

引用格式:刘娅,樊多盛,陈瑞琼,等. 增强罗兰授时差分站的时间统一技术[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 279-287.

# 增强罗兰授时差分站的时间统一技术

刘娅<sup>1,2,3</sup>, 樊多盛<sup>1,2</sup>, 陈瑞琼<sup>1,2</sup>, 赵志雄<sup>1,2</sup>, 孟令达<sup>1,2</sup>,

郭伟<sup>1</sup>, 李孝辉<sup>1,2,3</sup>, 张首刚<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600 ;
2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600 ;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 差分技术能将增强型罗兰授时系统微秒量级授时准确度提升至 100 ns 以内, 原理是利用分布全国的差分增强站生成罗兰授时偏差修正量并实时广播给用户。授时偏差修正量的产生需要各差分增强站的时钟信号溯源至标准时间且保证与标准时间偏差小于 10 ns (68.26%)。为满足这一工程建设需求, 本文提出了一种基于标准时间复现技术的分布式节点时间同步方案, 该方案具有低成本、高可靠、高精度、无人值守等工程应用特点, 可以满足覆盖我国国土区域的应用需求。为检验该方案, 建立了试验系统, 在零基线、短基线和长基线等试验条件下均能获得与标准时间 UTC (NTSC) 偏差小于 10 ns (95.44%) 的信号, 同时还能实时提供该信号与标准时间的偏差值, 为系统完好性自主监测提供支持。

**关键词:** eLoran 授时; 差分增强站; 时间同步网; 纳秒级时间同步; 时间溯源

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2021-04-0279-09

## Time synchronization technology for eLoran differential enhanced stations

LIU Ya<sup>1,2,3</sup>, FAN Duo-sheng<sup>1,2</sup>, CHEN Rui-qiong<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhi-xiong<sup>1,2</sup>, MENG Ling-da<sup>1,2</sup>,

GUO Wei<sup>1</sup>, LI Xiao-hui<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shou-gang<sup>1,2,3</sup>

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The accuracy of time service for eLoran can be improved to more than 10 times by using differential technology, this depends on the Loran time service deviation information which generated by the differential enhancement stations distributed all over the country. The accuracy of time service accuracy for eLoran system is expected to be better than 100 ns. The generation of deviation information requires that the clock signal of each differential enhancement station has the characteristics of tracing to the UTC(k), and the time difference from UTC is less than 10 ns (68.26%). In order to meet the requirements of project, this study proposed a distributed node time

收稿日期: 2021-05-11; 接受日期: 2021-06-19

基金项目: 国家自然科学基金天文联合资助项目(U2031125); 陕西省自然科学基金资助项目(2018ZDXM-GY-011)

synchronization scheme based on the standard time regenerate technology, which has the characteristics of engineering projects, including low cost, high reliability, high precision, automatic operation and so on. It can support the application in China. A test system was established for the validation. The results from the zero baseline, short baseline and long baseline tests shown that the equipment can output signals with a deviation of less than 10 ns (95.44%) from the UTC (NTSC), and it can also provide real-time time deviation values. The time deviation value can support the system to realize autonomous integrity monitoring.

**Key words:** eLoran time service; differential enhancement station; time synchronization network; nanosecond-level time synchronization; time tracing

## 0 引言

高精度地基授时系统计划通过增强型罗兰的无线授时与基于光纤的有线授时相结合的方式,实现高可靠与高精度的授时。其中采用差分技术的增强罗兰系统可以将授时准确度由  $1\ \mu\text{s}$  提高到 100 ns 内,具有作用距离远、稳定性好、可靠性高、抗干扰能力强等优点,是 GNSS 授时的最佳补充与备份系统<sup>[1-3]</sup>。

经高精度地基授时系统规划论证,通过差分提升 eLoran 覆盖区域的授时准确度,需要在全国建设约 200 个差分增强站,监测罗兰授时信号的偏差,并由系统实时广播到用户终端进行补偿,保障系统的授时精度<sup>[4-5]</sup>。为保障各差分增强站生成的授时偏差修正量准确性,要求各差分增强站参考时间溯源至标准时间 UTC (NTSC),且与 UTC (NTSC) 偏差不大于 10 ns。

目前支持该类组网应用的主要技术有 GNSS 授时、GNSS 共视和光纤时频传递等,其中 GNSS 授时典型精度是 10~20 ns (RMS),与接收机性能、安装环境条件、馈线和设备时延等有关,输出定时信号与标准时间偏差约为数十到数百纳秒,难以满足各差分增强站对参考时间的同步精度需求;GNSS 共视能实现 2~5 ns 的点对点时间比对,因为观测周期为 16 min,主要用于拥有原子钟的守时实验室之间的时间比对,不适用晶振等时差变化较快的频率源间比对。晶振因为体积小、功耗小、成本低、可靠性高、维护成本低等优点,是差分增强站频率源的最优选择;光纤能实现优于纳秒量级的时间同步,但需要各站点具有光纤带宽资源,部分差分增强站可能在西部人烟稀少地区,不一定有可用的光纤资源,敷设或维护光缆成本较 GNSS 授时更高<sup>[6-7]</sup>。本文提出一种分布式的节点时间同步技术,通过一台内置晶振的标准时间复现设备,实时获取来自中心节点的测量数据,即可保障该节点与标准时间偏差始终小于 10 ns。该技术支持组网应用,可支撑全国范围内数万台标准时间复现设备同时运行,可以满足差分增强站需求。

## 1 分布式节点纳秒级同步原理

分布式节点纳秒级时间同步基本原理是:以 GNSS 卫星钟和导航信号为媒介,建立标准时间与待同步标准时间复现设备时间的无线比对链路,各设备与标准时间的无线比对数据通过通信网络实现互通,要求通信网络具有数据及时交换、网内任意节点间数据可根据任务需求共享、支持网内所有节点数据并发处理等功能,此外考虑到工程应用可靠性需求,还应具有数据传输容错机制、数据加密措施、各节点数据传输时延不同步的应对措施等。

基本原理如图 1 所示。系统由位于西安的中心站和分布全国各地差分增强站的标准时间复现设备组成,其中西安的中心站包括远程时间比对基准设备和分析处理及监控中心,远程时间比对基准设备持续测试标准时间 UTC (NTSC) 主钟信号与所有可视 GNSS 卫星钟的时差,并以每分钟一组时差数据的频度通过网络发往分析处理及监控中心和各差分增强站。各差分增强站均安装一台标准时间复现设备,与西

安的基准设备采用相同的工作模式，持续测试设备输出的时间信号与所有可视 GNSS 卫星钟的时差，并按与中心站设备一致的频度生成时差数据，然后通过网络接收并解析来自基准设备的时差数据，进而计算出 UTC (NTSC) 时间与复现设备时间的时差，该时差值一份送给分析处理及监控中心用于集中监控各站状态和分析各站信号性能，一份用于标准时间复现设备内部，控制输出的时间信号，使其与 UTC (NTSC) 主钟同步，即在差分增强站恢复出与 UTC (NTSC) 同步的 1 PPS 和 10 MHz 信号，送入差分增强站设备。各节点与西安的中心站数据通信通过互联网或专用局域网、移动网络等公用资源，通过软硬件设计，实现前文所述需求，组建各站间安全、可靠的数据通信网络。

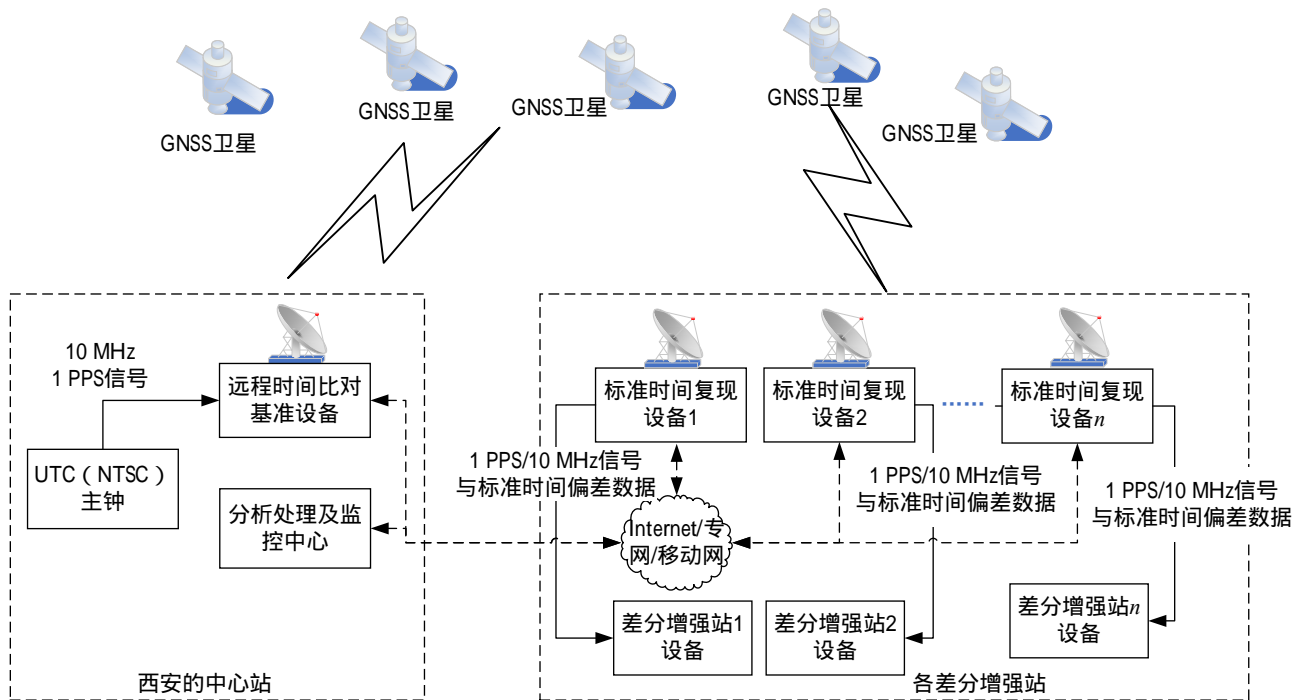


图 1 分布式节点纳秒级同步原理图

图 1 中标准时间复现设备与标准时间 UTC (NTSC) 的时差测量是差分增强时间同步网内各节点时间同步的关键，下面介绍时差的测量原理。

根据卫星授时原理，可将 GNSS 信号的传播时间  $t$  分为三部分：一是信号从卫星发射天线到接收机天线的信号空间传播时间，速度为真空光速  $c$ ，信号传播几何距离为  $r$ ；二是信号经大气传播，在对流层和电离层等非真空环境附加的延迟  $T_1(t)$  和  $T_2(t)$ ；三是发射和接收机设备传输时延  $t_{\text{delay}}$ （通常忽略卫星发射信号延迟）<sup>[8-9]</sup>。

GNSS 信号实际传播时延  $\tau(t)$  可以用式 (1) 表示：

$$\tau(t) = (r/c) + T_1(t) + T_2(t) + t_{\text{delay}} \quad (1)$$

接收机根据伪距测得的传播时延  $\delta t'_u(t)$  表示为式 (2)：

$$\delta t'_u(t) = \tau(t) + \delta t_u(t) + \varepsilon_p(t) \quad (2)$$

式 (2) 中， $\delta t_u(t)$  表示接收机时钟与卫星钟的时差， $\varepsilon_p(t)$  表示测量误差。

将式 (1) 代入式 (2) 可计算接收机时间  $t_u$  与卫星钟  $t_{\text{sat}}$  的时差，如式 (3) 所示：

$$\delta t_u(t) = \delta t'_u(t) - r/c - T_1(t) - T_2(t) - t_{\text{delay}} - \varepsilon_p(t) \quad (3)$$

为测卫星到接收机时差，需要已知接收机天线坐标到卫星的几何距离  $r$ ，因此要求已知接收天线坐标，卫星位置可以通过卫星星历参数获得。式中引入的未知参数  $\varepsilon_p(t)$  表示所有未直接体现在式 (3) 中

的各误差项总和。

利用时间间隔计数器测得参考时间  $T_{ref}$  (在西安的参考时间是 UTC (NTSC), 在差分增强站的参考时间是标准时间复现设备的输出信号) 与接收机时间  $T_u$  的差  $\tau_{tic}$ , 用式 (4) 表示:

$$\tau_{tic} = T_{ref} - T_u \quad (4)$$

结合式 (3) 和 (4) 可以得到参考时间与卫星钟的时差  $\tau_{REFSV}$ , 用式 (5) 表示:

$$\tau_{REFSV} = T_{ref} - T_{sat} = \tau_{tic} + \delta t'_u(t) - r/c - T_I(t) - T_T(t) - t_{delay} - \varepsilon_p(t) \quad (5)$$

中心站和差分增强站的参考时间分别在相同时刻与同一颗卫星的卫星钟比对, 则可以得到两个站参考时间之差, 如式 (6) 所示:

$$\tau_{REFSV}^i - \tau_{REFSV}^j = (T_{ref}^i - T_{sat}^m) - (T_{ref}^j - T_{sat}^m) = T_{ref}^i - T_{ref}^j \quad (6)$$

式 (6) 中卫星钟  $T_{sat}^m$  在相同时刻对两站的影响相同, 可以忽略, 电离层延迟的影响一方面可以通过接收机双频改正降低到 1% 以内<sup>[10]</sup>, 另一方面, 电离层、对流层等大气延迟的相关性与站间距离有关, 距离越近, 信号传输时延差异越小, 测量误差越小, 实测 3 000 km 基线时, 因卫星距离地面约 22 000 km, 两站夹角约 0.14°, 时差测量 A 类不确定度优于 2 ns。

设备时延差异是时差测量的主要误差来源之一, 需要在设备外场安装前, 将标准时间复现设备与远程时间比对基准设备进行零基线时延相对校准, 并精确标校天线的馈线时延。

## 2 系统组网方案

为差分增强站各节点提供 UTC (NTSC) 信号的差分站时间同步网系统组成如图 2 所示。系统由两台远程时间比对基准设备、分析处理及监控中心、全球时间比对数据云处理平台和若干台标准时间复现设备组成。

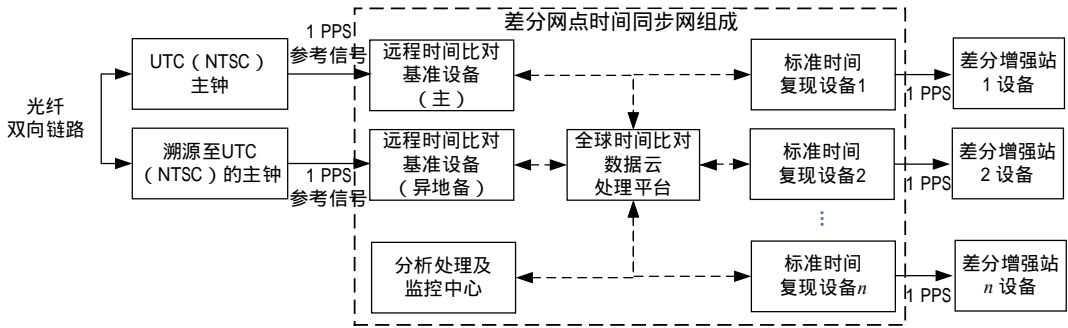


图 2 差分节点时间同步网系统组成框图

工程系统可靠运行是系统设计的重要目标, 为此系统设计了两地互备的远程时间比对基准设备配置方案, 其中两地参考信号通过专用光纤采用双向时频传递方案实现同步, 同步精度优于 100 ps。全球时间比对数据处理云平台为系统内各地设备的数据安全、实时交换建立通信链路; 分析处理及监控中心主要是为了满足同步网内各节点时间复现设备的工况、性能监视, 为各站设备自动运行、无人值守创造条件。鉴于各差分增强站主要任务是测试增强型罗兰授时系统的授时偏差, 对各站参考时间同步性能要求较高, 且需要运行维护的站点数量多, 仪器可靠性要求高, 因此标准时间复现设备内部的频率源使用更可靠、成本低的晶振代替具有一定守时能力但是成本更高的原子钟。系统服务能力与以下两项因素有关: 一是系统容量, 包括运算能力和并发数据吞吐容量; 二是基准设备数据的有效作用范围。系统容量方面,

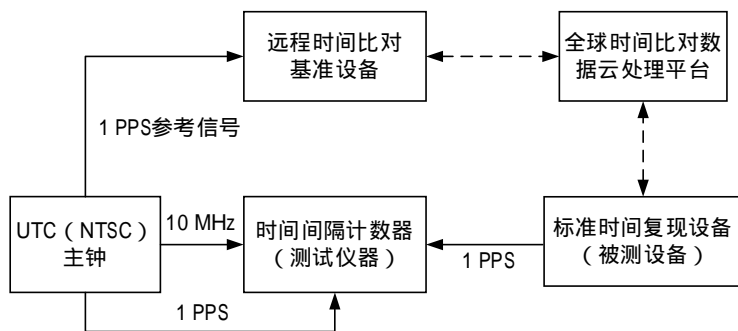
因为基准设备的观测数据是广播给各复现设备,理论上服务对象数量不受限制,但是因为需要集中显示、监控各站工况,考虑通信带宽容量以及服务器硬件配置,设计容量为支持 10 000 台设备同时在线运行;在数据的有效作用范围方面,通过理论分析结合试验验证确定,距离西安中心站直线距离 3 000 km 以内,复现设备与基准设备观测数据的相关性可以实现优于 2 ns 的测量不确定度,满足两地时间偏差优于 10 ns 的时间同步需求,而西安地处我国西北偏中部地区,西至霍尔果斯、南至三亚、北至漠河、东至上海均未超过 3 000 km,因此本方案满足工程建设需求。

### 3 试验验证

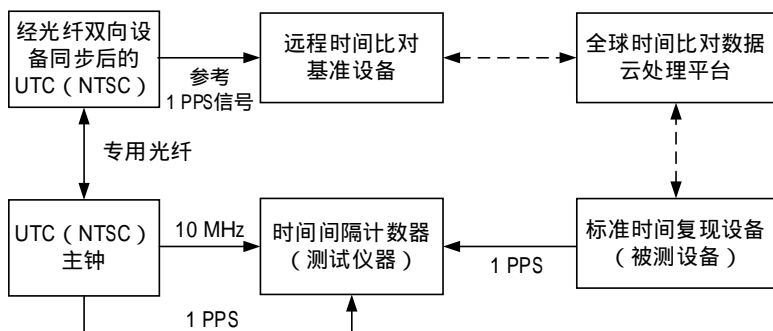
为检验本文设计系统的时间同步性能,搭建了标准时间复现系统平台,研制了基于高稳恒温晶振的标准时间复现设备,分别进行了零基线、30 km 短基线、1 000 km 和 2 000 km 长基线四种典型场景的测试试验。

#### 3.1 测试原理

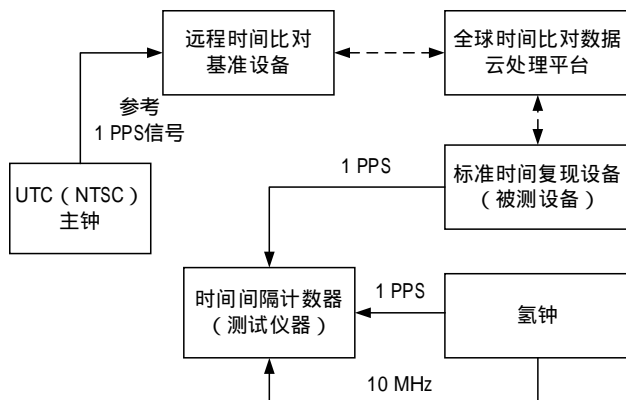
测试原理如图 3 所示,在零基线和短基线条件下,因为能直接或通过光纤间接获得 UTC (NTSC) 的主钟信号,因此使用计数器直接测量标准时间复现设备输出 1 PPS 与主钟信号的时差,评估复现设备的 1 PPS 信号与主钟信号的同步性能;当复现设备与 UTC (NTSC) 主钟和基准设备相距超过 1 000 km 时,使用试验所在地的氢原子钟作为参考信号进行测试,因氢原子钟未与 UTC (NTSC) 保持同步,不能评价复现信号的时间同步性能,但是因其频率准确度和长期稳定度优于  $10^{-13}$  量级,能输出稳定间隔的 1 PPS 信号,可反映标准时间复现设备恢复 1 PPS 信号的稳定性。不同基线条件下的测试原理如图 3(a)~(c) 所示。测试前,已对被测设备和电缆时延等可能影响测试结果参数进行精确标定。



(a) 零基线测试



(b) 30 km 基线测试



(c) 1 000 km 以上基线测试

图 3 系统在不同基线条件下的性能测试原理图

### 3.2 零基线试验结果

将标准时间复现设备与远程时间比对基准设备分别安装在国家授时中心临潼实验室,两设备直线距离约 5 m, 近似零值, 室温环境下测试 24 h, 使用计数器测试标准时间复现设备输出 1 PPS 相对 UTC (NTSC) 主钟 1 PPS 的时差变化量, 结果如图 4 所示, 最大偏差为 3.28 ns, 标准差为 0.96 ns, 时差峰峰值为 6.37 ns, 所有时差值均小于 5 ns。

使用连续 6 d 的测试数据, 用 Allan 方差分析频率稳定度, 测得  $1.59 \times 10^{-12}/1\ 000\ s$ ,  $1.65 \times 10^{-13}/10\ 000\ s$ ,  $1.78 \times 10^{-14}/100\ 000\ s$ 。

因为近似零基线, 比对链路相关性最强, 测量误差最小, 测试结果反映了该系统在当前条件下所能实现的最优性能。

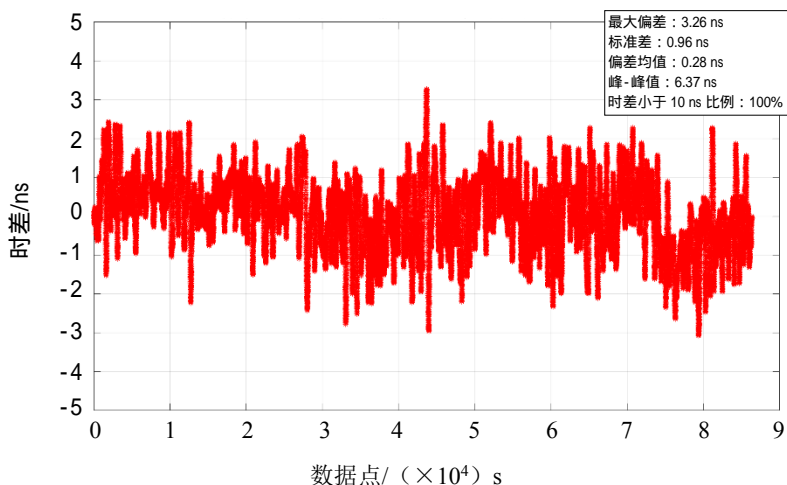


图 4 零基线时复现设备输出信号测试结果

### 3.3 32 km 基线试验结果

将标准时间复现设备与远程时间比对基准设备分别安装在国家授时中心西安临潼实验室和西安航天城实验室, 两地直线距离约 32 km, 临潼实验室设备处于自然室温环境, 西安航天城实验室 24 h 室温变化范围小于 5  $^{\circ}\text{C}$ , 持续测试 24 h, 标准时间复现设备输出 1 PPS 相对 UTC (NTSC) 主钟 1 PPS 的时差变化结果如图 5 所示, 最大偏差为 4.23 ns, 标准差为 0.98 ns, 时差峰峰值为 6.95 ns, 所有时差值均小

于 5 ns。即当服务节点距离中心站直线距离约 30 km 时，可以提供与标准时间偏差优于 5 ns 的时间信号，优于差分增强站 10 ns 的需求。

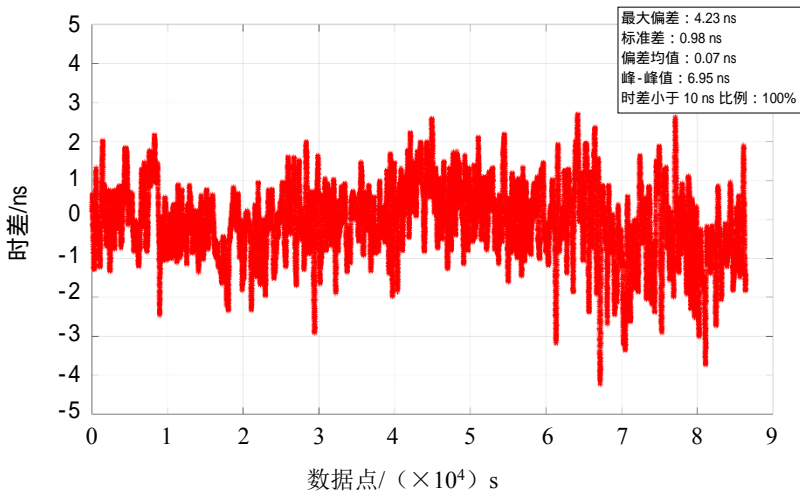


图 5 基线长度约 32 km 时，复现设备输出信号测试结果

### 3.4 1 000 km 基线试验结果

将标准时间复现设备与远程时间比对基准设备分别安装在天津某实验室和国家授时中心临潼实验室，两地直线距离约 904 km，天津某实验室 24 h 室温变化范围小于 5℃，持续测试 24 h，使用计数器测试标准时间复现设备输出 1 PPS 相对氢原子钟 1 PPS 的时差变化量，扣除初始时差后结果如图 6 所示，最大偏差为 6.92 ns，标准差为 1.91 ns，时差峰峰值为 12.33 ns，所有时差值均小于 8 ns。因为设备输出 1 PPS 相对标准时间的固定偏差可以通过零值校准予以补偿，而随机起伏不能被标校，反映的是系统在该条件下所能达到的最佳性能，1 000 km 条件下实测为 6.92 ns，优于差分增强站 10 ns 的需求。

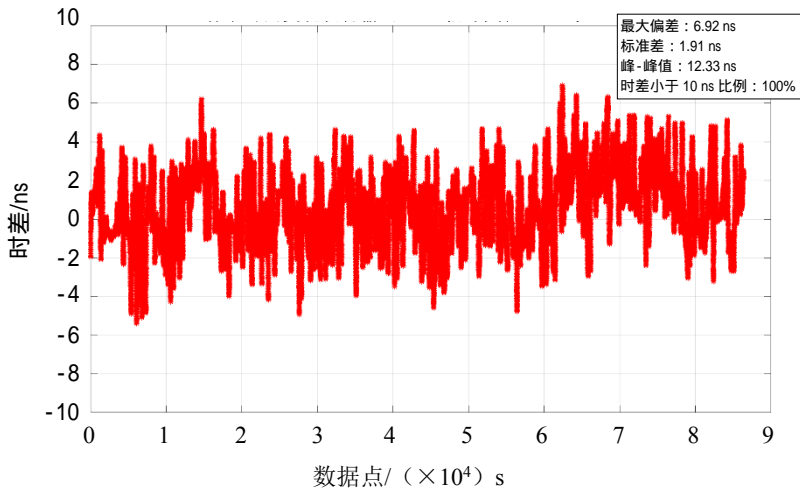


图 6 基线长度约 1 000 km 时，复现设备输出信号测试结果

### 3.5 2 000 km 基线试验结果

将标准时间复现设备与远程时间比对基准设备分别安装在海南省三亚市某实验室和国家授时中心临潼实验室，两地直线距离约 1 774 km，室温环境下测试 24 h，使用计数器测试标准时间复现设备输出 1 PPS 相对氢原子钟 1 PPS 的时差变化量，扣除初始时差后结果如图 7 所示，最大偏差为 13.11 ns，标准

差为 2.72 ns, 时差峰峰值为 20.63 ns, 其中 99.36% 的时差值小于 10 ns, 93.92% 的时差数据小于 5 ns。2 000 km 条件下实测最大偏差为 13.11 ns, 其中 99.36% 的时差值小于 10 ns, 优于差分增强站要求 68% 的时差小于 10 ns 需求。

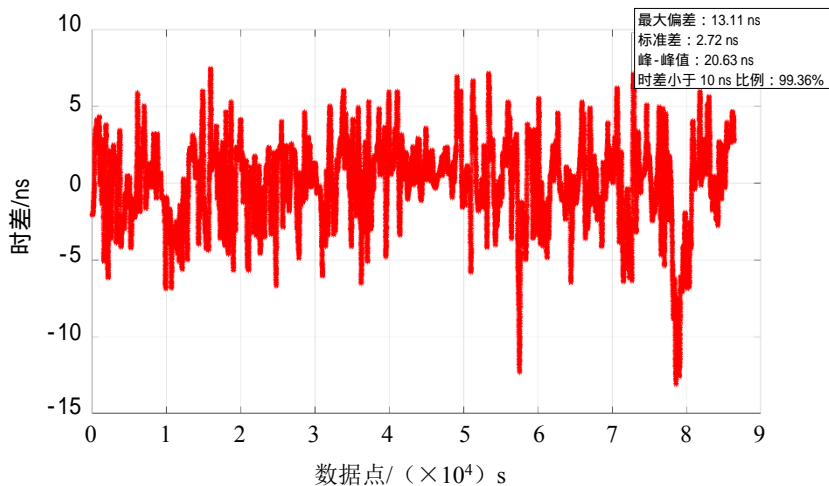


图 7 基线长度约 2 000 km 时, 复现设备输出信号测试结果

### 3.6 试验结果分析

将标准时间复现设备分别安装到距离临潼直线距离 2 000 km 范围内的几个典型距离进行测试, 测试结果如表 1 所示。发现随着距离的增加, 相同统计时长的标准差更大, 信号起伏更加明显, 分析其原因, 主要与基线长度和设备工作环境两个因素有关。为降低成本和提高可靠性, 标准时间复现设备内置频率源为恒温晶振, 晶振输出频率特性对温度较为敏感, 尽管设备内部已经采取了一定的温补措施, 但依然受室温变化影响; 其次, 根据标准时间复现原理, 基于 GNSS 导航信号的无线比对链路测量误差会影响复现信号的起伏特性, 随着基线长度增加, 链路之间的相关性降低, 测量误差随之增大。

为保障各差分增强站生成的授时偏差修正量准确性, 要求各差分增强站参考时间与 UTC (NTSC) 主钟时间偏差优于 10 ns (68.26%), 实测结果如表 1 所示, 在 2 000 km 范围内, 任意测试地点输出的 1 PPS 与 UTC (NTSC) 主钟偏差均能小于 10 ns (95.44%), 在温控环境下甚至能达到 8 ns 以内, 远优于系统需求。

表 1 不同基线时标准时间复现设备的 1 PPS 相对于参考信号 1 PPS 的统计结果

基线长度/km	最大偏差/ns	标准差/ns	峰-峰值/ns	均值/ns	小于 10 ns 的比例
0 (环境无温控措施)	3.28	0.96	6.37	0.28	<5 ns (100%)
30 (温控措施)	4.32	0.98	6.95	0.07	<5 ns (100%)
1 000 (温控措施)	6.92	1.91	12.33	-	<8 ns (100%)
2 000 (环境无温控措施)	13.11	2.72	20.63	-	<10 ns (99.36%)

## 4 结论

本文提出了基于标准时间复现技术的分布式节点时间同步方案, 通过测试试验, 验证了基线长度小于 2 000 km 范围内, 可以提供与 UTC (NTSC) 偏差小于 10 ns (95.44%) 的 1 PPS 信号, 优于差分增强站小于 10 ns (68.26%) 的需求; 结合理论分析, 该方案可以满足覆盖我国国土范围的差分增强站建站的性能需求; 从工程可实现角度分析, 系统及设备设计兼顾了系统容量、可靠性、安全性、成本、运行维护等工程建设基本需求, 易于工程实现。基于本文方案, 已经建成了试验系统, 西安中心站的数据可



为系统内所有节点共享，目前已为全国范围内的二十多个节点提供常规服务。

综上所述，基于标准时间复现技术的分布式节点时间同步方案，可以满足长波授时系统差分增强站对参考时间纳秒级时间统一的需求。

### 参考文献：

- [1] 张洪源, 徐兵, 李海波, 等. 国家综合 PNT 体系中的罗兰 C 导航系统[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(3): 6-11+74.
- [2] 张戎, 牛会丰, 张建伟. eLoran 发展现状和现代化改造技术分析[J]. 科技创新与应用, 2016(14): 38-39.
- [3] 徐永亮. eLoran 守时系统关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2015.
- [4] 孙延伟. eLoran 信号处理关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [5] 孙晶. 基于差分技术的罗兰系统授时精度提升[J]. 现代导航, 2020, 11(5): 9-11+19.
- [6] 陈炜. 高精度光纤时频传递及组网技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [7] 刘娅, 樊多盛, 陈瑞琼, 等. 一种基于单频授时接收机的纳秒级时间同步方法研究[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(4): 57-63.
- [8] LIU Ya, FAN Duo-sheng, WANG Jia-chen, et al. Research on time-frequency synchronization technology of multistatic joint observation[C]// 第十一届中国卫星导航年会, 成都: 第十一届中国卫星导航年会组委会, 2020.
- [9] 陈瑞琼, 刘娅, 李孝辉. 一种高精度的国家标准时间远程复现方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(2): 188-193.
- [10] TEUNISSEN P J G, MONTENBRUC O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems[M]. [s.l.]: Springer International Publishing AG, 2017.