doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.05.012

陆基无线电授时系统信号分析与解算

王雨竹，秦红磊，万国龙

（北京航空航天大学电子信息工程学院，北京 100191）

摘　要：时间应用的广泛性以及授时战的提出，使国家更加重视授时服务体系的完备性以及灵活性。为顺应授时战要求，从我国整体授时体系出发，简单介绍授时系统的工作原理，从多方面对比各类授时系统；主要分析了我国陆基无线电授时系统的发播程序以及信号格式等，对 BPM 短波呼号以及时码结构进行补充与修正，并讲解对陆基无线电授时信号的解算过程，利用实际试验验证解算方法的可行性；最后根据我国目前授时体系的现状以及授时战的要求，给出应对授时战的技术路线，对未来我国授时体系发展方向提出建议。

关键词：授时系统；陆基无线电授时；BPM 短波授时；BPL 长波授时；BPC 低频时码授时；综述

中图分类号：P127.1　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-8110(2023)05-0107-12

Signal analysis and solution of land-based radio timing system

WANG Yuzhu, QIN Honglei, WAN Guolong

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The wide application of time and the proposal of timing war make the country pay more attention to the completeness and flexibility of the timing system. In accordance with the requirements of the timing war, starting from the overall timing system in China, the working principle of the timing system and compare various timing systems from various aspects are introduced. In addition, the broadcast program and signal format of China's land-based radio timing system are analyzed, the BPM short-wave call sign and time code structure are supplemented and corrected, and the solution process of land-based radio timing signal is explained, the feasibility of the solution process by using practical experiments is verified. Finally, according to the current situation of China's timing system and the requirements of timing war, the technical route to deal with timing war is given, and suggestions are made for the future development direction of China's timing system.

Key words: Timing system; Land-based radio timing; BPM shortwave time service; BPL long-wave time service; BPC low-frequency time code time service; Review

0　引言

时间的应用，从民用满足日常生活、发展国民经济延伸到军用国防需求，其广泛性使授时服务迅速发展。自 20 世纪无线电通信技术崛起，我国也跟随时代要求前后建立各种授时系统，且继 2017 年授时战提出之后[1]，时间系统被要求自成体系并被列为特殊时期主要攻击对象之一，因此对授时系统的完备性、灵活性以及授时服务的弹性、稳健性都提出了更高的要求。

收稿日期：2023-04-01；**修订日期**：2023-05-26

作者简介：王雨竹(1999-)，女，硕士研究生，主要从事陆基无线电授时方面的研究。

通信作者：秦红磊(1975-)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事无线电导航定位领域方面的研究。

为解决目前对卫星授时的重度依赖而出现授时方式单一化[2]以及为了操作方便而广泛应用的网络授时出现保密安全性问题，可对现有多种授时系统进行研究与完善。多方式授时系统可作为主授时源或备份授时源，对其进行研究满足授时战[3]对授时系统可靠性以及授时服务安全性的需求，从而使多种授时方式进行优势互补，确保我国授时服务的稳定运转。首先对我国现有整体授时服务体系进行梳理，从多角度对比各类授时系统服务性能，包括授时精度、用户数量、信号完好体制以及信号校准体制；其次，选择其中的陆基无线电授时系统作为主要研究对象，分析 BPM 短波授时系统、BPL 长波授时系统以及 BPC 低频时码授时系统授时信号的发播程序以及信号格式等，对部分授时系统信号格式进行修正、补充与完善，给出三类授时系统相应的信号解算方法，并通过处理实际接收到的信号对解算方法进行验证，给出三类授时系统的时间信号时域图；最后，分析我国陆基授时体系的不足，并根据授时战需求给出应对授时战的技术路线。

1 我国整体授时体系

我国主要授时体系，按信号传播方式可分为陆基无线电授时系统、星基授时系统以及其他授时系统[4]。陆基无线电授时系统主要包括 BPM 短波授时系统、BPL 长波授时系统以及 BPC 低频时码授时系统；星基授时系统主要是卫星授时系统、数字电视授时；其他授时系统主要有电话授时、网络授时系统以及新型授时方法等。

陆基无线电授时以无线电发播方式作为时间信息传递手段，利用不同频率的无线电信号作为载波，将时间信息通过不同的调制方式调制到载波上对外播发。电话授时以公共电话交换网络 PSTN (public switched telephone network)为服务平台，通过点对点拨打授时服务专线的方式传递时间信息[5]。网络授时利用网络时间协议 NTP(network time protocol)等时间协议获取时间信息传递给时间用户[6]。卫星授时利用卫星上的时钟源作为时间基准或者将卫星作为时间基准的转发中介来发播时间信息[7]，其授时原理以卫星定位作为基础，利用四颗卫星的空间坐标解出定位目标空间坐标以及时间差[8]。现代数字电视授时以数字电视广播系统 DVB-S(digital video broadcasting-satellite)为基础平台，将授时电文插入数字卫星电视信号中，经数字卫星电视信道将授时电文发播出去[9]。除了上述基本的授时方式外，近些年又发展了一些新型授时方式，如光纤授时、量子时间授时技术等。各类授时系统的精度以及用户数量对比如图 1 所示(其中，横轴授时系统按我国对授时系统研究的先后顺序进行排列)。由图 1 可知，除新型授时方法外，授时系统的用户数量基本上是随着授时精度的提高而增加的。

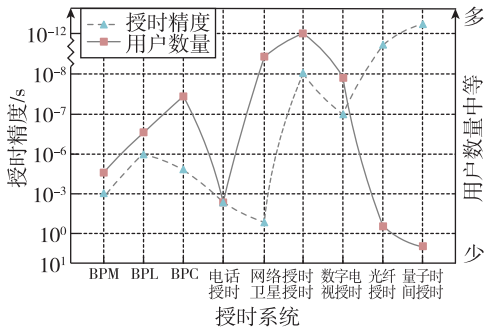


图 1 授时精度、用户数量对比

Fig. 1 Comparison of timing accuracy and number of users

此外，对我国主要授时体系在信号完好体制 SIS (signal integrity system)以及信号校准体制 SCS (signal calibrationability system)上的对比，如表 1 所示。信号完好体制指当授时信号质量降低或不能正常提供时间信息时，授时系统告知用户时间的可用性的体制，即授时系统是否具有自检体制；信号校准体制指授时系统是否具有一定的信号传播时延校准体制。由表 1 可知，授时信号的完好体制与校准体制如今也成为授时系统的重要组成部分。

表 1 信号完好体制与信号校准体制对比

Tab. 1 Comparison of SIS and SCS

授时系统	BPM	BPL	BPC	电话授时	网络授时	卫星授时	数字电视授时
SIS	—	√	√	—	√	√	√
SCS	—	—	—	√	√	√	√

由上述可知，我国已具备较为完善的授时体系。本文选择我国授时体系中的陆基无线电授时系统作为主要研究对象，对陆基无线电授时信号进行分析与解算。

2 陆基无线电授时系统信号分析

我国陆基无线电授时系统根据其使用的不同无

线电频率将其分为:BPM 短波授时系统,载波频率为 2.5 MHz、5 MHz、10 MHz 和 15 MHz 四个,授时精度为毫秒级;BPL 长波授时系统,载波频率为 100 kHz,授时精度为微秒级;BPC 低频时码授时系统,载波频率为 68.5 kHz,授时精度为亚毫秒级。其中,BPM 短波授时系统为完善其系统性能,于 5 MHz 载波信号上插入副载波频率为 125 Hz 的时码信号,由于后插入的时码信号与原时间信号调制方式不同,为加以区分,本文将 BPM 短波授时系统分为 BPM 短波秒信号授时系统以及 BPM 短波时码授时系统。

图 2 给出四类陆基授时系统在发播时间、中断时长以及时效时间上的对比。发播时间指由授时系统发播程序规定的信号播发时间区间;中断时长指在授时系统发播时间内因系统本身发播程序的原因造成无法提供时间信息的总时长;时效时间指时间用户从接收授时信号到可以输出此授时系统能提供的完整时间信息所用的最短时间。

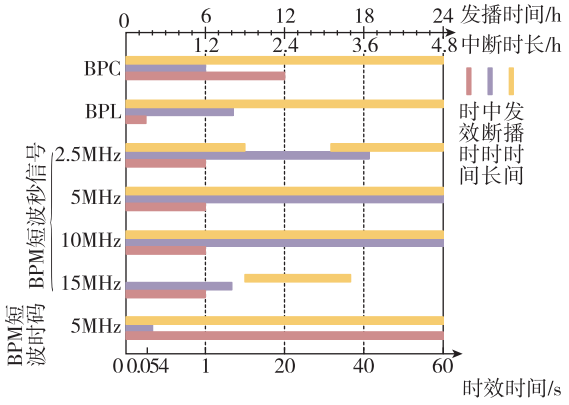


图 2　陆基授时系统发播时间、中断时长、时效时间对比

Fig. 2　Comparison of broadcast time, interruption time, and time-limitation time of land-based time system

2.1　BPM 短波授时系统信号分析

2.1.1　BPM 短波秒信号授时系统

我国短波授时服务主要由呼号为 BPM 的短波授时台负责,于 1966 年着手筹建,于 1981 年正式承担短波授时服务任务。由图 2 可知 BPM 短波秒信号授时系统四种发播频率共同合作可提供全天候 24 h 的短波秒信号授时服务,且此系统是我国唯一一个可提供 UT1 秒信号的授时系统,具有重要价值。

BPM 短波秒信号授时系统载波上承载六类信息,其中包括三类时间信息,分别是 UTC 秒信号、UT1 秒信号及整分信号;另包括无调制载波、BPM 呼号莫尔斯电码以及女生普通话语音广播。发播程序[10]以 30 min 为重复周期,每周期有 UTC 秒信号时段 15 min、UT1 秒信号时段 9 min。时间信息与 BPM 呼号均采用双边带幅度调制的方式调制到载波上向外发播。

时间信息以 1 kHz 标准音频信号的不同完整周波数表示,UTC 秒信号长 10 ms;UT1 秒信号长 100 ms;整分信号长 300 ms,如图 3 所示。

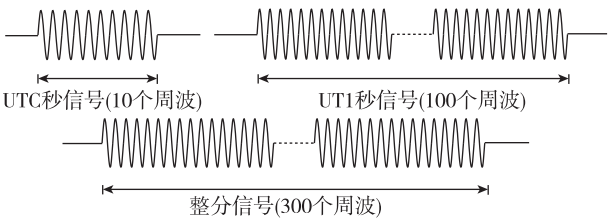


图 3　BPM 时间信号格式

Fig. 3　BPM time signal format

BPM 呼号莫尔斯电码特征为"— · · · · — — · — —"[11],其中"—"由 1 kHz 标准音频信号的 300 个完整周波构成,时长 300 ms;"· "由 1 kHz 标准音频信号的 100 个完整周波构成,时长 100 ms。一个字母的莫尔斯电码表示方式中"—"与"· "的时间间隔为 100 ms,字母与字母的莫尔斯电码表示方式之间的时间间隔为 300 ms,每遍完整的 BPM 呼号莫尔斯电码表示方式之间的时间间隔为 700 ms,其格式如图 4 所示,即每发送一遍完整的 BPM 呼号莫尔斯电码所耗时 4 s,连续播发 10 遍,共耗时 40 s。

图 4　BPM 呼号莫尔斯电码发播格式

Fig. 4　BPM Morse code broadcast format

无调制载波只播发载频信号,不承载时间信息,用来检验标准频率信息。女生普通话语音广播内容为"BPM 标准时间标准频率发播台",播发两遍,共持续 20 s。

2.1.2　BPM 短波时码授时系统

BPM 短波时码授时系统采用在 125 Hz 的副载波上以二进制 BCD 加权编码的方式调制年内儒略日(以每年 1 月 1 日为计数起点,不间断计数到每年 12 月 31 日)、时、分等时码信息,并将其插入 5 MHz 载波上。每一分钟发送一帧完整的时码信息,每秒播发一个脉冲且秒脉冲上升沿与 UTC(NTSC)重合,并以缺少秒脉冲作为帧头起始标志,每帧时码

信息包含 59 个有效脉冲，其中包括 23 位时码信息比特：7 位分信息，6 位小时信息，10 位天数信息，天数信息可转换为 X 月 X 日信息。BCD 编码以秒脉冲持续时长的不同表示不同的比特信息：200 ms 宽脉冲表示“0”比特，480 ms 宽脉冲表示“1”比特，另 800 ms 宽脉冲为定位分隔标志位。2014 年，中国科学院国家授时中心蒙智谋发表《BPM 短波时码授时发播技术方案》一文，指出短波时码的帧结构[12]。但经实验验证，目前时码帧结构已经更改，本文根据接收到的实际信号，对时码的帧结构以及标志位与权重进行猜测，更新其帧结构如图 5 所示。更新后的帧结构已经通过后续实际实验得到了验证，保证与目前正在发播的 BPM 短波时码帧结构保持一致，其中 P0～P5 为定位分隔标志；Pr 表示缺少秒脉冲，为帧参考标志；P6 为保留位。

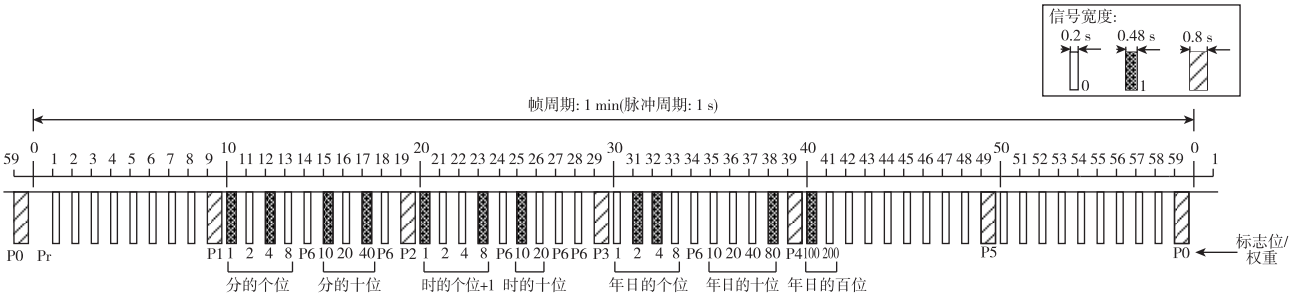


图 5 BPM 时码帧结构

Fig. 5 BPM timecode frame structure

2.2 BPL 长波授时系统信号分析

专门担任我国长波授时的是呼号为 BPL 的长波授时台，它是我国首个利用罗兰-C 脉冲信号体制实现陆基授时功能的系统，于 1975 年着手筹建，1983 年建设完成，可提供秒时间信息，但无法提供时码信息[13]；2006 年对系统进行技术改造，增加数据发播功能，可提供时码信息；2008 年，系统完成技术改造并投入使用。

改造后的 BPL 长波授时系统采用罗兰-C 信号体制发播周期性脉冲组信号，与我国罗兰-C 导航台链共用一套信号体制。一个罗兰-C 台链由多个发射台组成，其中必须有且只有一个主发射台，其他为副发射台。副台一组脉冲组信号发播 8 个单脉冲，每个脉冲之间的间隔为 1 ms；主台一组脉冲组信号发播 9 个单脉冲，前 8 个脉冲间隔为 1 ms，第 8 与第 9 个脉冲之间的间隔为 2 ms，作为区分主副台的标志。副台脉冲组信号在主台脉冲组信号播发完毕后经过一定的时间延迟后再进行播发，单个脉冲是根据钟形脉冲进行调制得到的[14]。每个罗兰-C 台链都有各自的信号播发周期，称为组重复周期 GRI(group repetition interval)，并分为奇数周期和偶数周期，奇偶数周期内主副台根据不同的相位编码调制脉冲组信号[15]，罗兰-C 台链的信号播发格式以及奇偶周期相位编码规则如图6所示(“+”

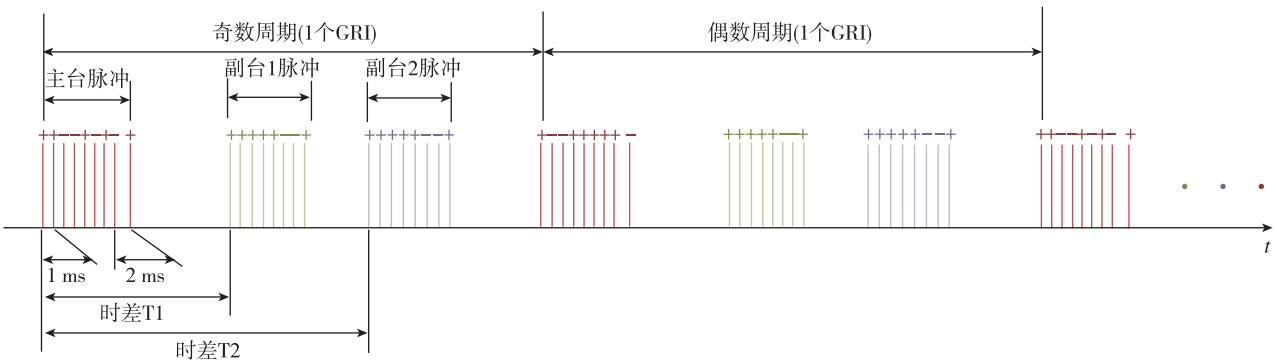


图 6 罗兰-C 台链信号发播格式与相位编码规则

Fig. 6 Loran-C signal transmission format and phase coding rules

号表示起始相位为 0 弧度相位，“-”号表示起始相位为 π 弧度相位）。BPL 长波授时台是独立于罗兰-C 台链外的授时专用系统，作为主发射台工作，GRI 为 60 ms。

BPL 长波授时系统的时码发播功能主要依靠数字调制技术，其采用脉冲位置调制技术 PPM (pulse position modulation)，并发展出“Eurofix”数字调制方法[16]。其调制原理是对经相位编码后的脉冲组中第 3 到第 8 个单脉冲进行三种时移调制，如图 7 所示，并规定 6 个被调制的脉冲需进行平衡调制，即超前 1 μs 调制脉冲个数要与滞后 1 μs 调制脉冲个数相等。根据上述编码原理，从 141 种平衡调制状态选取128种与标准ASCII码(7位一组的二进制码)建立调制序列对应关系(调制图样[17])即可将二进制码调制到脉冲组信号中，即一组脉冲组信号对应 7 位二进制码。

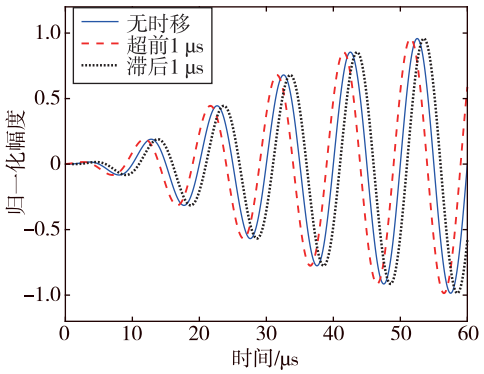


图 7　罗兰-C 信号 PPM 调制

Fig. 7　Loran-C signal PPM modulation

BPL 长波授时一份完整的帧信息需要同一发射台的连续 30 组 GRI 构成的 210 位比特信息[18]，其中有 56 位为授时电文，BPL 授时电文有两类，即授时电文 1 和授时电文 2[17]。授时电文播发以五组电文为一循环，五组电文中先播发一组授时电文 1，再播发四组授时电文 2。根据授时电文结构进行解码即可解算出时码信息，且当前授时电文给出的时间信息是下一组待调制的 30 个 GRI 脉冲组的第一个脉冲的起始时刻。(注：BPL 长波授时台台标识为 0001)。

2.3　BPC 低频时码授时系统信号分析

低频时码授时系统是一种特殊的长波授时系统，主要应用于民用电波表。我国低频时码授时台呼号为 BPC，于 1994 年着手筹建，1999 年建成试验发播台，2006 年正式于河南商丘建立 BPC 低频时码发播台并于 2007 年正式担任低频时码发播任务[19]。

BPC 低频时码授时信号以关断型 OOK 信号为基础，采用将幅度与脉冲宽度同时进行调制的方式将比特信息调制到 68.5 kHz 的载波上对外发播。BPC 低频时码帧周期为 20 s，每秒发播一个秒脉冲，以秒脉冲不同的占空比表示不同比特信息。其帧结构如图 8 所示，各标志位含义如表 2 所示。

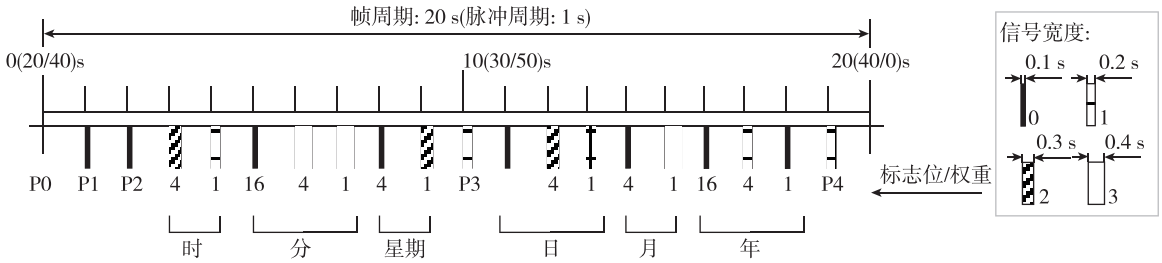


图 8　BPC 低频时码帧结构

Fig. 8　BPC low-frequency timecode frame structure

表 2　BPC 标志位含义与用法

Tab. 2　BPC flag bit meaning and usage

标志位	P0	P1	P2	P3	P4		
含义	帧起始预告	帧标志位	预留位	校验位	午前/午后标志	校验位	年最高两位标志
用法	缺少秒脉冲	0:第 1s 1:第 21s 2:第 41s	扩充信息	0/2:P1P2 时分星期位满足偶校验 1/3:P1P2 时分星期位满足奇校验	0/1:午前 2/3:午后	0/2:日月年位满足偶校验 1/3:日月年位满足奇校验	0/1:20XX 年 2/3:21XX 年

3 陆基无线电授时系统信号解算

各类授时系统可为时间用户提供时间信息的前提是对授时信号进行相应的解算。本章根据授时信号的不同特征设计不同的解调解算方法，提取时间信息，并根据实际接收到的信号对解算方法进行验证，给出实际信号解算结果图。

3.1 BPM 短波授时系统信号解算

3.1.1 BPM 短波秒信号授时系统信号解算

对于 BPM 短波授时秒信号解调方法采用相干解调，后利用互相关法提取其中的时间信息。由于 BPM 短波秒信号授时系统是我国目前唯一一个既播发 UTC 秒信号也播发 UT1 秒信号的授时系统，要想应用其中的秒时间信息，还需对秒信号进行判定与分类，以便于后续对起始时刻进行校准处理，其中，虽然整分信号特征不受秒信号种类影响，但也需根据当前播发秒信号类型将其分为 UTC 阶段整分信号与 UT1 阶段整分信号。时间信息的判定与分类采用峰值检测的方法检测时间信号周波个数，具体的判定与分类流程如图 9 所示。BPM 呼号时段不包含秒时间信息，只能判定 BPM 呼号开始时刻处于一个小时内的第 29 min 或第 59 min。

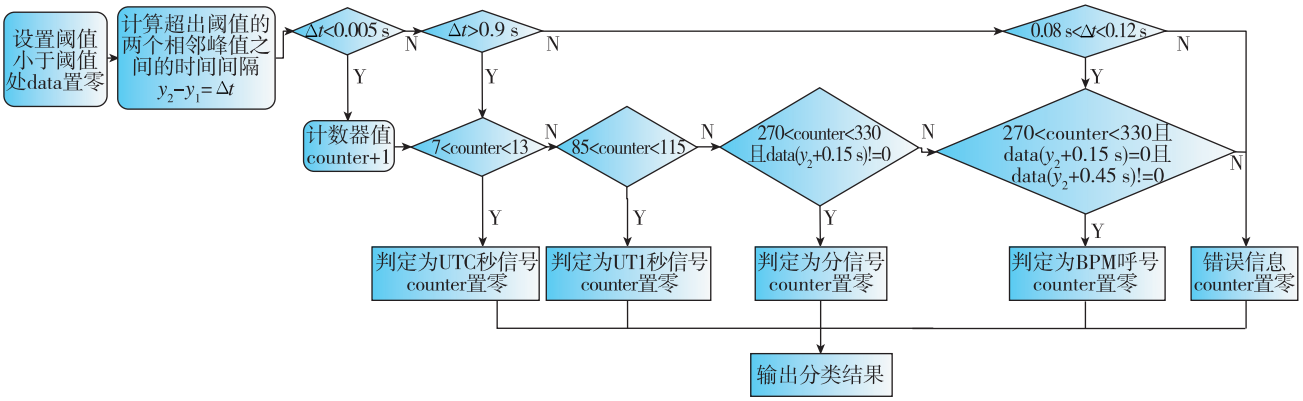


图 9 BPM 时间信息分类

Fig. 9 BPM time information classification

时间信息分类后，可利用高时间精度的秒脉冲对 BPM 短波秒信号的起始时刻进行校准后可输出相应的秒起始时刻。整体的 BPM 短波秒信号解算流程如图 10 所示。

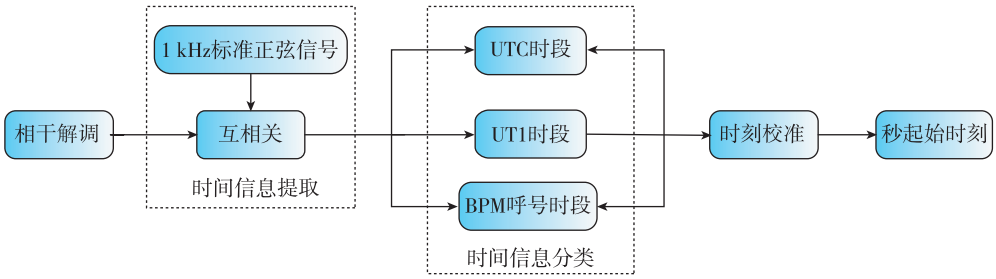


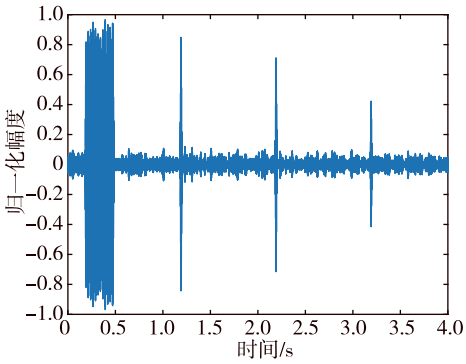
图 10 BPM 短波秒信号解算流程

Fig. 10 BPM shortwave second signal solution flow

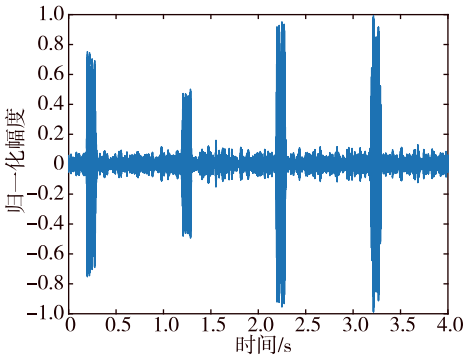
根据上述处理流程，对实际信号进行时间信息的提取如图 11 所示，图 11 (a)为整分信号以及 UTC 秒信号，图 11 (b)为 UT1 秒信号。

3.1.2 BPM 短波时码授时系统信号解算

根据更新后的帧结构，设计 BPM 短波时码授时信号的解算流程。首先对接收到的信号进行相干解调以及相关滤波等初步处理后得到数据帧信号，数据帧以缺少秒脉冲为帧起始标志，在对时码进行解算前需对帧头位置进行识别：若两个相邻脉冲上升沿的时间间隔大于 1.5 s，则认为后一个上升沿为 1 min 内第 1 s 的秒起始时刻。帧头位置识别成功后，再识别脉冲宽度。本文选择识别上升沿与下降沿并计算相邻的一对上升沿和下降沿之间的时间间隔作为脉冲宽度的判别标志，根据识别的脉冲宽度输出一组二进制数据，按数据帧结构以及相应权重进行时码的解算。



（a）整分信号与 UTC 秒信号时域图



（b）UT1 秒信号时域图

图 11　BPM 时间信号时域图

Fig. 11　BPM time signal time domain plot

根据上述解算流程对实际信号进行处理，图 12 给出 P1～P2 前的数据，输出一份二进制数据“010000100”，根据帧结构可解算出处于 22 分。

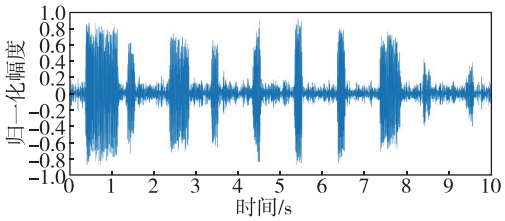


图 12　BPM 时码部分结果

Fig. 12　BPM timecode partial result

3.2　BPL 长波授时系统信号解算

对 BPL 长波授时系统的信号解算分为对信号的解调以及对授时电文的解算。

根据长波授时信号的 PPM 调制方式，选用互相关算法对信号进行解调。选取每个 GRI 所包含的脉冲组中第一个未经调制的单脉冲作为参考脉冲，将参考脉冲分别与同个脉冲组中第 3 到第 8 个单脉冲进行互相关，判定奇偶周期，奇偶周期识别流程如图 13 所示。

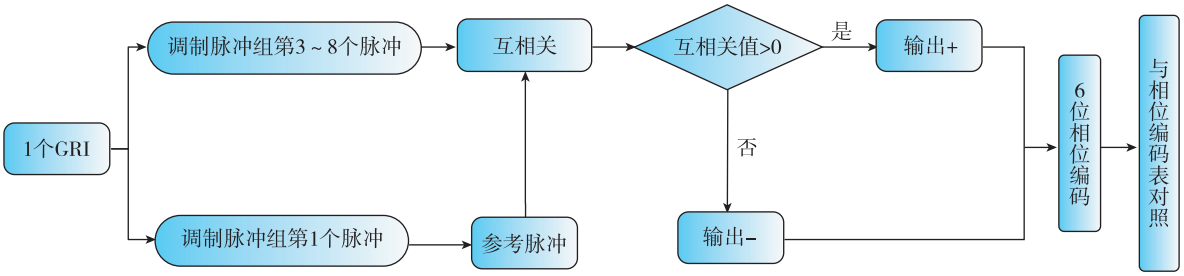


图 13　BPL 周期判定

Fig. 13　BPL cycle determination

奇偶周期识别成功后，根据相位编码规则对参考脉冲进行相位调整，将调整后的参考脉冲再进行时移处理，生成超前 1 μs 参考脉冲以及滞后 1 μs 参考脉冲，将三类参考脉冲分别与同一脉冲组中的第 3 到第 8 个脉冲进行互相关累加，比较互相关累加值，可输出一组 6 位解调序列[14]，其互相关解调算法流程如图 14 所示。

将上述经互相关算法得到的 6 位解调序列进行平衡调制检验后与调制图样进行对照即可得到一个十进制数据，再将此十进制数据转为 7 位二进制数据，如此重复直至找到 BPL 长波授时数据帧帧头位置。但 BPL 的数据帧并没有设置帧头标志，且由于受到罗兰-C 台链信号的交叉干扰导致 RS 纠错码与 CRC 校验码无法使用，因此本文提出并设计利用数据帧中所包含的授时电文信息的前 7 位比特信息对应的脉冲组作为数据帧的帧头位置，即识别到 7 位二进制数据为 0100010（授时电文 1 型）或 0100100（授时电文 2 型）时，则认为此对应的脉冲组为可能的数据帧帧头位置。为了避免在数据帧内部也出现 0100010 或 0100100 信息组，在识别到此两种信息组后，再识别此位置后 1.8 ms（一组完整数据帧时长）位置处的信息组，若同样为 0100100 或 0100100，则认为帧头识别成功，反之则重新进行帧头位置的寻找。

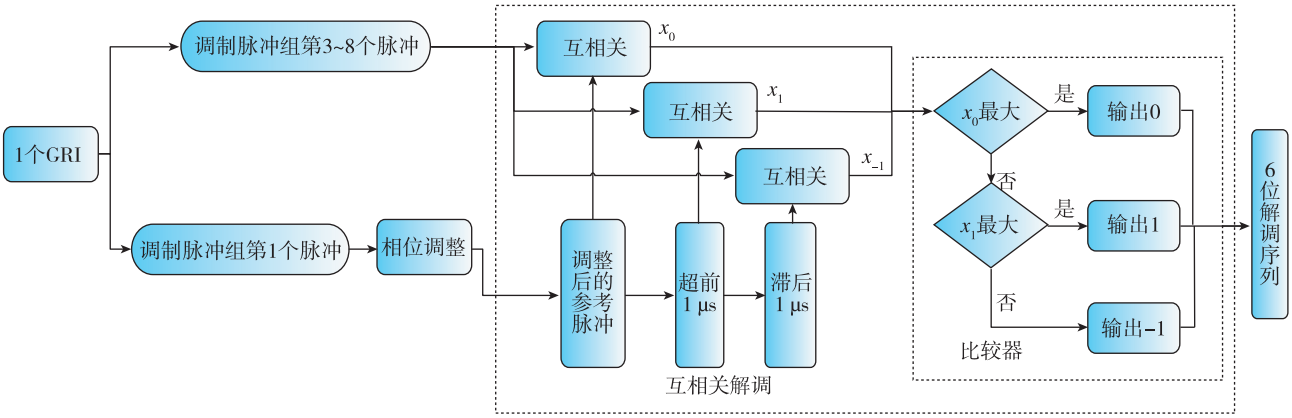


图 14 BPL 互相关解调

Fig. 14 BPL cross-correlation demodulation

帧头位置识别成功后，对包含帧头位置在内的 30 个 GRI 脉冲组进行互相关解调以及平衡调制校验等工作后得到 210 位解调后的比特信息，其中前 56 比特为授时电文，根据授时电文类型进行相应规则的解算，可输出对应的时间信息。其对应的信号解算整体流程如图 15 所示。

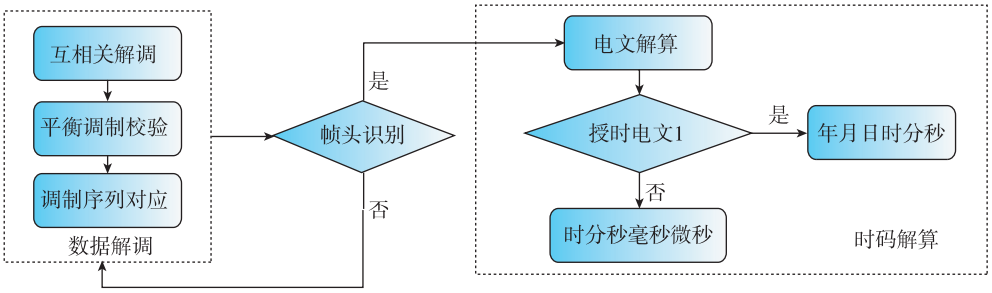


图 15 BPL 信号解算流程

Fig. 15 BPL signal solving process

根据上述流程对实际信号进行解调测试，结果如图 16 所示。用“-”表示超前调制，用“＋”表示滞后调制，用“0”表示未超前滞后，则下图表示的调制序列为“0 - ＋ - 0 ＋”，符合平衡调制。

3.3 BPC 低频时码授时系统信号解算

BPC 低频时码授时信号帧结构清晰，数据帧内包含编码后的年、月、日、星期、时及分等时码信息。对时码信息的解算，首先需对接收到的 BPC 低频时码授时信号进行相关滤波与包络提取等初步处理，后对经初步处理得到的数据帧进行帧头位置的识别，由于 BPC 时码帧以缺少秒脉冲为帧起始预告标志。因此判定两个相邻的脉冲上升沿时间间隔大于 1.5 s 时，认为后一个脉冲上升沿所属的秒脉冲为 P1 帧标志脉冲。完成帧头位置识别后，才可对时帧进行时码解算，随后对秒脉冲宽度进行识别，识别上升沿与下降沿并计算相邻的一对上升沿和下降沿之间的时间间隔作为脉冲宽度的判别标志，根据识别的脉冲宽度输出一组四进制数据，按照规定权重对数据进行解码并转换为二进制后对结果进行校验，若校验失败，则需重新进行下一时间段的数据初步处理以及帧头识别；若校验成功，则根据数据帧结构与权重输出解算的时码信息。

BPC 低频时码授时信号除了包含时码信息外，还隐藏有秒信息：由于数据帧每秒发播一个脉冲，可选择脉冲的上升沿作为秒起始时刻。在时码解算成功的基础上，对下一数据帧进行同样的相关滤波以及包络提取等初步处理后进行秒脉冲上升沿的识别即可输出含有年、月、日、星期、时、分以及秒起始时刻等授时信息，其具体的解算流程如图 17 所示。

根据上述的解算流程对实际接收到的 BPC 低频时码授时信号进行相应的解算验证，如图 18 所示，根据脉宽可输出一组四进制数据“200210312301311-1120”，将除校验位的其他标志位转为二进制后的二进

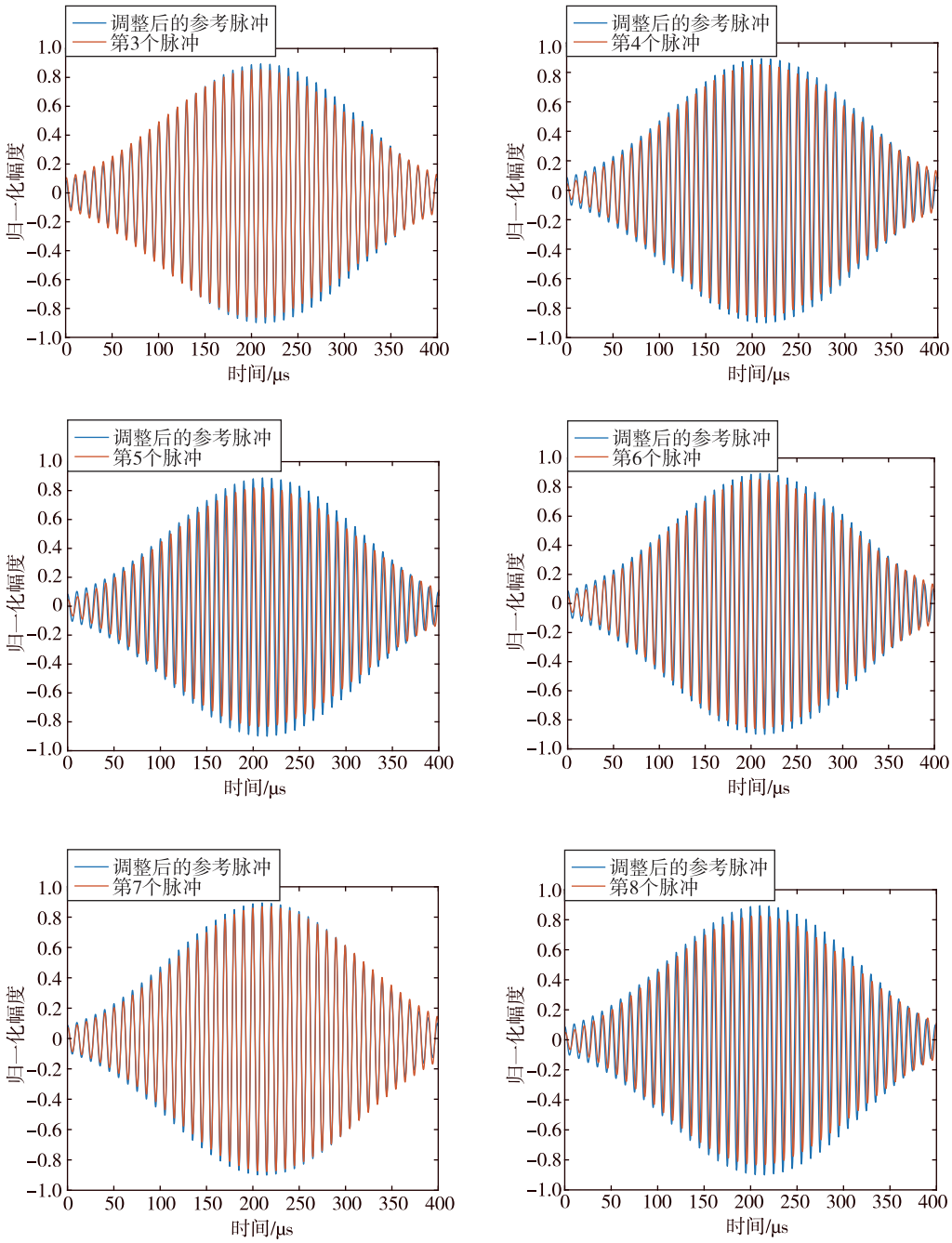


图 16　PPM 解调结果

Fig. 16　PPM demodulation results

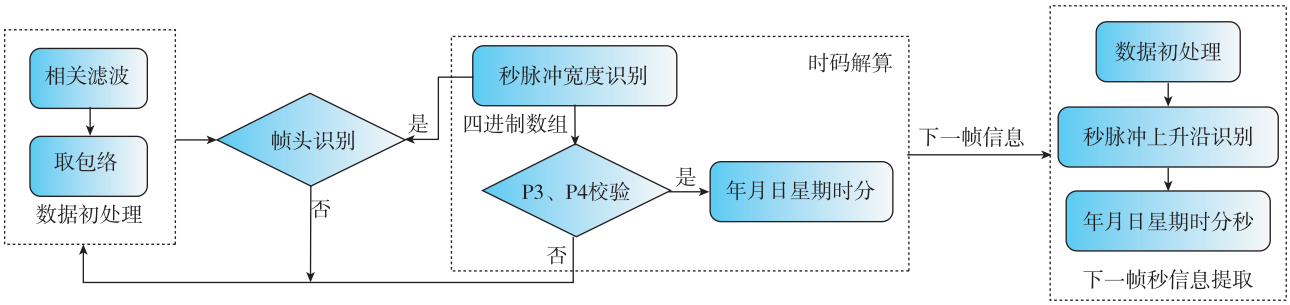


图 17　BPC 信号解算流程

Fig. 17　BPC signal solving process

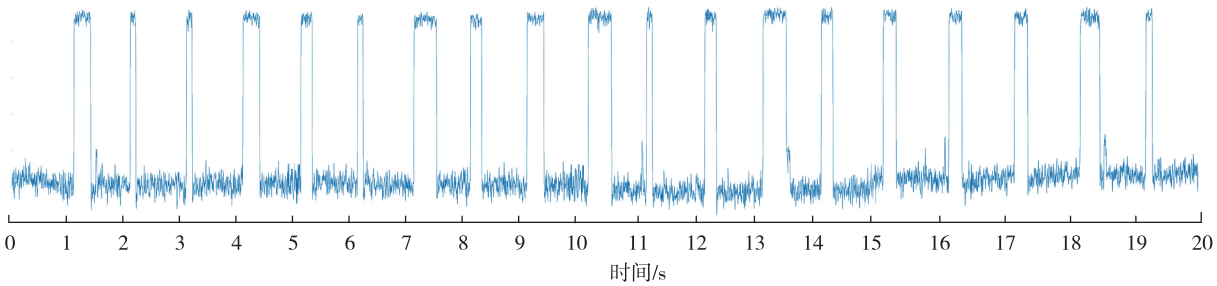


图 18 BPC 完整帧解调结果

Fig. 18 BPC full frame demodulation results

制数据为“10(P1)0(P2)10(时)10011(分)110(星期)3(P3:奇校验)111(日)101(月)10110(年)0(P4:偶校验)”,根据帧结构判定满足奇偶校验,数据解码正确,最终得到时码信息为“2022 年 5 月 7 日星期六下午 2 点 19 分”。

以图 18 完整数据帧解出的时码信息作为时间基础,可从下一帧开始进行 BPC 低频时码授时信号的秒信号识别。由于图 18 中显示 P1 标志位为 2,表示图 18 完整帧起始秒为第 41 s,下一完整帧的起始秒应为下一分钟的第 1 s,所以进行下一帧第 1 s 秒信号识别后的时间信息应为 2022 年 5 月 7 日星期六下午 2 点 20 分 1 秒。

4 授时体系现状及发展展望

从我国目前的授时体系发展现状来看,虽然具备了基本的陆基、星基以及网络等授时系统,但卫星授时以其高精度以及方便性占据了授时系统主导地位,对陆基无线电授时系统以及其他授时系统的应用与改进被放在次要地位。从本文研究的 BPM、BPL 及 BPC 三类授时系统来说,BPM 短波时码的帧结构设计采用一分钟帧长,占用资源过大且比特保留位过多造成资源浪费;BPL 长波授时系统信号体制与罗兰-C 导航台链共用一套,导致交叉干扰的出现,会大大降低解码效率与正确性;BPC 低频时码授时系统应用范围局限大,目前主要应用于民用钟表。从其他授时体系来说,我国授时系统被禁锢在陆空,对可在水下应用的授时系统研究甚少。授时战的提出将授时系统列入特殊时期主要攻击对象之一,因此如何能够有效应对授时战是一个非常值得关注并研究的问题。

根据授时战的要求,本文认为可从五个方面对我国的授时体系进行升级与改造,分别是:完备性、稳健性、灵活性、可靠性以及抗扰性。

1)完备性:是充分利用各授时系统优势达到协作授时的关键,在特殊时期下尤为重要。在对于现有授时系统进行改进和完善的基础上,也可研究新型授时方法,如通过研究水下授时方法,扩充授时体系备份力量,实现立体海陆空授时的全覆盖,提高授时体系的物理抗打击性。

2)稳健性:为国土范围内能稳定接收各类授时信号提供信号基础,包括提高授时信号发播时间的连续性以及各授时信号覆盖范围的重叠冗余性,以弥补如我国 BPM、BPL 授时系统中出现授时信号中断而不能提供授时服务的情况。

3)灵活性:集成各类授时系统,形成自成一体的强机动型且便携式设备,保证授时方法切换的灵活性以及信号接收设备移动上的灵活性。

4)可靠性:对时间发射与接收设备进行服务性能上的改进,应尤其注重授时精度与守时精度,由此提高时统设备提供时间信息的正确性和精确性,增强授时信息的可信任程度。

5)抗扰性:综合考虑有线授时与无线授时系统,对信号体制以及硬件接收设备进行合理设计,以提高授时信号对抗外界人为干扰能力以及各类信号之间的相互干扰,如 BPL 的交叉干扰等。

根据上述内容,简化应对授时战的技术路线如图 19 所示。

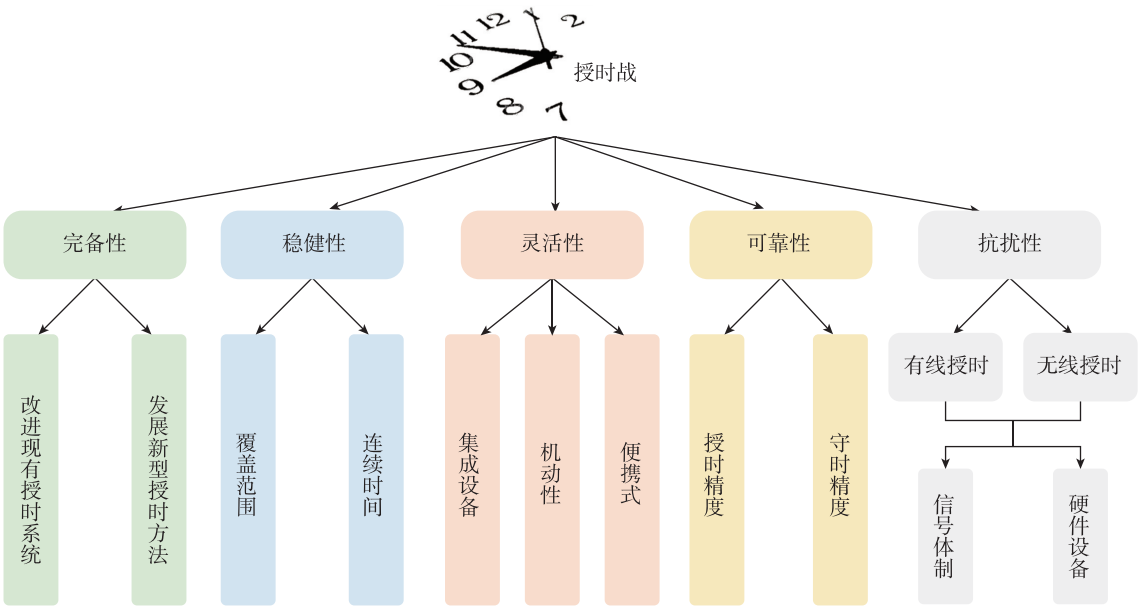


图 19　应对授时战技术路线

Fig. 19　Technical route dealing with the time-based warfare

参考文献

[1] 葛悦涛，薛连莉．美国导航战与授时战劣势分析[J]．飞航导弹，2020 (6)：6-11.
GE Yuetao，XUE Lianli. Analysis of the disadvantages of US navigation warfare and timing warfare[J]. Winged Missiles Journal，2020 (6)：6-11(in Chinese).

[2] MITCH L. What if the global positioning system didn't work[J]. Engineering，2019，5(6)：985-986＋1090-1092.

[3] TRUMP D J. Executive order on strengthening national resilience through responsible use of positioning，navigation and timing services[J]. Executive Order，2020，13905.

[4] 郭美军．BPM 授时信号监测方法研究[D]．西安：中国科学院研究生院(国家授时中心)，2013.
GUO Meijun. Study on the methods of BPM time service signal monitor[D]. Xi'an：Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center)，2013(in Chinese).

[5] 华宇，郭伟，燕保荣，等．我国授时服务体系发展现状分析[J]．时间频率学报，2016，39(3)：193-201.
HUA Yu，GUO Wei，YAN Baorong，et al. Developing status of national time service architecture[J]. Journal of Time and Frequency，2016，39(3)：193-201(in Chinese).

[6] JIE X，LIANG X，LIAN D，et al. Research on network timing system based on NTP[A]. Yangzhou：2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)[C]// IEEE，2017：356-360.

[7] 张宝全，周枫，张少泉．卫星信号捕获跟踪仿真与卫星授时的实现[J]．软件，2017，38(8)：107-11.
ZHANG Baoquan，ZHOU Feng，ZHANG Shaoquan. Satellite signal capture and tracking simulation and implementation of satellite time service[J]. Software，2017，38(8)：107-11(in Chinese).

[8] 秦红磊，丛丽，金天．全球卫星导航系统原理、进展及应用[M]．北京：高等教育出版社，2019：56-57.
QIN Honglei，CONG Li，JIN Tian. Principle，progress and application of global satellite navigation system[M]. Beijing：Higher Education Press，2019：56-57(in Chinese).

[9] 向渝，华宇，许林生，等．基于 DVB-S 的数字卫星电视授时方法研究[J]．时间频率学报，2014，37(2)：74-79.
XIANG Yu，HUA Yu，XU Linsheng，et al. Study on digital satellite-television time-service based on DVB-S[J]. Journal of Time and Frequency，2014，37(2)：74-79(in Chinese).

[10] 陈永奇，邢燕，陈颖明．BPM 短波定时接收机的设计与实现[J]．时间频率学报，2016 (2)：95-103.
CHEN Yongqi，XING Yan，CHEN Yingming. Design and implementation of a BPM shortwave timing receiver[J]. Journal of Time and Frequency，2016 (2)：95-103 (in Chinese).

[11] BAKDE N S，THAKARE A P. Morse code reader

[J]. International Journal of Recent Technology and Engineering,2012,1(4): 2278-7798.

[12] 蒙智谋. BPM 短波时码授时发播技术方案[J]. 时间频率学报, 2014, 37(3): 145-150.
MENG Zhimou. Dissemination scheme of BPM shortwave time code time-service[J]. Journal of Time and Frequency, 2014, 37(3): 145-150(in Chinese).

[13] 李瑞敏. 长波授时附加二次相位因子 ASF 时延修正的研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2012.
LI Ruimin. Research on the ASF correcting of long-wave time server [D]. Xi'an: Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2012(in Chinese).

[14] 靳小琴. Loran-C 信号接收处理及实现[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2020.
JIN Xiaoqin. Receiving and processing of Loran-C signal[D]. Beijing: Beihang University, 2020(in Chinese).

[15] JIEW, WEN O Y. The research of timing application and synchronization technology of Chinese Loran-C system[A]. 2010 2nd International Conference on Industrial and Information Systems[C]// IEEE, 2010, 2: 390-393.

[16] WILLIGEN D. Eurofix [J]. Journal of Navigation, 1989, 42(3): 375-381.

[17] 孙瑾颖. 长波授时信号模拟器的设计与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
SUN Jinying. Design and realization of long wave timing signal simulator[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021(in Chinese).

[18] 段建文. BPL 长波授时信号发播控制方法的研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2008.
DUAN Jianwen. Study on the broadcast control method of the BPL long wave time service signal[D]. Xi'an: Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2008(in Chinese).

[19] 顾卓璟. 低频时码接收系统的研究设计[D]. 南京: 南京大学, 2012.
GU Zhuojing. Research and design of low frequency time-code system[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012(in Chinese).

(编辑:孟彬)