

引用格式:杨海彦,李孝辉,张首刚,等. 中国世界时测量技术发展[J]. 时间频率学报, 2026, 49(1): 8-19.

中国世界时测量技术发展

杨海彦^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}, 张首刚^{1,2,3}, 杨旭海^{1,2,3}, 尹东山^{1,2,3},
马浪明^{1,2}, 姚当^{1,2}, 李西顺^{1,2}, 刘佳^{1,2}, 成璇^{1,2,3}, 李志刚¹

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:世界时是以地球自转为基础,通过观测恒星/河外射电源的周日视运动确定的一种时间尺度,是标准时间产生、卫星导航、深空探测等领域不可或缺的基础数据。我国的自主世界时测量和服务工作经历了从无到有、从强到弱、从弱到强的曲折发展历程。新中国成立之初,我国主要使用国际时间局和苏联的测时结果。1964 年,基于经典光学测量技术发展,建立了我国综合时号改正数系统,提供国际先进的世界时服务。1991 年底,经典光学测量系统停止测时工作,但甚长基线干涉测量(VLBI)、卫星激光测距(SLR)等新技术测时工作未能有效开展,世界时自主测量工作中断,此后 30 多年依赖美欧主导的国际地球自转与参考系服务(IERS)。近十年来,基于 VLBI 2010、北斗/GNSS(全球卫星导航系统)等先进技术,辅以传统的数字天顶望远镜,国内多个机构正在筹建世界时测量系统,并实现了例行化观测,初步具备了世界时自主服务能力。

关键词:世界时;综合时号改正数;经典光学仪器;甚长基线干涉测量;大型光学陀螺

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0008-12

Development of the UT1 measurement technology in China

YANG Hai-yan^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, ZHANG Shou-gang^{1,2,3}, YANG Xu-hai^{1,2,3},
YIN Dong-shan^{1,2,3}, MA Lang-ming^{1,2}, YAO Dang^{1,2}, LI Xi-shun^{1,2},
LIU Jia^{1,2}, CHENG Xuan^{1,2,3}, LI Zhi-gang¹

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Universal Time (UT1) is a time scale defined by the Earth rotation and determined by observing the diurnal motion of optical stars and extragalactic sources in radio, which is an fundamental data in applications of fields of the timing services, satellite navigation, deep space exploration, etc. China's UT1 measurement and service work has undergone a tortuous journey, starting from scratch, then going from strong to weak, and finally from weak to strong again. In the early days after the founding of the People's Republic of China, the country mainly relied on the time measurement results from the International Time Bureau and the Soviet Union. In 1964, based on the development of classical optical measurement technology,

收稿日期:2025-07-22;接受日期:2025-09-12

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDB1070301, XDB1070302, XDB1070201, XDB1070202, XDB1070203)

作者简介:杨海彦,男,博士,研究员,主要从事世界时测量技术、北斗/GNSS 监测评估研究。

China established its comprehensive correction system for time signals, providing UT1 service at an internationally advanced level. By the end of 1991, the classical optical measurement system had ceased its time measurement operations. However, new time measurement technologies such as very long baseline interferometry (VLBI) and satellite laser ranging (SLR) were not effectively implemented, leading to a disruption in independent UT1 measurement. Over the following over 30 years, China relied on the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), which was dominated by the United States and Europe. In the past decade, based on advanced technologies such as VLBI 2010 and BeiDou/GNSS (Global Navigation Satellite System), supplemented by traditional digital zenith telescopes, several domestic institutions have been working on establishing UT1 measurement systems. Routine observations have been achieved, and the capability for independent UT1 service has been preliminarily established.

Keywords: Universal Time (UT1); joint corrections of radio time signals; classical optical instruments; very long baseline interferometry (VLBI); large scale optical gyroscope

世界时 (Universal Time, UT) 是以地球自转为基础, 通过观测恒星/射电源的周日视运动确定的一种时间尺度^[1-2]。世界时是国际上第一个统一的时间尺度, 曾长期被认为是稳定均匀的时间计量系统, 得到广泛应用^[3-4]。

事实上, 世界时受到地球自转不均匀变化和极移的影响, 为了获得均匀的世界时, 国际天文联合会 (IAU) 先后定义了 UT0、UT1 和 UT2 三种世界时系统^[5]。各个天文台观测恒星求得的世界时为 UT0。1956 年, 在 UT0 基础上引进极移改正, 修正地球自转轴摆动的影响, 形成 UT1, UT1 完全描述地球自转特性 (本文中“世界时”指 UT1)。在 UT1 基础上引进地球自转速率的季节性变化改正, 得到 UT2, UT2 系统亦称为准均匀时间系统, 60 年代各国发播的时号改正数曾采用 UT2 系统。1972 年, 协调世界时 (Coordinated Universal Time, UTC) 成为官方时间计量系统, 其以原子时秒长为尺度, 在时刻上尽量接近于 UT1^[6-7]。为了适应观测精度的提高, 地球自转理论也随之发展, IAU 在 2000 年重新定义了 UT1, 它是地球自转角的线性函数, 同时, UT0 和 UT2 不再使用^[8]。原子时更加均匀, 稳定度比世界时高几个数量级, 为使用方便, 各类时间公报使用 UT1-UTC 来表达 UT1 的变化。

当前, 世界时不仅为 UTC 提供时刻信息, 在卫星导航、深空探测、武器发射、大地测量等空间领域也是必需的。世界时与极移、岁差章动一起构成地球定向参数 (earth orientation parameters, EOP), 其中世界时与极移一起也称为地球自转参数 (Earth rotation parameters, ERP)。EOP 用于天球坐标系

和地球坐标系间的相互转换, 精确的世界时也是研究地球自转变化的基础数据之一, 可以为地球自转理论、地球内部结构、板块运动、地震预报等有关科学研究提供必要的基本资料^[9-17]。

世界时的测量与发播服务, 关系着国家安全、经济和社会发展, 独立自主是必须的。我国的自主世界时测量与服务工作经历了从无到有、从强到弱、从弱到强的曲折发展历程。从 20 世纪 50 年代起, 中国科学院就担负着新中国的测时、播时工作, 1950—1952 年采用国际时间局 (Bureau International de l'Heure, BIH) 的时间公报, 1953—1964 年采用苏联标准时刻公报。60 年代, 建立起我国自主的综合时号改正数系统。70 年代, 利用我国独有的光电等高仪和真空天顶望远镜, 逐渐发展到 6~7 个台站十多台仪器来测时, 测时能力很好的满足了国防、科研和国民经济建设和发展的需要^[18]。90 年代初, 经典光学测量系统停止观测, 甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI)、卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR) 等新技术只是零星参与国际联测, 独立自主的测量未能有效开展起来, 直到 2021 年前我国一直使用国际地球自转与参考系服务 (International Earth Rotation Service, IERS) 发布的世界时。

这里对时号和时号改正数进行解释, 使用经典光学仪器测量世界时一般分两个步骤: 首先根据初步的天文测时结果发布无线电时号 (世界时的近似值); 然后用大量的天文测时结果经过数值处理来订定准确的世界时和时号之间的差值, 即时号改正数。时号改正数是世界时工作的最后结果, 它的精

确度集中反映了世界时服务所达到的水平^[19-21]。

本文以我国世界时测量与服务的技术发展为脉络,系统回顾分析了 20 世纪以来我国世界时测量技术、性能指标、服务情况的发展历程,并对未来发展趋势进行展望。

1 新中国成立前的时间服务

20 世纪 20 年代是世界上测时、授时领域产生飞跃变革的年代。1922 年,BIH 正式运行,综合 7 个国家的 9 个台站测时数据,发布高质量的时号改正数。1928 年,苏联的标准世界时系统建立。但此时的中华民族正处于战火纷飞的年代,我国的测时工作几乎掌握在外国人手中。现在能够追忆的只是 1924 年 3 月 1 日从德国人那里接管过来的青岛观象台和法国人建立的徐家汇观象台,作为中国的天文台参加了 1926 年、1933 年的两次国际经度联测^[21-24]。当时,徐家汇观象台依然是法国设在远东的 1 个研究机构,可以认为,青岛观象台是唯一一家中方机构参加了上述两次国际经度联测,观测设备是德国人遗留下来的中星仪,观测成绩得到各方好评。但由于日本侵华战争,青岛观象台在 1937 年 9 月至 1945 年 9 月被日本控制^[23-24]。徐家汇观象台是国际经度基本点之一,曾居于世界先进行列,只可惜它是 1 个“法国掌控的”天文台,直到 1949 年 12 月 12 日才由中国科学院和军委气象局接管^[25-26]。

2 1954 年 7 月 1 日,首次通过无线电台播发世界时时号,呼号 BPV

新中国成立后,由于我国时号的发播功率不够大,质量不高,军事测绘和航空航海部门全部采用苏联的 RWM、RBT 时号。大地测量领域提出改进我国自己发播的时号,用于满足野外测量作业的要求。徐家汇观象台使用帕兰(Prin)80 mm 中星仪测时,从 1954 年 7 月 1 日零时起,租用上海电信局真如电台 5 kW 的发报机,在每天 19 时、21 时和 23 时发播授时信号,呼号 BPV,这是第一次在全世界 40 个无线电时号中出现了我国自己的时间信号^[26-27]。

20 世纪 50 年代中期,正值我国“一五”计划实施的关键时期,国家经济建设必须有高精度的时号和时号改正数。特别是测绘部门测量全国精密地图,需要测定经纬度。测定经度时,首先测定测站的地方时,然后与代表格林尼治时刻的时号对比,其时刻差对应测站的经度值。测定纬度和方位角

时,也需知道观测时的准确时刻^[28]。

1955 年,测绘部门对比分析了苏联与徐家汇发播的时号改正数精度,结果还是苏联的比较好,二者相差达到 7 倍之多,主要原因是我国测时台站数量不足,只有徐家汇观象台 1 个台站^[29]。而苏联联合了多个社会主义国家进行测时,标准时系统在 1951—1953 年由 9 个台站 14 台仪器组成,1954 年发展至 17 个台站 29 台仪器,徐家汇观象台和紫金山天文台分别在 1954 年和 1957 年也加入该系统,测定的综合时改正数称为“标准时刻”^[16]。同一时期,BIH 根据全世界 39 个天文台的测时和播时资料综合归算精确时号改正数,称为“确定时”(Heure définitive),但一般要滞后半年、甚至 1 年以上才能揭晓^[4-16]。而苏联发布的“标准时刻”滞后时间则短得多,每月更新,且精度与 BIH 发布的“确定时”基本相当。

我国在 1953—1964 年使用苏联播发的“标准时刻”信息。期间,苏联国家物理技术与无线电技术研究所把每期授时公报的草印本在正式本出版前 3 个月寄给我国,每月更新 1 次,这给我国各野外测量队提供了便利。但从 1960 年开始,中苏关系日趋紧张,我国在 1963 年停止向苏联寄送测时资料,正式退出苏联的测时系统^[18]。

3 1966 年 1 月 1 日,自主的综合时号改正数正式启用,世界时测量精度进入国际先进行列

20 世纪 50 年代末,我国天文学家认识到世界时工作必须摆脱对国外的依赖。1957 年,呼吁“组织我国独立时政系统,即构建一个大的测时网”^[29-30]。同年,利用苏联赠送的一套光电装置,成功研制了第 1 台光电中星仪(Zeiss No. 14968),基本消除了人差的影响,测时设备性能有所改善^[31]。1959 年 1 月起,基于紫金山天文台和徐家汇观象台的帕兰中星仪、光电中星仪、超人差棱镜等高仪等 6 台仪器的测时资料生成“综合时号改正数”,开始在《授时公报》(TIME Service Bulletin)上刊布,每月 1 期,包括时号的改正数和守时、测时的原始资料^[18,32-34],这意味着我国世界时系统的初步建立,为 20 世纪 60 年代建立独立自主的测时系统奠定了技术基础。

1962 年,徐家汇观象台从紫金山天文台独立出来,与佘山天文台合并成立了上海天文台。随着北

京天文台的沙河时间工作站和武昌时辰站分别在1962年和1964年开始测时工作,测时台站数增加至4个,测时仪器以光电中星仪和丹容等高仪为主。1963年,采用了新的经度值并重新调整后,我国综合时号改正数的实际外推误差约为2.5 ms,与同期BIH的系统差均值约+2.0 ms,但其站间变化幅度达7.1 ms,从图1给出的1963年国际上几种时号改正数的精度来看(数据来自文献[20-21]),我国的世界时测量结果已达到国际领先水平。

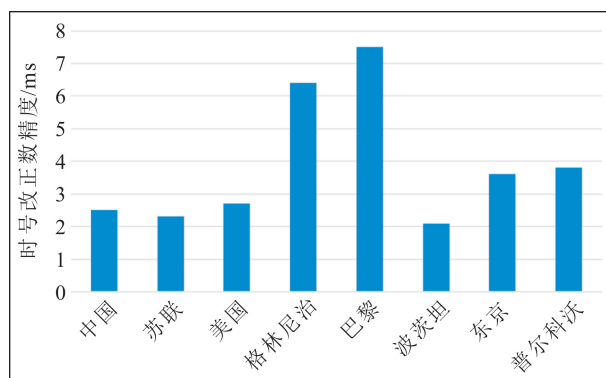


图1 1963年时号改正数精度对比

1965年8月3日,“我国的综合时号改正数”正式通过了鉴定,鉴定书上写道:“中国科学院上海天文台发播的时号及刊布的综合时号改正数已能满足当前国民经济建设和国防方面对世界时的要求”。同年12月25日,中国科学技术委员会批准“我国的综合时号改正数”作为我国世界时基准,并自1966年1月1日正式启用^[4,35]。至此,应该说我国的世界时测量与服务已经实现了独立自主。

4 1981年7月1日,BPM短波授时台正式承担我国时号发播任务,世界时快速服务的精度达到3 ms

1965年,“我国综合时号改正数”国家鉴定书上指出:“为了进一步加强系统的稳定性……并从战略上考虑,建议中国科学院在西部地区从速增设1个授时台。”这时对于世界时的需要,已经不只是测绘部门,此时最迫切的、对精度要求最高的,则是我国自力更生发展起来的的空间技术,特别是“651计划”(发射人造地球卫星计划)。1966年,中国科学院决定新的授时中心建在西安附近,即中国科学院陕西天文台(2001年3月更名为中国科学院国家授时中心)^[36]。

随着1972年和1975年陕西天文台和云南天文

台加入测时网,我国的世界时测量系统逐渐发展、扩大到联合使用国内6~7个台站约十多台测时仪器^[37-40]。此时,测时工作使用我国自主研制的I型、II型光电等高仪、照相天顶望远镜等新型仪器,其消除了人差的影响,观测精度良好,在往后的世界时测量中发挥了重要作用^[41-48]。陕西天文台作为专门从事时间频率工作的机构,开始测时工作后,由于观测地(蒲城)的晴夜多,仪器维护的好,观测质量在所有仪器中名列前茅,后来参加国际联测,成绩也十分优异。得益于台站数量增加和仪器性能的提升,我国综合时号改正数的精度达到 ± 1.9 ms^[39]。在国民经济、国防建设和科学研究,如导弹试验、卫星发射、大地测量、地震研究等,发挥了极其重要的作用。这项成果“世界时的精确测定”在1978年获得国家重大科技成果奖。

图2展示了部分经典光学测时仪器的实物图片。这些仪器以铅垂线或水银面为基准,通过测量天体的天顶距或过子午圈的时刻,确定世界时。中星仪(图2(a))通过测量恒星中天的时刻确定世界时。等高仪(图2(b))通过测量恒星通过等高圈的时刻解算测站天文经纬度。照相天顶望远镜(图2(c))可以测定测站的天文经纬度,进而通过多站联网观测测定世界时和地极坐标。

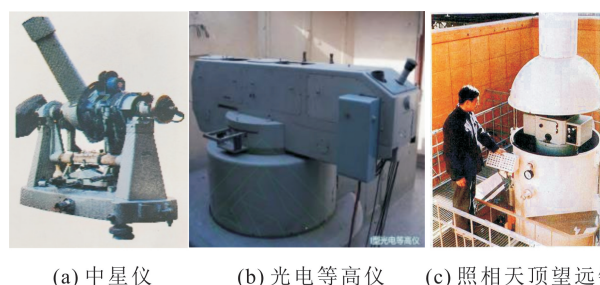


图2 经典光学测时仪器

在这一时期,世界时服务和时号播发方面发生了很大变化。从1970年起,除提供综合时号改正数外,同时开展世界时快速服务,使用前后3个星期的天文测时资料,解算当中1个星期的时号改正数,各天文台订定时号改正数,汇总处理后发布。1975年6月,快速时号改正数相对综合时号改正数的最大偏差可以控制在 ± 3 ms,也就是说,实时发播的世界时精度为 ± 3 ms^[35]。

1970年12月15日,陕西天文台BPM短波授时台开始试播。1975—1978年,BPM短波授时台进行扩建。1981年7月1日,位于蒲城的BPM短波授时台正式承担我国标准时间、标准频率的发播

任务,每天以 4 种频率(2.5、5、10 和 15 MHz)连续发播我国地方协调世界时 UTC(NTSC)(NTSC 是国家授时中心的英文简称)和世界时(UT1)时号,信号覆盖半径大于 3 000 km。其中,世界时时号根据我国综合时号改正数系统预报值进行发播,经过世界时工作钟和守时钟的控制、比对,发播时刻的控制精度优于 $\pm 0.3 \text{ ms}^{[49-50]}$ 。上海天文台从此时起停止 BPV 时号发播。

同时,陕西天文台在 1979 年创办了《时间频率公报》,1980 年 1 月起正式出版,每月 1 期。该刊向用户提供广泛的授时业务信息,其中包括 BPM 短波授时台的 UTC 和 UT1 时号。同时,也转发 IERS 提供的 EOP 最终确定结果,并且相对 IERS 的 UT1 系统给出了我国短波世界时时号的改正数^[51]。

5 1983—1985 年, MERIT 计划实施, VLBI、SLR 等新技术测时由试验走向应用

国际地球自转联测(Monitor Earth-Rotation and Intercompare the Techniques of Observation and Analysis, MERIT)计划,是国际天文联合会(IAU)和国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)共同发起的一项全球性合作项目。MERIT 计划于 1980 年 8 月至 10 月进行短期联测,1983 年 9 月至 1984 年 10 月进行主联测,后来又增加了 1985 年 6 月至 8 月的加强联测。参与联测不仅有经典光学技术,还有多普勒(Doppler)、SLR、激光测月(lunar laser ranging, LLR)、VLBI 等新技术。MERIT 计划的目的在于通过联合观测,精确测定 EOP,比较经典光学技术与新技术,进而提出应用新技术测定 EOP 的方案^[52-56]。表 1 给出了 MERIT 计划实施的详细信息,数据来自文献^[52]。

表 1 MERIT 计划实施详细信息

观测技术	仪器数量		分析中心数量		参与国家数量
	短期联测	主联测	短期联测	主联测	
光学仪器	85	61	2	3	22
Doppler	31	20	2	3	12
SLR	22+9*	27	6	8	19
LLR	2+1*	3	4	3	4
CEI	2	1	—	—	2
VLBI	6+3*	8	3	5	5

注: * 表示观测不满足解算要求

我国在 1979 年 11 月再次参与国际联测,恢复了向 BIH 提供测时资料。1980 年起,上海、北京、陕西、紫金山、云南和武昌几个台站共同参加了 MERIT 计划。在资料处理方面,我国是 3 个经典技术处理中心之一,也是 VLBI、SLR、LLR 等新技术处理中心之一^[54]。

在经典技术联测中,共 85 台仪器参与,测时精度约 1 ms。我国有 12 台经典仪器参加测时,占全球经典测时仪器总数的 17%,而观测结果的权重却高达 30%以上^[55]。MERIT 计划主席 Wikins 在工作总结中谈到,中国的 12 台仪器提供的时纬观测资料,显著地改进了 EOP 的精度^[18]。

在新技术方面,参与的主要是欧美国家 VLBI 和 SLR 台站。图 3 为 MERIT 计划中不同技术测时精度比较,数据来自文献^[52]。可以看出,VLBI、SLR 等新技术占据绝对优势,比经典光学技术的精度高出 1~2 个数量级。VLBI 测时精度约 0.06 ms,在所有技术中精度最高。SLR 参与台站较多,测时精度达到 0.2 ms。多普勒技术测时精度为 0.2 ms,其优势是可实现全天候观测,获得较密集的观测资料,但由于子午仪卫星轨道较低,受地球重力场和大气阻力的影响较为严重。我国 SLR 台站和 Doppler 台站参与了新技术联测,观测资料也用于地心和 EOP 解算,但由于仪器水平的限制,观测结果处于国际中等水平^[54]。

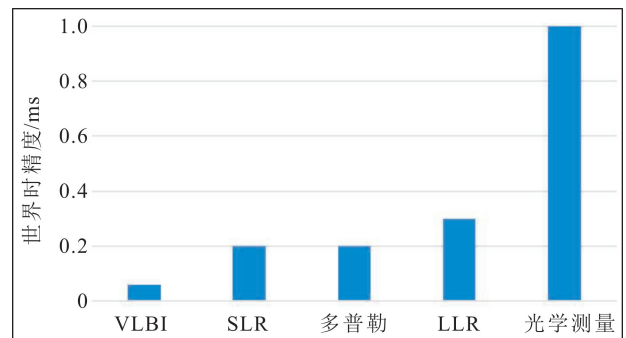


图 3 不同技术测时精度

在经典光学观测技术中,尽管所用的仪器和具体方法各不相同,但基本原理都是对仪器的铅垂线和天体射来的光线之间的夹角作直接的角度测量,由于光学仪器的角分辨率、仪器误差和大气折射复杂性的限制,一次测量的精度只能达到 0.1"或 10 ms 量级,进一步提高精度相当困难。VLBI、SLR、LLR 等新技术不再依赖角度的直接测量,以光行时测量为基础,测量精度有数量级的提高。

1982—1984 年,VLBI 在世界时测量结果中的权重已达 75%,其他技术也达 15%,而经典光学技术只占 10%的权^[55-57]。

MERIT 计划是测时手段由经典技术向新技术发展的有力推手,此后 VLBI、SLR 等技术逐步成为 EOP 测量的常规手段。虽然我国的经典光学仪器的观测精度继续保持了国际领先地位,在新技术观测资料处理方面取得了极大进步^[58-61],但是新技术发展不足、观测台站数量少的问题也初现端倪。

6 1991 年 12 月 31 日,经典光学仪器停止测时工作,世界时完全依赖 IERS

20 世纪 70 年代末,由于 VLBI、SLR、LLR 等空间技术的迅速发展,特别是 1983 年 9 月 1 日至 1985 年 10 月 31 日的 MERIT 计划,不仅推动了新技术的发展,也促使新技术进入常规观测,UT1 精度有了量级的提高,如图 4 所示(数据来自 IERS 网站)。为此,IAU 和 IUGG 决定设立国际地球自转服务组织 IERS。1987 年 3 月,IERS 成立筹备会议召开,并决定从 1988 年起只采用 VLBI、SLR 等空间技术观测资料来计算 EOP。1988 年 1 月 1 日,IERS 正式运行,并替代了 BIH 的地球自转测算职能和国际极移服务(International Polar Motion Service,IPMS)的极移测算职能。同年,IERS 成立了 VLBI、LLR、SLR 技术协调中心,1990 年成立了 GPS(Global Positioning System)技术协调中心,用来协调组织这些新技术的全球联合观测^[62-63]。2003 年更名为“国际地球自转与参考系服务(International Earth Rotation and Reference Systems Service)”,职能扩展到参考框架维护领域,但保留原缩写形式^[64]。

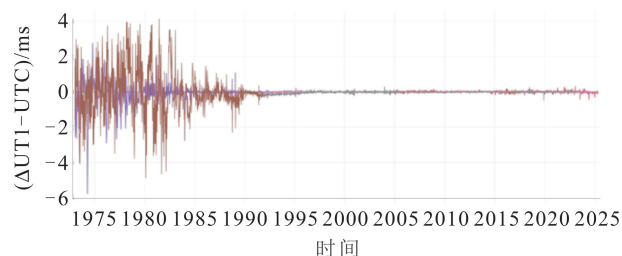


图 4 IERS 发布的世界时精度

IERS 基于新技术测算的高精度 EOP 正式提供公开服务后,国际上经典光学系统在 1988 年 12 月 31 日正式停止观测。在此背景下,我国的综合时号系统在工作 3 年后,所有经典光学仪器于 1991 年 12 月 31 日也停止测时工作^[65]。从此时起,

30 多年来,我国快速发展的探月、探火、北斗卫星导航系统等使用的 EOP 完全依赖由美、欧等西方国家主导的 IERS,包括中国科学院国家授时中心 BPM 发播的 UT1 时号以及相应的改正数均依赖于美国海军天文台的快速 EOP 服务。

VLBI 技术在测定 UT1 中占据绝对主导地位,也是唯一能够直接测定 UT1 的技术,美、俄等国家建立了独立的 VLBI 系统,提供世界时独立服务。我国在 20 世纪 70 年代末开始发展 VLBI 技术,研发 VLBI 系统。1987 年,上海天文台的佘山 25 m VLBI 系统正式投入使用;1994 年初,乌鲁木齐天文站(现新疆天文台)的南山 25 m VLBI 系统投入使用,两站参加国际测地/天体测量学 VLBI 服务(International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS)的国际联测。随着软、硬件性能不断提升,佘山、南山 VLBI 系统在 2005 年之后逐步具备了稳定的测量能力^[66]。实际上,南山—佘山的 VLBI 单基线就可以进行 UT1 观测,测量精度也能够达到国际中等水平^[66],但我国世界时独立观测工作始终没有例行化开展。

IUGG 在 1991 年初组织全球 120 个 GPS 跟踪站进行了地球自转服务和地球动力学试验,验证了 GPS 测定 ERP 的可行性,ERP 测定精度与 VLBI 和 SLR 相当,成功推动国际 GPS 服务组织(International GNSS Service, IGS)的建立^[67]。此后几十年,随着 GLONASS、Galileo、北斗系统的发展,基于全球跟踪网多 GNSS 观测数据,IGS 每天例行解算高精度极移和日长变化。

IERS 汇集 IVS、IGS、ILRS 等组织基于单一技术生成的 EOP 相关产品,进行多手段综合处理,例行发布 EOP 事后产品、快速产品以及预报产品,供全球用户使用^[68]。近十年来,IERS 发布的世界时多次出现无法下载的现象,为保障我国载人航天、探月、火星探测、北斗系统等重大任务的顺利实施,世界时自主测量与服务工作再次提上日程。

7 2020 年 7 月,我国自主世界时测量系统投入运行,提供世界时自主服务

鉴于世界时在授时服务、卫星导航、深空探测等领域的重要作用,为重启我国中断多年的自主世界时测量和服务,西安测绘研究所、国家授时中心、上海天文台等机构正在筹建世界时测量设施,主要采用新一代 VLBI 技术——VLBI 2010、北斗/

GNSS、数字天顶望远镜等技术。

数字天顶望远镜从最初用于测时工作,至今已超过百年的时间,是经典测量技术中精度最高的设备,主要是由于观测天顶附近的恒星,最大限度地减少了大气折射的影响^[69]。在 MERIT 观测结果中,平均每台照相天顶望远镜的权重比等高仪大 2.6 倍,展现了在未来继续使用的潜力^[69]。2016 年,国家授时中心研制建设新一代光学世界时观测网络,包括江苏盐城、云南丽江、青海德令哈、陕西骊山共 4 个观测站,如图 5 所示。该系统以新一代国产数字化天顶望远镜为主要观测设备,与传统照相天顶望远镜相比,采用了 CCD(charge coupld device)等新技术、新器件,系统自动化程度高,提高了观测效率和观测精度^[70-71]。4 个观测站观测恒星位置,并将观测数据实时传输到位于西安的分析处理中心,计算 UT1 结果,精度可达 2.6 ms ^[72-75],这标志着我国再次恢复了世界时自主测量能力。



图 5 数字天顶望远镜观测系统

传统的 VLBI 技术 24 h 测段得到的测站位置精度在 5 mm 水平,时延测量误差在 $10 \sim 50 \text{ ps}$,对于世界时的快速精确测定与预报是有限的^[76]。于是,IVS 在 2012 年将基于新一代 VLBI 2010 技术的站网命名为 VLBI 全球观测系统(VLBI Global Observing System, VGOS),采用宽带测量模式,其目标之一是连续测量测站位置和 EOP 的时间序列,大地测量产品生成周期小于 24 h ^[77-78]。国家授时中心在 2013—2017 年,研制建成了基于 VLBI 2010 规范的宽带 VLBI 系统,这是我国第一套宽带 VLBI 系统,在国内首次用于世界时高精度测量,上海天文台承担了 VLBI 设备研制工作。系统由位于三亚、吉林、喀什的 3 个 13 m VLBI 台站和西安的数据处理中心构成,如图 6 所示。该系统例行观测 UT1,每周一至周四开展每天 3 h 的世界时测量,其中周一和周四的观测数据通过网络回传,进行快速处

理并生成自主 UT1 产品。周二和周三的观测则通过磁盘寄回,用于事后分析和测量精度的评估。西安测绘研究所和上海天文台在国内已建成由 6 个 13 m 口径 VGOS 望远镜组成的自主观测网,包括乌鲁木齐南山、上海佘山等站点,即将在海外建成多个含有 13 m VGOS 望远镜的多技术并置站。目前,乌鲁木齐—佘山基线已具备例行观测能力^[79-81]。

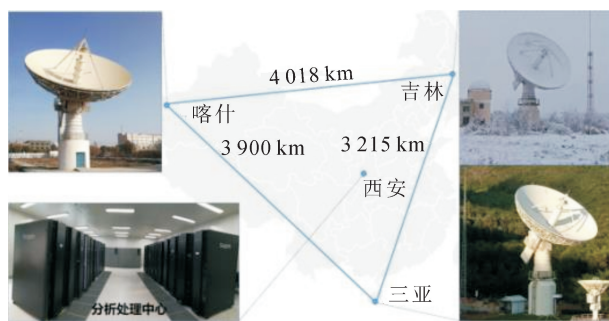


图 6 宽带 VLBI 测量系统

iGMAS(international GNSS Monitoring and Assessment System)是北斗重大专项规划建设三大试验系统之一,对北斗/GNSS 运行状况和主要性能指标进行监测和评估,生成精密星历和卫星钟差、ERP、跟踪站坐标和速率等产品的开放信息平台^[82]。iGMAS 系统由全球跟踪网、3 个数据中心、多个分析中心、1 个产品综合与发布中心、1 个监测评估中心等组成。全球分布的跟踪站采集北斗/GNSS 观测数据,通过互联网汇集至数据中心,各分析中心从数据中心下载观测数据,每天例行计算并生成卫星轨道、站坐标、ERP 等精密产品^[83]。产品综合与发布中心综合多个分析中心生成的精密产品,生成最终产品、快速产品和超快速产品。其中 ERP 包括滞后 12 d 的最终产品、滞后 17 h 的快速产品、每 6 h 更新的超快速产品(包含预报产品)^[84]。

在世界时服务方面,国家授时中心融合 VLBI 生成的 UT1 序列和 iGMAS 生成的日长数据,例行生成快速/事后的世界时产品,并提供服务^[85],处理流程如图 7 所示。图 8 为 2021 年 6 月至 2025 年 3 月自主测量世界时与 IERS 发布的最终产品的差异,精度为 $58.8 \mu\text{s}$ ^[86-88]。2020 年 7 月,为多家军民用户提供了自主世界时、极移等 EOP 数据服务,并为我国首次火星探测提供 EOP 保障,这标志着我国具备了重大任务的 EOP 服务保障能力。该系统在 2022 年 4 月 2 日正式上线运行,每天 0 点(UTC)更新,包括测量和预报序列。其他机构的世界时产品常规服务能力即将形成^[68]。

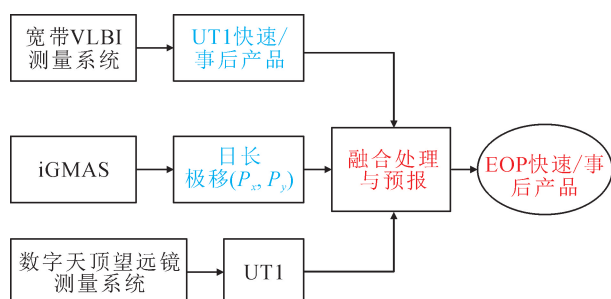


图 7 多手段融合 UT1 处理流程

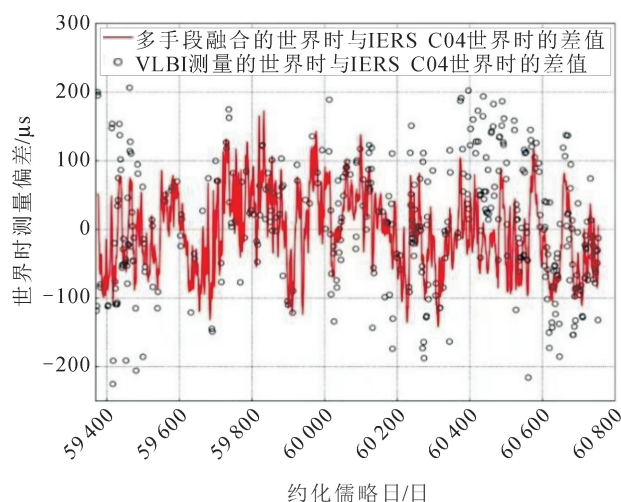


图 8 2021 年 6 月至 2025 年 3 月世界时精度

北斗系统的广播电文也在播发 ERP,目前播发的是 IERS 发布的预报 ERP,每天播发一组,北斗官方发布的信号频点接口控制文件(interface control document,ICD)给出了相应的 ERP 格式说明和用户指南^[89]。

8 2025 年,我国自主的世界时测量系统通过技术鉴定,世界时预报能力达到国际先进水平,服务例行化

世界时的生成需要经过测量、复杂数据处理过程,实测的世界时总是滞后的,而用户使用的是实时或预报的世界时,例如北斗/GNSS 广播星历的生成需要 7~14 d 的世界时预报值;在自主导航时,需要用到 60 d、甚至是 180 d 跨度的世界时预报值。但是,世界时的变化规律非常复杂,高精度预报方法一直是研究热点。

最经典预报方法是最小二乘与自回归组合模型,在最小二乘拟合和外推的基础上,对拟合残差进行自回归模型的建模与预报,预报精度明显优于单一模型^[90-91]。2021 年 9 月至 2022 年 12 月,IERS 组织了第二次国际 EOP 竞赛,共有来自全球的 28

家机构 33 个团队参与,国内多个机构参加了这次竞赛,上海天文台和国家授时中心在此次竞赛的多个参数的预报精度达到国际先进水平^[92-94]。这次竞赛全面比较分析了不同预报模型在不同时间跨度的预报精度,考虑地球物理激发的世界时预报方法,引入大气角动量,将单变量模型发展为多变量模型,取得了很好的效果,IERS 发布的 A 公报已采用考虑大气角动量的世界时预报策略^[92,94-97]。另外,机器学习算法在世界时中期、长期预报中也展现了较大潜力^[92,94-98]。

在世界时测量工作的基础上,国家授时中心持续改进多手段融合处理方法、预报方法^[95,97-100],研制了具有自主知识产权的软件平台,例行发布自主世界时产品及未来 90 d 的预报序列,实现了世界时测量与服务工作的规范化、例行化,初步改变了我国世界时依赖 IERS 的现状。2025 年 5 月,“多手段融合世界时测量及应用”通过技术鉴定,认为“项目整体成果达到国际先进水平,UT1 参数融合及预报技术居于国际领先水平”,并获得“2025 年度卫星导航定位科技进步特等奖”。

9 总结与展望

近百年来,我国独立自主世界时工作经历曲折的发展历程。曾在 20 世纪 60 年代建立了独立自主的光学测时系统,综合时号改正数精度 2 ms,达到国际先进水平。90 年代初,光学系统停止测时工作,但 VLBI、SLR 等新技术测时工作却没有开展起来,自主世界时服务中断,世界时的使用依赖 IERS。近十年来,在北斗系统、深空探测、武器试验等方面重大需求的推动下,西安测绘研究所、国家授时中心和上海天文台正在筹建世界时自主测量设施。目前,国家授时中心建成了 VLBI、iGMAS、数字天顶望远镜等组成的多手段自主 UT1 测量与服务系统,在 2021 年投入常规运行,并向军民用户提供了优质服务,初步改变了我国 30 年来对 IERS 的依赖。

纵观我国世界时测量技术发展,从光学测量到 VLBI、GNSS、SLR,始终跟随国际先进技术,但没有超越。针对当前自主世界时服务的不足和未来应用需求,我国自主世界时发展应集中在提升精度、时效性等方面。

从应用需求角度,一切空间飞行器精密定轨、空间目标观测与研究、深空探测飞行器导航支持等

都需要高精度世界时。例如,在深空探测领域,世界时精度直接影响探测器的导航定位精度;在北斗/GNSS 卫星导航方面,世界时精度直接影响卫星的轨道确定精度,从而间接影响用户的定位授时精度。特别是未来深远空间深空探测,对世界时精度需求越来越高。

从世界时测量技术角度,核心手段是 VLBI,我国喀什—吉林、乌鲁木齐—上海的 VLBI 基线长度约 3 000~4 000 km,世界时测量精度约 60~100 μ s。而美国、IERS 使用的基线长度超过 8 000 km,世界时测量精度约 30~40 μ s。主要原因是世界时测量精度与东西方向基线长度相关,基线越长,测量精度越高。VLBI 测量世界时,发布结果通常要滞后 1~2 d,用户使用世界时预报值。以北斗系统为例,一般需要上传未来 7 d 的世界时预报结果^[101]。世界时的时变性很复杂,长时间预报精度损失较大^[9,13-14,90,102]。因此,要提升世界时应用精度,应发展快速、实时测量技术,缩短预报时长。

在已有技术方面,应建立 VLBI 例行化、规范化测量机制,同时提升 VLBI 观测精度、数据传输能力、快速分析解算能力,实现 UT1 应用精度提升。

在发展新技术方面,一方面发展卫星 VLBI 技术,将地面 VLBI 天线与卫星上的 VLBI 天线组成星地超长基线,观测相同的射电源,计算目标射电源信号到两站的观测时延,进而计算世界时 UT1^[103]。星-地联测可大幅度增加 VLBI 基线长度,有效提升世界时测量精度,也可解决我国在海外建站困难的问题。另一方面应加大力度发展大型光学陀螺仪测量世界时技术,与地球固联的大型光学陀螺仪,可以实时测量地球自转角速度,建立地球自转角速度与世界时的转换关系,即可快速解算高时间分辨率的世界时产品^[104-108]。该方法可单站测量,给出世界时相对变化,利用高精度世界时定期进行初值校准,即可连续输出世界时产品。这种方法,可以实现分钟级更新世界时,是一种极具潜力的世界时测量技术。

参考文献:

- [1] 全国北斗卫星导航标准化技术委员会(SAC/TC 544). GB/T 39267—2020,北斗卫星导航术语[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [2] 许邦信,任江平,孙竹申. 关于世界时的定义[J]. 中国科学:A辑 数学 物理学 天文学 技术科学,1982(7): 644-649.
- [3] 吴守贤,漆贯荣,边玉敬. 时间测量[M]. 北京:科学出版社,1983:193-210.
- [4] 宁晓玉. 中国综合世界时系统的建立与发展[J/OL]. 工程研究——跨学科视野中的工程(2024-08-30) [2025-07-03]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=esvOG1ozB-iJw5wN1JZm0JRSI7-G7-PzrYoGA0jCFSsduLdIWyl47-b1GmaswTMVzQ2hzvplXu3hvN-bfN1LyrRMugJnKq5UuQd3hry8qn0OteW66ANvw6XZICiku_4qFGAkHElqp4m5r4gf83SQ5nT2MRS0TYpbr_PgF9QGt3CCqwznZFELUQ==&-uniplatform=NZKPT&-language=CHS.
- [5] 龚惠人,吴守贤. 授时工作的进展[J]. 天文学报,1963, 11(2):200-210.
- [6] 魏娜. 协调世界时 UTC:历史和未来[J]. 测绘科技情报,2008,69(4):21-23.
- [7] 《无线电工程译文》编辑部. 1972 年起协调世界时(UTC)及国外时号播发程序的变更[J]. 无线电工程译文,1972(1):92-93.
- [8] SOFFEL M, KLIONER S A, PETIT G, et al. The IAU 2000 Resolutions for Astrometry, Celestial Mechanics, and Metrology in the Relativistic Framework: Explanatory Supplement[J]. The Astronomical Journal, 2003, 126(6):2687-2706.
- [9] 张卫星,刘万科,龚晓颖. EOP 预报误差对自主定轨结果影响分析[J]. 大地测量与地球动力学,2011,31(5): 106-110.
- [10] 陈少杰,高玉平,时春霖,等. 地球定向参数测量发展现状和展望[J]. 全球定位系统,2021,46(5):111-116.
- [11] 连月勇,张超,谢宗特. 地球定向参数对天文定位定向的影响分析[J]. 导航定位学报,2015,3(1):41-45+56.
- [12] 魏飞,高玉平,尹东山. 地球自转参数预报误差对天文测量影响的分析[J]. 测绘通报,2023(8):102-107+125.
- [13] 项宇,蒋孝卿,杨建华,等. 地球定向参数预报误差及其对北斗三号卫星定轨精度的影响[J]. 天文学进展, 2023,41(2):269-278.
- [14] 谢代华,张伟,张明友,等. 地球自转对弹道导弹轨道和落点影响分析[J]. 航空兵器,2006,13(1):18-21.
- [15] 刘彩璋. 时频工作在测绘中的重要地位与应用[J]. 陕西天文台台刊,1992,15(1):97-99.
- [16] 宁晓玉. “任务带学科”模式下的授时工作——以综合世界时系统的建立为中心[J]. 中国科技史杂志,2021, 42(2):246-256.
- [17] 肖伟刚,齐朝祥. 太空活动时空基准的发展现状与启示[J]. 中国科学院院刊,2022,37(11):1642-1649.
- [18] 金文敬,李之方. 上海天文台世界时测定工作的回顾与总结[J]. 中国科学院上海天文台年刊,1993,14:40-48.
- [19] 全和钧. 时号与时号改正数[J]. 测绘通报,1964,10 (1):36-38.

- [20] 叶叔华,吴守贤.我国的综合时号改正数[J].科学通报,1966,11(1):9-10.
- [21] 叶叔华,吴守贤.我国的综合时号改正数[J].测绘学报,1966,9(1):1-16.
- [22] 沈祖耀.1926年上海徐家汇经度测定试验[J].中国科技史料,1983,4(2):71-74.
- [23] 沈冰冰,张静,颜惠玲,等.青岛观象台的历史沿革与贡献研究(1898—1949年)[J].气象科技进展,2016,6(4):44-50.
- [24] 吴燕.近代科学地域扩张背景下的国际经度联测——以中国境内的测量为中心[J].自然科学史研究,2011,30(4):417-434.
- [25] 阎林山,马宗良.徐家汇天文台的建立和发展(1872—1950)[J].中国科技史料,1984,5(2):65-72.
- [26] 罗定江.徐家汇观象台的授时工作[J].天文学报,1955,3(2):275-291.
- [27] 中国科学院紫金山天文台地球物理研究所联合上海工作站.中国科学院徐家汇观象台关于授时工作的规定[J].科学通报,1953(7):100.
- [28] 中国科学院测量制图研究所天文组.直接利用连续时号测定经差[J].测量制图学报,1959(1):7-11.
- [29] 王绥琯.试从大地测量的应用上评价徐家汇观象台的时号[J].测绘通报,1957,4(5):193-201.
- [30] 王扬.时政工作专门小组会议[J].科学通报,1958(1):31-32.
- [31] 苗永睿.光电中星仪观测误差分析[J].天文学报,1963,11(2):89-99.
- [32] 张嘉懿,宁晓玉.20世纪60年代中国综合世界时系统的建立[J].咸阳师范学院学报,2016,31(6):25-29.
- [33] 夏盛宏.1958—1960年徐家汇观象台超人差稜镜等高仪观测的初步分析[J].天文学报,1963,11(1):63-73.
- [34] 吴守贤.1959—1961年期间“综合时号改正数”对苏联标准时刻的偏离[J].天文学报,1962,10(2):192-202.
- [35] 中国科学院上海天文台一室.1966—1975年我国世界时工作[J].天文学报,1977,18(1):4-17.
- [36] 中国科学院西安分院.中国科学院在西安地区的科研机构[J].中国科学院院刊,1992(2):164-165.
- [37] 刘次沅.陕西天文台光电中星仪1972—1976年测时结果的风效应[J].陕西天文台台刊,1978,1(1):10-13.
- [38] 廖德春,金文敬,须同祺,等.1962—1988年我国综合世界时的均匀化[J].天文学报,1993,34(4):397-404.
- [39] 张清莲,华英敏,刘裕正,等.1974—1979年的综合时号改正数计算[J].陕西天文台台刊,1982,5(2):42-51.
- [40] 胡辉,蔡昕,王锐.云南天文台光电等高仪观测结果分析[J].天文学报,1988,29(4):333-338.
- [41] 光电等高仪研制组.一台新的光电等高仪[J].科学通报,1973(5):216-218.
- [42] 中国科学院陕西天文台一室二组.光电等高仪(I型)—观测精度的初步评价[J].科学通报,1974(9):417-419.
- [43] 陕西天文台一室等高仪组、资料分析组.Ⅰ型光电等高仪观测结果的初步分析[J].天文学报,1975,16(2):104-114.
- [44] 光电等高仪研制组.Ⅱ型光电等高仪[J].天文学报,1975,16(2):115-122.
- [45] 中国科学院上海天文台一室等高仪组.Ⅱ型光电等高仪一年观测资料的分析[J].天文学报,1976,17(1):27-33.
- [46] 中国科学院南京天文仪器厂.我国研制的照相天顶望远镜[J].天文学报,1977,18(1):32-38.
- [47] 季洪钦,孙增新,尤淑如,等.照相天顶望远镜1979.2—1980.5观测结果的初步分析[J].陕西天文台台刊,1982,5(2):58-66.
- [48] 季洪钦,孙增新,尤淑如.天津纬度站PZT1979.2—1980.5和1981.12—1983.3的观测结果及分析[J].天文学报,1984,25(2):191-200.
- [49] 安跃生.BPM短波授时台正式发播[J].陕西天文台台刊,1981,4(1):64.
- [50] 中国科学院陕西天文台BPM短波授时台发播程序及频率安排[J].时间频率公报,1981(S1):1-4.
- [51] 毛德驰.陕西天文台《时间频率公报》创刊[J].陕西天文台台刊,1980,3(1):68.
- [52] WILKIN S, GEORGE A. The MERIT-COTES campaign on earth rotation and reference systems[R]//the Third MERIT Workshop and the MERIT-COTES Joint Meeting, Columbus: [s. n.], 1985.
- [53] 金文敬,赵铭.MERIT计划的意义、进展和前景[J].天文学进展,1983(1):100-108.
- [54] 杨玉德.MERIT国内总结会(1985年6月,上海)[J].天文学进展,1985(4):399-400.
- [55] 杨玉德.MERIT联测圆满结束[J].天文学进展,1987(3):258.
- [56] 杨玉德.国际地球自转联测及其影响[J].中国科学院院刊,1988(2):153-155.
- [57] 王强国,金文敬.1983—1985年地球自转参数的联合解[J].天文学报,1988,29(1):79-87.
- [58] 地球自转参数与地面参考系课题组.1984—1985年中国的世界时工作[J].中国科学院上海天文台年刊,1986:142-151.
- [59] 黄城,何妙福,冯初刚,等.国际地球自转联测期间由LAGEOS卫星求得的ERP序列[J].中国科学:A辑 数学 物理学 天文学 技术科学,1986(6):629-637.
- [60] 徐家岩,张挥.用联线干涉仪测量地球自转参数[J].陕西天文台台刊,1983,6(1):59-69.
- [61] 郑大伟,王叔和,顾震年.各种天文观测技术测定地球自转参数[J].中国科学:A辑 数学 物理学 天文学 技

- 术科学,1983(12):1112-1120.
- [62] 金文敬. 国际地球自转参数服务的新组织[J]. 天文学进展,1987(4):334-335.
- [63] 张青莲. 新的国际地球自转服务(IERS)[J]. 时间频率公报,1990(8):12.
- [64] 金文敬,唐正宏,黄乘利,等. 国际地球自转服务(IERS)评介[J]. 天文学进展,2003,21(1):26-32.
- [65] 高建国,郭履灿. 地球自转参数测定的更新对地震震级测定的启示[J]. 地震地磁观测与研究,1987,8(5):10-14.
- [66] 张志斌,王广利,刘祥,等. 中国 VLBI 网观测地球定向参数能力分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2013,38(8):911-915.
- [67] 王解先,何妙福,朱文耀,等. GPS 在测定地球自转参数等方面的应用[J]. 天文学进展,1993(4):303-308.
- [68] 马卓希,李广云,张中凯,等. 国际世界时产品现状与 CNVN 网的观测能力评估[J]. 导航定位学报,2025,13(4):219-227.
- [69] 高布锡,李志刚,刘裕正,等. 关于照相天顶筒的前途[J]. 陕西天文台刊,1982,5(2):198-202.
- [70] 田立丽,郭金运,韩延本,等. 我国的数字化天顶望远镜样机[J]. 科学通报,2014,59(12):1094-1099.
- [71] 王博,田立丽,王政,等. 数字化天顶望远镜观测图像及数据处理[J]. 科学通报,2014,59(12):1100-1107.
- [72] 李琳,高玉平,蔡宏兵,等. 基于多站点数字天顶望远镜的 UT1 测量系统[J]. 时间频率学报,2019,42(3):233-239.
- [73] 蒋梦源,尹东山,李海波,等. 天顶望远镜测量世界时的 CCD 星图处理方法[J]. 时间频率学报,2020,43(2):143-152.
- [74] 刘娜,高玉平,蔡宏兵,等. 骊山观测站数字天顶望远镜的初步观测结果分析[J]. 时间频率学报,2021,44(1):33-44.
- [75] 陈少杰. 基于 DZT 的 ERP 测量与服务技术研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心),2022.
- [76] 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.
- [77] HASE H, BEHREND D, MA C, et al. The Emerging VGOS Network of the IVS[C] // IVS 2012 General Meeting Proceedings. Madrid: National Aeronautics and Space Administration, 2012: 8-12.
- [78] PETRACHENKO B, NIELL A, BEHREND D, et al. Design Aspects of the VLBI 2010 System[R]. Progress Report of the VLBI 2010 Committee, Greenbelt: National Aeronautics and Space Administration, 2009.
- [79] 郭丽,甘江英,舒逢春,等. 基于我国 VGOS 网的 UT1 加强观测与评估[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), (2025-05-07) [2025-07-20]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=esvOG1ozB-jN7Q0ZUoxfmyPjgFRYn_JGwR0s28myAXTzP-0Gkr_lOZ2SY1pY5YYRziMU32G4FMkRLnJBqBtXT07_VxHuhVrPJseH-ijWLg-FxCzInaSqMSxdvHKcryY0a6TvwKkoZ9wZph5E0iMfDwrB90ralVTrpAYkmuG4__ATpCmb51cZsELA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [80] 马慧斌,秦文振,江丹,等. 基于 VGOS 与同步 S/X VLBI 解算地球自转参数的精度评估[J/OL]. 大地测量与地球动力学, (2025-02-20) [2025-07-20]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=esvOG1ozB-ice_9arwa0FViUq7hijgsqM0S_JKUX9xlIpmADSujDF-guxXbjvGljqmVQXhR-No8GXp3FBH7VJx4gcEa0mKZTjxPJVgBRwQaUzdUDprCgoKGZXFd47WrqyqZd30KLmO64pyJS5Mg5UfjgeOsZsPoyaxSJBmVL9lNy66hlmqV-6A==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [81] 黄逸丹,舒逢春,何旋,等. VGOS 超宽带观测的首次 UT1 测量数据处理及分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(1):75-83.
- [82] 焦文海,丁群,李建文,等. GNSS 开放服务的监测评估[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2011,41(5):521-527.
- [83] 张喆,杨海彦,王海雪,等. 国际 GNSS 监测评估系统数据采集与服务的研究及应用[J]. 数据与计算发展前沿,2022,4(1):113-125.
- [84] 陈国,魏娜,赵齐乐,等. 多分析中心站坐标产品的综合方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(9):1289-1295.
- [85] 姚当,弓剑军,马浪明,等. 基于 VGOS 系统的 UT1 初步观测与计算[J]. 时间频率学报,2018,41(3):234-241.
- [86] 吴元伟,李西顺,孙保琪,等. 国家授时中心自主世界时测量与服务系统[J]. 时间频率学报,2022,45(3):184-193.
- [87] 姚当,张志斌,李金岭,等. 基于 VGOS 单基线的 UT1 测定能力评估[J]. 天文学报,2023,64(1):27-35.
- [88] 姚当,吴元伟,张波,等. The NTSC VLBI System and its application in UT1 measurement[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20(6): 153-162.
- [89] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件[Z]. 1.0 版. 北京:中国卫星导航系统管理办公室,2017.
- [90] 王小亚,胡小工,何冰,等. 毫米级地球参考架和 EOP 确定技术[M]. 北京:科学出版社,2023.
- [91] 杨玉国. 融合多种机器学习算法的高精度地球自转参数预报方法研究[D]. 济南:山东大学,2024.
- [92] LIWIŃSKA-BRONOWICZ J, KUR T, WIŃSKA M, et al. Assessment of length-of-day and universal time predic-

- tions based on the results of the Second Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign[J]. *Journal of Geodesy*, 2024, 98(3):22.
- [93] KUR T, DOBSLAW H, ŚLIWIŃSKA J, et al. Evaluation of selected short-term predictions of UT1-UTC and LOD collected in the second earth orientation parameters prediction comparison campaign[J]. *Earth, Planets and Space*, 2022, 74(1):191.
- [94] ŚLIWIŃSKA J, KUR T, WIŃSKA M, et al. Second earth orientation parameters prediction comparison campaign (2nd EOP PCC): overview[J]. *Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy*, 2022, 57(s1):191.
- [95] 杨新宇, 吴元伟, 赵鑫, 等. 基于地球流体有效角动量函数的 UT1 分段预报[J]. *时间频率学报*, 2023, 46(2): 94-104.
- [96] 俞克豪, 王小亚, 李丽华, 等. 顾及地球流体有效角动量信息的 UT1-UTC 中长期预报新方法[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*, (2024-12-17) [2025-07-20]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=esvOG1ozB-iiIAFY0-2nM8IIN_TYcgZwE0SUbKBVHZi0A0Ddf-CwiiXJTh6Cr7kKm23wyPPioNRUeZnA56lGPknVovl4O-HvA-JJDj87j-81F2Zb_aFseuseMe7Mbf4kEmScKjbcKeQ9wE-VfNN1a_zSJMtK5b1m1kielgRBQcMBkcUnsMFc9Q==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [97] LI X S, WU Y W, YAO D, et al. Research on UT1-UTC and LOD prediction algorithm based on denoised EAM dataset[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(19):4654.
- [98] LI C, LI X S, WU Y W, et al. Improved LOD and UT1-UTC prediction using least squares combined with polynomial CURVE fitting[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(23):4393.
- [99] 李西顺, 吴元伟, 叶仁琼, 等. 基于超快速 Δ LOD/UT1 融合的近实时 UT1 序列[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(8):245-252.
- [100] 李西顺, 吴元伟, 姚当, 等. 基于国内宽带 VLBI 2010 系统及 iGMAS 的 UT1/ Δ LOD 数据融合方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(5):1644-1651.
- [101] 张奋, 阮仁桂, 贾小林, 等. GNSS 广播 ERP 参数评估[J]. *全球定位系统*, 2024, 49(3):80-86.
- [102] 王波, 鄢建国, 高梧桐, 等. EOP 预报误差对深空探测器精密定轨结果影响分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(9):1538-1545.
- [103] 中国科学院国家授时中心. 基于星-地超长基线干涉测量的世界时 UT1 测定方法: 中国, 202210333431.4 [P]. 2023-02-21.
- [104] 王惜康. 基于大型光纤陀螺仪的世界时解算方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2019.
- [105] 王惜康, 高玉平. 一种基于大型光纤陀螺仪的世界时解算方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(9):317-322.
- [106] 孙思宇, 云恩学, 王弼松, 等. 大型光纤陀螺光源噪声抑制方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2024, 32(11): 1125-1131.
- [107] 王巍, 冯文帅, 张首刚, 等. 基于高精度光纤干涉仪的世界时测量技术研究[J]. *导航与控制*, 2023, 22(5): 1-11.
- [108] 王巍, 冯文帅, 张首刚, 著. 基于光纤干涉仪的世界时高精度测量技术[M]. 北京: 科学出版社, 2024.