

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2019-03-0248-08

# BPM 短波授时发播系统及其通道时延分析与测量

谢亮, 芦旭, 蒙智谋, 段建文

(中国科学院 国家授时中心, 西安 710600)

**摘要:** BPM 短波授时系统七部短波发射机及监测控制设备的更新改造于 2018 年全部完成, 由于设备更换, 原 BPM 短波授时发播系统的时延修正值已无法适用于当前系统。重新测量系统各模块的时延, 分析时延产生的原因, 对于提高短波授时发播时刻精度至关重要。主要对短波授时发播设备、控制设备等关键设备的时延值进行了测量, 分析了时延产生的主要因素, 为短波授时发播时刻的时延修正提供参考。

**关键词:** 短波授时; 发射机; 时延

## An analysis and measurement on the time delay of BPM short wave broadcasting system and its channel

XIE liang, LU xu, MENG Zhi-mou, DUAN Jian-wen

(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

**Abstract:** The National Time Service Center update seven shortwave BPM transmitters and the control systems of these transmitters in 2018. Due to the change of the hardware, the time delay correction values of the old BPM system cannot be used. Therefore, it is necessary to measure the time delay of the new system. Here, we report the measurement of time delays of the new equipments, i.e., the new transmitters and the new control system, and analyze the main reasons of equipment time delays.

**Key words:** shortwave time service; transmitter; time delay

## 0 引言

BPM 短波授时系统是国家重大科技基础设施之一, 是我国地基无线电授时服务、国家时频体系的重要组成部分<sup>[1]</sup>。短波授时信号主要靠天波进行传播, 不受网络枢纽和有源中继体制约, 因而具有传播距离远和战时顽存性强等优点<sup>[2]</sup>。尽管当前新型授时手段不断涌现, 但在丛林、山区等卫星信号易受遮挡的弱覆盖地区, 短波授时依然能够发挥其独特优势。准确测量短波授时发播系统的时延, 并采用闭环控制方式予以补偿, 对于提高短波授时发播时刻准确度, 更好地服务短波授时用户群具有积极的作用。

收稿日期: 2019-01-23; 接受日期: 2019-03-24

基金项目: 中国科学院国家授时中心青年创新人才资助项目(Y824SC1S11)

作者简介: 谢亮, 男, 工程师, 主要从事长短波授时技术与方法研究。

## 1 BPM 短波授时发播系统的组成及时延分析

BPM 短波授时发播系统组成如图 1 所示, 时频监控室提供标准时间频率信号, 短波授时台采用发播设备, 将标准时间频率信号通过无线电传播出去。由于短波授时台的核心设备短波发射机进行了升级改造, 从而导致短波授时系统发播端的时延发生变化。因此, 需要重新测量发射机及其他更新设备的时延, 以准确修正 UTC 发播提前值。

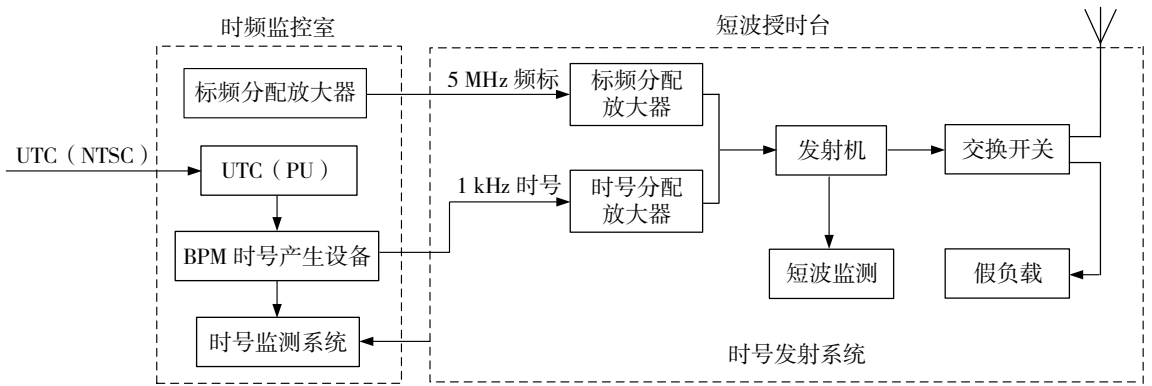


图 1 BPM 短波授时发播系统组成框图

BPM 短波授时监测系统主要用于监测短波授时信号的相位准确度及稳定性。该系统可监测的时延为从 BPM 时号产生设备输入端到 BPM 专用接收机输出端信号的延迟。通过在时间频率监控室外架设固定宽带天线, 采用四通道 BPM 专用监测接收机 (对应 BPM 四个载波频率) 接收 BPM 时号, 比较接收解调信号某固定电平相对于 UTC (PU) 相位差, 即可实现对 BPM 短波授时发播系统时延的监测, 通过多次测量, 取平均值作为发播时延的修正参考值, 原理框图如图 2 所示。

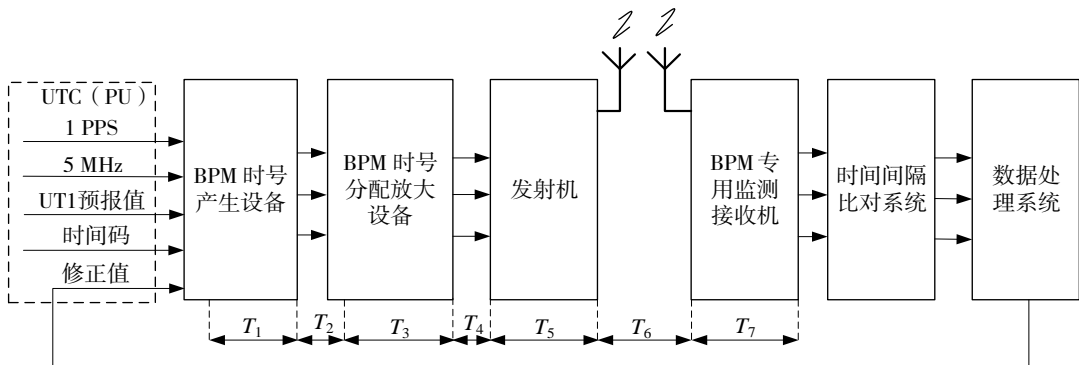


图 2 BPM 短波授时监测系统

根据图 2, BPM 短波授时系统的发播时延分为七部分。 $T_1$  为 BPM 时号产生设备自身的时延, 该时延可通过时间比对系统比较 UTC (PU) 与时号产生设备输出信号某固定电平的相位监测。 $T_2$  为 BPM 时号产生设备到 BPM 时号分配放大设备之间的时延, BPM 时号产生设备放置在时间频率监控钟房, BPM 时号分配放大设备放置在短波授时台监控机房, 两地相距约 50 m, 通过电缆连接, 其延迟为电缆所产生的延迟。 $T_3$  为 BPM 时号分配放大器自身的时延, 时延测量方法与发射机时延测试方法一致。 $T_4$  为 BPM 时号分配放大器到短波发射机之间的时延, 两者之间通过电缆连接, 长度不超过 30 m, 其时延为电缆所产生的延迟; $T_5$  为发射机自身时延; $T_6$  为短波授时信号的空间电波传播时延, 由于接收地点距离发播天线不足 100 m, 故其时延可忽略不计; $T_7$  为短波接收机时延。

## 2 短波授时发播设备时延分析

发射机作为短波授时发播系统的核心设备,分析研究其工作原理、电路结构,信号失真度,对于准确把握发射机的时频性能,精确计算发播时刻精度具有重要的意义。短波授时系统的发播历史上有过两次发射机升级改造,1998年以前使用的短波发射机为乙类屏调机,协调世界时(UTC)发播时刻准确度优于 $\pm 100 \mu\text{s}$ 。之后采用了当时较为先进的脉宽调制(PDM)发射机,时延平均值约 $80 \mu\text{s}$ ,相较于乙类屏调机时延有所减少。2013年之后逐步使用目前最为先进的固态发射机。

### 2.1 脉宽调制(PDM)发射机和全固态发射机的区别

脉宽调制(PDM)发射机与固态发射机最大的区别在于固态发射机采用了功率合成技术,使用全固态器件,发射机的功放、电源、滤波等功能均采用模块化设计。这种设计相较于PDM发射机,以晶体管代替电子管,延迟大幅降低,同时取消手动调谐匹配机械结构,频率切换时间减小,从而增加了发射机的可靠性<sup>[3]</sup>。

脉宽调制(PDM)发射机原理如图3所示。音频信号对方波进行脉宽调制,放大后经调制级滤波还原,脉冲放大器和调制级均处于开关状态。高频末级(被调级)工作于丙类或丁类状态。因此,PDM发射机的信号时延是信号经比较器、脉冲放大器、调制级、低通滤波器、高频末级到天线端口的时延总和。

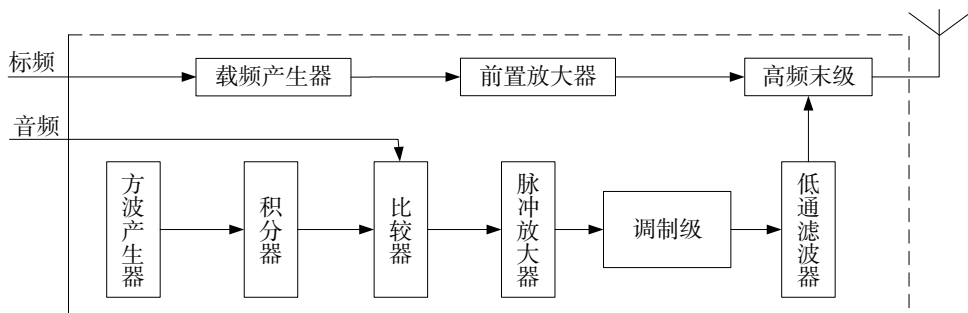


图3 脉宽调制(PDM)发射机原理

固态短波发射机原理如图4所示。频率合成器将标准频率信号通过频率合成与音频同时送至信号调制器进行幅度调制。已调信号经高精度衰减控制进行调幅度设置并送推动级放大器进行第一级放大,放大之后的信号由功率分配器分解成十六路分别送往十六个功率放大模块,每个模块采用滤波器单独滤波。滤波器的十六路信号每四路进行一次功率合成,从而得到四个功率合成单元。四路放大后的信号再次进行功率合成,最后送往定向耦合器,通过天线辐射出去<sup>[4]</sup>。因此,全固态发射机的信号时延是时号经信号调制器、推动级放大器、功率分配器、功放电路、滤波电路、功率合成电路、匹配电路至天线端口所产生的延迟。

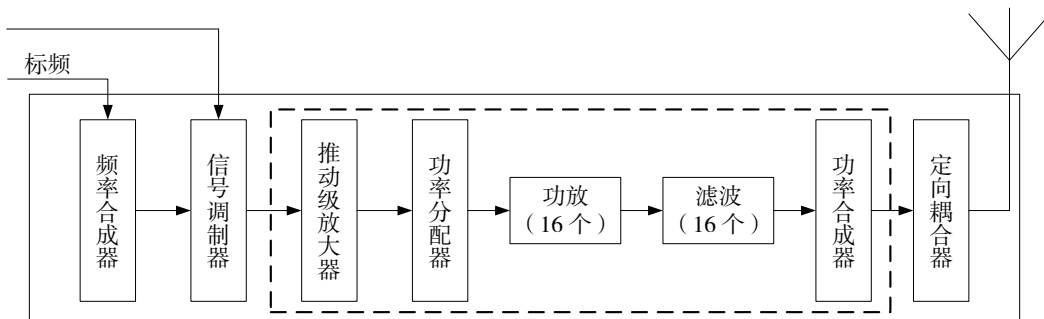


图4 全固态短波发射机原理图

## 2.2 全固态发射机性能指标对调制信号的影响

对于固态发射机, 功放单元的非线性以及滤波器的电路设计结构是产生时延的主要因素, 将作为分析研究的重点, 其余模块的时延对整个发射机的时延影响不大, 文中不作分析。

BPM 短波授时信号采用 2.5, 5, 10 和 15 MHz 四个频点作为载波信号, 使用 1 kHz 正弦波的固定周波表示 UTC 和 UT1 信号。UTC 的秒信号宽度为 10 ms, 整分信号宽度为 300 ms。UT1 的秒信号宽度为 100 ms, 整分信号宽度为 300 ms<sup>[5]</sup>。采用 1 kHz 正弦周波实现 UTC 秒信号和分信号的数学表达式如式(1)所示:

$$f(t) = \begin{cases} \sin(2\pi t f_0) & f_0 = 1 \text{ kHz} \quad t_{\text{sec}} \in (0 \sim 10 \text{ ms}); t_{\text{min}} \in (0 \sim 300 \text{ ms}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

BPM 短波授时信号采用双边带幅度调制, 将调幅信号表示为  $u_1(t)$ , 则通用数学表达式可用式(2)表示:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= A[1 + mf(t)]\sin \omega t = A[1 + m \sin \Omega t]\sin \omega t = \\ &A \sin \omega t + \frac{1}{2} mA[\cos(\omega - \Omega)t - \cos(\omega + \Omega)t], \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中,  $\omega$  为载波角频率,  $\Omega$  为调制信号角频率,  $m$  为调制度,  $A$  为载波幅度。

固态发射机的前级电路中, 调制振荡电路产生的射频信号功率很小, 无法满足发射要求, 因此信号需要经过一系列的放大、缓冲、滤波、功率合成等变换过程, 在获得足够大的射频功率之后, 才能馈送到天线上辐射出去。

为获得足够大的射频输出功率, 全固态发射机采用了射频功率放大器, 这也是整个发射机的核心模块。功率放大器使用的晶体管为非线性器件, 因而产生新的频率分量, 通常为二次、三次等多次谐波<sup>[6]</sup>, 发射机中的滤波器采用椭圆函数结构实现对谐波分量和杂散分量的滤除和抑制, 该滤波器对带内基波的衰减小于 0.3 dB, 对带外谐波分量的衰减大于 50 dB, 保证发射机符合 ITU 的相关规定和要求。

短波发射机中, 功率放大器晶体管的非线性性质和滤波器模块的结构特性是产生时延失真的主要环节。由于幅频特性和时延特性互相关联, 幅频特性发生剧变总是伴随相频特性的非线性, 因此幅频特性和时延特性的不均匀性将导致信号产生时延失真<sup>[7-15]</sup>。

为分析方便, 将功放模块和滤波模块作为一个整体网络, 如图 4 中虚线框图所示, 将调制信号的输出信号  $u_1(t)$  作为该网络的输入信号, 假设该网络输出信号为  $u_2(t)$ , 则  $u_2(t)$  的数学表达式可用式(3)表示:

$$\begin{aligned} u_2(t) &= Ku_1(t)e^{-i\theta} = KA \sin(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} KmA\{\cos[(\omega - \Omega)t - (\theta - \Delta\theta)] - \cos[(\omega + \Omega)t - (\theta + \Delta\theta)]\} = \\ &KA \sin(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} KmA\{\cos[(\omega t - \theta) - \Omega(t - \Delta\theta/\Omega)] - \cos[(\omega t - \theta) + \Omega(t - \Delta\theta/\Omega)]\} = \\ &KA[1 + m \sin \Omega(t - \Delta\theta/\Omega)]\sin \omega(t - \theta/\omega), \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中,  $K$  为网络传输系数,  $\theta$  为输出电压相对于输入产生的相位时延,  $\theta + \Delta\theta$ ,  $\theta - \Delta\theta$  为上、下边频经网络传输后的相移,  $\theta/\omega$  为载频分量的相时延,  $\Delta\theta/\Omega$  为包络时延。

目前, BPM 短波授时系统使用的全固态发射机, 已经按照国家《中、短波调幅广播发射机技术要

求和测量方法》<sup>[9]</sup> (GY/T 225-2007) 对 5, 10, 15 MHz 3 个频点进行了技术指标测试, 测试结果均优于国家中短波发射机测试参考标准, 通过长时间连续运行, 其性能可靠稳定<sup>[10-15]</sup>。表 1 所示为短波发射机组其中一部发射机入所验收时, 发射机输出端谐波分量的测试统计数据, 表 2 所示为发射机音频失真的测量统计记录。

表 1 谐波分量测试数据

GB9376-88	频率/MHz	实测值		
		频谱幅度/dBm	二次谐波/dBc	三次谐波/dBc
低于-60 dBc	5	-0.25	-69.0	-60.0
	10	-0.39	-72.0	-56.7
	15	-0.45	-73.0	-66.0

从表 1 可以看出, 10 MHz 频点的三次谐波测试指标, 实测值未达到设计要求, 这是因为发射机兼顾了 20.008 MHz 频点, 因需要兼顾满足该频点的技术指标要求, 从而对 10 MHz 的三次谐波产生了一定的影响, 虽然满足广电乙级发射机设计指标要求, 但对发射机的时延特性将产生一定的不良影响。

表 2 音频失真测量记录表

GB9376-88	频率/MHz	实测值		
		第 1 次	第 2 次	平均
≤4%	5	2.40	2.42	2.41
	10	2.30	2.36	2.33
	15	1.90	1.90	1.90

表 2 所示为发射机其中一部音频失真测试记录表, 从测试结果可以看出, 发射机的技术指标满足发射机设计要求。

对于授时而言, 短波时号秒脉冲的调制涉及到频率对应调制信号起点的初始相位。全固态短波发射机, 其电路结构、时频特性、调制信号失真等因素都会影响授时信号的起始点, 高次谐波会使调制信号产生失真, 而抑制高次谐波产生的重要因素是短波发射机放大电路和滤波器模块设计。因此, 分析短波发射机的组成结构, 通过技术指标了解短波发射机的性能, 对于判断短波发射机时延的稳定性具有至关重要的作用。

通过以上对短波全固态授时发射机关键指标的测试可以看出, 发射机的谐波分量测试指标和音频失真测量值均优于国家中、短波调幅广播发射机技术要求。因而 BPM 短波授时系统的七部短波授时发射机其时延值是相对稳定的。

### 2.3 BPM 全固态短波发射机时延测量

对于全固态短波发射机和 BPM 时号分配放大器, 采用了实测的测量方式, 发射机延迟测量原理如图 5 所示, BPM 时号分配放大器采用类似方法进行时延测量。截至 2018 年 7 月, BPM 短波授时系统的七部发射机以及监控设备全部更新完成, 本测试采用改造之后的设备完成。利用示波器测量音频分配放

大器输出的 1 kHz 秒信号和多路选择器输出的调制信号起始时刻的相位差值,从而可确定出发射机时延。

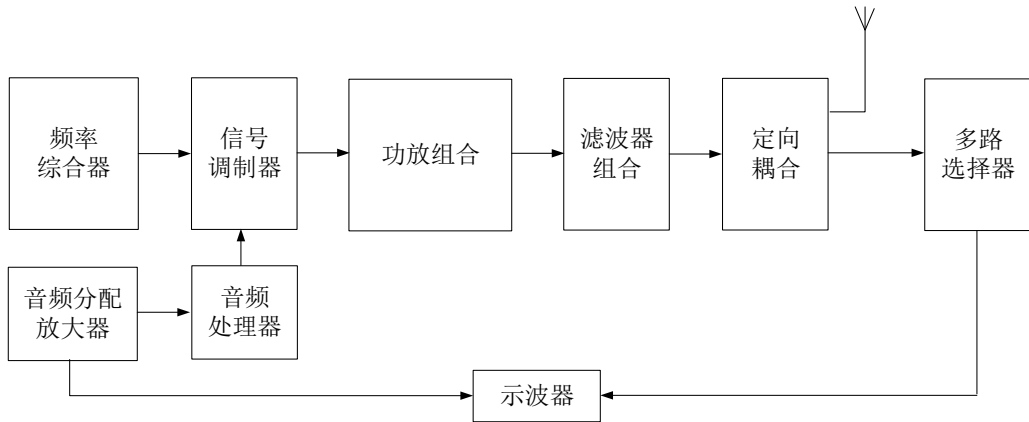


图5 短波发射机时延测量原理图

测试结果表明, BPM 时号分配放大器的延迟均值约为  $1 \mu\text{s}$  (原 BPM 时号分配放大器均值大于  $5 \mu\text{s}$ )。10 kW 全固态短波发射机 5 部机器均进行了测试, 测试结果如表 3 所示, 不同的频点, 不同发射机延迟存在差异, 但总体比较稳定。该测试结果相较于脉宽发射机延迟减小 (PDM 脉宽发射机根据历史测试数据均值在  $80 \mu\text{s}$ ), 这是由于全固态发射机内部采用了大规模的集成电路, 采用了晶体管代替陶瓷电子管等原因。

表3 10 kW 全固态发射机时延测试数据

发射机序号	发射机频点/MHz	平均延迟/ $\mu\text{s}$	波动范围/ $\mu\text{s}$
1#	15	35	20~50
2#	10	30	16~45
3#	5	36	12~60
4#	5	45	30~59
5#	5	40	20~61

### 3 BPM 短波授时发播系统时延修正

在短波时号监测系统中, 使用中的时号产生器和短波接收机, 设备陈旧, 内部电路结构复杂, 相较于刚刚更新完成的 BPM 时号分配放大器和 BPM 短波发射机, 是时延产生的主要因素。

根据历史测试数据, 用于监测的短波接收机延迟均值约为  $200 \mu\text{s}$ , 时号产生器延迟均值约为  $117 \mu\text{s}$ 。时间频率监控室和 BPM 短波发播机房之间的连接电缆  $T_2$  所产生的时延约为  $0.7 \mu\text{s}$ 。时号分配放大器和发射机之间的电缆采用同样材质, 且长度小于  $T_2$  连接电缆长度, 可参照  $T_2$  近似其时延  $T_4$  约为  $0.5 \mu\text{s}$ , 时号分配放大器时延约为  $1 \mu\text{s}$ 。空间电波传播时延  $T_6$  忽略不计。因而,  $T$  (总时延) =  $T_1$  (BPM 时号产生器) +  $T_2$  (连接电缆) +  $T_3$  (BPM 时号分配放大器) +  $T_4$  (连接电缆) +  $T_5$  (短波发射机) +  $T_7$  (BPM 短波接收机), 计算结果如表 4 所示。

表 4 BPM 短波授时系统的发播时延

 $\mu\text{s}$ 

时延模块	1# 发射机	2# 发射机	3# 发射机	4# 发射机	5# 发射机
BPM 时号产生器 $T_1$	117	117	117	117	117
连接电缆 $T_2$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
BPM 时号分配放大器 $T_3$	1	1	1	1	1
连接电缆 $T_4$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
短波发射机 $T_5$	20~50	16~45	12~60	30~59	20~61
BPM 短波接收机 $T_7$	200	200	200	200	200
总时延 $T$	339.2~369.2	335.2~364.2	339.2~369.2	349.2~378.2	339.2~380.2

可以看出,影响 BPM 短波授时系统发播时延的主要因素是系统的组成设备,由于不同的发射机时延本身存在差异,每部发射机的时延相对独立,不同的发射机,同样的频点,其时延值也有差异,且有一定的波动,因此实时监测、实时修正是提高发播端授时精度的关键。

目前, BPM 短波授时系统的实际运行中,对发射机时延进行统一调整,通过 BPM 短波授时系统的监测数据,标记总传递时延为  $T$ ,采用 2018 年 2 月、3 月和 4 月短波 10 MHz 频点的数据分析,时延实测均值在 360  $\mu\text{s}$  左右,最大时延为 395  $\mu\text{s}$ ,最小时延为 325  $\mu\text{s}$ ,波动差值为 70  $\mu\text{s}$ ,如图 6 所示。误差主要来自发射机时延变化、短波接收机误差,以及一些其他的忽略因素所导致。发射机时延变化主要源于发射机频响和发射机音频处理器以及信号调制器,功放等模块的性能因素。

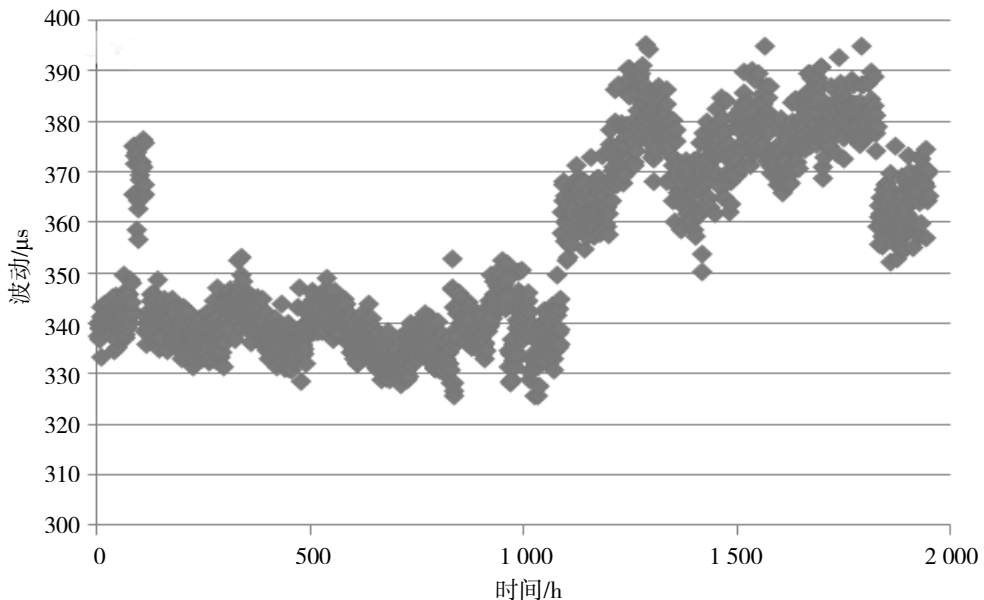


图 6 短波授时系统时延实测统计图

短波 UTC 发播控制精度是衡量短波授时质量的一个重要指标<sup>[16-18]</sup>,通过对短波 UTC 发播控制精度进行实时监控、修正,使其误差在  $\pm 5 \mu\text{s}$  以内。在满足该指标的前提下,通过修正短波发射机、时号放大器等设备的时延,可进一步提高短波发播时刻精度。实际运行中对 BPM 授时系统每部发射机的时延

值进行实时测量且单独修正,相较于目前采用的将所有发射机时延值进行统一修正,能够大幅提高 BPM 短波授时发播时刻准确度。

## 4 结语

针对短波授时发播系统设备更新改造完成之后,发播设备延迟无参考数据的问题展开研究,分析了两代发射机的电路结构和工作原理,针对延迟产生的主要构成单元进行了重点分析,最后给出了主要设备的延迟测量数据,计算了发播设备时延修正数值,并建议修正短波授时台改造之前的时延值。这样在满足短波发播控制精度指标的前提下为进一步提高 BPM 短波授时发播时刻准确度提供参考。

## 参考文献:

- [1] 童宝润. 时间统一技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [2] 漆贯荣. 时间科学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 蒙智谋, 车爱霞, 雷渝, 等. 升级改造后的BPM授时发播系统[J]. 时间频率学报, 2014, 37(4): 221-227.
- [4] 谢亮, 芦旭, 吴成英, 等. 基于ADF4360-8的锁相环频率合成器的设计与实现[J]. 时间频率学报, 2013, 36(2): 75-83.
- [5] 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.
- [6] 许峰. 大功率短波发射台天馈线系统维护与改进[J]. 西部广播电视, 2016(21): 227.
- [7] 沈益斌. 短波发射天馈线系统的维护探讨[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 40(3): 61-62.
- [8] 陈永奇, 邢燕, 陈颖鸣. BPM短波定时接收机的设计与实现[J]. 时间频率学报, 2016, 39(2): 95-103.
- [9] 高岸梅. 时间同步系统短波校时失败分析及解决方法[J]. 电讯技术, 2014, 54(7): 964-968.
- [10] 郭美军, 华宇, 高媛媛, 等. BPM授时信号传输损耗的仿真建模[J]. 宇航计测技术, 2013, 33(3): 23-27.
- [11] 王鹏. 影响短波发射机功率的因素分析[J]. 通讯世界, 2016(13): 96.
- [12] 吴宜斌. 150 kW短波发射机驻波比过大问题的解决方法[J]. 现代信息科技, 2018, 2(5): 38-39.
- [13] 崔朋. 大功率短波发射机的技术研究与分析[J]. 民营科技, 2018(5): 20.
- [14] 许龙霞, 陈婧亚, 李丹丹. 一种卫星双向时频传递设备时延差的标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2084-2090.
- [15] 陈婧亚, 许龙霞, 李孝辉. 一种共视接收机相对时延校准方法[J]. 时间频率学报, 2017, 40(1): 19-26.
- [16] 刘长虹, 季丹. 长波定时接收机系统时延的测量改进[J]. 时间频率学报, 2014, 37(1): 49-56.
- [17] 苏敏, 秦红磊. 调频广播定位技术的研究[J]. 导航定位学报, 2015, 3(4): 44-49.
- [18] 余尚林, 宗瑞朝. 副载波技术在应急广播系统的应用[J]. 电视技术, 2014, 38(10): 42-45.