

引用格式:陈颖鸣,李孝辉,刘长虹,等. 国家授时中心授时监测技术发展[J]. 时间频率学报, 2026, 49(1): 127-136.

国家授时中心授时监测技术发展

陈颖鸣^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}, 刘长虹^{1,2}, 张慧君^{1,2,3}, 许龙霞^{1,2,3}

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:随着高精度时间同步需求的增长,授时系统的稳定性与安全性面临更高要求。长波授时与卫星授时作为互补性授时方式,是国家时间服务体系的重要组成部分,需对其运行状态和服务性能进行有效监测。围绕长波授时监测、卫星授时监测和综合监测系统三个方面,系统梳理了中国科学院国家授时中心授时监测技术的发展历程。通过回顾典型工程实践与科研成果,展示了授时监测从分散化到综合化、从经验化到标准化、从国内应用到国际参与的发展路径。研究表明,授时监测不仅是提升各类授时系统精度与稳定性的重要技术支撑,更是保障授时服务连续性与安全性的核心环节。通过对多种授时手段的综合监测与性能评估,为不同授时系统的融合提供基础数据,是建立天地一体化国家弹性授时体系的基础。随着智能化、网络化监测技术的进一步发展,授时监测将在构建自主可控、安全高效的国家时间频率体系中发挥更加关键的作用,成为授时服务保障不可或缺的技术支撑。

关键词:长波授时监测;卫星授时监测;综合监测系统;授时保障

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0127-10

Development of time service monitoring technology at the National Time Service Center

CHEN Ying-ming^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, LIU Chang-hong^{1,2},
ZHANG Hui-jun^{1,2,3}, XU Long-xia^{1,2,3}

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: With the increasing demand for high-precision time synchronization, the stability and security of time service systems are facing higher requirements. As complementary time service methods, long-wave time service and satellite-based time service are important components of the national time service system, whose operational status and service performance require effective monitoring. This paper systematically reviews the development history of time service monitoring technologies at the National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences, focusing on three aspects: long-wave time service monitoring,

收稿日期:2025-08-07;接受日期:2025-10-12

基金项目:中国科学院青年创新促进会(2021410);“十三五”国家重大科技基础设施建设项目(发改高技[2018]777号);广东科技创新平台基金(2019B090904006)

作者简介:陈颖鸣,女,博士,高级工程师,主要从事无线电授时方法与技术、eLoran 监测评估等方面的研究。

satellite time service monitoring, and comprehensive monitoring system. By reviewing typical engineering practices and scientific research achievements, this paper demonstrates the development path of time service monitoring from decentralization to integration, from experience-based to standardized, and from domestic application to international participation. The research indicates that time service monitoring is not only an important technical support for improving the accuracy and stability of various time service systems, but also a core link in to ensure the continuity and security of time service. Through the comprehensive monitoring and performance evaluation of various time service methods, it provides basic data for the integration of different time service systems, which constitutes the foundation for establishing a national resilient time service system with space-ground integration. With the further development of intelligent and networked monitoring technologies, time service monitoring will play an increasingly critical role in building an independent, controllable, secure and efficient national time and frequency system, and become an indispensable technical support for time service guarantee.

Keywords: long-wave time service monitoring; satellite-based time service monitoring; comprehensive monitoring system; time service reliability assurance

授时监测旨在保障国家时间频率体系的安全性、可靠性与高精度运行^[1]。通过实时或准实时监测与评估授时发播链路中各类信号(如长波、短波、卫星导航系统等)的偏差、稳定性、连续性及信号质量^[2],可有效识别异常、定位故障源,并为授时服务性能的持续优化提供数据支撑。作为时间频率基础设施的重要组成部分,授时监测是确保通信、电力、金融、交通等关键领域时间应用安全可靠的基础性技术手段。

长波授时监测以国家标准时间 UTC(NTSC)为参考,聚焦于场强、信噪比 SNR(signal to noise ratio)、包周差 ECD(envelope to cycle difference)、到达时间 TOA(time of arrival)以及解码概率等参数^[2],以验证授时信号的准确性、抗干扰性及完好性^[3],为特殊场景下的授时备份提供保障^[4-9]。卫星授时监测以国家标准时间 UTC(NTSC)为参考,通过接收全球导航卫星系统 GNSS(Global Navigation Satellite System)空中信号,监测导航电文播发的各项时间参数的完好性,评估 GNSS 的授时服务性能^[10]。两者在监测目标和技术指标上具有显著差异,卫星授时以高精度和全球化覆盖见长,长波授时则更强调稳健性和抗毁能力^[11]。

综合监测系统以国家标准时间 UTC(NTSC)为参考,实现对长波、卫星、低频时码、光纤、广播、网络等不同精度授时手段的监测,监测对象覆盖空天地授时系统。该系统从数据层实现监测系统的融合共用,既能发挥长波授时的抗干扰优势,又能依托卫星授时的全球化能力,通过标准化的监测流

程,实现对多种授时服务的评估。

本文系统梳理我国授时监测技术的发展脉络,重点围绕长波授时监测技术发展、卫星授时监测技术发展以及综合监测系统构建三个核心方面展开,总结国家授时中心在授时监测技术的关键成果与发展经验,为未来技术创新与国家时间频率体系的自主可控、安全高效发展提供参考与支撑。

1 长波授时监测技术发展

长波授时监测技术作为国家时频体系的重要组成部分,从长波授时系统建设期的性能验证到常规运行期的常规监测,再到监测的标准化和性能拓展,对安全可靠的长波授时系统发展起到了重要的作用。

1.1 1978—1996 年的基础建设阶段,搭建监测网络雏形

我国长波授时系统建设采取了“先小功率试验、后大功率建设”的渐进式发展路径。小功率试播台信号的监测对长波授时系统的建设至关重要。建设试验性的小长波台,开展试验和分析,试验通过后再投入工程建设,这样主要技术可快速确定,有利于长波台的建设^[12]。

由于缺乏更高精度的外部授时手段,监测站之间的时间同步成为实现监测的主要技术障碍。1976 年 5 月中国科学院召开的试播工作会议,制定了以搬运钟时间同步为基础的测试方案,1978—1979 年开展多轮陆地和水上搬钟试验,成功实现了多个测点之间的时间同步,为后续长波传播特性研究奠定了基础^[12]。

在此基础上,为进一步掌握长波信号在不同地理环境下的传播规律,1979 年开展了沿长江和沿海地区的长波接收测试,获取了陆地与水面传播特性的第一手数据。这些监测试验为大功率长波授时台的建设提供了重要的技术依据。随后,在大功率长波授时台建设工程中,围绕天地波传播特性分析的需求,全国范围内设置了 8 个功能各异的监测站。涵盖地波、天地波和天波 3 类监测任务,分别承担场强测量、时延测定、电离层变化监测等任务,形成了较为完整的长波授时监测网络^[13]。

自 1980 年起,该监测网络进入全面运行阶段,持续积累大量时间同步与电波传播数据,支撑了大地电导率、电离层等效高度等关键参数的反演与建模,为提升定时精度奠定了理论和技术支持^[13]。随着系统运行趋于稳定,多数监测站在完成阶段性任务后陆续撤销,仅保留临潼长波监测站继续承担核心监测职能,标志着我国长波授时监测体系由全面建设转向常态化运行。

临潼长波监测站的主要监测设备为 PO20 型定时监测接收机,主要监测 BPL 长波授时信号的功率和授时准确性。临潼长波监测站从 1983 年 7 月 1 日开始正式承担 BPL 授时台监测任务,截至目前已经运行 40 余年,先后参与完成多次国家和国防重大任务的长波授时保障工作。图 1 为 2009 年临潼长波监测站。



图 1 临潼长波监测站(2009 年)

1993 年我国建成罗兰 C 导航系统——长河二号导航系统,该系统是我国自主可控的陆基无线电导航系统,具备独立提供定位、导航、授时信息的能力^[14]。长河二号导航系统在地波覆盖范围内建设监测站,作用是对导航信号和授时信号进行综合监测,测定主、副台信号时差,分析同步情况,协助地面台保持同步发射。

1.2 2008—2015 年的技术升级阶段,实现数字化与全时段监测

2008 年 5 月 19 日至 20 日,中国科学院大科学

装置维修改造项目“BPL 长波授时系统现代化技术改造项目”通过了中国科学院计划财务局和基础科学局组织的检查。改造后,BPL 授时台实现每日 24 小时连续发播,新增时码发播和授时脉冲信号时刻数据发播等功能,用户接收机实现自动定时^[15]。

在早期的监测工作中,数据采集、图形记录与异常报警主要依赖值班人员人工记录与定期巡检的方式实现,缺乏全时段、连续性的实时监测能力。为提升监测效率与自动化水平,中国科学院国家授时中心(以下简称国家授时中心)对原有系统进行了数字化改造,实现了 24 小时不间断实时监测。具体改进措施包括:首先,将有纸记录仪(依赖人工判读与后期数据处理)更换为无纸记录仪,实现数据自动采集与电子化存储;其次,基于长波信息数据比对技术,构建计算机的数据采集与存储系统,支持远程网络访问,并在信号异常时触发自动拨号报警机制。系统升级后,显著降低了对人工全程值守的依赖,提高了监测工作的连续性与工作效率。临潼长波监测站主要对 BPL 长波授时信号的波形、幅度、相位、场强、SNR、ECD 等 15 项参数数据进行全天候自动监测。在此基础上,开展电波传播及 D 电离层扰动研究,研究提高长波定时精度。图 2 为 2013 年临潼长波监测站,图 3 为临潼长波监测站 BPL 授时信号监测界面。



图 2 临潼长波监测站(2013 年)



图 3 临潼长波监测站 BPL 授时信号监测界面

为提高监测的可信性,国家授时中心开始提升规范化、标准化监测系统的建设,进一步完善并规范监测流程、监测数据处理、监测结果核实等各项程序。临潼长波监测站作为长波监测部门,2006年9月20日随国家授时中心通过新时代认证中心组

织的 GB/T 9001—2000 认证^[16]。

随后,临潼长波监测站持续扩展监测内容和升级监测系统,实现对长河二号台站长波信号电平、SNR、ECD、TOA 等参数的实时监测。图 4 为临潼长波监测站接收长河二号各台站情况。

Station	Code	Batch	SS	Peak	SNR	ECD	Skywave	SQ	# GRI	Status
6000M	P	9	109	115	37	2677	0.03	1.00	62	
6780M	P	9	63	70	-4	2756	0.05	0.99	80	
6780X	S	9	44	60	-20	-4406	-0.14	0.89	706	S
6780Y	S	9	58	65	-8	4044	-0.05	0.98	152	
7430M	P	9	63	71	-3	1925	-0.05	0.99	100	
7430X	S	9	66	74	-1	-410	0.02	0.99	68	
7430Y	S	9	40	58	-23	2049	-0.38	0.25	1210	S
7950L	S	9	55	57	-11	-1970	0.26	0.96	314	S
8390M	P	9	65	73	-1	1017	0.01	0.99	60	
8390X	S	9	50	60	-15	-982	0.02	0.95	540	S
8390Y	S	9	63	72	-4	-144	0.00	0.99	102	
9930M	P	9	45	56	-20	-2785	-0.36	0.65	728	S
9930Z	S	9	43	56	-20	-673	-0.19	0.73	896	S

图 4 长河二号发播信号监测(南海台链 6780、北海台链 7430、东海台链 8390)

1.3 2020—2022 年的功能拓展阶段,实现流动监测与网络化监测,具备特殊天象的授时影响研究条件

随着对授时可靠性要求的日益提高,特殊天象以及突发特殊状态对授时性能的影响逐渐成为不可忽视的重要议题。国家授时中心围绕相关研究需求开展网络化、机动化监测技术的研究。

2020 年 6 月 21 日夏至日“金边日食”接近全食状态^[17],为研究日食对长波 BPL 授时信号的影响提供了绝佳机会。

国家授时中心授时监测团队分别在海南三亚(天波反射点位于环食带上)和福建厦门(接收点位于环食带上)设置了观测点,用于分析日环食对 BPL 长波授时性能的影响。图 5 为 BPL 日环食观测传播路径图。

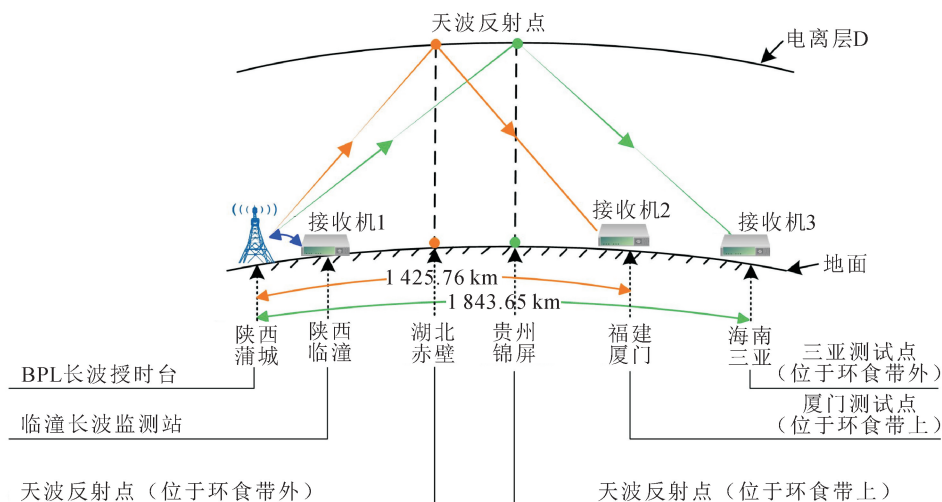


图 5 BPL 日环食观测传播路径图

研究发现,在日环食不同阶段(初亏、食甚、复圆),三亚测试点 TOA 数据以及厦门测试点场强数据均表现出先增大后减小的趋势。该变化与电离层总电子含量变化引起的电离层等效高度变化相吻合,表明日环食对 BPL 授时信号 TOA 和场强产生影响,日环食对位于环食带上的天波反射点和接收点授时性能产生了影响^[18]。图 6 为三亚测试点日环食前后 TOA 变化对比,图 7 为厦门测试点日环食前后场强变化对比。

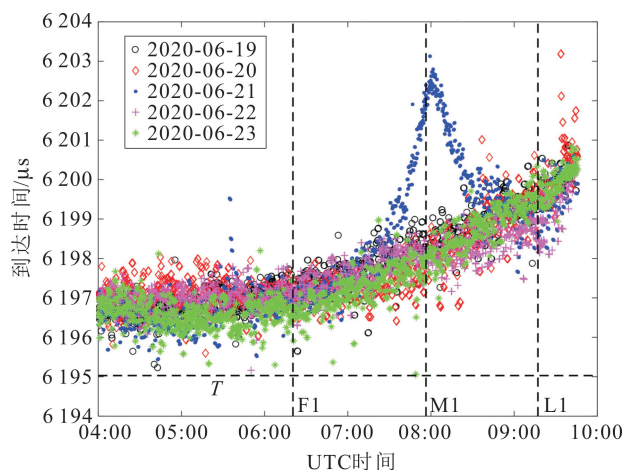


图 6 三亚测试点日环食前后 TOA 变化对比

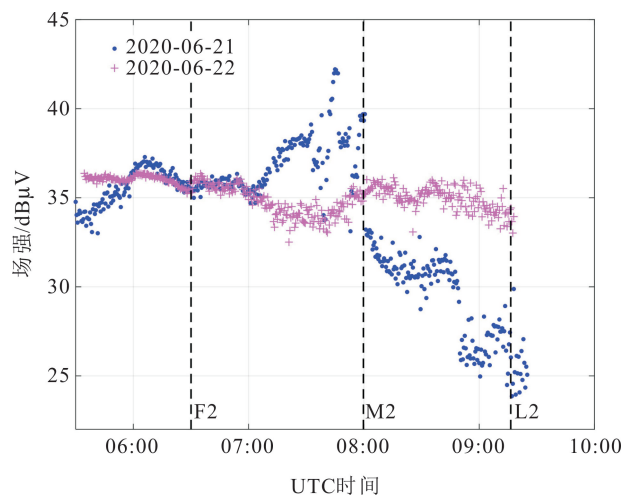


图 7 厦门测试点日环食前后场强变化对比

2022 年 8 月 16 日,国家授时中心承担的中国科学院重大科技基础设施维修改造项目通过验收^[19]。该项目建设了 4 个固定监测站(南京、武汉、成都和兰州)、1 个移动巡测平台和 1 个数据处理中心(西安)。上述监测设施的建成,使国家授时中心具备了应对各种异常状态的授时监测能力。图 8 为移动巡测平台,图 9 为 2022 年临潼长波监测站。



图 8 移动巡测平台



图 9 临潼长波监测站(2022 年)

1.4 2017 年至今的全域化监测网络,实现西部关键区域覆盖

为提升我国西部地区的高精度时间服务安全性与可靠性,国家重大科技基础设施建设“十三五”规划——高精度地基授时系统在西部地区建设 3 个增强型罗兰授时台^[20]。

围绕该系统建设需求,国家授时中心提出了全域化监测方案,建设敦煌、库尔勒、拉萨、西安 4 个新型监测站。通过对天地波的综合监测,实时分析各授时台信号发播质量,并及时向授时台反馈异常信息,以保障授时信号的稳定可靠。构建覆盖全面、响应迅速的信号质量监测、分析与评估体系,保障授时安全。

2017—2018 年选址验证阶段,项目团队先后在陕西富平和陕西蒲城开展近场接收实验(2017 年 11 月),在甘肃敦煌和陕西泾阳开展多场景干扰测试(2018 年 6 月),据此科学确定敦煌、库尔勒和拉萨授时监测站选址^[21]。2023 年 5 月完成工程设计方案论证^[22]。2023 年 8 月通过关键技术评审^[23]。2024 年 9 月敦煌授时监测站进入试运行阶段^[24]。

通过严格的选址验证、技术论证和工程管理,构建了覆盖西部关键区域的全域授时监测网络,为提升国家时频体系的安全性和可靠性提供了重要保障,其系统性的建设经验对类似重大科技基础设施项目具有重要参考价值。

2 卫星授时监测技术发展

我国卫星授时监测随着北斗一号、北斗二号和北斗三号的建设逐步完善,并与系统建设同步发展。授时监测数据的拓展应用对卫星导航系统的发展起到了重要作用。

2.1 2001 年,完成北斗一号时间标校站建设,实现了北斗授时监测与北斗系统时间溯源

“北斗一号”卫星导航系统是我国第一代自主研发的卫星导航定位系统,具备定位、授时和通信三大核心功能^[25]。为保障其授时服务的准确性和可溯源性,系统时间(即北斗时)需与国家标准时间 UTC(NTSC)保持高度同步。为此,在“北斗一号”地面系统建设中,为实现授时监测站与时间溯源一体化建设,国家授时中心设立定时标校站,实现对系统授时性能的连续监测与定期校准。

定时标校站由定时标校机、定时终端以及 UTC(NTSC)时频参考信号组成。定时标校机接收并解调由主控站发出,经卫星转发的导航信号,生成与北斗系统时间相关的定时信号,定时终端输入 UTC(NTSC)的标准时间信号,解算北斗系统时间与 UTC(NTSC)的偏差,比对结果经定时标校机发送,卫星转发后,回传至主控站,从而标校站实现了北斗一号的系统时间向国家标准时间 UTC(NTSC)的溯源。

“北斗一号”定时标校站建设于 2001 年启动,2001 年 12 月通过验收,2002 年 1 月 1 日 0 时起对北斗一号的系统时间实施标校,保障了“北斗一号”2002 年 1 月 1 日 0 时的正式开通。

2008 年 12 月 19 日,定时标校站完成升级改造,改造后实现了北斗系统时与 UTC(NTSC)时差的实时监测,提升了时间标校的可信度。这一系列建设成果不仅为北斗一号系统提供了可靠的时间溯源保障,也为后续北斗系统的时间保持体系建设奠定了重要基础,在我国卫星导航发展历程中具有里程碑意义。

2.2 2014 年,完成 GNSS 系统时间偏差监测平台建设,开始了系统时间偏差监测

为满足多系统组合导航的需要,国家授时中心开展了卫星导航系统的系统时间偏差监测技术研究。

在国家 863 项目支持下,国家授时中心建立了 GPST(Global Positioning System Time)与 UTC(NTSC)时差监测实验系统,开展 GPS(Global Positioning System)系统时间监测方法研究。该项目于 2011 年 7 月 23 日通过验收,成功实现了对 GPS 系统时间的监测。

2014 年 4 月 18 日,国家授时中心完成系统升级,将原有单站系统升级为长春、喀什和西安 3 站联测的多站同步监测系统。升级后监测能力从单一 GPS 系统扩展到同时监测 GPS 和 GLONASS(GLObal NAvigation Satellite System)系统,监测不确定度由 50 ns 提升至 5 ns^[26]。

该系统以 UTC(NTSC)为参考标准,于 2013 年初全面开展了 GNSS 时间监测工作。国家授时中心发现监测结果与国际权度局 BIPM 的监测结果存在 210 ns 的偏差。研究人员通过多种技术手段验证了我国监测方法的科学性与准确性,最终在 2013 年 9 月 10 日获得认可。

此后,BIPM 对其接收机系统进行重新校准和改进数据处理算法。2017 年 3 月 7 日发布的新版 T 公报监测结果证实了我国研究团队的正确性^[27]。这一技术验证过程不仅确立了我国 GNSS 时差监测系统的国际地位,更彰显了我国在时间频率领域的技术实力,为全球卫星导航时间监测提供了重要参考基准。该成果标志着我国在 GNSS 系统时间偏差监测领域从技术跟随者转变为具有国际话语权的技术引领者。图 10 给出了 BIPM 调整后监测结果与国家授时中心监测结果的一致性。

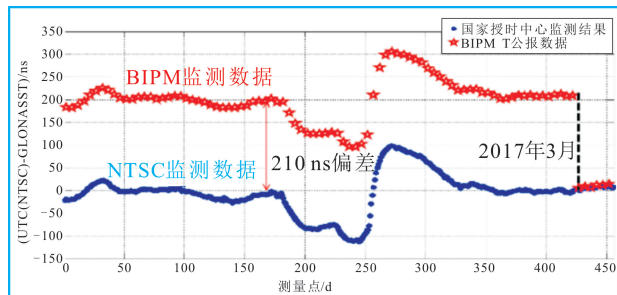


图 10 BIPM 调整后的监测结果与国家授时中心监测结果一致(201601—201703)

2014 年 9 月 15 日,转发式卫星导航试验系统 GNSS 系统时间偏差监测子系统通过验收。该系统将原有的 3 站监测系统优化为西安单站监测系统,监测对象扩展至北斗卫星导航系统。系统以国家授时中心标准时间频率参考源 UTC(NTSC)为参考信号,通过接收 GNSS 空间信号,对 GNSS 系统时间进行监测,获得 UTC(NTSC)与 GPST/GLO-NASST (GLObal NAvigation Satellite System Time)/BDT(BeiDou Time)等系统的时间偏差^[28]。监测精度 RMS(root mean square)分别达到了 2.85 ns(GPST)、3.81 ns(GLONASST)和 3.01 ns(BDT)。

GNSS 系统时间偏差对于多系统导航,分析导航系统完好性有重要的作用。2015 年,为确保 GNSS 系统时间偏差的监测性能和规范监测过程,国家授时中心启动了 GNSS 时间偏差监测能力的认证工作。通过制定完整的操作规范,优化时差监测技术流程,建立监测结果核查机制,显著提升了监测工作的标准化水平。图 11 为多站联合监测软件界面。



图 11 多站联合监测软件界面

2015 年 7 月,国家授时中心 GNSS 系统时间偏差监测能力、国家标准时间 UTC(NTSC)保持能力、长短波授时能力和世界时发播能力通过了总装备部组织的现场考察。2015 年 11 月 19 日获得认可证书,进行正式运行。2023 年,获得新的为军服务认证。

这一系列认证工作不仅确保了 GNSS 系统时间偏差监测的可靠性和准确性,也为多系统导航应用和导航系统完好性分析提供了重要技术支撑,标志着我国在卫星导航时间监测领域已建立起完善的标准化管理体系。

我国卫星导航系统的系统时间监测实现了从

实验研究到业务化运行的跨越,在监测范围、精度和可靠性等方面均取得重大突破,为后续多模卫星导航系统授时监测奠定了重要技术基础。

2.3 2014 年,完成卫星授时性能监测系统建设,开始卫星授时的监测与评估

国家授时中心从 2010 年初开展北斗授时性能评估技术研究,从用户角度出发,提出卫星广播 UTC 时间与实际 UTC 偏差测试的概念和方法。以国家标准时间 UTC(NTSC)为参考,监测北斗、GPS 等全球系统的卫星广播的时间与 UTC 的偏差,并根据监测数据对北斗、GPS 导航系统的授时性能进行评估,监测不确定度优于 5 ns(RMS)。该系统建成以后,于 2016 年完成北斗全球系统试验星 I6、G7 的授时性能测试,确认了北斗 I6、G7 星的授时性能^[29-30]。

该系统的建设与运行,不仅提升了我国对卫星导航系统时间偏差的监测能力,也为北斗系统授时性能的客观评估提供了数据支撑和技术支撑,进一步推动了我国在卫星导航与授时领域的自主可控与技术进步。

为确保北斗三号基本系统在 2018 年 12 月 27 日正式开通服务前其授时性能满足设计要求,特别是在涵盖“一带一路”沿线国家和地区的应用背景下,开展科学、准确的授时性能评估具有重要意义。2018 年 11 月 15 日,国家授时中心基于临潼监测站与德国物理技术研究院 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)监测站监测数据,开展了北斗三号授时性能联合评估。图 12 为北斗三号基本系统授时性能评估结果。

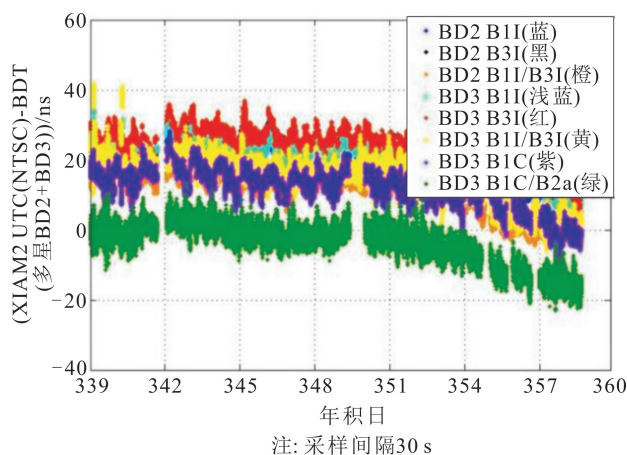


图 12 北斗三号基本系统授时性能评估结果

评估结果表明北斗三号系统授时性能完全符合设计要求^[31]。此次评估工作不仅验证了北斗三号的授时性能,更通过国际合作测试的方式,彰显了我国卫星导航系统的国际服务能力,为北斗系统的全球化应用奠定了坚实基础。

2.4 2020 年,全球卫星导航系统时间监测评估系统网站开通,可提供多种数据服务

自 2014 年起,国家授时中心研究团队通过承担北斗专项关键技术攻关课题,创新性地将 GNSS 系统时间偏差监测与卫星导航授时性能评估技术进行融合。研究团队基于北斗区域系统监测经验,面向北斗三号系统需求,建立了集 GNSS 系统时差监测、授时性能评估、卫星发射通道偏差监测及授时增强信息生成于一体的综合监测体系。

2020 年 10 月 1 日,全球卫星导航系统时间监测评估系统网站正式开通,实现了对全球及部分区域卫星导航系统的多频点连续监测和数据产品发布。2022 年,该系统成功监测到伽利略系统时间异常。监测数据表明,2024 年至今,UTC(NTSC) — BDT 时差保持在 ± 10 ns 以内^[32]。图 13 为全球卫星导航系统时间监测评估系统网站界面局部截图,图 14 为全球卫星导航系统时间监测评估系统数据特征。



图 13 全球卫星导航系统时间监测评估系统网站界面局部截图



图 14 全球卫星导航系统时间监测评估系统数据特征

依托该系统建设成果,国家授时中心进一步拓展海外监测能力,于 2022 年建成北斗授时海外监测

站(位于白俄罗斯),并在 2023 年协助巴基斯坦建设星基增强授时监测站。2024 年 8 月起监测站连续稳定运行,标志着我国在构建全球性北斗授时监测网络方面迈出了坚实步伐,为北斗系统“走出去”提供了有力支撑^[33]。

3 综合监测系统构建

围绕国家时间频率体系建设需求,国家授时中心开展授时系统综合监测平台研制,该平台基于统一的国家标准时间 UTC(NTSC)^[34-38],实现了对长波、短波、低频时码、卫星等无线授时系统^[39-40],以及光纤、网络、电话等有线授时方式的全面系统性监测,监测对象覆盖地面、空中、有线、无线等共 9 种授时手段,构建了参考统一、评价指标统一的“一张网”授时监测体系。

在建设过程中,为规范监测质量,团队制定了《无线电授时性能评价与发布要求》、《长波授时信号监测技术要求》、《数字卫星电视授时监测接收机通用技术要求》、《BPM 短波授时接收设备技术要求及测试方法》4 个工程标准,规范了授时监测方法与评估流程。

为提高监测数据效用,该平台提供实时数据流和事后文件发布两种数据发布手段。用户不但能够实时确认各种授时信号的完好性,还能够通过对授时偏差的改正提高授时精度,并利用事后发布的精度数据实现对授时偏差的高精度修正,支撑事后的精密研究与应用。

在监测数据融合方面,该平台根据授时系统的服务精度,确定融合的优先级。优先考虑精度较高且精度相近的授时系统监测数据的融合,例如亚纳秒量级的光纤与纳秒量级 GNSS 的融合,GNSS 与几十纳秒量级的长波授时、数字电视授时的融合。在融合算法方面,根据多源异构数据的特点,先对数据进行预处理,再采用自适应 Kalman 滤波或机器学习等类似算法实现对多路数据的融合^[41-43]。

2023 年 8 月 15 日该平台通过验收,标志着我国首次建成天地一体化的授时系统综合监测体系。该平台实现了对卫星、长波、短波、低频时码、广播网、数字电视、网络、电话和光纤共 9 种授时方法的监测。不仅对已有的授时监测进行了扩展提升,同时对新建的电话、广播网等授时方法实现了监测。图 15 为授时系统综合监测平台软件界面。基于该

平台可以实时掌握各类授时系统的授时服务性能,分析授时服务的可靠性和稳定性,为融合使用多种授时手段提供了重要的数据支撑,对国家时间频率体系的建设具有里程碑意义。



图 15 授时系统综合监测平台软件界面

4 结语

授时监测技术历经数十年发展,长波授时监测与卫星授时监测沿着各自的技术路径持续突破,始终以应对授时系统面临的安全挑战为核心驱动力,共同构筑起保障授时安全性的坚实屏障。综合监测系统实现了天地一体化的协同融合,构建起覆盖多手段、多场景的国家授时监测体系。

从技术演进来看,授时监测技术既各自依托自身原理不断突破,又在抗干扰、冗余备份等方面形成互补,共同应对复杂电磁环境、极端天气及人为恶意攻击等多元威胁。实践表明,授时监测技术的每一次进步,都是对授时系统潜在安全漏洞的及时封堵,其本质都是以技术手段筑牢授时安全的防线。

面向未来,随着授时服务在电力调度、金融交易、智能交通等关键基础设施中的深度嵌入,授时安全的内涵将从“精度可靠”向“韧性可信”拓展。为此,授时监测体系亟需向智能化与网络化方向升级,可引入人工智能与机器学习方法,实现对海量监测数据的实时异常检测、故障根因推理与告警预警。在此背景下,长波与卫星授时监测技术的持续协同创新,仍将作为筑牢国家时间基准安全底线的核心支撑,为构建高韧性、高可信、自适应的新一代授时安全体系提供不可替代的技术屏障。

参考文献:

[1] 许龙霞. 一种高精度 GNSS 单向授时方法实现研究

[J]. 时间频率学报, 2016, 39(4): 290-299.

- [2] 陈颖鸣. 增强型罗兰授时监测评估方法研究与系统设计[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2022.
- [3] 严建华. 罗兰 C 授时监测技术研究[J]. 现代导航, 2013, 4(5): 331-337.
- [4] 席欢. 美国国土安全部发布 PNT 备份能力报告[J]. 全球定位系统, 2020, 45(3): 27.
- [5] JOHNSON G W, SWASZEK P F, HARTNETT R J, et al. An evaluation of eLoran as a backup to GPS [C]//2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security, Woburn; IEEE, 2007.
- [6] JOHNSON G, SHALAEV R, HARTNETT R, et al. Can LORAN meet GPS backup requirements[J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, 2005, 20(2): 3-12.
- [7] JOHNSON G W, SWASZEK P, HARTNETT R, et al. Navigating harbors at high accuracy without GPS: eLoran proof-of-concept on the Thames River [C]//Institute of Navigation National Technical Meeting, Geneva: [s. n.], 2007: 1201-1211.
- [8] NARKUS-KRAMER M, SCALES W, CALLE E. Evaluating eLORAN as a backup for surveillance and navigation: A comparative cost analysis [C]//2009 IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference, Orlando: IEEE, 2009.
- [9] BASKERD S, WILLIAMS D P. Navigating eLoran: Challenges and the way forward [C]//Proceedings of the XVIIth IALA Conference, Cape Town: International Organization for Marine Aids to Navigation, 2010.
- [10] CABINET OFFICE. Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Satellite Positioning, Navigation and Timing Service (IS-QZSS-PNT-003) [S]. 2018.
- [11] 张洪源, 徐兵, 李海波, 等. 国家综合 PNT 体系中的罗兰 C 导航系统[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(3): 6-11+74.
- [12] 漆贯荣, 郭际, 主编. 中国科学院陕西天文台: 1966—2000 [G]. 西安: 中国科学院陕西天文台, 2001.
- [13] 中国科学院. 长波授时台国家级技术鉴定意见及技术审查报告[Z]. 北京: 中国科学院, 1986.
- [14] 杜鸿. 长河二号导航系统简介与发展趋势[J]. 科技资讯, 2010(22): 6.
- [15] 李孝辉, 窦忠, 赵晓辉. 北京时间——长波授时系统 [M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2015: 60-63.
- [16] 高海军. 质量手册 Q/NTSC-2006 [Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2006.

- [17] 2026-06-21 日环食. 国家天文科学数据中心[EB/OL]. (2020-06-21) [2025-08-05]. https://nadc.china-vol.org/eclipse/?eclipse_filter=3&start_date=2020-06-21&end_date=2020-06-21.
- [18] CHEN Y M, FENG P, LIU C H, et al. Impact of the annular solar eclipse on June 21, 2020 on BPL time service performance[J]. AIP Advances, 2021(11): 115003.
- [19] 中国科学院国家授时中心. 中国科学院重大科技基础设施维修改造项目“BPL 长波授时监测系统维修改造”验收意见[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2022.
- [20] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于高精度地基授时系统国家重大科技基础设施项目建议书的批复. 发改高技[2018]777 号[Z]. 北京: 国家发展改革委, 2028.
- [21] 刘长虹, 朱峰, 陈颖鸣, 等. BPL 长波授时系统近场、咸阳机场等地测试报告[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2018.
- [22] 中国科学院国家授时中心. 国家重大科技基础设施“高精度地基授时系统”罗兰授时监测分系统增强型罗兰授时监测系统任务包工程设计方案评审意见[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2023.
- [23] 中国科学院国家授时中心. 高精度地基授时系统罗兰授时监测分系统增强型罗兰授时监测系统任务包研制技术要求评审意见[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2023.
- [24] 中华人民共和国中央人民政府. 高精度地基授时系统敦煌长波授时台建成并成功试播[EB/OL]. (2024-09-30) [2025-08-05]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202409/content_6977814.htm.
- [25] 袁冰清, 蔡芸云, 王英翔. 浅析北斗卫星导航系统[J]. 中国无线电, 2022(2): 46-47.
- [26] 张慧君. GNSS 系统时差监测子系统验收报告[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2014.
- [27] BIPM. BIPM. Circular T[EB/OL]. (2017-04-07) [2025-08-05]. <https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/Circular-T/cirhtml/cirt.351.html>.
- [28] 张慧君, 李孝辉, 许龙霞. GNSS 系统时间偏差监测与预报[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集(下), 北京: 中国卫星导航学术年会组委会, 2010: 587-592.
- [29] 朱峰. 北斗全球系统 I6 试验星授时性能测试报告[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2016.
- [30] 朱峰. 北斗全球系统 G7 试验星授时性能测试报告[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2016.
- [31] 张慧君. 北斗三号基本系统授时性能评估报告[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2018.
- [32] 中国科学院国家授时中心. 时间频率公报[EB/OL]. (2025-03-06) [2025-07-09]. <http://tfbu.ntsc.ac.cn>.
- [33] 张慧君. 巴基斯坦星基增强授时分系统验收报告[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2025.
- [34] 刘娅, 李孝辉, 赵志雄, 等. 基于北斗卫星的纳秒级全球授时系统[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(3): 14-22.
- [35] 刘娅, 陈瑞琼, 赵志雄, 等. UTC(NTSC)远程高精度复现方法研究及工程实现[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 178-192.
- [36] 陈瑞琼, 刘娅, 李孝辉. 一种基于高精度国家标准时间远程复现方法[J]. 武汉大学学报, 2018, 43(2): 188-192.
- [37] 许龙霞, 樊多盛, 刘娅, 等. GNSS 超快速产品在全球标准时间复现中的应用[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(1): 134-140.
- [38] 陈瑞琼, 刘娅, 李孝辉. 基于改进的卫星共视法的远程时间比对研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 757-763.
- [39] 阮许新, 许龙霞, 刘娅, 等. GNSS UTC0 参数演变分析与对比评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(2): 173-179.
- [40] 许龙霞, 刘娅, 李孝辉. GNSS 系统时间偏差参数分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(4): 350-353+397.
- [41] GUAN X L, WU J F, LI Y J, et al. Research on the adaptive fusion timing algorithm for BeiDou and LORAN based on the EKF[J]. Remote Sensing, 2025, 17(2): 246.
- [42] 凡净, 潘骏琪, 刘施诗, 等. 基于 GNSS 与分布式光纤传感的滑坡实时形变监测与早期预警研究[J]. 地理科学研究, 2025, 14(5): 1119-1133.
- [43] 毛正君, 王木楠, 马旭, 等. 基于数据融合的梯田型黄土滑坡隐患监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(9): 1848-1863.