

引用格式：樊多盛，刘娅，李孝辉，等. 温度对 GNSS 卫星共视设备时延的影响分析[J]. 时间频率学报, 2024, 47(3): 153-158.

温度对 GNSS 卫星共视设备时延的影响分析

樊多盛¹，刘娅^{1,2,3}，李孝辉^{1,2,3}，许龙霞^{1,3}，朱峰¹，孟令达^{1,3}

- 中国科学院 国家授时中心，西安 710600;
- 中国科学院大学，北京 100049;
- 时间基准及应用重点实验室（中国科学院），西安 710600

摘要：在高精度地基授时系统中，新建的增强型罗兰授时系统与现有长波授时系统相结合，将实现长波授时信号全国土覆盖，通过差分技术，实现国家标准时间在重点区域授时精度优于 100 ns。GNSS (global navigation satellite system, GNSS) 卫星共视设备为差分技术提供时间频率信号，对 GNSS 卫星共视设备的环境适用性提出了要求，作为高精度授时设备，设备时延的准确度关系到授时精确度，是影响系统时间统一的核心要素。本文研究了在不同环境温度下 GNSS 卫星共视设备的时延变化，通过实验验证了 GNSS 卫星共视设备的设备时延与温度变化呈正相关关系，当温度从 -20 °C 升高至 60 °C 时，设备时延变化了近 3 ns，同时说明了设备在 -20 °C~60 °C 环境温度范围内是可以正常工作的。此研究结果对增强型罗兰授时系统差分增强系统的用时统一起到了积极作用，通过监测环境温度变化实时修正 GNSS 卫星共视设备时延提高其授时精度，扩展了 GNSS 卫星共视设备的应用场景。

关键词：GNSS 卫星共视设备；设备时延；国家标准时间

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-03-0153-06

The influence analysis of temperature on the delay for GNSS common-view equipment

FAN Duo-sheng¹, LIU Ya^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, XU Long-xia^{1,3}, ZHU Feng¹, MENG Ling-da^{1,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

Abstract: The time service accuracy of eLoran can be improved by using differential technology, which depends on the differential enhancement stations distributed all over the country to provide the eLoran time service deviation information. The time service accuracy of the eLoran system is expected to be better than 100 ns. The GNSS common-view equipment provides time-frequency signals for differential technology, which puts

收稿日期：2023-05-06；接受日期：2023-06-15

基金项目：中国科学院西部交叉团队(xbzx-zdsys-202120)；国家自然科学基金(U2031125；12073033)；中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”(XAB2021YN28)；中国铁道科学研究院院基金(2022YJ244)

forward requirements for the environmental applicability of the GNSS common-view equipment. As a high-precision time service device, the accuracy of device delay is related to the accuracy of time service, and is a core element that affects system time unity and system security. In this paper, the time delay variation of GNSS common-view equipment with fluctuation in the surrounding environment is studied. The experimental results show that there is a positive correlation between temperature changes and the device delay of the GNSS common-view equipment. When the temperature rises from $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, the device delay changes by nearly 3 ns. It also shows that the GNSS common-view equipment can work normally within the ambient temperature range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. This research result ensures the time unification and safety of the enhanced Loran time service system differential enhancement system. It also supports real-time correction of equipment delay through monitoring environmental temperature changes and expands the application scenario of the GNSS common-view equipment.

Key words: GNSS common-view equipment; device delay; National Standard Time

高精度地基授时系统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、高精度与国土全覆盖的授时。其中采用差分技术的增强罗兰系统可以将授时准确度由 $1\text{ }\mu\text{s}$ 提高到几十纳秒,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 (global navigation satellite system, GNSS) 授时的最佳补充与备份系统^[1-3]。经高精度地基授时系统规划论证,通过差分技术将 eLoran 覆盖区域的授时精度均提高到 100 ns 以内,需要建设约 175 个差分增强站,实时监测罗兰授时信号的偏差修正量,并由系统广播到用户终端进行补偿,保障系统的授时精度^[4-6]。为保障各差分增强站生成的授时偏差修正量准确性,要求各差分增强站的时间与 UTC (NTSC) 主钟时间偏差优于 10 ns。

GNSS 卫星共视设备具备授时、时间同步、远程测量、不受纬度限制等特点,用户使用前对其进行设备时延校准,但由于我国南北纬度跨度很大,包括横跨寒、温、亚热及热带等多个气候环境类型,环境温度是影响其准确度的一个关键因素,不同温度下,设备时延会有不同的差异,分析环境温度与设备时延的关系,对提高 GNSS 卫星共视设备的授时精度具有重要的意义。

具有纳秒量级测量精度的 GNSS 卫星共视设备,环境温度是影响 GNSS 卫星共视设备精度的关键因素之一,在不同的环境温度下,GNSS 卫星共视设备的设备时延受环境温度的影响都有差异,

分析清楚环境温度对设备时延的影响,对提高 GNSS 卫星共视设备的测量精度与授时精度都有好处。作为高精度的授时设备,纳秒的变化都会影响设备的授时精度,因此,需要考虑环境温度对设备运行的影响。环境温度对设备运行的影响是由温度的波动引起的。在 GNSS 卫星共视设备实际运行时,以一天为单位去校准设备时延,受一年四季环境温度变化的影响,夏季与冬季设备时延表现是不一样的。同时,当环境温度过低或过高,对设备的运行也产生不利影响。由于 GNSS 卫星共视设备单板集成度高,使用了大量芯片,不同的芯片有不同的工作温度范围,极端的环境温度会对设备内部的芯片有影响,从而对设备的稳定性和授时精度产生不同的影响,甚至导致设备不工作。在 GNSS 卫星共视设备实际应用中,在不同的地域(不同的地域环境温度是不一样的),设备时延不一样。为此,为了保证设备正常有效工作,研究设备的工作温度范围,是设备应用中必须具备的一项工作。

本文首先介绍 GNSS 卫星共视设备的工作原理,然后阐述了 GNSS 卫星共视设备的设备时延计算方法,环境温度作为一个影响设备时延的关键因素,以环境温度变化作为变量,设计了测试试验系统,研究在不同环境温度下 GNSS 卫星共视设备的设备时延变化情况,最后根据实验结果分析了温度对设备时延的影响。

1 GNSS 卫星共视设备工作原理

GNSS 卫星共视设备为用户提供可溯源至基准时间的高精度时间频率信号与信息,同时可以远程测量与比对分析用户的时间信号性能。GNSS 卫星共视设备通过卫星共视技术和数据传输网络,溯源至基准时间,获得用户时间与基准时间的时差,GNSS 卫星共视设备将根据事先制定的钟驾驭策略控制内部的时频信号产生模块,使 GNSS 卫星共视设备最终输出与基准时间同步的时间频率信号^[7-9]。

GNSS 卫星共视设备的基本工作原理是基于卫星共视的远程时间比对、以及根据比对结果驾驭本地时钟源,使其与参考时间源保持同步。卫星共视使用多颗可视的 GNSS 卫星作为中间媒介,实现时间和频率的远程比对。基本原理示意图如图 1 所示,站 A 和站 B 两个地点的接收机在同一个共视时间,同时观测到某颗 GNSS 卫星 i , A 站可解算出接收机钟 A 与卫星 i 的钟差,同时利用时间间隔计数器测得 A 站的参考时间与接收机钟 A 的钟差,从而计算得到 A 站参考时间与卫星 i 的钟差,在 B 站进行相同的计算得到 B 站参考时间与卫星 i 的钟差,两站的钟差结果通过数据交互,相减即得到两站钟差^[7-9]。

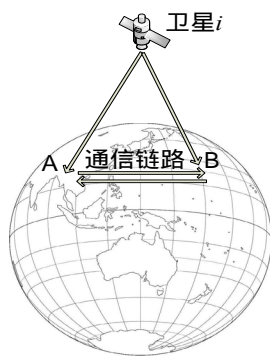


图 1 卫星共视时间比对测量原理

在共视比对中,因为两站观测是同时进行,近似认为两条路径、星载钟特性对两站的影响相同,可以在数据归算中消除。

GNSS 卫星共视设备与基准终端同时观测所在地可视的 GNSS 卫星,以约定的观测周期采集并处理数据,生成本地参考时间与各颗卫星钟的

偏差,在完成一个观测周期后将偏差计算结果发送到基准站,计算 GNSS 卫星共视设备的参考时间与基准时间的偏差,并回传给 GNSS 卫星共视设备,完成一次远程时间比对。为提升灵活性,各 GNSS 卫星共视设备还支持广播形式的工作模式,即接收基准站发送的观测数据,GNSS 卫星共视设备接收到基准站生成的偏差数据,计算本地时间与基准时间的偏差。GNSS 卫星共视设备的数据观测与数据处理并行执行,每个观测周期结束后自动生成偏差结果,因此测量周期之间无中断,产生的偏差结果通过数据传输网络及时输出^[7-9]。

GNSS 卫星共视设备的设备时延精确度是影响信号准确度与授时精度的关键因素之一,由于 GNSS 卫星共视设备是依赖于基准终端而运行的,它的设备时延不是绝对时延,而是一个相对的设备时延。

2 相对设备时延计算方法

GNSS 卫星共视设备的设备时延包括接收机时延与信号在设备内部的时延,单独对其中一项进行测量,是比较困难的,因此采用了相对校准的办法,即通过测量 GNSS 卫星共视设备输出时间信号与基准时间之间的时差来标定其相对设备时延。下面首先介绍 GNSS 卫星共视设备时差的测量原理,然后再分析 GNSS 卫星共视设备的设备时延计算办法^[1]。

根据卫星授时原理,可将全球卫星导航系统(GNSS)信号的传播时间 t 分为 3 部分:一是信号从卫星发射天线到接收机天线的空间传播时间,传播速度为真空光速 c ,信号传播几何距离为 r ;二是信号经大气传播,经对流层和电离层等非真空环境附加的延迟 $T_T(t)$ 和 $T_I(t)$;三是卫星发射和接收机设备传输时延 t_{dl} (通常忽略卫星发射信号延迟)^[1]。

GNSS 信号实际传播时延 $\tau(t)$ 可以用式(1)表示:

$$\tau(t) = (r/c) + T_T(t) + T_I(t) + t_{dl} \quad (1)$$

接收机根据伪距测得的传播时延 $\delta t_u^i(t)$ 表

示为

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

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_{sat} 的时差:

$$\begin{aligned} \delta t_u(t) &= T_u - T_{\text{sat}} = \\ &\delta t'_u(t) - r/c - \\ &T_1(t) - T_T(t) - t_{\text{dl}} - \varepsilon_p(t)。 \end{aligned} \quad (3)$$

为测得卫星到接收机时差, 需要已知接收机天线坐标到卫星的几何距离 r , 因此要求已知的接收天线坐标, 卫星位置可以通过卫星星历参数获得。式(3)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^[5]。

利用时间间隔计数器测得参考时间 T_{ref} (基准站的参考时间是 UTC(NTSC), 在 GNSS 卫星共视设备安装地点参考时间是输入给 GNSS 卫星共视设备的时间信号) 与接收机时间 T_u 的差 τ_{tic} , 用式(4)表示:

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

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

$$\begin{aligned} \tau_{\text{RF}} &= T_{\text{ref}} - T_{\text{sat}} = \\ &\tau_{\text{tic}} + \delta t'_u(t) - r/c - \\ &T_1(t) - T_T(t) - t_{\text{dl}} - \varepsilon_p(t)。 \end{aligned} \quad (5)$$

基准站和 GNSS 卫星共视设备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:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{RF}}^i - \tau_{\text{RF}}^j &= (T_{\text{ref}}^i - T_{\text{sat}}^m) - (T_{\text{ref}}^j - T_{\text{sat}}^m) = \\ &T_{\text{ref}}^i - T_{\text{ref}}^j。 \end{aligned} \quad (6)$$

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 10% 以内, 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, 两站夹角仅约 0.14°, 时差测量 A 类不确定度优于 2 ns。时间间隔计数器的测量精度优于 0.1 ns。

GNSS 卫星共视设备的设备时延标定是零基线情景下进行的, GNSS 卫星共视设备与基准站的参考时间都是 UTC(NTSC), 同时, 由于基准站的设备时延是已知的, 假设为 0, 参考信号是不变的, 基准站的接收机也是固定的, 如此通过测量 GNSS 卫星共视设备与基准站的时差就可以得到 GNSS 卫星共视设备的设备时延^[10-11], 因此, 在零基线测量模式下就可以得到 GNSS 卫星共视设备的设备时延 t_{dll} 为

$$\begin{aligned} t_{\text{dll}} &= \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (\tau_{\text{RF}}^i - \tau_{\text{RF}}^j)_n = \\ &\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M ((\tau_{\text{ref}}^i + T_u^i) - (\tau_{\text{ref}}^j + T_u^j))_n \quad (7) \\ &n = 1, 2, \dots, M。 \end{aligned}$$

式(7)中的 M 至少需要 24 h, 1 s 一组。

3 实验系统构建

前面给出了 GNSS 卫星共视设备的设备时延计算方法, 在设备应用中, 温度对 GNSS 卫星共视设备的影响表现在各个层面, 单独对某一个层面进行测量是无法实现的, 从 GNSS 卫星共视设备整体的角度出发, 温度对设备的影响是可以通过设备时延进行补偿与修正。温度作为一个影响设备时延的重要因素, 在实验系统中进行着重考量, 因此, 本实验系统是为了验证 GNSS 卫星共视设备在不同温度下设备时延的变化情况及工作温度范围。在中国科学院国家授时中心临潼本部将 GNSS 卫星共视设备放置在高低温湿热试验箱内进行测试, 其测试原理如图 2 所示。在零基线测量模式下, 基准站与 GNSS 卫星共视设备测量参考信号都是 UTC(NTSC), 二者共用一个天线, 天线没有放在恒温箱中。根据公式(7)已经标定了 GNSS 卫星共视设备在室温条件下的设备时延, 将设备放置高低温湿热试验箱进行零基线测试, GNSS 卫星共视设备测得时差结果, 即为温度对 GNSS 卫星共视设备的设备时延影响结果^[10-11]。将高

低温湿热试验箱设置在不同温度下，每个温度下持续工作 24 h，记录 GNSS 卫星共视设备的时间偏差数据，统计分析时间偏差数据的均值与标准差，对设备时延进行分析。

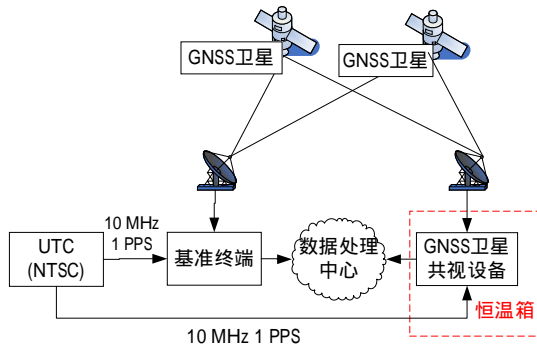


图 2 GNSS 卫星共视设备在不同温度下测试工作图

本实验中使用的低高温湿热试验箱，它的温度波动度优于 0.5，温度偏差为 ±2。为了减少湿度等因素对设备时延的影响，我们仅设置低高温湿热试验箱的温度，让其在设定的温度下持续工作。

4 实验结果

为了标定设备工作温度范围及验证温度对设备时延的影响，能明显地反映出温度对设备时延的影响，以 -20 作为起点，每隔 20 为一个间隔，将低高温湿热试验箱分别设置在 -20、0、20、40、60 五种定温运行模式，在每种温度下 GNSS 卫星共视设备持续工作 24 h，统计分析 GNSS 卫星共视设备时间偏差数据的标准差与均值。以测得的 GNSS 卫星共视设备的时间偏差结果为依据，对设备时延进行分析，同时检验在不同温度下设备是否正常工作。

通过处理不同温度下 GNSS 卫星共视设备的时间偏差数据，得到每种温度下 GNSS 卫星共视设备的时间偏差数据如图 3 所示，统计每种温度下 GNSS 卫星共视设备时间偏差的标准差与均值（见表 1），最后给出了 GNSS 卫星共视设备在室温下输出的时间偏差数据（如图 4 所示），进一步验证了温度对设备时延的影响，室温环境下 GNSS 卫星共视设备测试时间是 2023 年 3 月 16 日至 3

月 17 日，这两天的环境气温是 5 ~11^[12]。

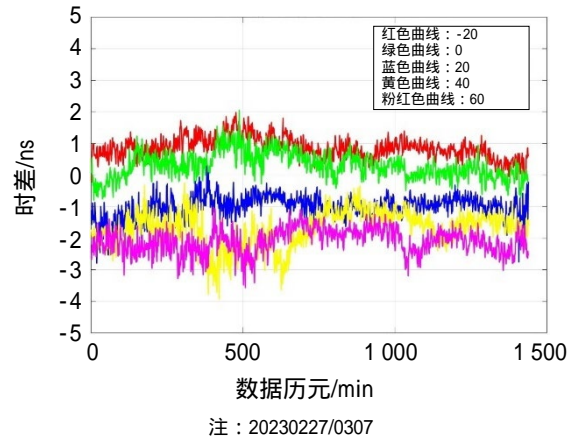


图 3 GNSS 卫星共视设备在 -20 ~60 下零基线共视测试结果图

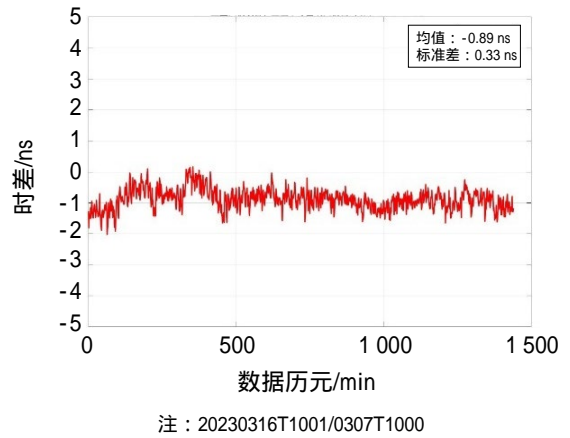


图 4 GNSS 卫星共视设备在室温下零基线共视测试结果图

表 1 GNSS 卫星共视设备在 -20 ~60 温度下时间偏差统计表

温度/	均值/ns	标准差/ns
-20	0.85	0.34
0	0.30	0.41
20	-1.02	0.36
40	-1.71	0.57
60	-2.10	0.39
室温	-0.89	0.33

由图 3 及表 1 对比可以看出，GNSS 卫星共视设备在 -20 ~60 环境温度下是可以正常工作的，设备时延在温度从 -20 变到 60 时，时延变化了 2.95 ns，随着温度的升高，GNSS 卫星共视设备的设备时延值是朝着负方向变大，并且设备

时延与温度呈现正相关的关系。

由图 4 得出, 在 5 ~11 的室温环境下, GNSS 卫星共视设备的设备时延测试结果为-0.89 ns, 根据 GNSS 卫星共视设备在高低温湿热试验箱的测试结果, 当温度从 0 变化到 20 时, 设备时延值应该在 0.3~-1.02 ns 之间, 而室温下 GNSS 卫星共视设备的设备时延测试结果落在了 0.3~-1.02 ns 之间, 进一步表明了 GNSS 卫星共视设备的设备时延与温度之间呈现正相关的关系。

由上述测试结果表明, GNSS 卫星共视设备在 -20 ~60 环境温度下, 是可以正常工作的, 同时表明 GNSS 卫星共视设备的设备时延变化与温度变化呈现正相关的关系。

5 结论

本文对 GNSS 卫星共视设备的工作原理与设备时延计算方法进行详细介绍后, 将环境温度对设备的影响, 以黑盒子的方式全部归于设备时延进行补偿与修正, 设计了温度对设备时延影响的测试验证系统, 并以天为单位进行了测试验证实验, 实验结果表明, GNSS 卫星共视设备在 -20 ~ 60 之间是可以正常工作的, 且温度与设备时延之间呈现正相关关系, 随着温度升高, GNSS 卫星共视设备的设备时延值也相应变大, 温度从 -20 变到了 60 , 时延变化了 2.95 ns。根据本研究结果对设备时延进行温度补偿, 可以进一步提升 GNSS 卫星共视设备的测量与授时准确度, 通过监测设备环境温度的变化对设备时延进行实时修正, 或者通过 GNSS 卫星共视设备特定应用场景, 对设备机箱进行温度控制, 减少温度对设备授时精度的影响。本研究分析了环境温度对 GNSS 卫星共视设备的设备时延影响情况, 研究结果支撑进一步修正与补偿设备时延值, 保障了

GNSS 卫星共视设备在宽环境温度波动时可以正常工作, 同时扩展 GNSS 卫星共视设备的应用场景。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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+14.
- [3] 张戎, 牛会丰, 张建伟. E-loran 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.
- [4] 徐永亮. E-loran 守时系统关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(国家授时中心), 2015.
- [5] 孙延伟. E-loran 信号处理关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [6] 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): 318-320+328.
- [7] 许龙霞. 基于共视原理的卫星授时方法[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2012.
- [8] 樊多盛, 刘娅, 李孝辉, 等. 基于卫星共视的钟驾驭方法研究[J]. 时间频率学报, 2018, 41(4): 300-306.
- [9] 樊多盛, 刘娅, 许龙霞, 等. 基于压控晶振的超远距离时间复现方法研究[J]. 时间频率学报, 2022, 45(3): 211-217.
- [10] 樊多盛, 刘娅, 李孝辉, 等. 一种基于温度变化差驾驭压控晶振的时间保持方法: 中国, CN111490781A [P]. 2020.
- [11] 樊多盛, 刘娅, 李孝辉, 等. 基于晶振的高性能时间保持方法研究[J]. 时间频率学报, 2021, 44(1): 26-32.
- [12] 三原天气预报[EB/OL].(2023-03-17)[2023-05-02] <http://weather.com.cn>.