

引用格式:杨朝中,李实锋,梁帆,等.中国长波授时技术的发展[J].时间频率学报,2026,49(1):90-98.

中国长波授时技术的发展

杨朝中^{1,2,3}, 李实锋^{1,2,3}, 梁帆¹, 史志伟¹, 胡召鹏^{1,2,3},
华宇^{1,2,3}, 李孝辉^{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:从 20 世纪 70 年代的 3262 工程到“十三五”规划的“高精度地基授时系统”,通过脚踏实地一个一个解决卡脖子问题,我国的长波授时技术从模仿到领跑实现了跨越式发展。梳理了我国长波授时技术的发展历程,聚焦台站建设、技术攻坚与体系升级。主要分为自主突破期(1972—1986 年):启动 3262 工程,建成 BPL 长波授时台,用户定时精度 1 μ s,填补国内空白。体系拓展期(1994—2009 年):1994 年建成“长河二号”系统,实现近海导航定位能力;2009 年完成 BPL 台现代化改造,具备增强型罗兰业务能力。国际引领期(2018 年至今):国家布局“高精度地基授时系统”,通过长波授时差分技术进一步将用户定时精度从 1 μ s 提升至 100 ns。中国长波授时技术实现了“微秒至纳秒”的跨越,为国防安全与前沿科研提供了自主可控的时间基准。

关键词:长波授时;3262 工程;BPL;长河二号;罗兰

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0090-09

Development of longwave time service technology in China

YANG Chao-zhong^{1,2,3}, LI Shi-feng^{1,2,3}, LIANG Fan¹, SHI Zhi-wei¹,
HU Zhao-peng^{1,2,3}, HUA Yu^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{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: From the 3262 Project in the 1970s to the “High-Precision Ground-based Timing System” in the 13th Five-Year Plan, China's long-wave time service technology has achieved leapfrog development—evolving from imitation to global leadership—by steadfastly resolving one bottleneck issue after another. This study outlines the development trajectory of China's long-wave time service technology, focusing on the construction of stations, technological breakthroughs, and system upgrades. It contains three stages: The Period of Independent Breakthrough (1972—1986): The “3262 Project” was launched, and the BPL long-wave time service station was completed, with user timing accuracy of 1 μ s, filling the domestic gap. The Period of System Expansion (1994—2009): The “Changhe-II” system was completed in 1994, realizing offshore navigation and positioning capabilities; the modernization of the BPL station was completed in

收稿日期:2025-07-22;接受日期:2025-09-17

基金项目:中国科学院“西部之光”人才培养计划(XAB2022YN19)

作者简介:杨朝中,男,博士,研究员,主要从事无线电授时与导航研究。

2009, enabling it to provide enhanced Loran (eLoran) services. International Leadership Period (2018 to Present): The national deployment of the “High-Precision Ground-based Timing System” has further improved user timing accuracy from 1 μ s to 100 ns through long-wave time service differential technology. China’s long-wave time service technology has achieved a leap from microseconds to nanoseconds, providing an autonomous and controllable time reference for national defense security and cutting-edge scientific research.

Keywords: long-wave time service; 3262 Project; BPL; Changhe-II; Loran

长波授时技术一般特指工作中心频率为 100 kHz, 带宽范围为 90~110 kHz, 采用罗兰 C (long range navigation-C, 英文缩写为 Loran-C, 中文音译为罗兰 C) 脉冲调幅信号体制进行授时的技术^[1]。

罗兰 C 系统的历史可以追溯到 1940 年代第二次世界大战时期, 由美国麻省理工学院的辐射实验室负责研究和开发, 目的是为盟军的海上和空中导航提供一种能够在长距离上工作的导航授时系统^[2]。

随着技术的发展和需求的变化, 罗兰系统不断改进, 经历了罗兰 A 与罗兰 B。1950 年代, 罗兰 C 系统开始发展, 并于 1957 年首次投入使用^[3]。

1950 年代, 苏联受美国罗兰 C 系统的启发, 也开始研制自己的远程无线电定位授时系统, 采用类似于罗兰 C 的信号体制, 代号为 Chayka, 其定位授时性能与罗兰 C 系统相当^[4]。

我国于 1972 年开始长波授时台的研制建设, 于 1985 年开始全功率发播呼号为 BPL 的长波授时信号, 用户定时精度达微秒级, 填补了我国在长波授时领域的空白。本文从台站的建设、技术的发展、现代化的更新改造等方面对我国长波授时技术的发展进行了回顾。

1 1972 年, “3262 工程”启动, 长波授时台开始建设

由于 20 世纪 50 年代我国战略武器和空间技术的飞速发展, 需要更加精确的时间支撑相关技术研究, 国家开始论证长波授时台的建设。在发射人造地球卫星计划的“时间统一勤务系统初步方案”中国家科委明确提出“在西安地区建立短波授时台, 以满足第一颗人卫的需要”的建议, 同时把“采用长波授时, 在西安地区建立以原子时标准为基础的长波授时台列为最佳方案”^[5]。

考虑到我国的科研经费有限, 我国先启动了短波授时台的建设, 即“326 工程”。1967 年 4 月上海天文台提出在 326 工程中增设发射长波计划^[6-7]。

1968 年 8 月, 中国科学院在论证 326 工程时, 原则同意采取中等功率的长波发射。同年 11 月, 中央军委办事组在中国科学院关于 326 工程防护要求的请示报告上批示: 在工程设计上, 要考虑到在我国能够制造长波、超长波的授时台设备时, 改装成长波、超长波授时台设备。国防科委经与中国科学院协商, 于 1971 年 7 月向国务院、中央军委提出“中国科学院迅速着手在陕西天文台增设长波授时台”的报告, 并建议列入国家计划^[8]。

1971 年 7 月国防科委抽调中国人民解放军 8361 部队、8120 部队, 中国科学院抽调陕西天文台 (2001 年更名为中国科学院国家授时中心)、上海天文台和北京天文台 (2001 年与其他单位组建为中国科学院国家天文台) 的领导和科技人员组成调查组, 就建立长波授时台有关问题进行深入调查。调查组于 1971 年 8 月底和 9 月初分别提出“筹建长波授时台方案 (草案)”和“关于建立长波授时台的调查情况汇报”^[9-10]。1972 年 1 月 18 日, 国防科委、中国科学院联合向国家计划委员会 (现国家发展和改革委员会) 提出“关于筹建长波授时台的请示报告”。在这一报告中, 中国科学院以长波授时台作为 326 工程的第二期工程, 故确定其代号为 3262 工程^[11]。同年 5 月, 中国科学院向全国无线电管理委员会申请并得到批复长波授时台使用频率 100 kHz^[12-13]。

1972 年 5 月 16 日, 中国科学院颁发“中国科学院 3262 工程指挥部”印章, 即日启用, 标志着长波授时台的建设正式开始^[14]。

为了使筹建中的长波授时台建成后更好地为国防和国民经济各部门服务, 国防科委会同中国科学院, 于 1972 年 10 月在北京召开了长波授时使用要求会议, 为制定 3262 工程的总体设计方案提供依据。根据会议纪要要求, 3262 系统的设计指标, 作用距离: 确定以陕西天文台为中心, 作用半径, 地波 1500~2 000 km, 一跳天波 3 500 km, 基本上可满足全国陆地和近海区域对时间和频率同步的需要。

定时精度:系统建成初期,地波 $\pm 5\ \mu\text{s}$,天波 $\pm 10\sim 15\ \mu\text{s}$,经过两年以上电波传播时延修正地波 $\pm 1\ \mu\text{s}$,天波 $\pm 5\ \mu\text{s}$ 。校频精度:地波 10^{-11} 数量级,天波 10^{-10} 数量级^[15]。

2 1986年,“BPL长波授时台”通过国家鉴定,正式承担长波授时任务

为了集中力量,加快进展,并避免授时、导航采用同一频率的互相干扰,经有关单位多次酝酿,1973年4月28日由中国科学院、国防科委、空军司令部和海军司令部联合向国务院和中央军委提出“关于长波授时台与长波导航试验台结合建设的请示报告”,并建议授时台和导航试验台的主台合并建成一个台,由中国科学院负责筹建和管理,建成后既是授时台,又兼导航主台,合建台拟建在陕西蒲城地区,具体地点按长波工作的要求勘测后确定^[16]。

国务院和中央军委于1973年6月发文批复同意关于长波授时台与长波导航试验台结合建设的请示,并建议在建设步骤上分两步走,先安装小功率发射台进行试验,以取得经验并解决国防急需,同时安排大功率发射台的研制和基建计划^[17]。

经国务院批准,“3262工程总体方案论证会”于1974年8月27日至9月10日在北京召开。会议全面论证和审议了“3262工程总体方案”,进一步落实了工程实施计划和协作任务。时任国防科委副主任钱学森在会上形象地说明了授时台的重要性:“授时工作是科学工作的基本工作,是发展科学的基本建设。现在我们在讨论3262工程总体方案的同时,我们也应该向同志们交底,我们的目的就是搞全国性的一个钟。3262不光是科委的需要,不光对尖端技术重要,而且对我国自然科学,乃至整个科学的发展,都有关系。”^[18]

按照国务院、中央军委批复建设“两步走”原则,1974年11月,小长波台机房破土兴建,1976年7月,小长波台开始试播^[19-21]。3262工程指挥部组织国内科研人员对小长波台测试数据进行了详细的分析,确定了小长波台的性能是可靠的,符合预期建设目标。从1979年11月起,小长波台开始每天定时发播,呼号为BPL,频率为100 kHz^[22-24]。

小长波台的建设和测试为大长波台的建设扫平了主要障碍,确定了大长波台的总体技术方案和建设方案,大长波台的建设顺利启动。

1978年5月,大长波台开始主体工程施工^[25]。

长波授时台是当时国际上最为先进的授时系统,在国外的长波授时台中,关键部件都是核心秘密,公开的信息很少,国内的科研人员并不畏惧,协作攻克了一个个技术难题,自主研制生产了所有关键设备。

以发射系统为例,其中2 000 kW脉冲发射机网络参数由工程指挥部组织成都电讯工程学院、北京广播器材厂、720所、1022所协作试验取得,四机部761厂按试验参数设计发射机,并加工制作。发射机于1979年11月运进现场,1981年6月完成安装,开始调试^[25]。发射天线,经多次论证,最后确定为四塔倒锥形天线,塔高206 m,由1022所完成电气性能设计,西北建筑设计院完成结构设计,广播电视部广播设备厂于1981年5月完成加工制作和现场架设^[25]。

1983年,大功率脉冲发射机与天线连通,进行调试。1985年5月26日,最终联调成功后,发射系统正式交付使用。同年7月1日起,以全功率试验发播BPL长波授时信号^[25]。图1至图3为长波授时台建设期间地下发播大厅、发射机控制机柜及发射天线的现场安装场景,图4为监测到的长波授时脉冲波形信号。



图1 长波授时台地下发播大厅建设现场



图2 长波授时台发射机控制机柜



图 3 长波授时台天线阵

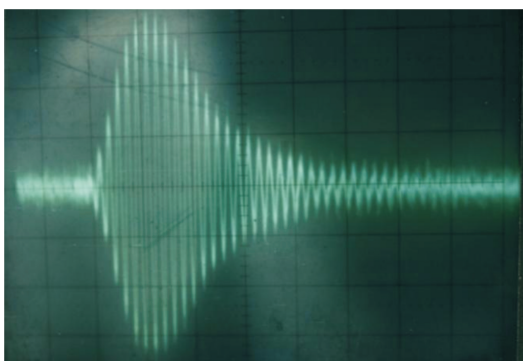


图 4 长波授时信号脉冲波形

1984 年 10 月 1 日,长波授时成果模型彩车,作为科技界重大成果参加国庆 35 周年庆典活动,通过天安门广场,接受党、国家领导人和全国人民检阅。图 5 为彩车照片。



图 5 长波授时台参加建国 35 周年游行彩车

1986 年 6 月 16 日至 20 日,国家科委在临潼主持召开长波授时台国家级技术鉴定会^[26]。鉴定会议认为:长波授时台技术指标达到或超过《三二六二工程总体方案》所提出的技术要求,长波授时台的建成将我国授时精度由毫秒量级提高到微秒量级,使我国在原子时授时系统方面进入世界先进行列,填补了我国在长波授时领域的空白,鉴定委员会

及全体与会代表一致同意长波授时台通过国家级技术鉴定,并认为长波授时台具备了正式发播的条件^[27-28]。

1986 年 6 月 21 日《人民日报》头版刊登了“长波授时台通过鉴定”的新闻报道,如图 6 所示。



图 6 人民日报刊登长波授时台通过鉴定

长波授时台的研制建设是个复杂而庞大的系统工程,涉及众多专业领域,在当时的历史条件下,完全依靠我国的科技工作者自主研制建设完成。该项成果于 1988 年获国家科技进步奖一等奖,图 7 为获奖证书。

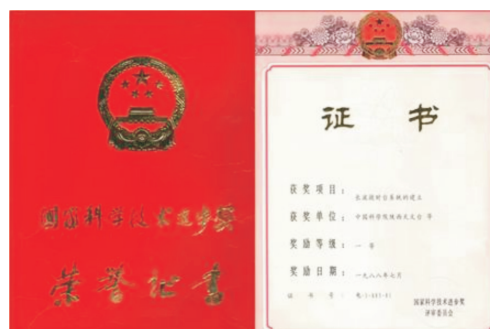


图 7 长波授时台荣获国家科技进步一等奖证书

长波授时台自发播以来,便同时开展了高精度时频服务工作,为卫星的入轨、姿态控制等地面无线电控制提供了准确的标准时间,为飞行器的速度测量提供了精确的频率参考,在我国战略武器和空间技术发展中作出了重要贡献。

3 1994 年,长河二号系统建成,实现我国近海海域长波信号的覆盖

经过 BPL 长波授时台的研发和建设,我国已掌握了长波导航授时的核心技术。为了满足我国近海导航的需求,在 BPL 长波授时台建成之际,我国启动了名为“长河二号工程”的陆基远程无线电定位导航系统的建设,“长河二号工程”采用与 BPL 授时台相同的罗兰 C 信号体制^[29]。

“长河二号工程”主要包含 6 个发射台,组成了 3 个导航台链,包括南海台链、东海台链和北海台链,并且设置 3 个监测站对信号质量进行监测^[29]。

1988 年南海台链完成建设,信号覆盖南海及西太平洋区域^[29]。1993 年东海台链及北海台链完成,信号覆盖东海、日本海、黄海及朝鲜半岛^[29]。1994 年“长河二号导航系统”全面建成,并向国内外用户开放使用,人民日报对相关成果作了报道,如图 8 所示。



图 8 人民日报刊登长河二号导航系统调试成功

“长河二号导航系统”地波信号的覆盖范围北起日本海域、东到西太平洋海域、南达南沙群岛^[30-33],在我国内陆区域以及近海海域形成了相对

比较完整的罗兰 C 系统地波信号覆盖,在舰船航行、海洋勘探、渔业生产、资源开发、抢险救生以及航空、交通管理等方面发挥着重要作用。

4 2009 年,BPL 长波授时台现代化改造通过验收,我国在罗兰自主授时技术方面达到国际先进水平

BPL 长波授时台截至 2005 年已连续运行 30 年,设备陈旧老化,无论是系统稳定性、可靠性,还是安全性等,均出现许多问题,且存在很多隐患,无法保证连续安全运行。急需对 BPL 长波授时台设备进行设备更新和技术改造^[34]。

2005 年 12 月,中国科学院计划局(现发展规划局)组织院内外专家对“BPL 长波授时系统现代化改造技术改造项目建议书”进行了评审,同月国家授时中心向“2005 年第十一次院长办公会议”作了专题汇报。一致认为:BPL 长波授时系统是我国时间频率保障系统的重要组成部分,需求迫切,急需改造^[35]。

2006 年 2 月,BPL 长波授时系统改造项目启动,同年 3 月 BPL 长波授时台改造总体方案通过评审,4 月中国科学院下达科学装置维修改造项目“BPL 长波授时系统现代化技术改造”任务书^[36-37]。按照改造总体方案,项目共分为固态发射机研制、地面机房建设、天线维护改造(增加匹配网络)、发射控制系统改造、新型接收机研制、电波传播修正建模及测量 6 个分项^[36]。

经国家授时中心两年多的研制建设,BPL 技术改造项目取得成功,并通过了中国科学院高技术研究与发展局组织的竣工验收,于 2009 年 1 月 10 日投入试发射运行^[36,38]。图 9 为竣工验收会现场,图 10 为改造后的固态发射机,图 11 为改造后的 BPL 长波授时台全景图。



图 9 BPL 现代化改造竣工验收会



图 10 改造后的 BPL 固态发射机



图 11 改造后的 BPL 长波授时台全景图

改造后的 BPL 长波授时台实现了每天 24 小时连续发播,采用 Eurofix 技术增加了数据信息发播功能,满足时码等数据发播,具备增强型罗兰 (enhanced Loran, eLoran) 初始业务能力。其信号发播控制精度、信号辐射功率、信号发播质量均有大幅提升,BPL 的成功改造标志着我国在罗兰自主授时技术方面达到国际先进水平^[38]。

5 2018 年,高精度地基授时系统建议书批复,长波授时进入新时代

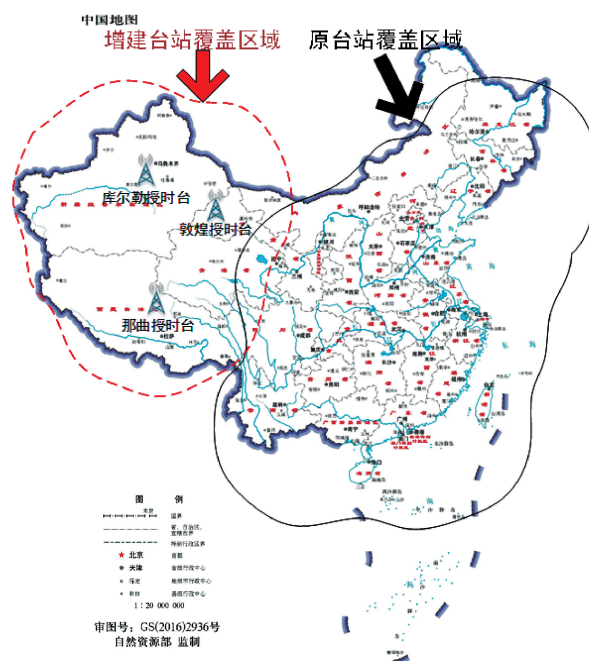
根据国务院颁布的《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030 年)》文件中明确提到,适时启动新一代授时系统建设,支撑超精密时间频率技术开发,逐步形成高精度卫星授时系统和高精度地基授时系统共同发展的格局^[39]。

国家发改委于 2016 年颁布了《关于印发国家重大科技基础设施建设“十三五”规划的通知》,文件中明确提到十三五期间要建设十个国家重大科技基础设施,高精度地基授时系统名列其中。系统建设的主要内容包括:增补完善增强型罗兰授时系统,实现长波授时信号的全国土覆盖,通过增建差分增强系统实现重点区域授时精度优于百纳秒;利用通信光纤网建设覆盖主要城市和重要用户的高精度光纤时频传递骨干网。系统建成后,与星基授时系统一起构成我国天地一体化授时系统,可为精

密测量物理、精密时频技术等科学研究提供重要实验平台,支撑经济社会和国家安全的长远发展^[40]。

2018 年 5 月 23 日,国家发展和改革委员会批复了“高精度地基授时系统”项目建议书^[41]。

高精度地基授时系统增补完善的增强型罗兰授时系统,分别选址在甘肃省敦煌市,新疆维吾尔自治区库尔勒市和西藏自治区那曲市^[41],增补的长波授时台与 BPL 长波授时台及“长河二号工程”相互配合基本实现长波授时信号的全国土覆盖,如图 12 所示。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2936 号的标准地图制作,底图无修改

图 12 长波授时信号覆盖范围示意图

随着“高精度地基授时系统”建议书的批复,长波授时系统的发展也进入到快车道,国家授时中心凭借多年的技术积累,及对长波授时技术发展趋势的把握,提出了在原有长波授时系统采用的增强型罗兰(eLoran)信号体制的基础上,增加数据通道,以拓展长波授时技术的应用范围,并利用新增的数据通道发播长波差分数据,提高长波用户定时的精度,差分后的长波用户定时精度预期从 $1\ \mu\text{s}$ 提升至 $100\ \text{ns}$ ^[42]。

2019 年,国家授时中心对现有的长波授时数据通道 Eurofix 技术,及拟增加的数据通道(数调脉冲及第九脉冲技术)进行了大量的仿真和实际测试^[42-47]。

2019 年 6 月,国家授时中心进行了信号体制试验测试,对长波授时信号体制性能、电波传播性能

及接收终端性能进行了外场验证,累计行程 2 600 多千米,如图 13 至 16 所示,最终选择 Eurofix 加第九脉冲技术的方式作为高精度地基授时系统增强型罗兰长波授时系统拟采用的数据调制方式,其中 Eurofix 技术调制时码和系统状态,第九脉冲技术调制差分信息及应急信息。

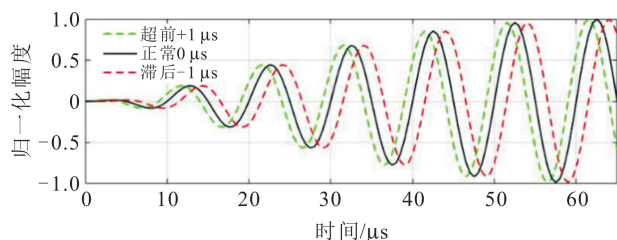


图 13 Eurofix 数据调制技术

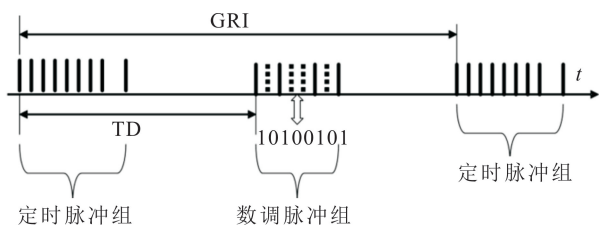


图 14 数调脉冲数据调制技术

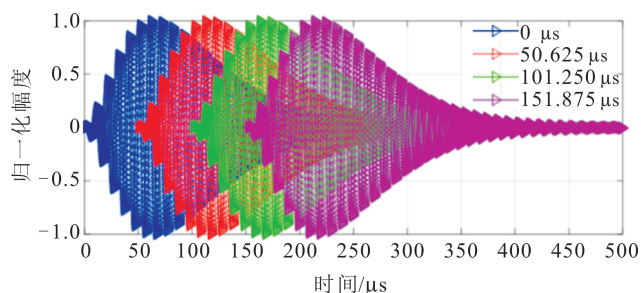


图 15 第九脉冲数据调制技术



图 16 信号体制试验测试现场图

6 2024 年 9 月,高精度地基授时系统敦煌授时台试发播成功

2020 年 2 月,国家发展和改革委员会,批复了

“高精度地基授时系统”项目可行性研究报告^[48]。

2021 年 5 月,“高精度地基授时系统”概算批复,标志着系统进入到建设阶段^[49]。

2023 年 9 月敦煌授时台开工,经过近一年的基础设施建设及设备安装联调,2024 年 9 月 30 日,高精度地基授时系统敦煌长波授时台试发播成功,如图 17 所示。



图 17 敦煌授时台试播现场

科研人员突破了高精度发播控制和脉冲时间基准反馈调节技术,以及高稳定大功率脉冲信号产生技术,实现了 20 ns 的兆瓦级罗兰授时发播控制精度,领先于 50 ns 的现有国际水平。利用差分增强信息,用户可以把定时精度从 1 μ s 提高到差分后 100 ns。敦煌授时台试发播成功,标志着我国空天地立体交叉授时系统建设又向前迈进了一步,图 18 为敦煌授时台全景图。



图 18 敦煌授时台全景图

2024 年 12 月,国家授时中心在甘肃酒泉完成了对敦煌授时台的差分授时性能测试,定时精度达到 100 ns(RMS),证明长波授时具备了和卫星授时互为备份并行服务的能力。

高精度地基授时系统预期 2026 年完成建设,届时那曲授时台及库尔勒授时台投入运行,我国将真正实现长波授时信号的全国土覆盖。

7 结语

中国长波授时技术的发展,每一步均凝聚着我国科研人员的自主创新与攻坚付出。从最开始的电子管发射机到第一代固态发射机,再到现在的全自动控制固态发射机,长波授时系统的发播控制精度也从 50 ns 提升至 20 ns。目前,长波授时系统的用户定时精度也从 1 μ s 提升至差分后 100 ns,极大地拓展了长波授时的应用领域。

高精度地基授时系统的建设发展,使我国的长波授时技术达到了国际先进水平,在一代代授时人的努力下,长波授时技术始终是我国经济建设和国防建设重要的时间保障。

参考文献:

- [1] International Loran Association. Enhanced Loran(eLoran) Definition Document, version 0.1 [EB/OL]. (2007-01-12)[2025-07-16]. <https://rntfnd.org/wp-content/uploads/eLoran-Definition-Document-0-1-Released.pdf>.
- [2] PTEENGILL G E. Loran, long range navigation [M]. New York: McGraw-Hill, 1948.
- [3] Loran-B, D and F [EB/OL]. (2015-08-28) [2025-07-13]. http://jproc.ca/hyperbolic/loran_b_d.html.
- [4] CHAYKA. CHAYKA RADIONAVIGATION [EB/OL]. (2022-07-17) [2025-06-18]. <http://jproc.ca/hyperbolic/chayka.html>.
- [5] “651”会议地面组. “651”会议地面组专题论证之三——“651 任务”时间统一勤务系统初步方案 [Z]. 北京: “651”会议地面组, 1965.
- [6] 中国科学院上海天文台. 中国科学院上海天文台计字 036 号. 在 326 工程中增设发射长波计划 [Z]. 北京: 中国科学院上海天文台, 1967.
- [7] 中国科学院计划局. 中国科学院 (67) 院计研字第 128 号. 在 326 工程中增设发射长波的请示 [Z]. 北京: 中国科学院计划局, 1967.
- [8] 国防科委. 国防科委 (71) 司四字第 241 号. 关于迫切需要解决长波授时问题的报告 [Z]. 北京: 国防科委, 1971.
- [9] 国防科委、中国科学院长波授时联合调查组. 筹建长波授时台方案 [Z]. 北京: 出版者不详, 1971.
- [10] 国防科委、中国科学院长波授时联合调查组. 关于建立长波授时台的调查情况汇报 [Z]. 北京: 出版者不详, 1971.
- [11] 国防科委、中国科学院. 国防科委、中国科学院 (72) 科字 17 号. 关于筹建长波授时台的请示报告 [Z]. 北京: 出版者不详, 1972.
- [12] 中国科学院. 中国科学院 (72) 科字第 182 号. 关于我院在陕西天文台增建长波授时台 (3262 工程) 使用频率的申请报告 [Z]. 北京: 中国科学院, 1972.
- [13] 全国无线电管理委员会. 全国无线电管理委员会 (72) 无发文 16 号. 复陕西长波授时台使用频率问题 [Z]. 北京: 全国无线电管理委员会, 1972.
- [14] 中国科学院. 中国科学院 (72) 科字第 205 号. 关于“3262 工程指挥部”印章启用的通知 [Z]. 北京: 中国科学院, 1972.
- [15] 中国科学院 3262 工程指挥部. 中国科学院 3262 工程指挥部整理. 长波授时使用要求会议纪要 [Z]. 北京: 中国科学院 3262 工程指挥部, 1972.
- [16] 中国科学院、国防科委、空军司令部、海军司令部. 中国科学院、国防科委、空军司令部、海军司令部 (73) 科发业字 054 号. 关于长波授时台与长波导航试验台结合建设的请示报告 [Z]. 北京: 中国科学院、国防科委、空军司令部、海军司令部, 1973.
- [17] 国务院、中央军委. 国务院、中央军委国发 (1973) 72 号. 国务院、中央军委关于长波授时台与长波导航试验台结合建设问题的批复 [Z]. 北京: 国务院、中央军委, 1973.
- [18] 中国科学院. 中国科学院 (74) 科发长字 598 号. 发送《3262 工程总体方案论证会议纪要》及附件 [Z]. 北京: 中国科学院, 1974.
- [19] 3262 工程协调小组. 3262 工程协调小组第一次会议纪要 [Z]. 北京: 3262 工程协调小组, 1974.
- [20] 中国科学院. 中国科学院 (74) 科发二字 186 号. 发送《3262 工程总体方案论证会议纪要》及附件 [Z]. 北京: 中国科学院, 1974.
- [21] 3262 工程协调小组. 3262 工程小功率发射台试播工作会议纪要 [Z]. 北京: 中国科学院, 1976.
- [22] 中国科学院陕西天文台. 陕台发业字 (79) 042 号. 关于申请长波授时台电台呼号的请示报告 [Z]. 蒲城: 中国科学院陕西天文台, 1979.
- [23] 中国科学院. 中国科学院 (79) 科计字 083 号. 复长波授时台电台呼号事 [Z]. 北京: 中国科学院, 1979.
- [24] 中国科学院陕西天文台. 陕台发业字 (79) 059 号. 关于 BPL 长波授时试验台定期发播试为用户服务的请示报告 [Z]. 蒲城: 中国科学院陕西天文台, 1979.
- [25] 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: 1-8.
- [26] 国家科委 (现科技部). 国家科委长波授时台国家级技术鉴定委员会. 长波授时台国家级技术鉴定意见 [Z]. 北京: 国家科委长波授时台国家级技术鉴定委员会, 1986.
- [27] 国防科委. 国家科委 (87) 国科发新字 0001 号. 关于颁发“长波授时台”国家级技术鉴定证书的通知 [Z]. 北京: 国防科委, 1987.

- [28] 毛德驰. 微秒量级高精度授时系统—长波授时台[J]. 中国科学院院刊, 1987, 7(3): 239-244.
- [29] 迈迪. 长河二号工程——远程无线电导航系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 1993: 182-192.
- [30] 李孝辉, 窦忠, 赵晓辉. 北京时间[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2018: 49-66.
- [31] 童宝润. 时间统一技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 159-179.
- [32] 甄卫民, 丁长春. 陆基远程和超远程无线电导航系统发展现状与趋势[J]. 全球定位系统, 2019, 44(1): 10-15.
- [33] 赵当丽, 胡永辉. 关于“长河二号”导航系统的时间同步及授时[J]. 时间频率学报, 2003, 26(1): 61-68.
- [34] 中国科学院国家授时中心. 中国科学院国家授时中心国授发字〔2005〕33号. 关于报送“BPL长波授时系统现代化技术改造项目建议书”的报告[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2005.
- [35] 中国科学院国家授时中心. 中国科学院国家授时中心国授发字〔2006〕8号. 关于报送“长波授时系统(BPL)现代化技术改造项目建议书”的报告[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2006.
- [36] 漆贯荣, 郭际, 主编. 中国科学院国家授时中心 2001—2015 史册[G]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2016.
- [37] 中国科学院国家授时中心. 中国科学院国家授时中心国授发字〔2006〕42号. 关于报送“长波授时系统(BPL)技术改造项目建议书”的报告[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2006.
- [38] 中国科学院国家授时中心. 中国科学院国家授时中心国授发字〔2009〕68号. 关于申请对国家授时中心 BPL 长波授时系统现代化技术改造项目验收的报告[Z]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2009.
- [39] 国务院. 《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030 年)》[Z]. 北京: 国务院, 2013.
- [40] 国家发展改革委等相关九个部门. 发改高技〔2016〕2736号. 关于印发国家重大科技基础设施建设“十三五”规划的通知[K]. 北京: 国家发展改革委等相关九个部门, 2016.
- [41] 国家发展改革委. 发改高技〔2018〕(777号). 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[Z]. 北京: 国家发展改革委, 2018.
- [42] 杨朝中, 李实锋, 胡召鹏, 等. 增强型罗兰授时发射机发射控制精度分析[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 317-321.
- [43] SAE9990, Transmitted Enhanced Loran(eLoran) Signal Standard[S]. 2018.
- [44] SAE9990/1, Transmitted Enhanced Loran (eLoran) Signal Standard for Tri-State Pulse Position Modulation [S]. 2018.
- [45] SAE9990/2, Transmitted Enhanced Loran (eLoran) Signal Standard for 9th Pulse Modulation[S]. 2018.
- [46] 李实锋, 王玉林, 华宇, 等. 罗兰-C 数据解调与解码技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1407-1413.
- [47] 国家技术监督局. 罗兰 C 系统通用技术条件[S]. 2019.
- [48] 国家发展改革委. 发改高技〔2020〕158号. 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可行性研究报告的批复[Z]. 北京: 国家发展改革委, 2020.
- [49] 国家发展改革委. 发改投资〔2021〕660号. 国家发展改革委关于核定高精度地基授时系统国家重大科技基础设施项目初步设计概算的复函[Z]. 北京: 国家发展改革委, 2021.