

引用格式: 王嘉琛, 樊多盛, 肖波, 等. 基于晶振的远程时间同步参考源性能分析[J]. 时间频率学报, 2020, 43(4): 270-278.

基于晶振的远程时间同步参考源性能分析

王嘉琛^{1,2,3}, 樊多盛^{1,2}, 肖波^{1,2,3}, 邓智峰^{1,2,3}, 刘娅^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}

- (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: 针对用户需求结合资源条件, 中国科学院国家授时中心实现了主站以高稳晶振作为参考时钟, 在直线距离约 300 km 的从站复现出与参考同步的时频信号, 使相距数百千米的两个站点之间保持时频同步。根据应用场景特点, 设计了针对高稳晶振的性能测试方案, 通过试验分析, 发现高稳晶振的准确度对两地时间同步精度影响较大。为保证在不具备外部驯服条件下的主从站间的同步性能, 通过对主站高稳晶振进行机械调准, 使两站点间时差峰峰值从 190 ns 降低到 60 ns, 标准差 (STD) 达到了 15 ns 以内, 满足了两站点间时间同步应用需求。通过分析测试结果, 若需进一步提高两地同步精度, 可以从改善参考源的频率稳定性和频率准确度两方面入手。

关键词: 频率源; 高稳晶振; 时间同步; 频率相对偏差

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-04-0270-09

Performance analysis of remote time synchronized reference source based on crystal oscillator

WANG Jia-chen^{1,2,3}, FAN Duo-sheng^{1,2}, XIAO Bo^{1,2,3}, DENG Zhi-feng^{1,2,3},

LIU Ya^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}

- (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: According to the user's demand and resource conditions, the NTSC (the National Time Service Center, Chinese academy of sciences) has reproduced the time-frequency signal synchronizing with the reference clock in the slave station with a straight-line distance of 300 km based on the high stability crystal oscillator in the master station, and realized the time-frequency synchronization between two stations hundreds of kilometers apart. According to the characteristics of the application scenario, a performance test scheme for high stability crystal oscillator is designed. It is found that the frequency accuracy of high stability crystal oscillator has a great influence on the time synchronization accuracy. To ensure the synchronization performance between master and slave sites in the absence of external taming conditions, the high stability

收稿日期: 2020-04-18; 接受日期: 2020-05-16

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2018ZDXM-GY-011)

crystal oscillator of the master station is mechanically adjusted. After the adjustment, the peak value of the time difference between the two stations is reduced from 190 ns to 60 ns, and the standard deviation (STD) is within 15 ns, which met the application requirements of time synchronization between two stations. According to the analysis of test results, further improvement of the synchronization accuracy can be obtained by improving the frequency stability and frequency accuracy of the reference source.

Key words: frequency source; high stability crystal oscillator; time synchronization; relative deviation of frequency

0 引言

中国科学院国家授时中心保持着我国的标准时间 UTC (NTSC), 并通过卫星双向时频传递、GNSS 精密时频传递、GNSS 卫星共视等手段与其他国家守时实验室的标准时间保持比对, 近年来 UTC(NTSC) 与 UTC 偏差小于 5 ns^[1]。

目前, 国家授时中心以铯原子钟、氢原子钟等高精度频率源输出的频率稳定性和准确度都较高的信号作为参考进行高精度远程时间同步技术已经成熟^[2-5]。铯原子钟、氢原子钟等高精度频率源价格昂贵、运行环境要求高并且国外对其高性能原子钟在我国使用有着严格的禁止条款, 使得大部分用户无法获得^[6-8]。但是在实际应用中, 很多行业的用户有着几十纳秒甚至纳秒级时间同步需求, 比如在第五代移动通信系统中要求基站间时间同步偏差小于百纳秒量级甚至更高, 且由于基站数量较多, 因此在满足精度要求的同时, 成本、功耗要求尽可能地低, 体积尽可能地小。高稳晶振以其价格低、功耗小、体积小、相位噪声较低, 短期稳定度较高等诸多优点, 获得了人们的关注。近年来, 随着科技的进步, 高稳晶振在工艺水平、品种规格、理论研究等方面都有了飞速的发展, 再加上人造石英晶体的发展, 使得高稳晶振的质量和产量均大幅度增长^[9]。目前高稳晶振已经在通讯、雷达、航空航天、测试计量等多个领域得到了广泛的应用, 未来也必将迎合用户的需求, 向着微型化、低功耗、响应速率快、高分辨率、高准确度、高稳定度、多功能和智能化等方向快速发展。

综合以上因素, 优势明显的高稳晶振成了部分成本敏感用户的首选。以高稳晶振作为参考源时, 如何保证远程时间同步精度的研究变得尤为重要。针对高精度远程时间同步需求, 根据试验场景特点, 设计了高稳晶振的性能测试方案, 并进行了远程时间同步试验。

1 高稳晶振性能分析

高稳晶振输出的秒脉冲信号与标准时间的钟差可以用以下模型表示:

$$X(t) = a + bt + \frac{ct^2}{2} + \xi(t), \quad (1)$$

式(1)中, a 是初始时刻钟差; b 是高稳晶振的频差; c 是高稳晶振的频率漂移也称之为老化率, 是由于高稳晶振自身老化等原因引起的, 其在频率上表现为频率线性偏离标称频率, 时间上表现为二次方的趋势偏离标准时间^[10-11]; $\xi(t)$ 是噪声, 由各种不确定因素引起。

使用雷达系统中较为常用的一款超低相位噪声高稳晶振作为试验研究对象, 其标称频率为 80 MHz, 标称频率稳定度为 $10^{-11}/s$, 该类晶振最大的特点是相噪低且体积较小, 但是受老化、温度等因素影响, 其准确度、长期稳定度较差。结合远程时间同步试验对参考源性能的需求, 主要针对晶振的频率稳定度和频率相对偏差两项参数对其进行性能评估。

频率稳定度表示振荡频率保持不变的能力,是频率源输出频率值不稳定成份的定量描述,在时域上表示单位时间间隔内频率平均值的随机起伏程度,该时间间隔称为取样时间,在统计学上用其方差表示,而由于闪烁噪声对频率源的影响,使得方差在表征频率稳定度上有着严重的缺陷,因此频率稳定度通常用 Allan 方差来进行表征^[12-13],其定义如下:

$$\sigma_y^2(N, T, \tau) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (y_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k)^2, \quad (2)$$

式(2)中, $y_k = \frac{1}{\tau} (x(t_k + \tau) - x(t_k))$, T 表示采样周期, τ 表示基本采样间隔, N 表示在一个采样周期内以 τ 为采样间隔的样本数, $x(t_k)$ 表示时域的测量值。

而实际基于时差测量值计算 Allan 方差的公式可以简化表示为

$$\sigma_y^2(\tau) \approx \frac{1}{2\tau^2(M-2N+1)} \sum_{i=1}^{M-2N+1} (x_{i+2N} - 2x_{i+N} + x_i)^2, \quad (3)$$

式(3)中, M 表示样本总数。

频率相对偏差表示频率真值与其标称值的相对偏差。对于频率相对偏差的测量,有直接测频法、变频测频法、频差倍增测频法、比相法以及比时法。而对本研究的高稳晶振,采用比时法即可满足测试要求。在待测频率源稳定后,参考 GJB/J 2762-96 的频率长期特性测量方法^[14],使用时间间隔计数器对参考频率源输出的 1 PPS 秒脉冲信号和待测频率源输出的 1 PPS 秒脉冲信号的时差进行测量,连续测量时间不少于 30 min。在采集的时差测量数据中选取间隔为 τ 的 n 个数据 t_1, t_2, \dots, t_n , 其中 $\tau \geq 10$ s, $n \geq 4$, 根据测试结果可以计算时差的变化率 Δt , $\overline{\Delta t}$ 为时差变化率的均值,其中:

$$\Delta t_i = t_n - t_{n-1}, \quad (4)$$

$$\overline{\Delta t} = \frac{\sum_{i=2}^n \Delta t_i}{n-1}. \quad (5)$$

进而可以根据式(6)计算出相对频率偏差:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{\Delta f}{F}. \quad (6)$$

2 高稳晶振性能测试方法研究

为客观评价高稳晶振性能,提出以 UTC (NTSC) 为参考和以 GNSS 定时接收机输出的定时信号为参考两种测试方案,主要针对高稳晶振的频率稳定度和频率相对偏差。以 UTC (NTSC) 为参考的测试因 UTC (NTSC) 主钟秒稳定度优于 $8 \times 10^{-14}/s$, 准确度优于 1×10^{-14} , 较待测晶振高出数个量级,能够客观地反映高稳晶振的性能。而在实际应用场景中,高稳晶振是现场最好的频率源,难以通过直接比对测试获得其频率稳定度等性能参数。在这样的情况下,考虑使用定时精度优于 20 ns, 准确度与卫星导航系统时间相当的 GNSS 双频定时接收机输出的定时信号作为参考,对晶振的频率相对偏差进行测试,下面将对两种方法分别进行详细介绍。

2.1 以 UTC (NTSC) 为参考的性能测试及分析

在中国科学院国家授时中心实验室对该高稳晶振进行了测试, 首先使用国家授时中心的 UTC (NTSC) 主钟输出的 10 MHz 信号作为时间间隔计数器 SR620 的外部参考时钟, 模拟实际应用场景, 晶振的压控端悬空, 测得晶振的初始频率, 并根据测试结果, 使用晶振自带的机械调准旋钮对晶振输出信号的频率进行调准, 将晶振的频率调至其标称频率 80 MHz 附近。再将 UTC (NTSC) 主钟输出的 1 PPS 信号作为测试所用的时间参考信号接入时间间隔计数器 A 通道作为关门信号; 将该高稳晶振的 80 MHz 信号经过分频处理得到 1 PPS 信号接入时间间隔计数器 B 通道作为开门信号, SR620 的实时数据通过工控机采集存储, 选择比时法参考公式 (4) ~ (6), 对高稳晶振的频率准确度进行计算。同时使用 5125A 对高稳晶振输出的 80 MHz 信号的频率稳定度进行分析。测试结构框图见图 1 所示。

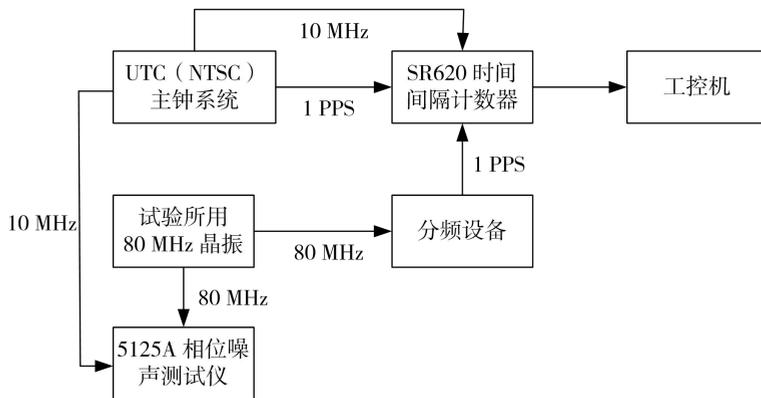


图 1 以 UTC (NTSC) 为参考测试结构框图

按图 1 所示结构框图, 2019 年 8 月 28 日在国家授时中心实验室对自由运行的高稳晶振持续测试 8 h。为了更直观评估晶振自由运行状态下相对频率偏差情况, 对所采集数据按公式 (6) 中的模型进行拟合平滑, 并扣除时差均值后被测高稳晶振的时差偏差曲线如图 2 所示。

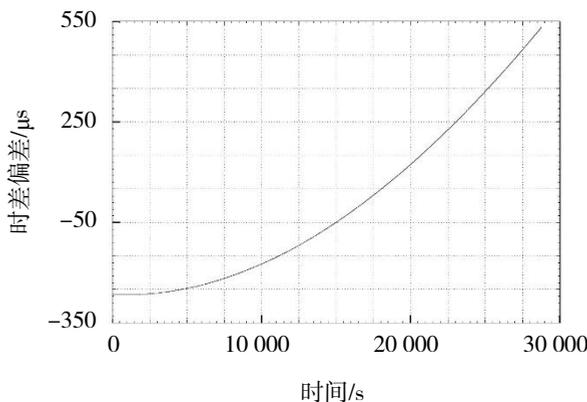


图 2 连续 8 h 拟合时差偏差数据

从图 2 可以看出, 由于高稳晶振与参考信号存在频差, 在未对其进行驯服的情况下, 随时间增长, 高稳晶振分频输出的 1 PPS 与 UTC (NTSC) 输出的 1 PPS 的时差也一直累积呈发散趋势。高稳晶振与参考信号的频率相对偏差计算是采用系统稳定后 10 min 的时差数据, 参考公式 (4) ~ (6) 采用比时法计算, 其中的取样间隔 τ 和取样个数 n 分别取 10 s 和 4, 得到频率相对偏差为 1.48×10^{-9} 。

Symmetricom 公司生产的 5125A 相位噪声测试仪器运用公式 (2), 可以直接输出待测频率源的实时 Allan 偏差图, 5125A 的测量底噪可以达到 $3 \times 10^{-15}/s$, 测试使用短期稳定度优于 $8 \times 10^{-14}/s$ 的 UTC

(NTSC) 主钟信号做测量参考, 参考信号优于待测信号 3 倍以上, 能够客观地反映待测频率源的频率稳定度。故本研究使用 5125A 对高稳晶振的稳定度进行测试。使用 5125A 得出该高稳晶振的频率稳定度测试结果参见表 1。

表 1 高稳晶振频率稳定度测试结果

取样间隔/s	Allan 偏差
1	1.05×10^{-11}
10	4.85×10^{-11}
100	2.08×10^{-10}
1 000	7.50×10^{-10}

2.2 以 GNSS 定时信号为参考的性能测试及分析

在某典型应用场景中, 因诸多限制没有理想参考信号, 考虑因地制宜, 使用 GNSS 定时接收机输出的定时信号作为参考, 因定时接收机性能所限, 其短期稳定性不及被测高稳晶振, 故利用定时接收机输出信号的长期稳定度、准确度较高的优点, 对该高稳晶振与其标称值的频率相对偏差进行测试, 以便调准。将由高稳晶振输出的频率信号进行分频, 整形, 再由 GNSS 定时接收机输出的定时信号对分频、整形后的 1 PPS 进行粗同步, 使得生成 1 PPS 与 GNSS 定时接收机输出的定时信号同步, 将同步后用于两站点间时间同步的 1 PPS 接入时间间隔计数器 SR620 的 A 通道作为开门信号, GNSS 定时接收机输出的 1 PPS 接入时间间隔计数器 SR620 的 B 通道作为关门信号, 站点内测试结构框图见图 3。

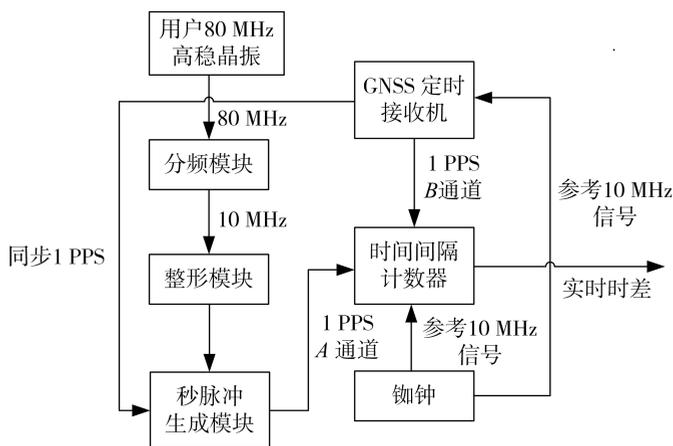


图 3 以 GNSS 定时接收机输出的定时信号为参考测试结构框图

按以上原理, 2019 年 9 月 6 日在试验主端站点持续测试 6h, 其中晶振的压控端悬空。因导航信号传播受各种因素干扰, 导致短期抖动较大, 为更好地评估待测晶振的频率特性, 采用对测试数据进行后处理的方式来减小影响, 通过对得到的钟差数据进行平滑处理以得到其长期特性, 噪声的平滑处理通常用二次拟合来表示。对试验主端站点晶振输出的 1 PPS 信号与 GNSS 接收机输出的卫星钟 1 PPS 信号测试, 实时频率相对变化率特性与二次拟合后实时频率相对变化率特性如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 使用该高稳晶振进行试验, 其经过分频设备输出的 1 PPS 信号与 GNSS 定时接收机的 1 PPS 信号有较大的初始偏差, 经分析这可能是因为 80 MHz 晶振与其标称频率存在频偏, 导致由晶振 80 MHz 信号分频出来的秒长与标准秒长不一致引起的。

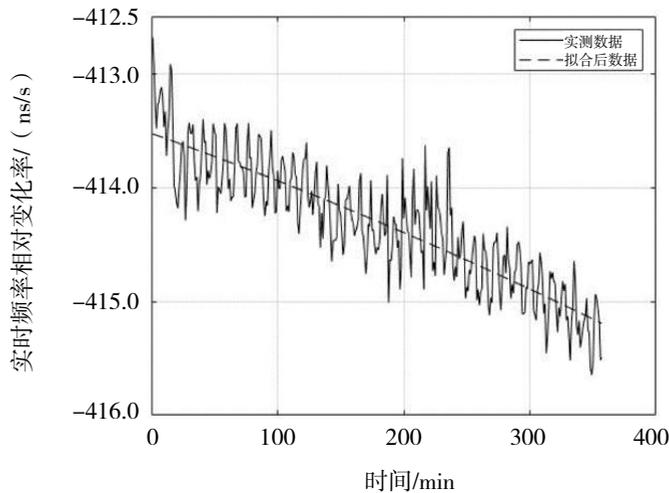


图4 试验主站点本地初始实时频率相对变化率特性图

参考公式(5)在 t 以及 F 都确定的情况下,改善时差增量 Δt 的关键在于使高稳晶振的频偏 Δf 尽可能地小,但其压控端因为使用条件限制不能接入压控信号,只能通过对其进行机械调准使频率尽可能接近80 MHz。每次调准后都按照图3测试框图所示的结构对时差进行测试,最终将晶振频率调至约80 MHz,得到实时频率相对变化率特性与经二次拟合后的实时频率相对变化率特性如图5所示。

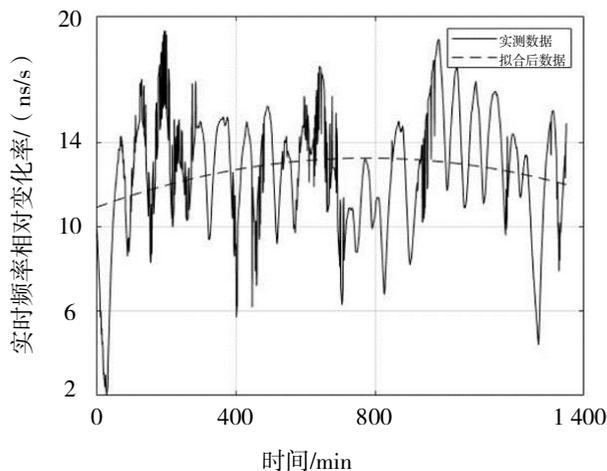


图5 试验主站点机械调准后实时频率相对变化率特性图

从图5可以看出经过机械调准后该站点系统主站相对频差变化率结果得到了大幅度改善。综合上述结果可以小结如下,提出的以GNSS定时接收机输出的定时信号作为参考对所用高稳晶振性能进行测试,再通过数据拟合方式对时差数据进行处理的方法,可以估计出待测频率源的频率偏差。实测结果显示按照测试数据调试后,主端站点实时频率相对变化率均值从414.3 ns/s降低至12.6 ns/s,变化速度得到了大幅度抑制。

2.3 试验结果分析

通过对比2.1节与2.2节的试验结果,可得出使用GNSS接收机输出的卫星钟信号作为参考的测试结果虽然不如使用国家授时中心UTC(NTSC)主钟信号作为参考进行测试时得到的结果准确,但反映的该高稳晶振的特性趋势与以UTC(NTSC)作为参考进行试验得到的结果基本一致,说明在试验场景下,使用GNSS接收机输出的卫星钟信号作参考得出的结果可信,可以作为高精度远程时间同步试验

可靠的支撑。

3 以高稳晶振为参考的异地时间同步试验结果

在相距 300 km 的两地以该高稳晶振为参考源开展同步实验,应用系统需要主从两站点间的时差标准差优于 15 ns, 结合实际需求采用卫星共视比对方案^[15-16]。在主端先将由高稳晶振输出的频率信号进行分频, 整形, 输出 1 PPS 信号接入时间间隔计数器的一个通道, 再将 GNSS 定时接收机输出的定时信号送入时间间隔计数器另一个通道, 实现对主端参考信号与卫星钟时间信号的时差测量; 从端同样通过时间间隔计数器对来自高稳晶振的参考信号与卫星钟时间信号进行比对, 然后两个站点通过网络实时交换观测数据。卫星共视能抵消卫星钟以及共有测量误差的影响, 从而得到两地晶振的时差。然后根据测量结果驯服从端站点的高稳晶振, 使得从端站点复现出与主端站点作为参考的高稳晶振同步的时频信号^[4,17-18], 实现两地时间同步。主从两站点测试结构框图如图 6 所示。

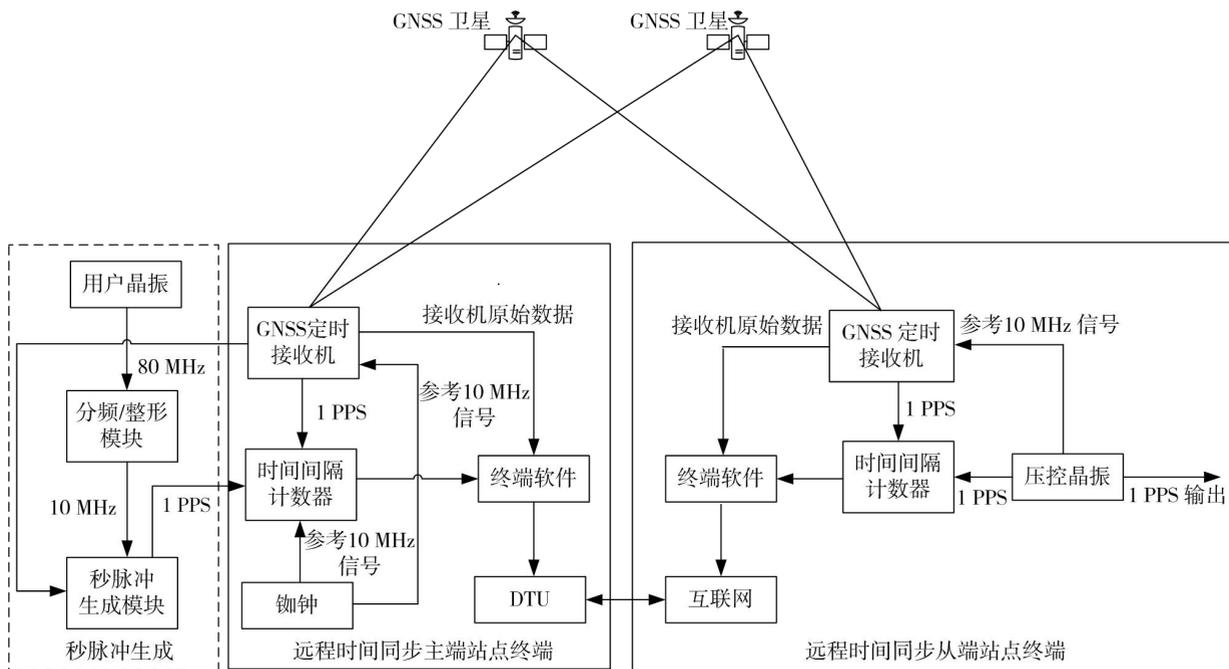


图 6 主从两站点测试结构框图

主端站点高稳晶振机械校准前、后两站点间的时差数据对比如图 7 和图 8 所示。

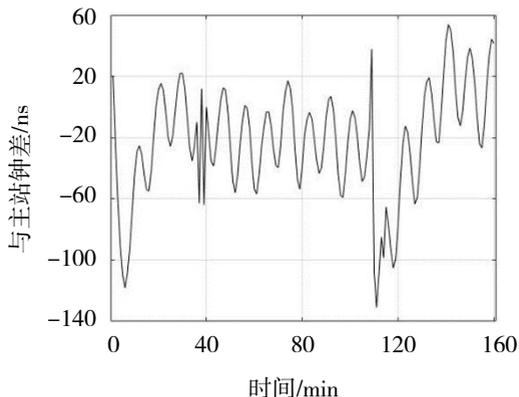


图 7 校准前试验主从两站点时差数据

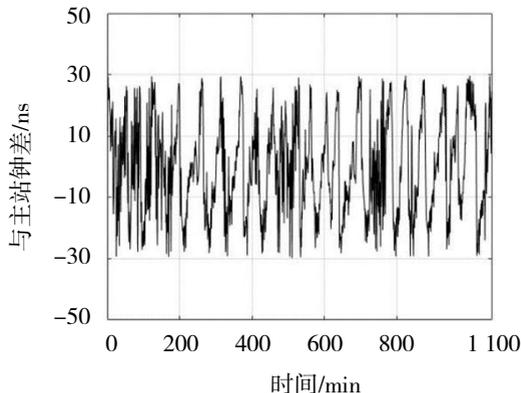


图 8 校准后试验主从两站点时差数据

根据测试结果,发现高稳晶振与参考信号的频率相对偏差对两站点间时间同步精度影响较大。而在不具备外部驯服条件下,选择根据测试结果对晶振频率进行机械调准来改善晶振的频率准确度,调准后两站点间的同步精度得到了显著的提高。调准前,两站点间时差的峰峰值优于 190 ns,经计算两站点间时差标准差(STD)优于 36.6 ns;调准后,两站点间时差的峰峰值优于 60 ns,经计算两站点间时差标准差(STD)优于 15 ns。

4 进一步提升同步精度的方案

由于没有一个更好的参考源去校准高稳晶振频率偏差,导致所用高稳晶振输出信号的频率较其标称频率值可能存在较大偏差,当用其作为站间同步的参考源时出现同步性能提高受限的问题,结合实际应用场景,本文提出了对晶振与其标称频率的频率偏差进行补偿的两种解决方法,一是根据测试结果,将晶振的频率进行周期性的机械调准,使得其输出信号的频率偏差尽可能得小,那么表现在时域上的时差变化也就会尽可能得小。而这种方案的问题在于由于晶振的老化特性没有得到补偿,频率相对偏差仍会随着时间的增长而慢慢变化,不能从根本上解决问题。第二种方案是将其锁定到稳定度、准确度更高的频率源上,使最终晶振输出在保留自身短期稳定度特性同时,具有与其溯源标准类似的准确度和长期稳定性,从根本上解决以晶振为参考源时因频率不准确带来的时差累积影响。

5 结语

针对以晶振作为参考源的高精度时间同步需求,首先使用国家授时中心 UTC(NTSC)主钟信号作为参考源,对所用高稳晶振的性能进行测试及分析。在实际应用中,因试验场地没有更好的频率源以及诸多环境问题限制,设计以 GNSS 定时接收机输出的定时信号作为参考进行测试。通过对两种测试方案的结果对比,发现以 GNSS 接收机定时信号作为参考,能满足高稳晶振频偏的测量需求,测试结果可信。在此基础上,以该高稳晶振作为参考源进行了异地时间同步试验,发现通过测试晶振的频率相对偏差校准晶振后,可以将两站点间时间同步偏差的峰峰值从 190 ns 降低到 60 ns 以内,改善了两地时间同步精度。

本文根据工程应用场景特点,提出了一种满足应用需求的频率相对偏差测试和数据处理方法,并通过异地时间同步测试验证了其可行性,解决了工程实用问题,不仅为用户节省了成本,也为更多需要按自身需求进行高精度远程时间频率传递的用户提供了一种解决方案,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 刘娅,陈瑞琼,赵志雄,等.基于卫星共视的标准时间远程高精度复现方法研究[J].时间频率学报,2018,41(3):53-58.
- [2] 高喆.改进的 ALGOS 算法在 TA(NTSC)归算中的应用研究[D].北京:中国科学院大学,2016.
- [3] 刘娅,陈瑞琼,赵志雄,等.UTC(NTSC)远程高精度复现方法研究及工程实现[J].时间频率学报,2016,39(3):178-192.
- [4] 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):24-30.
- [5] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉.基于改进的卫星共视法的远程时间比对研究[J].仪器仪表学报,2016,37(4):757-763.
- [6] 迟华山,张磊,迟文波,等.基于 GPS/北斗共视技术的铷钟驯服方法[J].计算机测量与控制,2017,25(7):306-308.
- [7] 高小珣,高源,张越,等.GPS 共视法远距离时间频率传递技术研究[J].计量学报,2008,29(1):80-83.

- [8] ZHANG P, XU C, HU C, et al. Time scales and time transformations among satellite navigation systems[C]// China satellite navigation conference (CSNC) 2012 proceedings, Berlin: Heidelberg, 2012: 491-502.
- [9] 张艺. 基于应力处理的工艺探索下的温补晶振研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [10] FAN Duo-sheng, SHI Shao-hua, ZHAO Zhi-xiong, et al. Research method of the VCXO disciplined base on UTC (NTSC)[C]// 2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), Qingdao: IEEE Beijing science, 2015(3): 1400-1404.
- [11] UPDEGRAFF R E. Precise time and frequency control using the Navstar GPS and a disciplined rubidium oscillator[C]// 1989 Second International Conference on Frequency Control and Synthesis, [S.l.]: IET, 1989: 92-96.
- [12] 郭春梅. 频率稳定度时域表征的测量不确定度[J]. 实用测试技术, 2000(5): 30-33.
- [13] ALLAN D W. Statistics of atomic frequency standards[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(2): 221-230.
- [14] 频率长期特性测量方法. GJB/J 2762-96 中华人民共和国国家军用标准[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1996.
- [15] 左建生, 董莲, 陆福敏, 等. 时间频率远程校准系统的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2010(4): 8-10.
- [16] 郭庆贺. 基于 DPLL 和 GPS 的同步信号合成及授时系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [17] 张莹, 周渭, 梁志荣. 基于 GPS 锁定高稳晶体振荡器技术的研究[J]. 宇航计测技术, 2005, 25(1): 54-58.
- [18] LOMBARDI M A. An introduction to frequency calibration: Part II[J]. Cal Lab the International Journal of Metrology, 1996: 28-34.