

引用格式：杨朝中, 李实锋, 胡召鹏, 等. 增强型罗兰授时发射机发播控制精度分析[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 317-321.

增强型罗兰授时发射机发播控制精度分析

杨朝中¹, 李实锋¹, 胡召鹏¹, 闫温合^{1,2}, 袁江斌¹

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600 ;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 发播控制精度是发射机的关键指标之一, 决定着增强型罗兰授时系统的性能。通过对影响发播控制精度误差源的分解, 理论分析发播控制精度能达到的性能为 30 ns。通过对 BPL 长波授时台实际信号的测试, 分析统计发播控制精度的实际性能优于 11 ns, 能满足现有增强型罗兰差分授时应用方案对发播控制精度的需求。

关键词: 增强型罗兰; 授时发射机; 发播控制

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-04-0317-05

Analysis of broadcasting control precision of eLoran timing transmitter

YANG Chao-zhong¹, LI Shi-feng¹, HU Zhao-peng¹, YAN Wen-he^{1,2}, YUAN Jiang-bin¹

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The broadcast control accuracy is one of the key indicators for the transmitter, it determines the performance of the eLoran timing system. Through decomposition of error sources which affecting the broadcast control accuracy, the performance of the broadcast control accuracy can be achieved to 30 ns by the theoretical analysis. And by the test and analyze of the actual signal from the BPL long-wave timing station, the actual performance of the broadcast control accuracy is better than 11 ns, which can satisfy the existing eLoran application solutions to transmit control precision demand.

Key words: eLoran; timing transmitter; broadcast control

0 引言

目前我国在运行的增强型罗兰 (eLoran) 授时发射机共计有七部, 包括 BPL 长波授时系统一部和长河二号系统六部, 增强型罗兰信号基本覆盖我国中东部地区及近海领域, 地波信号覆盖范围内用户的定时精度可达 $1\ \mu\text{s}$ 。发射机是增强型罗兰授时系统的重要组成部分, 其功能是以溯源至国家标准时间 UTC (NTSC) 的高精度时间频率信号和时间信息为基准, 由增强型罗兰发射系统产生适合大范围覆盖的大

收稿日期: 2021-04-19; 接受日期: 2021-07-20

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”B类资助项目(XAB2018B21); “十三五”国家重大科技基础设施资助项目(2018777)

功率增强型罗兰授时信号^[1-5]。

发播控制精度是授时发射机的关键指标,提高发播控制精度以便输出更加稳定的罗兰授时信号是增强型罗兰发射机的研究方向之一,并且可以有效支撑包括差分罗兰在内的提高用户定时精度的应用。根据高精度地基授时系统的建设方案,我国将在西部地区新建三座增强型罗兰授时台,结合已有的罗兰授时台将基本实现我国增强型罗兰授时信号的全国土覆盖;高精度地基授时系统项目将在我国重点区域建设罗兰差分台,在差分信号作用范围内为用户提供优于 100 ns 精度的授时服务;发播控制精度的提高可以更好地支撑我国罗兰差分系统的建设^[6-11]。

1 增强型罗兰授时发射机发播控制分析

增强型罗兰授时发射机输出稳定的授时信号,是实现高精度差分修正的前提,罗兰差分系统才能对路径传播时延偏差进行修正,只有提高增强型罗兰授时发射机发播控制精度,才能实现高精度地基授时系统要求的 100 ns 差分定时精度。

1.1 增强型罗兰授时发射机工作原理

目前我国在运行的增强型罗兰系统均采用基于磁半周脉冲发生器的全固态罗兰发射机,其采用 64 个半周脉冲发生器合成功率,产生的大功率半周脉冲(脉冲宽度为 5 μs)激励谐振固有频率为 100 kHz 的电感电容网络,产生 100 kHz 的大功率正弦波,峰值功率输出可达 2 000 kW。图 1 为增强型罗兰授时发射机工作原理,通过精确控制网络参数和激励脉冲的幅度与激励方式,形成大功率的罗兰-C 脉冲波形,再通过耦合/输出网络与天线调谐,最终将大功率的罗兰-C 脉冲信号发射出去。

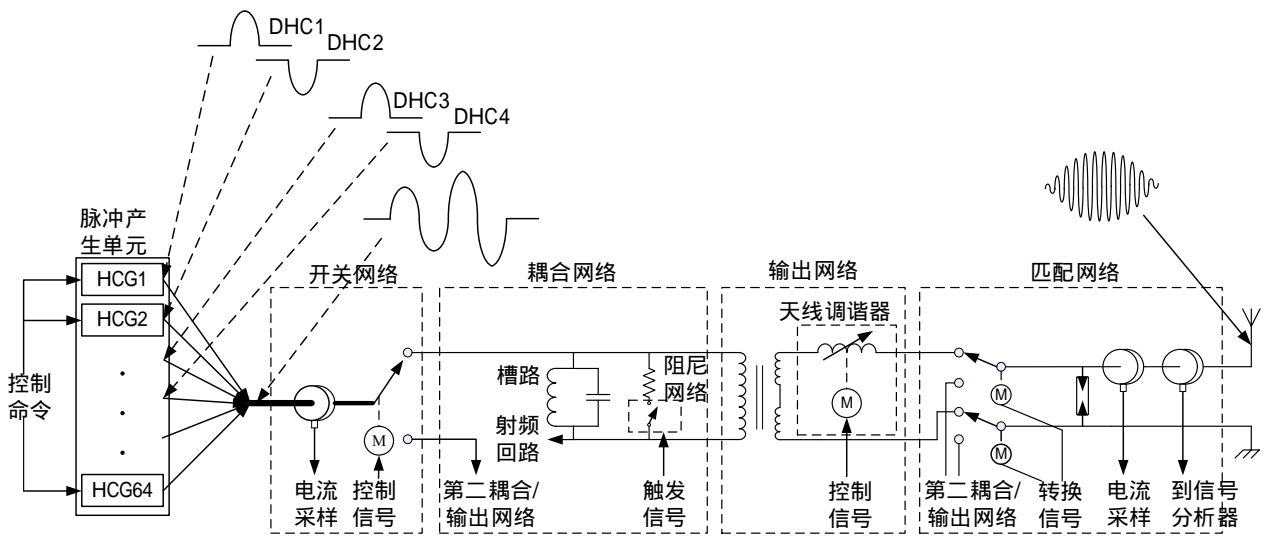


图 1 增强型罗兰授时发射机工作原理图

1.2 发播控制误差源分解

增强型罗兰授时系统发播控制精度是指信号发播的时间信号与 UTC(NTSC)1 PPS 偏差的波动情况,发播控制误差的来源主要可归纳为以下 3 类:

发播台参考时间与 UTC(NTSC)之间的同步误差

该误差是由发播台参考时间与 UTC(NTSC)之间的同步偏差和其不确定度引起的。

天线相位中心测量误差

天线的相位中心与其几何中心理论上应保持一致，但在恶劣天气环境下，天线的摆动会引起相位中心的波动，从而导致天线相位中心的不确定，导致测量误差。

信号控制误差

信号控制误差主要由编码误差、信号调制误差、反馈信号与本地信号测量比对误差和发射机噪声误差等组成。

1.3 发播控制误差分析

根据发播控制误差源分解的结果，将其中三部分的误差进行细分，可以确定到 6 个方面，详细如下：授时发播台时间参考与 UTC (NTSC) 的溯源比对误差 $T_{\sigma_1} = 5 \text{ ns}$ ；信号控制引起的误差 $T_{\sigma_2} = 20 \text{ ns}$ ；固态发射机通道延迟标定误差 $T_{\sigma_3} = 12 \text{ ns}$ ；高功率脉冲信号馈入天线时引起的误差 $T_{\sigma_4} = 10 \text{ ns}$ ；发射天线相位中心抖动引起的误差 $T_{\sigma_5} = 10 \text{ ns}$ ；天线电路调谐稳定性引起的误差 $T_{\sigma_6} = 10 \text{ ns}$ 。

根据误差传递的理论分析，观测值代数和（差）的误差，与观测值个数的平方根成正比，即观测值代数和（差）的误差平方，等于观测值误差平方之和。

经过理论分析增强型罗兰授时系统可达到的发播控制精度为 T_{σ} ：

$$T_{\sigma}^2 = T_{\sigma_1}^2 + T_{\sigma_2}^2 + T_{\sigma_3}^2 + T_{\sigma_4}^2 + T_{\sigma_5}^2 + T_{\sigma_6}^2, \tag{1}$$

$$T_{\sigma} = \sqrt{T_{\sigma_1}^2 + T_{\sigma_2}^2 + T_{\sigma_3}^2 + T_{\sigma_4}^2 + T_{\sigma_5}^2 + T_{\sigma_6}^2}, \tag{2}$$

$$T_{\sigma} \approx 30 \text{ ns}. \tag{3}$$

2 发播控制精度测试

2.1 发播控制精度测试方法

发播控制精度测试可以用数据采集器对电流环取样信号直接采样然后通过软件进行分析的方法进行测试，但是这种方法不够直观，不能对 1 PPS 信号进行实时比对，本文采用增强型罗兰定时终端接收发射天线根部的电流环取样信号，进行定时输出比对测试，剔除定时终端引入的误差即是授时发播控制精度。然而，由于定时终端误差不易分离，因此直接测量定时终端输出的 1 PPS 信号与标准 1 PPS 信号之间的时差，结合理论分析计算得到授时发播控制精度。

发播控制精度测试的时频基准参考为 UTC (NTSC)；增强型罗兰定时终端输出的有效 1 PPS 信号为被测信号；采集时间间隔计数器输出的时差测量结果用于后续的发播控制精度指标计算。发播控制精度测试原理如图 2 所示。

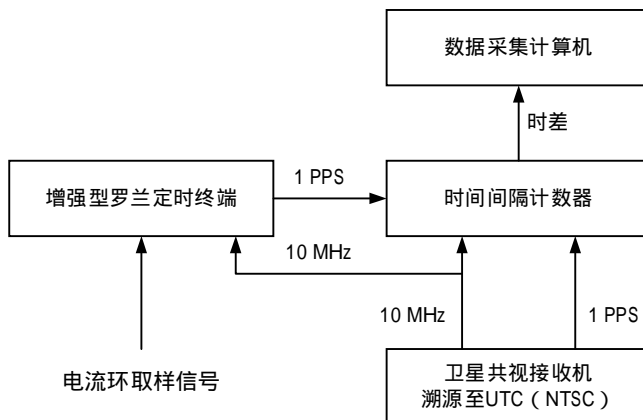


图 2 发播控制精度测试原理图

2.2 发播控制精度计算方法

发播控制精度用 1 PPS 时差的标准差表示，每秒测量一个数据：

$$\sigma_{\text{发播}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{86400} (T_{Xi} - T_{\bar{X}})^2}{N}}, \quad (4)$$

式(4)中： $\sigma_{\text{发播}}$ 为增强型罗兰授时发播控制精度，单位 ns； T_{Xi} 为时间间隔计数器第 i 次测量得到的时差数据，单位 ns； $T_{\bar{X}}$ 为时差数据 T_{Xi} 的均值，单位 ns； N 为测量数据的数量。

3 发播控制精度数据分析

根据发播控制精度测试方案，通过在 BPL 长波授时发射机基础上搭建测试平台，经过 30 余天的测试，并对测试数据进行计算分析，得到定时终端输出的 1 PPS 信号与 UTC (NTSC) 标准 1 PPS 信号之间时差的标准差为 10.564 ns，优于理论分析的 30 ns 的发播控制精度指标测试结果见图 3。由于测试方法的限制，测试得到的发播控制精度包含定时终端的 1 PPS 抖动误差，实际的发播控制精度会优于目前测得的指标。

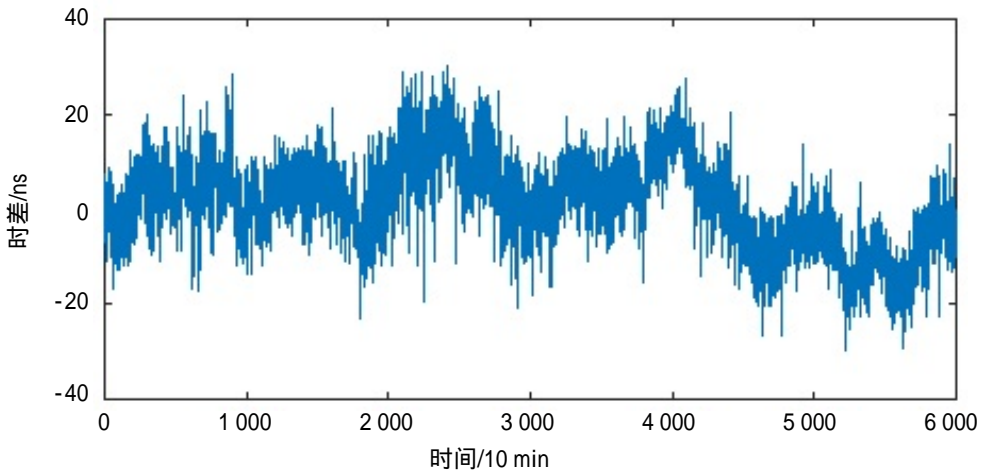


图 3 发播控制精度测试结果图

4 结语

发播控制精度是增强型罗兰授时系统的重要指标，通过对影响发播控制精度的误差源进行梳理，理论分析发播控制能达到的精度；并以 BPL 长波授时发射机为基础搭建发播控制精度测试平台，通过对长期测试的结果进行分析，验证 BPL 长波授时发射机发播控制精度优于 11 ns，能满足现有增强型罗兰差分授时应用方案对发播控制精度的需求。

参考文献：

- [1] 吴海涛, 边玉敬, 李志刚. 罗兰-C 最新进展及其对我国相关系统改造的启示[J]. 陕西天文台台刊, 2000(1): 10-18.
- [2] 王玉林. Loran-C 技术应用扩展[J]. 陕西天文台台刊, 2000(1): 1-9.
- [3] 吴海涛, 边玉敬. Loran-C 系统的技术改造与发展方向[J]. 陕西天文台台刊, 2000(2): 130-135.

- [4] 机械电子工业部第二十研究所. GBT 14379-1993. 罗兰 C 系统通用技术条[S]. 北京: 国家技术监督局, 1993.
- [5] GJB2718-1996. 罗兰 C 导航系统和设备通用规范[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1996.
- [6] 西安导航技术研究所. SJ/T10700-1996. 罗兰 C 导航系统固态发射机通用规范[S]. 北京: 中华人民共和国电子工业部, 1996.
- [7] International Loran Association. Enhanced Loran (eLoran) definition document[P/OL]. (2007-10-16)[2019-03-20]. <https://loran.org/otherarchives/2007%20eLoran%20Definition%20Document-1.0.pdf>.
- [8] SAE9990. Transmitted enhanced Loran (eLoran) signal standard[S]. USA: SAE INTERNATIONAL, 2018.
- [9] ITU-R M.589-3. Technical characteristics of methods of data transmission and interference protection for radionavigation services in the frequency bands between 70 and 130 kHz[S]. [S.L]: International Telecommunication Union, 2001.
- [10] 国发[2013]8 号. 国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012-2030 年)[K]. 北京: 国务院, 2013.
- [11] 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: 国家发改委, 2016.