

引用格式:武建锋,李孝辉,赵爱萍,等. 国家授时中心定时/定位接收机技术发展[J]. 时间频率学报,2026, 49(1):137-149.

国家授时中心定时/定位接收机技术发展

武建锋^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}, 赵爱萍^{1,2}, 吴华兵^{1,2}, 胡永辉^{1,2}

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:系统梳理了中国科学院国家授时中心在定时与定位接收机技术的发展历程,并对未来发展趋势进行展望。1970 年,伴随着我国短波授时系统的建成,BPM-I 型短波定时接收机研制成功;1977 年,应中国科学院 3262 长波授时台建设需要,团队成功研制 PO20 定时校频接收机,及时满足国防用户核心需求;后续依托短波授时系统扩建,攻克 BPM 短波定时仪研制难题。1989 年,“PO21 型全自动长波定时校频接收机与 BPM-III 型定时仪”通过了国防科工委组织的设计定型鉴定,实现技术成果规范化落地。1999 年,BPC 低频时码授时技术依托中华世纪坛时钟实现首次重大应用,献礼新千年。21 世纪以来,国家授时中心承接 CAPS(Chinese Area Positioning System)粗码、精码接收机研制任务;突破北斗三号定时接收机核心技术并研制工程样机;攻克 C 波段定位、定时与测速技术,研发 11 类专用接收机;开展北斗+5G 融合定位定时技术研究,为国家综合 PNT(positioning, navigation, and timing)体系建设开展先期探索;开展 eLoran 授时差分技术研究,研制 eLoran 差分用户接收机。全文完整呈现了该领域从长、短波授时接收机到卫星定时定位接收机、融合定位技术、eLoran 用户接收机的迭代升级路径,为后续技术研发与体系建设提供参考。

关键词:长波;短波;低频时码;中国区域定位系统(CAPS);北斗+5G;eLoran

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0137-13

Development of timing/positioning receiver technology at the National Time Service Center

WU Jian-feng^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, ZHAO Ai-ping^{1,2}, WU Hua-bing^{1,2}, HU Yong-hui^{1,2}

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: This paper systematically reviews the developments trajectory of timing and positioning receiver technologies at the National Time Service Center(NTSC) of Chinese Academy of Sciences(CAS) over the period from 1977 to 2025, and further envisions of the future evolution of such receivers. In 1970, along with the construction of China's shortwave time service system, the BPM-I shortwave timing receiver was successfully developed. In 1977, the PO20 timing and frequency calibration receiver was successfully

收稿日期:2025-09-02;接受日期:2025-11-09

基金项目:陕西省创新能力支撑计划(2025JC-GXPT-034)

作者简介:武建锋,男,博士,研究员,主要从事标准时间产生与授时技术的研究。

developed in response to the construction demand of the CAS 3262 Long-Wave Timing Station, thereby fulfilling the critical technical requirements of national defense end-users. Concurrently with the development of the short-wave timing system, the BPM short-wave timing instrument was accomplished thereafter. In 1989, the PO21 fully automatic long-wave timing and frequency calibration receiver and the BPM-III timing instrument passed the design finalization assessment organized by the Commission of Science, Technology and Industry for National Defense (COSTIND), marking the standardized translation of technical achievements into practical applications. In 1999, the BPC low-frequency time-code timing technology witnessed its landmark inaugural application in the Millennium Monument clock, commemorating the advent of the new millennium. Since the dawn of the 21st century, NTSC has successively undertaken the development of coarse-code and precision-code receivers for the Chinese Area Positioning System (CAPS), achieved breakthroughs in the core technologies of BDS-3 timing receivers and delivered corresponding engineering prototypes, NTSC has mastered C-band positioning, timing and velocity measurement technologies and developed 11 categories of dedicated receivers and conducted in-depth research on BDS+5G integrated positioning and timing techniques, laying a preliminary foundation for the construction of the national comprehensive positioning, navigation and timing (PNT) architecture. NTSC also conduct research on eLoran (enhanced Long-Range Navigation) timing differential technology, and developed an eLoran differential end-user receiver. This work comprehensively delineates the iterative advancement pathway of the discipline, evolving from long-wave and short-wave timing receivers to satellite-based timing and positioning receivers, and further to multi-source integrated positioning technologies, eLoran end-user terminal receiver offering valuable references for subsequent technological innovation and systematic construction in this area.

Keywords: long wave; short wave; low-frequency time-code; Chinese Area Positioning System (CAPS); BeiDou+5G; enhanced Long-Range Navigation (eLoran)

定时/定位接收机是接收陆基/星基系统的无线电信号,经过捕获、跟踪、解调、解算处理,可向用户提供标准时间信号、标准时间信息以及位置、速度信息的设备,是授时、导航系统面向用户的关键接口和连接用户的纽带与系统核心设备。本文回顾了中国科学院国家授时中心定时/定位接收机技术 1970—2025 年的发展历程,讨论了定时/定位接收机的未来发展方向。

1 1970 年, BPM-I 型短波定时接收机研制成功

1965 年,国家科委建议由中国科学院在西部地区从速增设一个授时台,拉开了我国短波授时系统建设的序幕。1981 年 7 月 1 日开始,陕西天文台(中国科学院国家授时中心前身)正式发播短波时号,呼号 BPM^[1-2]。

BPM 短波授时台每天 24 h 连续不断地以四种频率(2.5、5、10 和 15 MHz,同时保证 3 种频率)交

替发播标准时间、标准频率信号,覆盖半径超过 3 000 km,授时精度为毫秒(千分之一秒)量级^[3-4]。

伴随着系统的建设工作,中国科学院陕西天文台同步开展了 BPM 短波定时接收机的研制工作。代表型号有 BPM-I 型短波定时接收机、BPM-II 型短波定时接收机。BPM-I 型短波定时接收机研制于 1970 年左右,体积庞大、功耗高,需手动调谐频率,依赖示波器或记录仪比对时号脉冲,精度约为 10 ms。1980 年左右,短波定时接收机引入数字电路,实现自动校时,精度提升至 1~5 ms,形成 BPM-II 型短波定时接收机。1985 年 6 月至 1987 年 9 月,中国科学院陕西天文台对 BPM 短波定时仪进行了升级,主要是采用中点检测技术实现对 BPM 时号波形的检测,形成了 BPM-III 型短波定时接收机,原理框图如图 1 所示,定时精度为 ± 1.5 ms^[5]。

1988 年, BPM 短波定时仪荣获中国科学院科学技术进步三等奖^[6]。

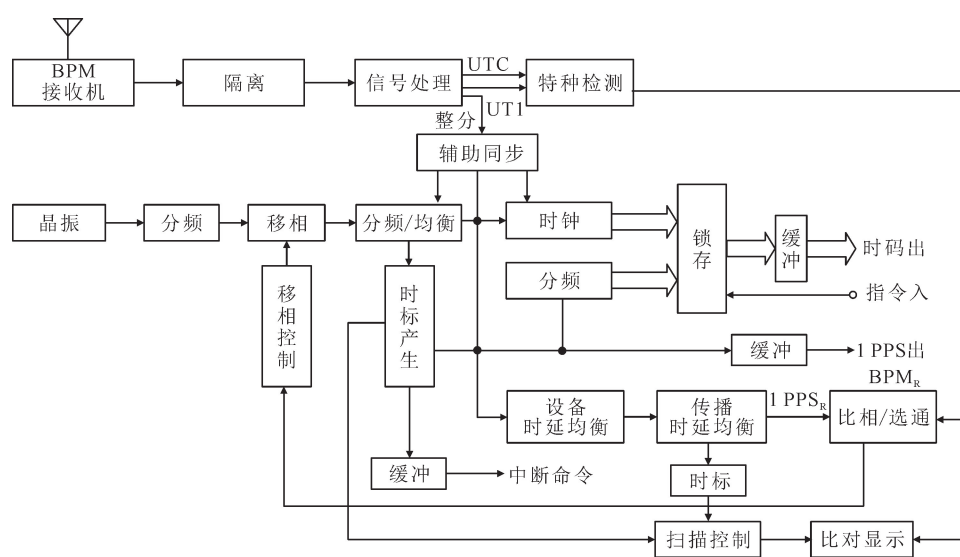


图 1 BPM 定时仪原理框图

2 1977 年, PO20 长波定时校频接收机仿制成功

1973 年 12 月,应国家相关部委需求,中国科学院 3262 工程(长波授时台建设任务)建设全面展开;1977 年 1 月,小功率长波发射台开始试播,取得经验并解决国防急需^[7];1987 年 1 月,BPL 长波授时台正式提供授时服务^[8]。BPL 长波授时采用“罗兰 C”信号发播体制,发播脉冲信号中心频率为 100 kHz,脉冲组重复周期为 60 ms,发射机脉冲峰值有效功率约 2 000 kW,天线辐射脉冲峰值有效功率 $\geq 1\,000\text{ kW}$ 。地波信号作用半径为 1 000 ~ 2 000 km,天地波结合作用半径为 3 000 km,覆盖全国陆地和近海海域。地波信号授时精度优于 $\pm 1\text{ }\mu\text{s}$ ($1/10^6\text{ s}$),天波信号授时精度优于 $\pm 2.8\text{ }\mu\text{s}$ ^[8]。

在系统建设过程中,工程相关单位自主研制了发射机、发射天线及原子时频基准。长波定时校频接收机是用户关键设备。为解决工程急需,工程指挥部与四机部 750 厂合作,仿制美国 2000C 型罗兰 C 定时校频接收机,1977 年 11 月完成样机,1978 年 2 月通过四机部和中国科学院联合鉴定,定名为 PO20 定时校频接收机,并投入批量生产,供用户使用。利用 PO20 定时校频接收机跟踪 BPL 地波信号时,定时精度可优于 $1\text{ }\mu\text{s}$,日校频精度达到 10^{-12} 量级^[8-9]。

利用 BPL 信号进行定时,首先要正确地操作和使用 PO20 型接收机,完成搜索、捕获、跟踪和周期识别。周期识别是难点问题,通常可采用划线法、

幅度法、场强法以及峰值法等;长波信号以地波传播为主,信道特性高度稳定,在接收场强衰减基本不变的条件下,完成首次周期识别并锁定后,接收机可维持周期计数连续性,使跟踪周数与初始识别结果保持一致。利用 BPL 信号进行定时,还需要预先计算总定时延迟,其由三部分组成:传播延迟、接收机延迟以及周期修正,如图 2 所示。

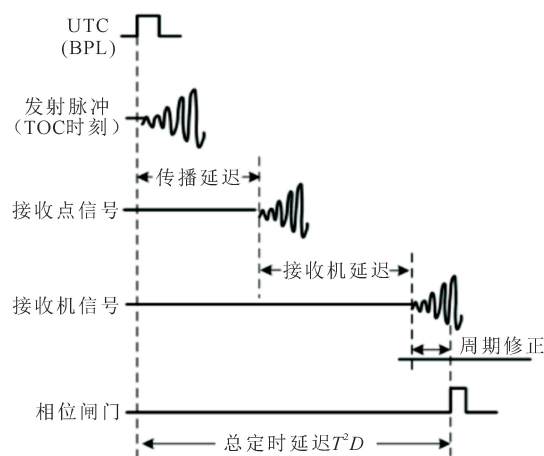


图 2 BPL 定时总延时组成

利用 PO20 定时校频接收机定时的过程如下:
① 利用 BPM 短波时号进行粗同步,粗同步完成后把钟面即时、分、秒显示调整正确;② 对长波定时校频接收机进行 TOC(time of coincidence)同步;③ 调整本地钟时刻;④ 时间检验。

定时校频接收机接收地波信号进行定时,影响地波定时精度的因素有:发射信号的相位不稳定性、传播路径的不稳定性、传播时延计算误差、接收

机误差、大气噪声和干扰引起的误差等,同步精度优于 $0.58 \mu\text{s}^{[8]}$ 。利用 BPL 进行频率校准,一般采用相位跟踪记录曲线法或时刻比对法,校频精度的影响主要是大气噪声和人为干扰、发射相位的不稳定性等,一天的校频精度约为 $2.3 \times 10^{-12}^{[8]}$ 。

3 1989 年, PO21 长波定时校频接收机与 BPM-III 型定时仪设计定型

PO21 型全自动长波定时校频接收机是中国科学院陕西天文台研制的长波定时终端接收设备,能够自动搜索跟踪 BPL 和长河二号导航台发

播的长波信号,用于时间同步、频率校准和控制。PO21 长波定时校频接收机的原理框图如图 3 所示,PO21 型全自动长波定时校频接收机是由微处理器 6802 控制,有效地避免了 PO20 使用中人工完成的许多操作和计算。设备上电启动后,操作人员仅需配置目标接收台链的重复周期参数并完成主副台选择,后续信号捕获、跟踪、解算等流程均由接收机自主完成,整机自动化水平显著提升,有效改善了用户操作体验,具备良好的人机工程特性。图 4 为 PO21 型全自动长波定时校频接收机照片。

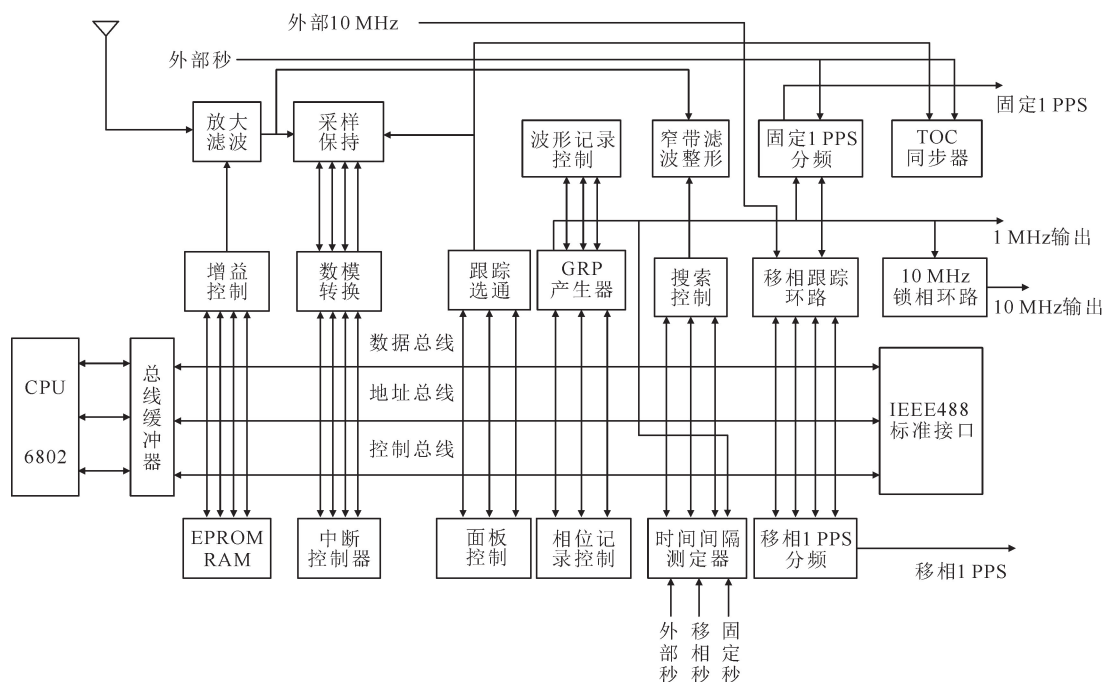


图 3 PO21 长波定时校频接收机的原理框图

1989 年 4 月 21 日至 22 日,由某部组织在北京召开了“PO21 型全自动长波定时校频接收机与 BPM-III 型定时仪设计定型会”,通过定型鉴定,并被作为某部的更新换代产品^[9]。1997 年又被总装备部认定为“九二一”工程专用定时、校频设备。已装备原国防科工委、总装备部、海军、空军数百台套。



图 4 PO21 型全自动长波定时校频接收机

4 1999 年, 低频时码世纪坛时钟献礼新千年

1999 年,陕西天文台受托研制“中华世纪坛”标准时间系统。该时间系统接收陕西天文台蒲城 BPC 低频时码试验台发播的授时信号实现定时,这也是 BPC 低频时码授时技术首次重要应用。从 1993 年起,陕西天文台致力于低频时码授时技术的研究,1998 年中国科学院陕西天文台与企业合作建成陕西蒲城 BPC 低频时码试验台,并于 1999 年在陕西蒲城成功建立了实用的试验台并进行了发播,授时发播信号中心频率 68.5 kHz,授时精度亚毫秒量级,每天发播 4 h,发播年、月、日、时、分、秒全时间信息信号,用户接收机可自动校时,广泛用于电

波表自动校时^[10]。图 5 为数字低频时码接收机结构,硬件分为模拟部分、数字部分和显示部分^[11-12]。此方案的特色在于将模拟信号在射频进行采样转换成数字信号,从射频到基带的所有工作都可以用软件来实现,整个接收机结构将获得更大的灵活性和开放性。

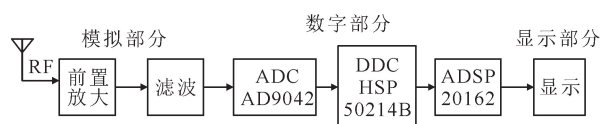


图 5 数字低频时码接收机结构

5 2005 年, 中国区域定位系统(CAPS)接收机研制成功

2001 年 3 月,中国科学院决定并报经中央机构编制委员会批准,中国科学院陕西天文台更名为中国科学院国家授时中心。

2005 年,中国科学院国家授时中心、国家天文台等单位联合,研制了中国区域定位系统(CAPS)的演示验证系统,利用地球同步轨道(GEO)商用通信卫星组成导航星座,利用卫星上的信号转发器转发地面控制站发出的时间、卫星轨道参数等导航电

文,用户使用专用的接收终端接收转发的信号、测量伪距,实现导航定位、测速和授时^[13]。

在 CAPS 系统中,国家授时中心牵头研制出 CAPS 接收机。在 CAPS 试验期间,用户接收机利用 3 颗 GEO 卫星便能实现伪距测量、定位、导航和授时。在 CAPS 研究和设计过程中,接收机是对系统进行验证的关键设备,其功能是接收 CAPS 卫星所播发的粗码和精码测距信号,实现精密定位、授时和测速。

图 6 为 CAPS 接收机原理框图。CAPS 接收机主要由天线模块、射频前端模块、基带处理模块和人机界面等四个部分组成^[14]。天线所接收到的 CAPS 卫星信号经过射频前端进行变频和放大,输出中频信号;AD 转换模块对中频信号进行抽样,通过抽样将模拟信号转换为数字信号;接收机数字基带部分对 AD 转换模块输出的数字中频信号进行相关处理,实现对该信号的捕获、跟踪、解调等处理,并向后端导航处理器输出解调后的电文数据、伪距、载波相位观测值,导航处理器对所得到的伪距信息、电文信息和时间信息进行导航解算,进而得到用户的位置信息和标准时间信息。

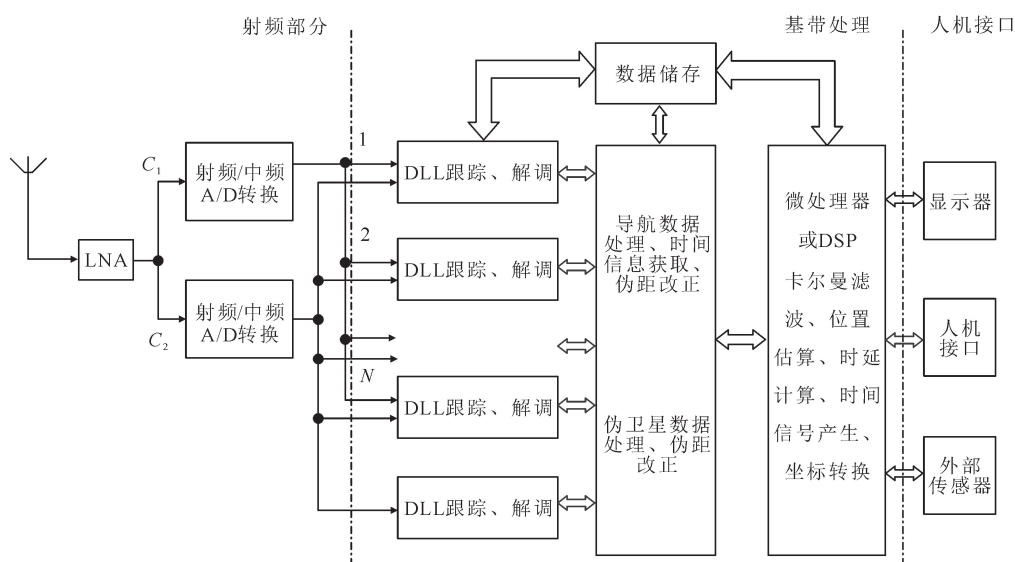


图 6 CAPS 接收机原理框图

研制的 CAPS 粗码接收机及天线如图 7 所示,测试结果表明,CAPS 粗码接收机静态平面定位精度 20.5~24.6 m;高程 1.2~12.8 m;测速精度 0.13~0.30 m/s。粗码接收机动态平面定位精度

24.4 m;高程 3.0 m;研制的 CAPS 车载接收机如图 8 所示,测速精度 0.24 m/s,定时精度 200 ns。CAPS 精码接收机定位精度(1°)南北 5.0 m,东西 0.8 m^[14]。



(a) CAPS 天线



(b) 手持接收机

图 7 CAPS 天线和手持接收机



图 8 CAPS 车载接收机

6 2010 年, 北斗三号 RNSS 授时型接收机研制成功

2010 年, 根据我国第二代卫星导航系统信号体制设计方案, 中国科学院国家授时中心攻克了接收机通道时延控制、时钟建模、时钟粒度技术、二进制偏移载波(BOC)信号接收等关键技术, 研制了卫星无线电导航业务(RNSS)单频授时、双频授时和多模授时接收机原理样机与工程样机, 接收机原理框图如图 9 所示, RNSS 授时型接收机外形如图 10 所示。在北斗办组织的第三方比测中该接收机获得第一名的成绩; 2015—2017 年工程样机全程参与了北斗试验卫星工程的在轨测试和验证工作, 在北斗

卫星导航系统试验阶段发挥了重要作用。

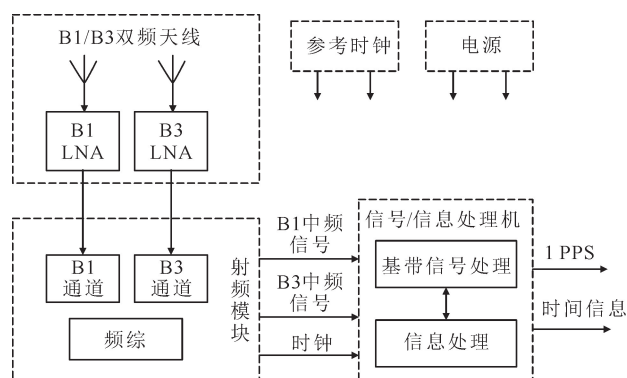


图 9 RNSS 授时型接收机原理框图



图 10 RNSS 授时型接收机

2014 年 9 月 1 日至 4 日在中国航天科技集团五院五一四所完成了 RNSS 定时接收机的测试。本次测试涵盖 5 大类 32 小类指标, 重点围绕定时精度、伪距测量精度、载波相位测量精度及多普勒测量精度展开, 最终国家授时中心的设备在比测中荣获第一名, 图 11 为测试现场照片、图 12 为 RNSS 授时型接收机测试结果^[15]。



图 11 RNSS 授时型接收机测试现场

国家授时中心						
测试项目				测试值	分值	满分
授时性能 指标测试	RNSS 单频授时 精度测试	BDS(B1C)		3.37 ns	5	5
		BDS(B3C)	BPSK(5)	2.65 ns	5	5
			BOC(15,2,5)	3.89 ns	5	5
	单星授时	B1C		3.67 ns	5	5
	RNSS 双频授时 精度测试	BDS(B1C)+BDS(B3C)(BPSK)		3.49 ns	5	5
		BDS(B1C)+BDS(B3C)(BOC)		3.51 ns	5	5
	RNSS 双模测试 精度	BDS(B1C)+GPS(L1C)		3.10 ns	4	4
		BDS(B3C)(BPSK)+GPS(L1C)		3.10 ns	4	4
		BDS(B3C)(BOC)+GPS(L1C)		3.18 ns	4	4
	动态范围	B1C+B3C	BPSK(5)	3.35 ns	6	6
BOC(15,2,5)			3.39 ns	6	6	
频率输出 测试	频率准确度 B1C			4.98×10^{-8}	0	5
1 PPS 输出信号 测试	前沿抖动			8.955 ps	1	5
	上升沿宽度			1.538 ns	1	1
	下降沿宽度			1.491 ns	1	1
	脉冲宽度			20.001 μ s	1	1
幅度				2.92 V	0	1
信号接收 性能测试	接收信号 功率范围	B1C		100%	3	3
		B3C	BPSK(5)	100%	3	3
			BOC(15,2,5)	100%	3	3
	冷启动首次 定位时间	B1C		78.02 s	0	3
		B3C(BPSK)		63.53 s	0	3
		B3C(BOC)		81.42 s	0	3
	伪距测量精度	B1C		0.042 m	2	2
		B3C	BPSK(5)	0.081 m	2	2
			BOC(15,2,5)	0.308 m	1.42	2
	载波相位 测量精度	B1C		0.001 m	2	2
		B3C(BPSK)		0.001 m	2	2
		B3C(BOC)		0.001 m	2	2
	多普勒测量精度	B1C		0.007 m/s	2	2
		B3C(BPSK)		0.009 m/s	2	2
		B3C(BOC)		0.017 m/s	2	2
总分					84.42	100

图 12 RNSS 授时型接收机测试结果

7 2017 年, 转发式卫星导航试验系统第二阶段 PVT 接收机通过验收

转发式卫星导航系统是将直发式卫星导航系统卫星的有效载荷搬移到地面来实现导航定位功能, 相对于直发式系统, 转发式的地面系统非常复杂, 而转发式卫星的功能要求相对简单, 易于实现, 只要求具有透明转发功能。在相关部委的支持下, CAPS 系统进入第二阶段。

2015—2018 年, 依据转发式卫星导航试验系统的建设需求, 中国科学院国家授时中心攻克了基于伪码的转发式定位、定时与测速技术, 研制了 C 波段性能测试接收机、C1/Cn 监测接收机、差分用户接收机^[16]。

C 波段接收机主要由天线模块、射频前端模块、基带信号处理模块、导航信息处理模块、参考时钟模块、电源模块、存储器模块、显示控制模块等组成。图 13 给出了 C 波段接收机的原理框图。

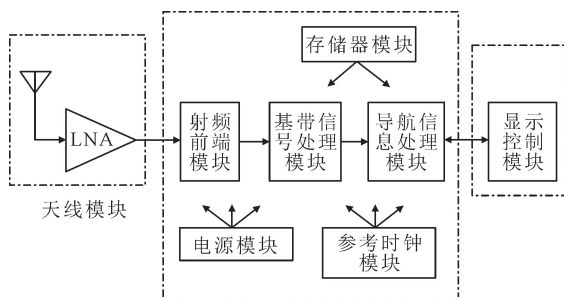


图 13 C 波段接收机原理框图

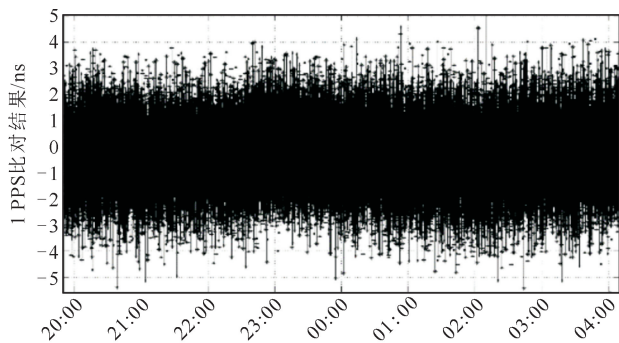
所研制的接收机配合转发式卫星导航试验系统完成了多项关键技术试验, 在北斗卫星导航系统论证与建设阶段发挥了重要作用, 研制出 11 类 100 余台转发式卫星导航试验系统 PVT 接收机, 如图 14 所示。

2017 年 8 月 22 日至 9 月 6 日, 中国卫星导航系统专项管理办公室组织测试专家组和测试工作组, 先后在西安、北京、三亚等地, 对转发式系统第二阶段验收测试的 8 大测试任务进行了现场测试, 开展了定位、授时以及测速测试^[16]。

图 15 为定时的测试结果, 从西安测试的统计结果来看, 单星授时结果优于 5.4 ns(95%); 多星授时结果优于 3.12 ns(95%)。从北京测试的统计结果来看, 单星授时结果优于 3.81 ns(95%); 多星授时结果优于 3.96 ns(95%)。



图 14 转发式卫星导航试验系统 PVT 接收机



观测时间 CAPST: 2017-08-21T19:50:00/2017-08-22T04:10:00

注: 统计历元数: 29 994, 有效历元数: 29 994,
均值: -0.305 ns, 95% 分位值: 2.76 ns

图 15 西安定时测试结果

从西安测试的统计结果来看, 当 $8.07 < PDOP$ (位置几何精度因子) < 10.08 , 涇阳伪码静态定位结果优于 2.92 m(95%), 西安伪码静态定位结果优于 4.42 m(95%)。从北京测试的统计结果来看, 当 $8.22 < PDOP < 10.19$, 伪码静态定位结果优于 9.86 m(95%)。从三亚测试的统计结果来看, 当 $7.8 < PDOP < 9.9$, 伪码静态定位结果优于 6.43 m(95%), 图 16 为北京静态定位的测试结果。

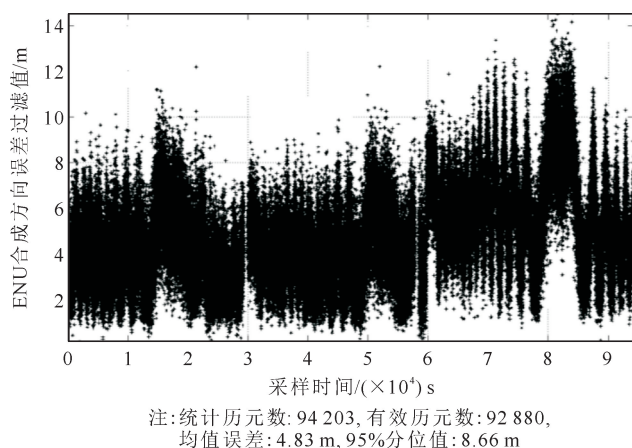


图 16 北京测试 ENU 合成误差

从西安测试的统计结果来看,当 $8 < PDOP < 10$,测速精度优于 0.2 m/s (95%),图 17 为西安的测速结果。从北京测试的统计结果来看,当 $8 < PDOP < 10$,测速精度优于 0.14 m/s (95%)。

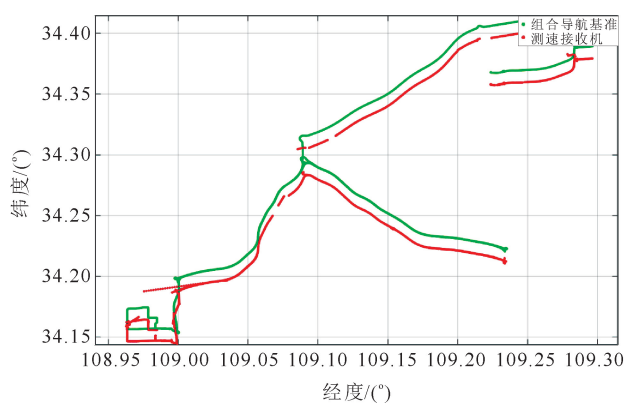


图 17 西安测速结果

8 2021 年,北斗+5G 联合定位接收机先行先试

2018—2021 年,面向国家综合 PNT 体系中导航与通信融合的关键技术和新技术探索^[17-18],转发式卫星导航试验系统进入到第三阶段,国家授时中心承担了导航与通信融合的攻坚任务。国家授时中心攻克了 5G 基站间高精度时间同步、北斗与 5G 时空基准统一、5G 室内/外定位、北斗+5G 融合定位、5G 辅助北斗快速定位等关键技术;研制了 5G 定位接收机、北斗+5G 联合定位接收机,实现了我国两大基础建设(北斗与 5G)的紧密融合,为国家综合 PNT 体系建设先行先试,为我国北斗+5G 高精

度融合定位标准的制定奠定了基础,也为国家北斗全域位置服务覆盖与国家位置信息安全提供了支撑。

北斗+5G 联合定位接收机利用 5G 基站作为伪卫星与北斗联合定位,试验终端对 5G 基站进行观测,获得基站到终端距离观测量,构成观测方程,完成位置解算,最终实现目标定位精度 2 m (与 GNSS RTK (Global Navigation Satellite System real-time kinematic)设备定位实时比对验证),优于全卫星下 5 m (无遮挡)的定位精度^[19-20]。北斗+5G 联合定位原理如图 18 所示,研制的北斗+5G 联合定位接收机如图 19 所示。

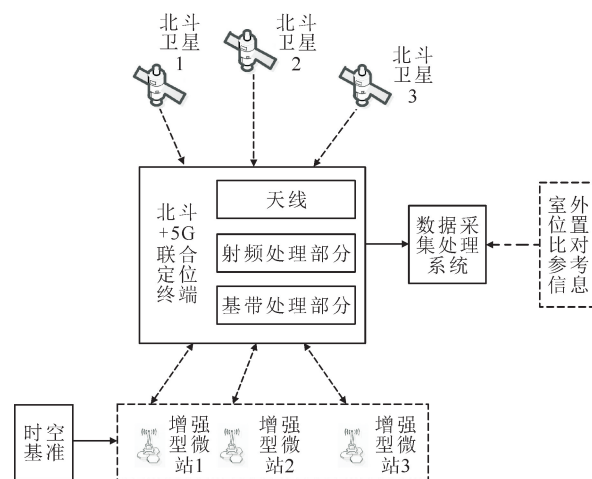


图 18 北斗+5G 联合定位原理图



图 19 北斗+5G 联合定位接收机

2021 年 3 月 18 日至 19 日,在西安试验场区开展导航通信一体化试验系统功能、性能指标测试工作。由北斗工程大总体、导航通信一体化试验系统责任专家及代表、中国科学院二代导航专项总体部等组成的测试专家组全程参与各项指标的测试^[21]。

在室内选取了 10 个待测点,均匀分布在测试场,10 个点定位结果的平均值为 0.92 m ,如表 1 所示。结果中有一些点位例如 21 点位,定位结果为 1.91 m ^[22-23],主要原因是点位的定位几何因子较差所导致。

表 1 室内定位测试结果

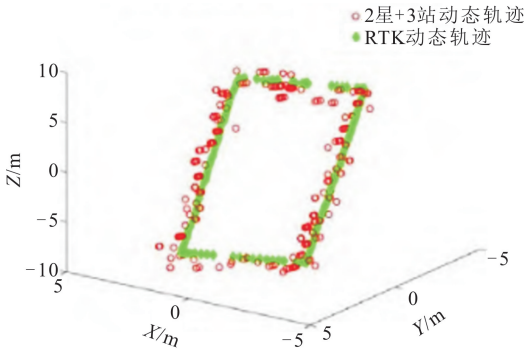
序号	测试点	参考位置	测试结果均值(水平)/m	RMSE(水平)/m	平面误差/m
1	8	7.681,24.736	7.292,25.537	0.390,0.801	0.892
2	11	14.203,19.636	14.242,19.703	0.165,0.079	1.214
3	13	14.203,11.852	15.037,11.960	0.835,0.110	1.466
4	19	2.000,12.088	2.418,12.536	0.443,0.453	0.633
5	21	2.000,17.416	1.046,18.551	0.955,1.135	1.908
6	27	3.300,12.088	2.722,12.877	0.580,0.790	0.979
7	30	3.300,17.416	3.486,17.885	0.189,0.470	0.507
8	36	4.400,19.116	4.389,19.534	0.048,0.419	0.421
9	47	7.530,2.000	7.966,2.351	0.462,0.417	0.623
10	56	11.306,10.288	11.869,10.451	0.566,0.164	0.590
平均误差			0.923		

在如图 20 所示的室外北斗+5G 联合定位场景下,分别开展了 3 颗卫星+2 个基站、2 颗卫星+3 个基站组合的定位试验。由于试验中 5G 基站位置固定,为了提升定位结果,需选择较优的位置精度因子值,因此在卫星的选取上考虑了与 5G 基站方位角互补的卫星,使得定位待测区域处于基站与卫星的中心区域。试验中每个定点静态测试 10 min,3 颗卫星+2 个基站静态定位精度优于 2.20 m,2 颗卫星+3 个基站静态定位精度优于 2.02 m^[24]。

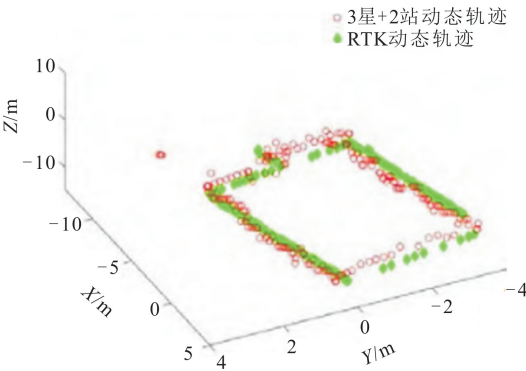


图 20 北斗+5G 室内外测试现场

图 21 为 2 星+3 站、3 星+2 站的动态定位结果,行人推车的行进速度约为 0.5 m/s,图中菱形线为实时载波相位差分技术 RTK 测量结果,圆圈线为北斗+5G 联合定位结果,运行轨迹基本一致。与 GNSS RTK 设备定位结果相比,3 颗卫星+2 个基站定位精度优于 3.34 m,2 颗卫星+3 个基站定位精度优于 2.78 m。



(a) 2星+3站动态定位轨迹



(b) 3星+2站动态定位轨迹

图 21 北斗+5G 室外测试结果

从试验结果来看,北斗+5G 组合定位在城市峡谷或遮挡环境下利用基站观测量与北斗联合完成定位,可以解决定位可用性问题。在实际场景中,所选卫星、基站组合不同,三维(空间)位置精度因子不尽相同,定位结果会存在一定的差异。在选择基站或卫星时需要采用一定的优化算法,保证可以获得较小的 PDOP,同时在先验知识的辅助下尽量

选择无遮挡可以直视的 5G 基站,减小非视距(non line of sight,NLOS)信号的影响。对于 5G 用户,北斗系统的引入可解决高程问题,另外也可解决基站不足 3 个的情况下的定位问题^[25]。

9 2024 年,eLoran 差分定时接收机研制成功并开展了初步试验

2021 年,国家授时中心承担的国家重大科技基础设施——高精度地基授时系统正式启动,系统重点建设内容之一是建设增强型罗兰授时系统,包括建设覆盖全国重点区域的差分增强系统,对长波授时准确度进行修正,使定时准确度提高到 100 ns。实现长波授时对卫星授时进行补充和增强,提高我国国防和国民经济等重要领域用时的安全性和

可靠性。

国家授时中心承担了长波差分定时接收机的研制,研制的差分接收机如图 22 所示。eLoran 差分测试系统原理如图 23 所示,由 BPL 发射台发出 eLoran 信号,差分站以本地参考为基准接收信号并生成差分修正信息。差分站通过通信链路将差分修正信息播发至用户端,差分定时接收机对接收的差分修正信息进行解调、解码与参数提取,获取授时误差修正量,进行差分性能修正。



图 22 eLoran 差分用户接收机

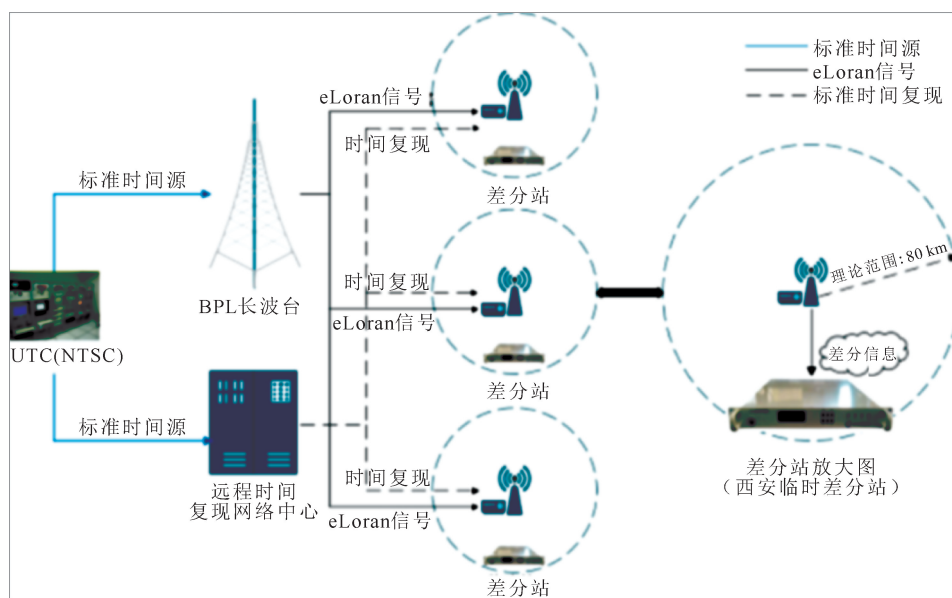


图 23 eLoran 差分测试系统原理图

2024 年 8 月,围绕 BPL 长波台,采用车载差分系统定点测试,在鄠邑区、兴平市、周至县、杨陵区对西安临时差分站开展了差分效果测试,测试结果显示,鄠邑区、兴平市、周至县、杨陵区四个测试地

的差分前后 1 PPS 测试数据的均值和标准差均有所改善。

图 24 至图 27 分别展示了四个测试地差分前后结果,表 2 为差分前后测试结果。

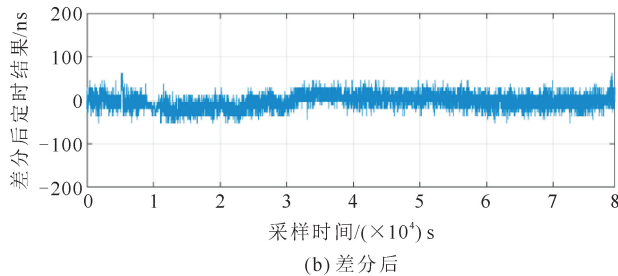
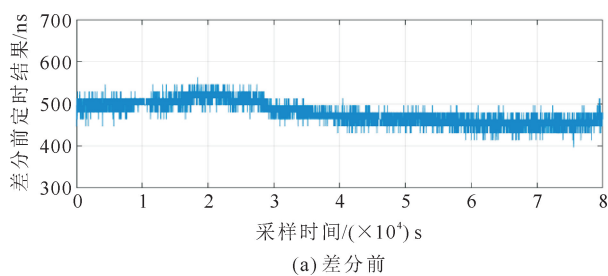


图 24 鄠邑区测试结果

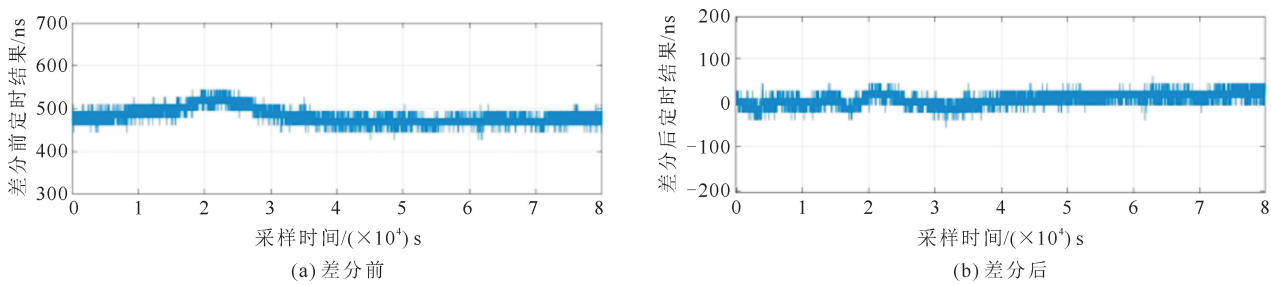


图 25 兴平市测试结果

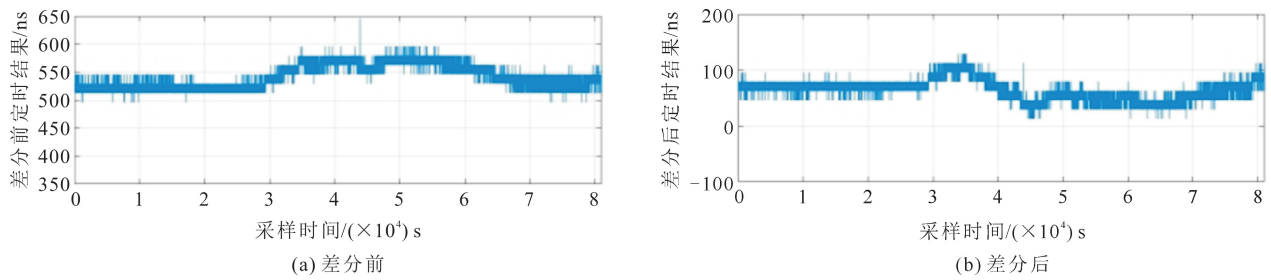


图 26 周至县测试结果

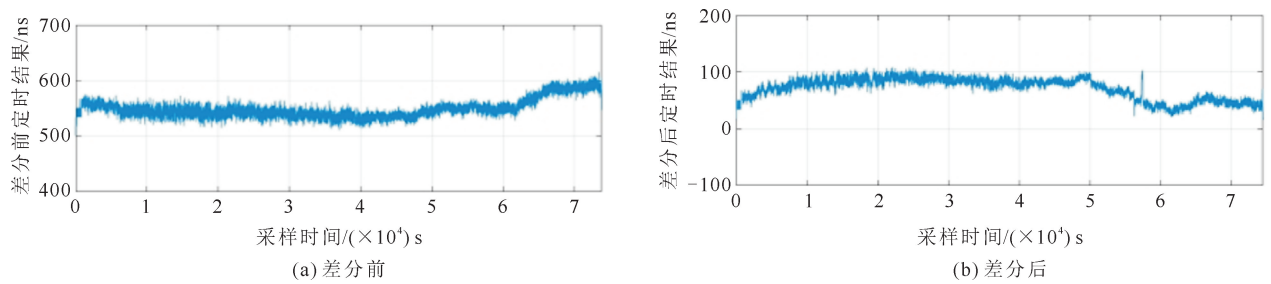


图 27 杨陵区测试结果

表 2 长波差分测试结果统计表

测试地点	距离差分站/km	差分前均值/ns	差分后均值/ns	差分前标准差/ns	差分后标准差/ns
鄂邑区	40.2	478.54	-2.52	25.9	15.9
兴平县	57.3	482.21	7.47	16.8	12.3
周至县	74.1	540.31	67.82	19.8	16.8
杨陵区	86.6	549.15	70.91	17.0	18.9

测试结果表明,经差分修正后,授时精度均在 100 ns 以内,初步验证了差分的思路和可行性。

10 结语

国家授时中心的定时/定位接收机技术发展历程,始终紧密围绕国家授时系统的建设和技术发展趋势。从 1970 年短波接收机研制成功到 1973 年 12 月中国科学院 3262 工程(长波授时台建设任务),再到 1999 年的低频时码授时系统,围绕这些陆基授时系统的发展需求,国家授时中心研制了对应的定

时接收机来满足不同用户的需求。从 2000 年以后,卫星导航系统逐步发展,围绕中国区域定位系统、转发式卫星导航试验系统第二阶段、第三阶段的建设需求,研制了 CAPS 粗码、精码接收机、C 波段定位、定时接收机以及北斗+5G 联合定位接收机,满足了国家不同时期的需求。2024 年开始,随着国家重大科技基础设施——高精度地基授时系统的建设,国家授时中心研制了 eLoran 差分定时接收机,使定时准确度提高到 100 ns。实现长波授时对卫星授时进行补充和增强,提高我国国防和国民经济等

重要领域用时的安全性和可靠性。

《新时代的中国北斗》白皮书指出,面向未来构建国家综合定位导航授时体系,发展多种导航手段,实现前沿技术交叉创新、多种手段聚能增效、多源信息融合共享,推动服务向水下、室内、深空延伸,提供基准统一、覆盖无缝、弹性智能、安全可信、便捷高效的综合时空信息服务。展望未来,随着国家综合 PNT 系统的即将建设,多源融合的 PNT 弹性终端是大势所趋,可解决单一授时源存在干扰的风险。对于未来的 PNT 用户而言,多源弹性 PNT 的解决方案需要寻求主动监控、被动备份及智能补偿途径。短波、长波、低频时码、北斗、5G、惯导等具有天地互备、异构的特点,它们的多源融合能够提高定时、定位终端输出的连续性和可靠性,是未来导航、时频装备应对对抗的重要策略和发展方向。

参考文献:

- [1] 中国科学院. 中国科学院 BPM 短波授时台鉴定报告[A]. 档案号:K278-323-0006. 西安:中国科学院国家授时中心档案室,1980.
- [2] 中国科学院. BPM 短波授时台鉴定会议技术文件之一:BPM 短波授时台授时性能技术报告[A]. 档案号:K278-324-0001. 西安:中国科学院国家授时中心档案室,1980.
- [3] 中国科学院. BPM 短波授时台鉴定会议技术文件之四:BPM 时号的覆盖范围[A]. 档案号:K278-324-0004. 西安:中国科学院国家授时中心档案室,1980.
- [4] 中国科学院. BPM 短波授时台鉴定会议技术文件之五:BPM 短波时号同步精度的研究和测定[A]. 档案号:K278-324-0005. 西安:中国科学院国家授时中心档案室,1980.
- [5] 范荣美,吕彩田,李为丰. BPM 定时仪的研制[J]. 陕西天文台台刊,1987(增刊1):71-75.
- [6] 中国科学院.“BPM 短波定时仪”获中国科学院科学技术进步奖三等奖[A]. 档案号:HJ-03-019. 西安:中国科学院国家授时中心档案室,1988.
- [7] 中国科学院. 长波授时台国家级技术鉴定技术报告汇编[A]. 档案号:K278-307-0005. 西安:中国科学院国家授时中心档案室,1986.
- [8] 国家科学技术委员会. 关于颁发“长波授时台”国家级技术鉴定证书的通知(87)国科发新字 0001 号[A]//档案号:K278-398-1. 西安:中国科学院国家授时中心档案室,1987.
- [9] 中国科学院. BPM-III 型定时仪和 PO21 全自动定时校频接收机设计定型意见[A]. 档案号:K278-KY-00021-01. 西安:中国科学院国家授时中心档案室,1989.
- [10] 李孝辉,窦忠,赵晓辉. 北京时间——长短波授时系统[M]. 杭州:浙江教育出版社,2015.
- [11] 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.
- [12] 刘军,吴贵臣,许林生. 低频时码接收机数字化改进研究[J]. 无线电工程,2002,32(5):32-36.
- [13] 艾国祥,施浒立,吴海涛,等. 基于通信卫星的定位系统原理[J]. 中国科学 G 辑:物理学 力学 天文学,2008,38(12):1615-1635.
- [14] 胡永辉,华宇,侯雷,等. CAPS 接收机的设计与实现[J]. 中国科学 G 辑:物理学 力学 天文学,2008,38(12):1706-1714.
- [15] 吴华兵,胡永辉,武建锋,等. RNSS 授时型接收机研制总结[R]. 西安:二代导航总体部,2014.
- [16] 验收测试组. 转发式卫星导航试验系统(第二阶段)验收测试报告[R]. 西安:二代导航总体部,2017.
- [17] 中华人民共和国国务院办公厅. 新时代的中国北斗[M]. 北京:人民出版社,2022.
- [18] 杨元喜,任夏,贾小林,等. 以北斗系统为核心的国家安全 PNT 体系发展趋势[J]. 中国科学:地球科学,2023,53(5):917-927.
- [19] 薛嘉琛,武建锋,焦喜康,等. 一种基于北斗+5G 的联合定位系统[J]. 无线电工程,2020,50(10):825-830.
- [20] 刘源,徐威,武建锋,等. 基于 LM 优化 BP 神经网络的 5G 室内定位[J]. 无线电工程,2022,52(8):1447-1455.
- [21] 武建锋,吴华兵,赵爱萍,等. 转发式卫星导航试验系统第三阶段导航通信一体化试验系统验收测试总结[R]. 西安:二代导航总体部,2021.
- [22] 焦喜康,吴华兵,薛嘉琛,等. 基于 Kalman-Chan 算法的 5G 毫米波室内定位试验[J]. 时间频率学报,2023,46(1):40-48.
- [23] 赵爱萍,武建锋,吴华兵,等. 北斗+5G 融合定位技术及应用[J]. 中国科技成果,2023(11):12-15.
- [24] 马雨薇,武建锋,赵爱萍,等. 一种北斗+5G 试验场景构建及联合定位结果分析[J]. 时间频率学报,2024,47(7):202-209.
- [25] 武建锋,吴华兵,赵爱萍,等. 转发式卫星导航试验系统第三阶段北斗+5G 定位评估试验总结[R]. 西安:二代导航总体部,2021.