局部相对论动态时空框架,从根本上改变精密时空测量技术受制于人的局面,引领基础物理学、相对论测地学、量子 PNT 技术的发展。

2.7 多学科交叉与测量数据融合

量子时代下的时空基准涉及大地测量学、地球物理学、天文地球动力学、原子分子物理、天体物理、海洋测绘、时间频率、应用数学、人工智能、仪器研制与应用等多学科的交叉。因此,需要建立统一的数据共享与资料的软件处理平台;探究人工智能(大数据、深度学习等)应用,实现大规模数据处理和多源数据融合;对仪器噪声、观测噪声、地球环境噪声、随机噪声等建立合适的数学模型进行误差机理、建模分析和数据处理,服务于以北斗系统为核心的新一代国家安全 PNT 体系建设^[65]。

3 未来 5~10 年时空基准研究多学科交叉发展目标及资助重点

3.1 发展目标

量子时代下的时空基准研究具有典型的多学科交叉特征。未来 5~10 年,需要针对量子时代下高精度时空基准建设的重大科学问题和关键技术突破,围绕空天地海等一体化的时空基准建立和维持、天地一体的授时系统建设和应用、全球高程系统统一和地球重力场精化、量子新技术对环境的精确感知、测量数据处理平台和数据融合理论与方法等几个大的方面,深入开展基础科学研究,关键技术攻关,应用研究与平台建设等,推动相关科学技术领域的深度融合和全面发展。

3.2 资助重点

建议未来 5~10 年重点研究时空基准关键技术、环境对地球参考框架影响的理论与方法、空天地

海一体化的参考框架理论与方法、空天地海一体化的时间基准传递体系等领域共 16 个研究方向。

3.2.1 时空基准关键技术研发

(1) E-18 不确定度可移动和星载光钟研制和产品化,并对光钟自身噪声和环境噪声进行精准建模和评估,提高其中短期和长期稳定度和不确定度;

(2) 发展光钟驱动微波钟、氢钟、汞离子钟等关键核心技术,建立以光钟为基础的时间基准,构建千公里尺度光钟网络和自由空间量子时间同步技术;

(3) 量子重力仪、量子重力梯度仪、量子陀螺仪和量子磁力计等量子感知技术的研制和产品化;

(4) 发展地面和空间 VLBI 技术,为自主时空基准建设和未来深空基准建设提供必要技术、理论、数据处理等全方位支撑;

(5) 北斗系统时频传递与授时理论与方法研究。建立以北斗系统为核心的 GNSS 高精度光钟或微波钟时间频率比对与传递技术平台,实现优于 E-17 量级的 GNSS 频率比对技术,并为 UTC 和 TAI 的比对提供技术支撑。

3.2.2 环境对地球参考框架影响的理论、方法与应用

(1) 基于空间和地面光钟的相对论红移、时频测位和全球高程统一理论与应用。实现不确定度优于 E-18 的光钟高程比对网络,在区域和全球尺度上开展相对论大地测量重力位和高程研究和应用。

(2) 非线性地球物理效应对地球参考框架影响的理论与方法。研究地球自转和形变、对流层和电离层影响、区域构造活动、地震、地表流体引起地表形变及地球内部动力学等非线性地球物理效应对地球参考框架的影响,服务于毫米级动态地球参考框架的建立和维持。

(3) 全球高精度重力场的建立与维持。基于卫星、航空、测高等多种技术手段,建立全球高精度重力场(厘米量级大地水准面),为 GNSS 高程、陆海交界大地水准面匹配、海洋潮汐模型构建、水下重力匹配导航等提供基础支撑。

(4) 建立高程和时间统一基准。建立地面光纤时频信号传递网,发展空天地间高精度时频信号链路,攻克 GNSS 时频信号测定重力位和海拔高关键技术,构建国家高程和时间统一基准。

3.2.3 空天地海一体化的参考框架理论、方法与应用

(1) 高精度动态时空基准理论、应用与多技术

融合。基于多学科交叉,融合量子、北斗系统、卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)、VLBI、GNSS 等数据,建立综合时空体系,实现全球坐标参考框架和全球高程基准维持与精化。

(2) 海洋基准理论和检测技术研究。通过声学、量子等技术手段更快更好地建立海底基准网和立体观测体系,开展多源数据处理和融合理论研究,精细评估海洋动态环境对基准传递精度的影响,建设长期安全有效的海底基准维持/保持技术。

(3) 深空基准建设与感知。建设以地月空间 VLBI 观测、脉冲星信号接收处理、量子感知和 μ 子射线位置感知为代表的深空时空基准建立与维持技术体系。实现自主可控的太阳系历表、射电天球参考架、光学天球参考架、脉冲星星表、地球定向参数等深空基准构建理论、方法和技术。

(4) 相对论框架下的参考框架理论与方法。在广义相对论框架下,建立时空基准和非线性时空坐标赋值理论,建立不同物理原理、空天海地立体交叉的时空基准监测、维持和传递手段。

3.2.4 空天地海一体化的时间基准传递体系

(1) 组建高精度全国光纤、卫星授时网。继续推进国内时频计量设备的精准度,完善自主可控的国家标准时间,建成国际一流的时间体系。

(2) 增建长波授时台。在我国西部增建增强型长波授时台并与现有 7 个授时台实现信号全国土覆盖,提高国家授时安全性。

(3) 建立量子时间网络。突破脉冲星时间专用测量系统及应用技术、安全的量子时间传递及同步技术、水下和深空时频传递技术;融合多种时频信号资源和时频传递技术,构建空天地统一的综合弹性时频系统。

4 结 语

我国的时空基准研究在技术和人才上有较好储备,北斗系统实现了全球高精度定位导航和授时;在守时装备研制方面,系列原子钟达到了世界先进水平;在量子感知设备研制方面,量子重力仪和量子重力梯度仪也取得了突破。虽然在深空基准和海洋基准方面,我们还存在差距,但通过国家 PNT 体系建设以及探月、探测火星、探测太阳等深空计划的逐步实施,我国在时空基准的深空应用方面取得了长足进步;通过海底大地测量基准与水下导航试验网的建设,海洋水下导航取得明显技术进步。

针对量子时代下精密时空基准研究的关键科学问题和重点技术攻关,我们凝练了该领域未来 5~10 年的发展目标与资助重点。为了实现我国时空基准发展的总体科学目标,仍需以国家需求为导向,在技术上和科学目标上不断探索,力争早日全面实现我国自主可控的精密时空基准建设与维持,实现量子时代的时空精密测量与应用。

致谢 感谢参加双清论坛的全体专家及相关领域科学家。

参 考 文 献

- [1] 党亚民, 陈俊勇. GGOS 和大地测量技术进展. 测绘科学, 2006, 31(1): 131—133.
- [2] Yang YX. Chinese geodetic coordinate system 2000. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(15): 2714—2721.
- [3] 周兴华, 付延光, 许军. 海洋垂直基准研究进展与展望. 测绘学报, 2017, 46(10): 1770—1777.
- [4] 卢晓同, 常宏. 冷原子气体的时频测量——光晶格原子钟. 物理, 2022, 51(2): 100—109.
- [5] Consultative Committee for Time and Frequency. Recommendation CCTF PSFS 2. (2022-04-13)/[2023-07-30]. <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/22-2-2021>.
- [6] Heavner TP, Donley EA, Levi F, et al. First accuracy evaluation of NIST-F2. Metrologia, 2014, 51(3): 174—182.
- [7] Li RX, Gibble K, Szymaniec K. Improved accuracy of the NPL-CsF₂ primary frequency standard: evaluation of distributed cavity phase and microwave lensing frequency shifts. Metrologia, 2011, 48(5): 283—289.
- [8] Weyers S, Gerginov V, Nemitz N, et al. Distributed cavity phase frequency shifts of the caesium fountain PTB-CSF₂. Metrologia, 2012, 49(1): 82—87.
- [9] Abgrall M, Chupin B, De Sarlo L, et al. Atomic fountains and optical clocks at SYRTE: status and perspectives. Comptes Rendus Physique, 2015, 16(5): 461—470.
- [10] Bauch A, Weyers S, Piester D, et al. Generation of UTC (PTB) as a fountain-clock based time scale. Metrologia, 2012, 49(3): 180—188.
- [11] Rovera GD, Bize S, Chupin B, et al. UTC(OP) based on LNE-SYRTE atomic fountain primary frequency standards. Metrologia, 2016, 53(3): S81—S88.
- [12] Domnin YS, Kardashova LM, Tatarenkov VM, et al. Frequency stabilization of a CO₂ laser by fluorescence of the CO₂ gas. Measurement Techniques, 1979, 22(10): 1179—1181.
- [13] Peil S, Hanssen J, Swanson TB, et al. The USNO rubidium fountains. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 723: 012004.
- [14] Hachisu H, Nakagawa F, Hanado Y, et al. Months-long real-time generation of a time scale based on an optical clock. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1—12.
- [15] Ludlow AD, Boyd MM, Ye J, et al. Optical atomic clocks. Reviews of Modern Physics, 2015, 87(2): 637—701.
- [16] Nicholson TL, Campbell SL, Hutson RB, et al. Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty. Nature Communications, 2015, 6(1): 1—8.
- [17] Ushijima I, Takamoto M, Das M, et al. Cryogenic optical lattice clocks. Nature Photonics, 2015, 9(3): 185—189.
- [18] Lu BK, Sun Z, Yang T, et al. Improved evaluation of BBR and collisional frequency shifts of NIM-Sr2 with 7.2×10^{-18} total uncertainty. Chinese Physics Letters, 2022, 39(8): 080601.
- [19] Brewer S, Chen JS, Hankin A, et al. Al⁺ 27 quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10^{-18} . Physical Review Letters, 2019, 123(3): 033201.
- [20] Riehle F, Gill P, Arias F, et al. The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures. Metrologia, 2018, 55(2): 188—200.
- [21] Mehlstäubler TE, Grosche G, Lisdat C, et al. Atomic clocks for geodesy. Reports on Progress in Physics, 2018, 81(6): 064401.
- [22] Huang Y, Zhang BL, Zeng MY, et al. Liquid-nitrogen-cooled Ca⁺ optical clock with systematic uncertainty of 3×10^{-18} . Physical Review Applied, 2022, 17(3): 034041.
- [23] Cui KF, Chao SJ, Sun CL, et al. Evaluation of the systematic shifts of a ⁴⁰Ca⁺—²⁷Al⁺ optical clock. The European Physical Journal D, 2022, 76(8): 140.
- [24] Consultative Committee for Time and Frequency. Report of the 19th meeting (13—14 September 2012) to the International Committee for Weights and Measures. (2013-04-04)/[2023-07-30]. <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/19-2012>.
- [25] Consultative Committee for Time and Frequency. Report of the 20th meeting (17—18 September 2015) to the International Committee for Weights and Measures. (2016-04-15)/[2023-07-30]. <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/20-2015>.
- [26] Consultative Committee for Time and Frequency. Report of the 21st meeting (8—9 June 2017) to the International Committee for Weights and Measures. (2017-12-11)/[2023-07-30]. <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/21-2017>.
- [27] 葛悦涛, 薛连莉, 赵小平. 美国备份授时系统建设法案发展研究. 飞航导弹, 2019, 10: 20—26.

- [28] National Executive Committee for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing. National timing resilience and security Act of 2018. (2018-12-04)/[2023-07-30]. <https://www.gps.gov/policy/legislation/loran-c/>.
- [29] Department for Business, Energy & Industrial Strategy and UK Research and Innovation. World's first timing centre to protect UK from risk of satellite failure. (2020-02-19)/[2023-07-30]. <https://www.gov.uk/government/news/worlds-first-timing-centre-to-protect-uk-from-risk-of-satellite-failure>.
- [30] 张蔚蓝. [大国重器—中科院重大科技基础设施]长短波授时系统. (2020-09-21)/[2023-07-30]. http://ydyf.china.com.cn/2020-09/21/content_76725379.htm.
- [31] 刘民, 王乾娟, 李军. 空间守时系统概念研究. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 1—6.
- [32] 杨元喜. 中国大地坐标系建设主要进展. 测绘通报, 2005, 1: 6—9, 52.
- [33] 陈俊勇. 大地坐标框架理论和实践的进展. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(1): 1—6.
- [34] Altamimi Z, Collilieux X, Boucher C. Strengths and limitations of the ITRF; ITRF2005 and Beyond// Drewes H. Geodetic Reference Frames. Berlin: Springer, 2009: 73—79.
- [35] Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. Journal of Geodesy, 2011, 85(8): 457—473.
- [36] Collilieux X, Altamimi Z, Coulot D, et al. Comparison of very long baseline interferometry, GPS, and satellite laser ranging height residuals from ITRF2005 using spectral and correlation methods. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112(B12), doi:10.1029/2007JB004933.
- [37] 刘经南, 魏娜, 施闯. 国际地球参考框架(ITRF)的研究现状及展望. 自然杂志, 2013, 35(4): 243—250.
- [38] Dong DN, Qu WJ, Fang P, et al. Non-linearity of geocentre motion and its impact on the origin of the terrestrial reference frame. Geophysical Journal International, 2014, 198(2): 1071—1080.
- [39] 宁津生, 王华, 程鹏飞, 等. 2000 国家大地坐标系框架体系建设及其进展. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(5): 569—573.
- [40] 宋淑丽, 朱文耀, 熊福文, 等. 毫米级地球参考框架的构建. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2704—2711.
- [41] 程鹏飞, 成英燕, 秘金钟, 等. CGCS2000 板块模型构建. 测绘学报, 2013, 42(2): 159—167.
- [42] 孙中苗, 范昊鹏. VLBI 全球观测系统(VGOS)研究进展. 测绘学报, 2017, 46(10): 1346—1353.
- [43] 李建成. 我国现代高程测定关键技术若干问题的研究及进展. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(11): 980—987.
- [44] 李建成, 褚永海, 徐新禹. 区域与全球高程基准差异的确定. 测绘学报, 2017, 46(10): 1262—1273.
- [45] 党亚民, 蒋涛, 陈俊勇. 全球高程基准研究进展. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1576—1586.
- [46] 许厚泽. 全球高程系统的统一问题. 测绘学报, 2017, 46(8): 939—944.
- [47] International Association of Geodesy. Geodesists' handbook 2012. (2012-09-20)/[2023-07-30]. <https://www.iag-aig.org/geodesists-handbook/24>.
- [48] 孙和平, 孙文科, 申文斌, 等. 地球重力场及其地学应用研究进展——2020 中国地球科学联合学术年会专题综述. 地球科学进展, 2021, 36(5): 445—460.
- [49] Pan M, Sjöberg LE. Unification of vertical datums by GPS and gravimetric geoid models with application to Fennoscandia. Journal of Geodesy, 1998, 72(2): 64—70.
- [50] Zhao JH, Zou YJ, Zhang HM, et al. A new method for absolute datum transfer in seafloor control network measurement. Journal of Marine Science and Technology, 2016, 21(2): 216—226.
- [51] 陈俊勇, 李健成, 晁定波, 等. 我国海域大地水准面的计算及其与大陆大地水准面拼接的研究和实施. 地球物理学报, 2003, 46(1): 31—35.
- [52] 徐德明. 中国测绘地理信息创新报告(2012). 北京: 社会科学文献出版社, 2012.
- [53] 杨元喜, 徐天河, 薛树强. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望. 测绘学报, 2017, 46(1): 1—8.
- [54] Downs GS. Interplanetary navigation using pulsating radio sources. NASA Technical Report N74-34150, 1974: 1—12.
- [55] Josep S, Andreu U, Xavier V, et al. Feasibility study for a spacecraft navigation system relying on pulsar timing information. (2004-06-23)/[2023-07-30]. <https://www.esa.int/gsp/ACT/doc/ARI/ARI%20Study%20Report/ACT-RPT-MAD-ARI-03-4202-Pulsar%20Navigation-UPC.pdf>.
- [56] Werner B. Neutron Stars and Pulsars. Berlin: Springer, 2009.
- [57] 魏二虎, 李冠, 刘经南, 等. 脉冲星用于深空探测器导航定位及授时的探讨. 测绘信息与工程, 2009, 3: 1—3.
- [58] Bernhardt MG, Prinz T, Becker W, et al. Timing X-ray pulsars with application to spacecraft navigation// Proceedings of High Time Resolution Astrophysics IV, PoS (HTRA-IV)050, Italy: Sissa Medialab, 2010: 1—5.
- [59] 任红飞, 魏子卿, 刘思伟, 等. 国内外深空基准发展现状与启示. 测绘科学与工程, 2020, 3: 8—15.
- [60] Belenchia A, Carlesso M, Bayraktar Ö, et al. Quantum physics in space. Physics Reports, 2022, 951: 1—70.
- [61] Lyu W, Zhong JQ, Zhang XW, et al. Compact high-resolution absolute-gravity gradiometer based on atom interferometers. Physical Review Applied, 2022, 18(5): 054091.
- [62] Rossi L, Koç, Migliaccio F. Assessment of gravity field recovery from a quantum satellite mission with atomic clocks and cold atom gradiometers. Quantum Science and Technology, 2023, 8(1): 014009.

- [63] Tanaka Y, Katori H. Exploring potential applications of optical lattice clocks in a plate subduction zone. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(8): 93. (2022-11-28)/[2023-07-30]. <https://arxiv.org/pdf/2211.15412.pdf>.
- [64] Holger A, Leonardo B, Angelo B, et al. Ste-quest: space time explorer and quantum equivalence principle space test. (2022-11-28)/[2023-07-30]. <https://arxiv.org/pdf/2211.15412.pdf>.
- [65] Yang YX, Ren X, Jia XL, et al. Development trends of the national secure PNT system based on BDS. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(5): 929–938.

Key Scientific Frontiers and Core Technologies in Space-time Reference Research in the Era of Precision (Quantum) Measurement

Heping Sun^{1*} Yuanxi Yang² Zhaohui Ye¹ Haoming Yan¹ Hua Guan¹
Peng Peng¹ Baocheng Zhang¹ Mingqiang Hou¹ Huihong Cheng³ Sheng Yu³

1. *Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077*

2. *Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054*

3. *Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

Abstract Based on the contents and perspectives of the 316th Shuangqing forum on Space-time datum research in the era of precise (quantum) measurement, this paper summarizes the important national needs of space-time datum research in our country in the age of precision (quantum) measurement, and reviews the development history and severe situation of space-time datum domestically and abroad. The key scientific frontier and core technologies for the future 5~10 years, such as the theory, methods and application research of space-time datum, research and development of key technologies and equipment in related fields, etc. are put forwarded. In addition, the potential scientific funding strategy is also suggested.

Keywords quantum; precise measurement; space-time datum; development strategy; recommendations for funding projects

(责任编辑 崔国增 张强)

* Corresponding Author, Email: heping@whigg.ac.cn