

引用格式:冯平,赵凡,丁晓峰,等.中国低频时码授时技术发展[J].时间频率学报,2026,49(1):99-104.

中国低频时码授时技术发展

冯平^{1,2,3}, 赵凡^{1,2,3}, 丁晓峰^{1,2}, 王昕^{1,2}, 黄璐希^{1,2},
刘强^{1,2}, 李孝辉^{1,2,3}, 张首刚^{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:低频时码授时系统是我国授时体系的重要组成部分。系统梳理了自 1994 年以来我国低频时码授时的技术特征演进和工程建设进程,分析了我国低频时码授时从试验探索到工程应用的跨越式发展过程。技术革新方面,在信号体制、信号接收、信号测量和传播时延建模等关键技术领域取得重大突破,授时精度从初期的百毫秒提升至百微秒。在推广应用方面,服务范围从计时行业拓展至电力、通信、金融、国防等关键领域。随着新低频时码授时台建设的推进和智能化技术的深度融合,低频时码授时系统将实现重点区域覆盖,为国家经济建设、国防安全和低空经济发展提供更加精准、可靠的授时服务。

关键词:BPC;低频时码;授时

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0099-06

Development of low-frequency time-code time service system in China

FENG Ping^{1,2,3}, ZHAO Fan^{1,2,3}, DING Xiao-feng^{1,2}, WANG Xin^{1,2}, HUANG Lu-xi^{1,2},
LIU Qiang^{1,2}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, ZHANG Shou-gang^{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: The low-frequency time-code timing system is an important component of China's timing system. This study systematically reviews the technological characteristics evolution and construction process of China's low-frequency time-code timing since 1994, and analyzes the leapfrog development process of China's low-frequency time-code timing from experimental exploration to engineering application. In terms of technological innovation, significant breakthroughs have been made in key technologies such as signal system, signal reception, signal measurement, and propagation time delay modeling. The timing accuracy has been improved from the initial hundreds of milliseconds to hundreds of microseconds. In terms of application promotion, the service scope has expanded from the timing industry to key fields such as power, communication, finance, and national defense. With the advancement of new low-frequency time-code timing stations and the deep integration of intelligent technologies, the low-frequency time-code timing system will achieve coverage in key areas, providing more accurate and reliable

收稿日期:2025-10-28;接受日期:2025-12-16

基金项目:广东科技创新平台基金(2019B090904006)

作者简介:冯平,男,博士,研究员,主要从事无线电授时研究。

timing services for national economic construction, national defense security, and low-altitude economic development.

Keywords: BPC; low-frequency time-code; time service

低频时码授时是国际电信联盟(ITU)鼓励采用的授时技术之一,信号传播稳定,覆盖范围大^[1-2]。我国目前已有的低频时码授时系统(商丘台)发播的授时信号覆盖了华北、华中及长江三角洲等经济较为发达和人口密集地区,为军民用户提供了可靠的授时服务。

低频时码授时技术与其他授时技术相比,最大的优势为终端设备功耗低、使用方便快捷^[3-4]。同时,低频时码信号具有较强的绕射性能和抗干扰能力,可实现水下数米、室内、城市峡谷等区域的授时。

中国科学院国家授时中心,承担着我国标准时间的产生、保持和发播任务,建设和运行着低频时码授时系统基础设施,为我国通信、电力、交通、灾害预警、股票交易、航空航天、国防等诸多行业 and 部门提供了可靠的授时服务,为我国国家时间频率体系建设和发展作出了重要贡献,基本满足了国家经济发展、国防建设和国家安全的需求^[5]。

本文从 1994 年中国低频时码授时技术研究开始,对我国低频时码授时技术的发展历程进行了分析。

1 起源探索阶段

20 世纪 90 年代,中国开始了低频时码授时技术研究。1994 年 8 月中国科学院陕西天文台(2001 年更名为中国科学院国家授时中心)提出“民用低频时码授时可行性研究”报告,1996 年和企业签订“关于联合开发低频时码技术的合作议定书”,陕西天文台决定在 BPL(长波台呼号)长波授时台发播的间隙进行低频时码授时的发播试验,以院企合作方式建设实用的低频时码授时试验发播台。

1997 年底专门研制的大功率全固态低频发射机在蒲城试验台装机,1998 年 5 月低频时码试验系统联调成功,进入系统调优阶段^[6]。该试验台基于 BPL 长波授时天线,研制出国内首套 50 kW 全固态大功率发射机,用于 68.5 kHz 的载波开始发播低频时码授时信号,呼号 BPC^[7]。低频时码蒲城试验台在信号体制上采用四进制编码格式,调幅度为 75%,在信息传输效率上是国外同类授时台的 3 倍^[8]。

1999 年 5 月 1 日,低频时码授时蒲城试验台开始运转发播,2000 年开展外场测试试验,完成了其系统性能验证。这使我国成为了继德国、英国、美国之后世界上第 4 个发射低频时码授时信号的国家。2002 年 4 月 1 日,低频时码授时蒲城试验台开始进入常规发播阶段,每天发播时间为 6 个半小时^[9]。

低频时码授时技术的推广,需要各种应用终端,其中电波钟表成为典型的应用终端。在试验台建成后,中国科学院陕西天文台、西安高华电气实业有限公司和中国轻工业钟表研究所开始了电波钟表和相关接收终端的研制。1999 年 12 月 31 日,以低频时码授时终端为标准时间源的中华世纪坛世纪钟准时敲响^[10],开启了低频时码授时发播标准时间公共纪念建筑领域的应用。

2002 年 4 月底,深圳国际钟表博览会上举行“国产电波钟表新闻发布会”,同年 10 月 20 日,在北京国际钟表展览会中国电波钟表技术研讨会上,西安高华电气实业有限公司、中国科学院国家授时中心及中国轻工业钟表研究所联合研制推出的“大秦”牌电波钟表及相关产品再次亮相^[11]。至此,我国自主研发的电波钟表作为低频时码授时的主要应用终端,其产品性能趋于成熟,电波钟表相关产业链初具雏形,具有一定生产规模且推广市场应用的能力。

电波钟表是通过低频无线电波将标准北京时间展示给用户,掀开了我国消费者使用本国码电波表的历史篇章,标志着“中国新计时”时代已经到来。

2 自主奠基阶段

由于低频时码试验台与 BPL 长波授时系统采用天线分时共用,发播功率小,且发播时间受限。2000 年起国家授时中心开始考虑规划建设中国专用低频时码授时台。2004 年 3 月,国家授时中心组织国内专家召开的“低频时码系统优化研讨会”,推动了低频时码授时技术研究的深化。

2005 年,中国科学院基础局批准院重要方向项目“低频时码授时系统研究”^[12],国家授时中心开始了低频时码授时技术系统性深入研究。在发射机

系统优化上实现了输出功率 100 kW 向下连续可调,天线馈线系统与发射机参数匹配优化,有效提高发射效率;在激励器设计方面,信号控制系统对新激励器进行优化,由不对称连接改为对称连接,和发射机联接后提高了信噪比,满足了系统电磁兼容。在信号体制设计方面,优选了频率、调制方法和调制制度,重新设计了信号体制,采用多态位编码技术,形成了一种新的格式方案,同时也得到国外同行专家的赞扬^[13]。

在终端应用推广方面,面向不同用户形成了系列化的终端设备,已研制成功定时仪器、组合时间服务器、定时模块、手表、挂钟和传输技术数种,并作了验证性试用。在民用计时产品方面已形成产业链,推出了升级换代产品。

在低频电波传播和 D 电离层研究方面,首次进行了低频时码授时信号从华北到东北的大规模实验测量,电波传播实验信号实测半径超过 3 000 km,行程超过 60 000 km,积累了丰富资料,验证了低频电波的传播规律,对 D 电离层的规律有了新的发现,实验数据及结果填补了国内空白,并指导了台站建设实践^[13]。

2006 年 12 月,国家授时中心研制出基于虚拟仪器技术的低频时码授时测量系统,低频时码授时测量系统基于授时信号的特性,具有携带方便、可存储异常授时信号波形、数据连续记录、能直观反映待测信号的时频特性等功能,场强测量精度优于 1 dB μ V/m,载波相位测量精度优于 1 μ s,解决了低频时码授时信号场强测量的问题,并将低频时码授时测量技术推广至工程应用^[14]。利用低频时码授时测量系统可以为研究 D 电离层特性及低频电波的传播规律提供实验样本,并为 ITU 的 2006 年新课题草案第 7/6 号文件和第 7/35 号文件所提出低频场强测量、台站干扰、电干扰源对低频接收的影响等问题提出一种解决方案^[15]。

2006 年 2 月 16 日,国家授时中心与高华科技有限公司签订第二阶段合作协议书,同年 10 月 13 日商丘低频时码授时发播台在河南商丘开工建设。2007 年 5 月 18 日,商丘低频时码授时发播台系统联调成功并通过 24 h 烤机试验。2007 年 12 月 26 日,国家授时中心、西安高华科技有限公司在河南商丘市召开了“中国科学院国家授时中心商丘低频时码发播台工程验收会”,与会专家一致认定商丘发播台的各项运行指标符合合同设计要求^[16]。新

建大功率发射系统的发播功率提升至 100 kW,地波信号覆盖 1 000 km,天波信号覆盖 3 000 km,定时精度为亚毫秒量级^[16]。2008 年 1 月 1 日开始每天 21 h 的正式发播,图 1 为商丘低频时码授时台。

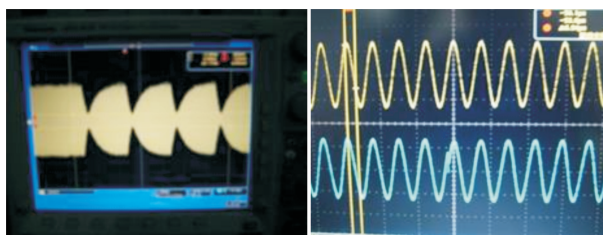


(a) 商丘低频时码授时台园区图 (b) 发播控制机房图

图 1 商丘低频时码授时台

商丘低频时码授时发播台发播的 BPC 授时信号,白天能可靠的覆盖北京、上海、西安等区域,在夜间传播条件较好的时候,能够覆盖我国大陆绝大多数地区^[17]。商丘台的成功建设奠定了我国电波钟表事业全面发展的基石,是我国电波钟表事业发展又一划时代的里程碑。

为了充分利用低频频率资源,针对现有低频时码授时应用中定时精度、抗干扰性及覆盖范围等方面的不足,2008 年国家授时中心开始了低频时码系统附加扩频授时技术的研究^[18]。在空闲载波上附加扩频调相的方法,相比原有单一脉宽调幅体制,大大提高了接收信噪比,有效增强终端解码的可靠性,定时精度从 1 ms 提升到 100 μ s。2010 年 7 月,国家授时中心在商丘授时台上完成了调制实验,验证了低频时码授时发射系统具备载波相位调制的能力,对于低频时码授时系统附加扩频的调制模式具备重要的工程应用价值,验证了设计方案的可行性^[19]。图 2 为附加扩频调相实验载波变化示意图。



(a) 信号图 (b) 信号载波时延变换图

图 2 附加扩频调相实验载波变化示意图

从商丘台发播开始,低频时码授时服务的用户群呈几何级数增长,从计时行业逐渐发展到电信、电力、金融、电子政务、智慧交通等行业,产业链已经完善^[20]。

2011 年 10 月 31 日,教育部发出《国家教育考试标准化考点暂行规范》^[21],规定“校准时钟”,电波

钟能够自动得到标准时间并每天自动修正内置时间与标准时间信息取得一致,而且价格低廉、使用方便。电波钟属于低频时码技术的典型应用产品,电波钟通过接收并解析低频时码信号,实现高精度、全自动、免维护的时间校准,因此,电波钟进入了各省市设计规划标准化考场建设方案中。2013年,江苏省、重庆市、安徽省、辽宁省等地区的标准化考场建设中都进行了电波钟项目的招投标,使考场的计时设备实现了标准化^[22]。

2012年8月27日,中国钟表协会低频时码电波钟表专业委员会成立大会在北京召开^[23]。来自全国各地电波钟表(含机芯)及上下游共17家企业21名代表出席了会议。2013年3月5日,我国钟表行业首家“电波钟表工程实验室”项目获批^[24]。电波钟表已成为政府、教育、军队等行业的首选计时仪器,电波钟表也被作为未来计时仪器的发展方向。

3 技术拓展阶段

2022年5月,低频时码授时移动测试平台投入使用,用于机动、灵活的综合监测低频时码授时系统的各项性能指标,包括覆盖范围、信号质量等,为低频时码授时发播质量进行综合分析,支撑低频时码授时系统综合性能分析和研究^[25]。

自低频时码授时商丘台发播以来,低频时码授时系统在终端标校方面一直处于空白,限制了低频时码授时技术进一步的产业应用。2022年6月,国家授时中心建立了低频时码授时终端标校平台^[26],实现了低频时码授时终端设备标校和接收天线测试,具备低频信号电波传播模拟和低频信号干扰分析能力。图3为低频时码授时终端标校平台。

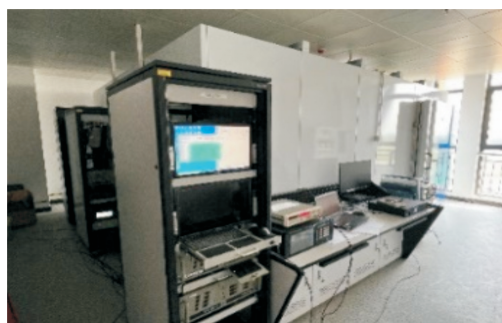


图3 低频时码授时终端标校平台

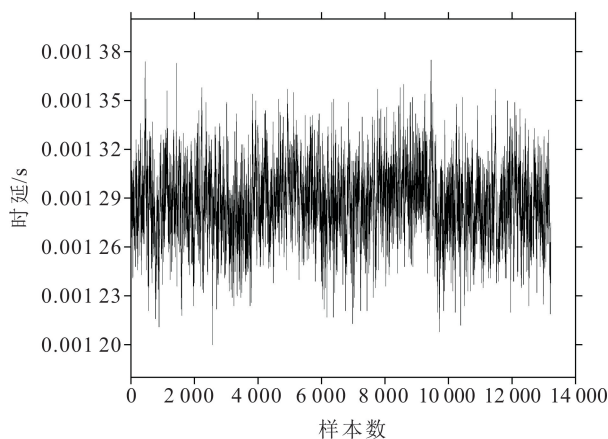
2022年7月,国家授时中心建成低频时码授时系统运控中心^[27],实现低频时码授时系统运行可视化(图4为可视化界面),提升监测站的自动化和无人值守能力。同期,建成低频时码数据应用中心,

实现低频时码授时系统各类数据的管理、分类、存储以及数据库建设,提供业务数据长期存储保障能力。



图4 低频时码运控可视化界面

低频时码定时能力是低频时码授时系统授时性能的直接体现,它是系统的核心指标。过去20年的发展,低频时码授时系统定时精度从开始的100 ms提升到100 μ s,达到了国际先进水平^[28]。2022年8月,基于现代数字接收技术,国家授时中心研制成功高精度、多通道的监测型低频时码授时接收机,可同时接收商丘以及日本JJY(日本低频时码授时台呼号)台的信号,地波范围实测定时精度达22.8 μ s,突破了国外最好的100 μ s定时精度^[29]。图5为低频时码信号授时性能变化曲线。



注:2022年9月19日洛阳(距离商丘台站303 km)
测试时间10:20至14:00 SNR=28

图5 低频时码信号授时性能变化曲线

2022年9月,国家授时中心建成了低频时码授时的西安、三亚和武汉监测站,实时监测商丘授时台的信号,并具备兼容新建台站的监测能力。图6为低频时码监测站机房图。低频时码授时监测站的建设,改变了以前只针对发播信号幅度线性变化的单一性能监测模式,建立了较为完备的低频时码授时信号监测体系,从监测要素方面,确立了授时

偏差、时码、场强、相位、码宽、信噪比和环境等监测要素;从授时性能监测、信号质量监测方面、异常反馈机制和信号评估 4 个方面,建立了覆盖授时偏差、时码比对、信号监测流程、反馈机制、综合评估低频时码授时发播质量^[29]。实现低频时码信号实时监测与数据分析,形成体系化的完好性监测与保障能力。



图 6 低频时码监测站机房图

为有效提升改善低频时码的授时性能,国家授时中心开展了低频时码信号传播时延研究。综合考虑了地波、天波传播路径及天地波干涉效应,2023 年 5 月初步建立了传播时延预测模型,传播时延的精确建模与预测是实现终端设备自动时延修正功能的核心技术基础,对于将低频时码授时精度从毫秒级提升至百微秒级具有决定性作用。2023 年 6 月至 2024 年 11 月开展了两次大范围低频时码信号授时时延测试,通过对不同距离下的时延数据进行分析,验证了时延模型理论预测值与实际测量结果之间的一致性,二者的线性相关系数 R^2 超过 0.99,82.5% 的模型预测误差控制在 $100\ \mu\text{s}$ 以内,为研究低频电波传播规律以及实现定时终端时延自动校准提供了重要的理论依据与数据支持^[30]。图 7 为实际测试时延与模型输出时延对比图。

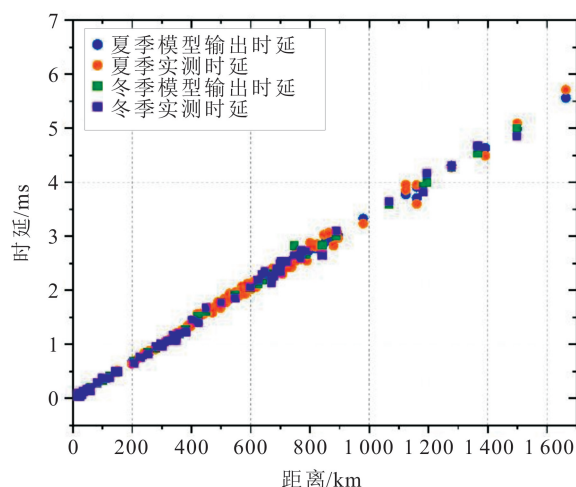


图 7 实际测试时延与模型输出时延对比图

4 创新发展阶段

面对构建天空地一体化的综合授时服务体系,以现有低频时码授时系统商丘台为基础,在未来需要对现有低频时码授时系统进行补充加强,从系统发展的角度来看,增补新的低频时码授时系统发播台站优先布局在我国人口稠密和工业发达的区域,与现有的低频时码商丘台构建国土重点区域覆盖的低频时码授时服务体系。

首先低频时码授时可覆盖室内甚至水下 10 m,在中低精度军事国防和经济生活中具有广泛的应用价值。同时,低频信号(30~120 kHz)凭借长波长、强绕射和高穿透能力,在复杂环境(如密集建筑、地下设施、森林等)中传播稳定,抗屏蔽、抗干扰及抗欺骗性能优于高频信号。结合大功率发射,其可为低空经济提供可靠、广覆盖的时间同步保障。

其次,在信号体制上进一步挖掘低频时码授时的潜能,新低频时码信号体制拟实时发播世界时信息。为扩充低频时码信息量,拟引入公共气象信息、有偿增值服务信息、自然灾害信息和短报文信息^[31],扩大低频时码授时信号的应用范围。

低频时码授时技术正朝着更加智能、高效的方向演进。实现了更高的自动化程度,能够自动适应环境变化并优化自身性能;低频时码接收芯片即将重新设计,新一代的接收芯片内容更为丰富、接口更为健全、尺寸和功耗更为适应新的需求,同时接收终端开展融入了大数据分析、边缘计算等人工智能的研究,支持更复杂的应用场景和运行模式。

5 结语

回顾我国低频时码授时技术的发展历程,自 20 世纪 90 年代至今,低频时码授时系统持续发展,授时不确定度也从毫秒量级提升至百微秒量级,高精度接收终端、信号模拟源、授时测量系统等核心设备也随之研发成功,这些都离不开中国科学院国家授时中心几代人的不懈努力。最近十年,攻克核心关键技术,自主研发的新一代激励器、信号测量设备、接收终端,信号发播控制性能达到国际前列,实现了自主自强的目标,可以预见,我国的 BPC(中国低频时码授时台呼号)电波信号将更加稳定、更加准确、更加安全。

致谢:

向中国低频时码授时技术的开拓者和奠基者

吴贵臣先生致敬,感谢许林生、张志勇、张元有、白燕、李志彤、樊旭升、王玉芬、朱春莲、王玲、权佳赟、李文浩、孙彦珂等同志在 BPC 授时技术革新、台站建设和运维中所作的贡献。

参考文献:

- [1] ITU-R. Draft revision of recommendation ITU-R/F.583-4 TIME CODE[Z]. Geneva:ITU,1997.
- [2] ITU-R. Interference between standard frequency and time signal services operating between 20 and 90 kHz [Z]. Geneva:ITU,2005.
- [3] 白燕,吴贵臣,许林生. 低频时码接收机高精度定时的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2006,20(3):102-105.
- [4] 刘军,吴贵臣. 低频时码信号正交解调技术研究[J]. 陕西天文台台刊(现《时间频率学报》),2001,24(1):22-29.
- [5] 吴贵臣. 关于近期国家授时体系和时间同步参考架[C]//2001 全国时间频率学术报告会,成都:中国宇航协会,2001.
- [6] 刘军,吴贵臣. 低频频段无线电频谱资源的应用与发展[C]//中国电子学会第七届学术年会,北京:中国电子学会,2008.
- [7] 刘军. 低频时码授时系统中的若干理论与工程设计实验研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心),2002.
- [8] 中国科学院国家授时中心. 国授发字[2004]15 号. 关于低频时码授时发播台设置的请示[Z]. 西安:中国科学院国家授时中心,2004.
- [9] 中国科学院国家授时中心. 国授发科字[2004]27 号. 关于申请建设低频时码发播台(BPC)的请示[Z]. 西安:中国科学院国家授时中心,2004.
- [10] 中国科学院国家授时中心. 2000 年 1 月 1 日,国家授时中心为中华世纪坛迎新千年提供标准计时[EB/OL]. (2023-01-01)[2025-10-27]. https://mp.weixin.qq.com/s?_biz=MzU5NDQ5MzgZMA==&mid=2247486605&idx=1&sn=ed4ab7601f144d439eeb1a70e61561fc&chksm=fe012464c976ad7276b916ee7bab3819584b3a358b1dcd811143c49cd229fd2b9911d28a140f&scene=27.
- [11] 佚名. 中国电波钟表正式上市拉开帷幕[J]. 钟表,2002(2):58.
- [12] 吴贵臣. 中国科学院知识创新工程重要项目“新一代低频时码授时系统研究”任务书[R]. 西安:中国科学院国家授时中心,2005.
- [13] 吴贵臣. 中国科学院知识创新工程重要方向性项目“新一代低频时码授时系统研究”总报告[R]. 西安:中国科学院国家授时中心,2008.
- [14] 刘智芳. 虚拟仪器技术在低频时码授时信号测量与监测中的应用研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心),2007.
- [15] ITU-R. Interference to the standard frequency and time signal service in the low-frequency band cause by noise from electrical sources[Z]. Geneva:ITU,2006.
- [16] 北京北广科技股份有限公司. 中国科学院国家授时中心商丘低频时码发播台工程验收报告[R]. 商丘:BPC 低频时码授时台,2007.
- [17] 赵晶. 低频时码信号场强测量方法及便携式场强仪的研究与设计[D]. 西安:中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心),2007.
- [18] 冯平. 低频时码系统附加扩频授时研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心),2008.
- [19] 张行勇,曹玉玻. 国家授时中心解决低频时码扩频授时关键技术[EB/OL]. (2009-12-18)[2025-10-20]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2009/12/226267.shtm>.
- [20] 刘舒. 电波钟表专用接收系统的设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [21] 教育部. 教考试[2011]2 号. 国家教育考试标准的考点规范(暂行)[Z]. 北京:教育部,2011.
- [22] 中国政府采购新闻网. 江苏政采构建全省标准化考场[EB/OL]. (2014-02-21)[2025-10-20]. <http://www.cgpnews.cn/articles/7812>.
- [23] 中国钟表协会. 中国钟表协会 2012 年工作总结和 2013 年工作计划[EB/OL]. (2012-12-17)[2025-10-20]. <https://www.chinahorologe.com/contentdetail.aspx?id=627>.
- [24] 中国钟表协会. 中国钟表协会电波钟表专业委员会(筹)成立大会纪要[EB/OL]. (2012-09-04)[2025-10-20]. <https://www.chinahorologe.com/contentdetail.aspx?id=139>.
- [25] 中国科学院国家授时中心. 低频时码授时移动测试平台验收报告[R]. 西安:中国科学院国家授时中心,2022.
- [26] 中国科学院国家授时中心. 低频时码信号测试标校设备入所测试总结报告[R]. 西安:中国科学院国家授时中心,2022.
- [27] 中国科学院国家授时中心. 低频时码信号运控设备入所测试总结报告[R]. 西安:中国科学院国家授时中心,2022.
- [28] 白燕. 低频时码接收的 DSP 实现以及改进低频定时的研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(中国科学院国家授时中心),2003.
- [29] 中国科学院国家授时中心. 低频时码信号授时性能设备验收报告[R]. 西安:中国科学院国家授时中心,2022.
- [30] 齐震. 低频时码定时性能提升方法研究[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心),2025.
- [31] 黄璐希. 低频时码授时信号体制设计及产生方法[D]. 西安:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心),2022.