

引用格式: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.

基于压控晶振的超远距离时间复现方法研究

樊多盛¹, 刘娅^{1,2}, 许龙霞¹, 李孝辉^{1,2}, 朱峰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:以中国科学院国家授时中心保持的协调世界时(UTC(NTSC))为参考时间信号,采用压控晶振控制策略和卫星全视时间比对技术,在超远距离基线使用本地压控晶振复现出与 UTC(NTSC)同步的高精度时间频率信号。零基线测试结果表明,以压控晶振为频率源实现的超远距离时间复现设备产生的时间信号与 UTC(NTSC)偏差的标准差优于 0.8 ns,最大时间间隔误差优于 5.0 ns/1 d,其输出 10 MHz 频率信号的秒稳定性为 1.25×10^{-12} ,百秒稳定性为 3.0×10^{-12} ,万秒稳定性为 6.17×10^{-14} ,为增强型罗兰授时系统发播信号监测和超远距离时间产生提供了一种可行方法。

关键词:压控晶振控制;授时信号监测;卫星全视

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2022-03-0211-07

The study of ultra-long baseline time reproduction based on the VCXO

FAN Duo-sheng¹, LIU Ya^{1,2}, XU Long-xia¹, LI Xiao-hui^{1,2}, ZHU Feng¹

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

Abstract: The Coordinated Universal Time maintained by the National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences(UTC(NTSC)) is a reference time signal. Based on the common view time comparison technique and the VCXO controlled method, the high-precision time and frequency signal synchronizing with the UTC(NTSC) is reproduced with the local clock in the case of ultra-long baseline. Based on the results of a zero-baseline test, the standard deviation of the offset between the reproduced time signal and UTC(NTSC) is less than 0.8 ns, the maximum time interval error is better than 5.0 ns/1 d, and the stability of 10 MHz signal is $1.25 \times 10^{-12}/1$ s, $3.0 \times 10^{-12}/100$ s and $6.17 \times 10^{-14}/10$ ks. It provides a feasible method for monitoring the broadcast signal of the enhanced Loran time service system and ultra-long baseline time generation.

Key words: steer voltage control crystal oscillator (VCXO); timing signal monitoring; satellite omnivision view

收稿日期:2021-10-17;接受日期:2021-12-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2031125,12073033);陕西省自然科学基金资助项目(2018ZDXM-GY-011);中国科学院“西部之光”人才培养计划“西部青年学者”资助项目(XAB2020YN07)

0 引言

世界上发达国家都有自己独立运行的守时系统,以此确保本国时间统一、连续、稳定。有了守时系统,如何将标准时间传递给用户,便有了授时,目前世界上主要的授时系统有长短波授时与卫星授时。卫星授时如美国的 GPS(Global Positioning System)与我国的北斗,都已经非常成熟,但是在卫星信号受到干扰时,会给时间用户带来很多不确定因素,从国家经济、国防等安全角度出发,长短波授时是不可或缺的授时手段。目前长短波授时美国有 WWVB(Standard Time and Frequency Station, 60 kHz, Fort Collins Colorado)授时系统,我国有将建设的增强型罗兰授时系统。增强型罗兰授时系统的建设,将不仅满足国民经济、国防安全、科学的研究等对时间的高精度要求,更重要的是实现了我国授时信号国土面积的全覆盖^[1-3]。

增强型罗兰授时系统所广播的时间频率信号覆盖国土所到之处,对所广播的时间信号进行监测,保证广播信号的准确、稳定、可靠,是非常必要的。分布在全国各地的监测站对广播的罗兰信号进行监测,需要准确、稳定、可靠的时间频率信号作为监测站的时间频率参考,这样,价格成本占有绝对优势的压控晶振作为本地频率源就成为了首选,由于压控晶振受环境温度等因素的影响其频率漂移特性很明显,因此,需要对压控晶振加以控制,改正它的频率漂移,使压控晶振产生的时间信号与某一个参考时间信号保持同步。

中国科学院国家授时中心承担我国标准时间的产生、保持和发播任务^[4],由铯原子钟和氢原子钟组成的守时原子钟组(包括 6 台氢原子钟,32 台铯原子钟)^[4],作为我国基准时间信号的产生地,拥有的原子钟数量在世界上排名第四位。国家授时中心保持的我国标准时间 UTC(NTSC)与 UTC 的偏差常年一直保持在 10 ns 以内^[4],其建立的国家标准时间通过电话、网络、光纤、卫星双向及卫星全视等手段为不同行业的时间用户提供高准确度、高稳定度的时间频率信号与信息。

卫星共视技术作为一个时间传递的手段,受到可视卫星数量的限制,同时在长基线情况下它的精度也不同程度的有所下降。因此,以国家授时中心保持的我国标准时间为参考信号,基于卫星全视时间比对技术及晶振控制策略,在以压控晶振为频率源的远程时间用户终端,产生出与 UTC(NTSC)同步的时间频率信号。这种超远距离时间复现方法使得全国乃至全球任意地点的时间用户可以获得与国家授时中心保持的协调世界时同步的高精度时间频率信号,同时低成本的压控晶振降低了用户的价格成本,具有普遍应用价值^[5-6]。当然,这种远程时间复现方法为增强型罗兰授时信号监测终端提供了高精度的时间频率信号。

1 卫星全视方法

2004 年,Z.Jiang 和 G.Petit 提出了卫星全视时间传递的方法,这是对传统卫星共视比对时间传递的改进与提升,最大优点是观测的两地不再需要同时观测到相同的卫星,解决了超远距离时间传递的问题,但是它受卫星钟差与轨道精度的影响,因此需要使用精密星历产品。目前,国际大地测量协会(IGS)公布的事后精密星历产品中卫星钟差精度优于 75 ps,轨道精度优于 2.5 cm,同时该分析中心建立了 IGST 时间尺度,这就为超远距离时间传递提供了便利的条件。我国运行的全球连续监测评估系统(iGMAS)对全球卫星导航系统(GNSS)的运行状态、星座状态参数、空间信息参数等在 2021 年 6 月 1 日有了明确的规定,其中,它的最终星地钟差测量精度优于 0.16 ns,卫星轨道精度优于 1.2 cm,iGMAS 也可以提供与 IGS 类似的服务,在必要时可以替代 IGS 数据。对于客户端时间产生而言,目的就是获得本地时间与参考时间的时间偏差,基于卫星共视技术是利用了卫星系统的时间尺度(GNSST),而基于卫星全视是利用了 IGST 时间尺度或 iGMAS 时间尺度^[7]。

在本文,远程时间复现终端的压控晶振和国家授时中心的主钟在同一时刻接收 GPS 和北斗卫星系统的信号,同时获取 IGS 分布中心的精密星历产品,根据两地处理的星站钟差结果,通过实时数据交换的方式,远程时间复现终端的压控晶振就可以获得其与国家授时中心主钟的时间偏差^[7]。假设 A、B 为 GNSS 全视的两端,两端分别获得卫星观测数据,首先解算 A 站本地时间与卫星系统时间 IGST 的偏差 ΔT_{AS} :

$$c \cdot \Delta T_{AS} = \rho_{iA} - r_{iA} + c \cdot \delta t^{(s)} - I_{iA} - T_{iA} - \varepsilon_{iA}, \quad (1)$$

式(1)中, i 表示某颗卫星号, $\delta t^{(s)}$ 为 IGS 产品提供的卫星钟差, T_{iA} 为对流层延迟, I_{iA} 为电离层延迟, ϵ_{iA} 表示噪声误差, r_{iA} 为卫星与 A 站之间的几何距离, c 为光速。同理, 可以得到 B 站本地时间与卫星系统时间 IGST 的偏差 ΔT_{BS} , 这样 A 站和 B 站作差后就得到了两站的时间偏差, 即本地时间与参考时间的时间偏差:

$$y = \Delta T_{AS} - \Delta T_{BS}。 \quad (2)$$

通过卫星全视比对技术获得压控晶振与参考钟的时间偏差, 对于压控晶振而言, 最关心时间偏差数据的获得周期, 即全视时间间隔。压控晶振的特点就是短期特性良好, 需要及时获得与参考钟的时间偏差, 这种及时性也解决了压控晶振因环境变化而引起的瞬时突跳问题。同时, 由于 IGST 的参考时间尺度其短期稳定性好且连续稳定, 它的超快速产品延迟是实时的, 对钟驾驭无影响。因此, 以压控晶振为频率源的超远距离时间用户通过卫星全视获得与参考时间的时间偏差, 其最大的特点是, 及时获得压控晶振与参考钟之间的时间偏差, 实现了全视周期的灵活选择和无缝衔接。

2 压控晶振控制策略

压控晶振的控制策略, 包括估计压控晶振的运行参数和通过该参数对压控晶振施加控制两部分内容。常用的晶振参数估计方法有 Kalman 滤波、最小二乘、小波等方法, 根据参考源及测量方法的不同, 对参数估计方法进行选择。压控晶振围绕参考时间收敛的目的, 对压控晶振进行控制, 常用 PI 线性器控制及“乒乓”控制策略等。在本文, 根据卫星全视比对测量两地钟差的精度限制及对远程时间复现终端产生时间高精度的要求, 采用一次最小二乘法估计压控晶振的运行参数和“乒乓”控制策略对压控晶振加以控制。

2.1 一次最小二乘法

设定在 t_1 时刻压控晶振获得的时间偏差是 y_1 , t_2 时刻压控晶振获得的时间偏差是 y_2 , t_1 到 t_2 这个时间段是压控晶振与参考钟之间进行卫星全视后数据交互的周期, 是固定的一个常数, 记为 T 。由于压控晶振在短期内的老化很微小, 不影响它的参数估计规律, 可以忽略不计, 因此, 压控晶振的相位差与频偏参数 a 、 b 用公式(3) 表示:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}。 \quad (3)$$

由式(1) 可以解算出压控晶振的频偏系数:

$$b = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}, \quad (4)$$

即:

$$b = \frac{y_2 - y_1}{T}。 \quad (5)$$

由于 T 是压控晶振与参考钟之间卫星全视后星站钟差进行数据交互的周期, 压控晶振的短期稳定性很好, 通常它的秒稳定性在 10^{-12} 量级, 而它的长期稳定性很差, 因此, 根据实验经验积累, 在远程时间复现终端中, T 取值为 1 min。

通过式(5) 估算出压控晶振的频偏, 由于对压控晶振的控制发生在 t_2 时刻, 而在 t_2 时刻压控晶振与参考钟之间的时间偏差为 y_2 , 即 T 周期内压控晶振与参考钟之间的时间偏差, 二者结合就可以对压控晶振加以调节控制^[8-11]。

2.2 “乒乓”控制策略

采用上节中的一次最小二乘法估算出压控晶振的频偏和时间偏差参数后, 将时间偏差转换为频率偏差, 然后再结合压控晶振估算的频偏, 如何将二者结合起来, 对压控晶振进行调节控制, 使得压控晶振的频率既准确又稳定, 二者的结合策略就是“乒乓球”控制策略。

由于远程时间复现终端的压控晶振在上电初始偏离参考钟较远, 随着加以控制, 压控晶振输出的频率会慢慢靠近参考钟的频率, 最终压控晶振稳定后就一直围绕参考钟在一定的范围内来回振荡。此时对压控

晶振输出频率的控制就如同打“乒乓球”一样,使其产生的频率围绕参考频率来回运动,这个控制过程就是“乒乓”控制策略。根据压控晶振偏离参考钟的远近,对压控晶振的控制分为粗调与细调两步进行。粗调的目的是让压控晶振的输出频率快速靠近参考频率,细调的目的是让压控晶振输出的频率围绕参考频率来回运动。压控晶振输出的频率与参考钟的频率进行作差,根据频率是时间的导数关系,它们之间的频率差进行积分就是时间偏差,以这个时间偏差的零值为中心点,即“乒乓”控制策略的中间平衡点。

对压控晶振的调节,无论是粗调还是细调,都是要计算出压控晶振的调整量,只是调整量大还是小的问题而已。根据计算得到压控晶振与参考钟之间的时间偏差、压控晶振的频偏和预估出下一次的时间偏差,三者如何结合计算压控晶振最终调整量,总的原则分为以下三种情形:

①当时间偏差和频偏同号且同时朝零的方向变化,此时,最终的调整量是预测时间偏差除以阻尼因子和全视周期,除阻尼因子的目的是防止对压控晶振调偏;

②当时间偏差和频偏异号时,最佳的调整量计算方法是,频偏直接除以衰减因子,不考虑时间偏差及预估的时间偏差对晶振调整量计算的影响;

③当时间偏差与频偏出现其他情形时,压控晶振调整量的计算最好方法是将频偏和预测时间偏差除以衰减因子及全视周期作为最终结果。这种计算策略,可以将钟的速率减小到零同时使得钟差调整到零,所产生的调整量较小,不会引起压控晶振与参考钟之间的时间偏差出现发散的情形^[9-12]。“乒乓”控制策略的控制流程如图 1 所示。

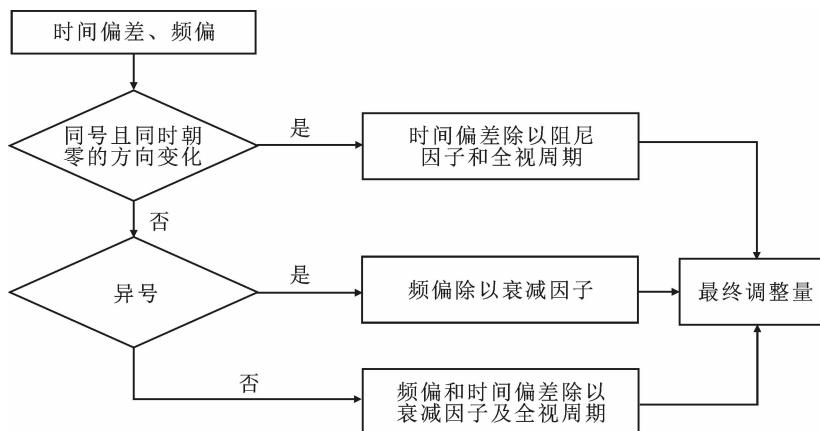


图 1 “乒乓”控制策略的控制流程图

在“乒乓”控制策略中,阻尼因子的选取根据对频率信号和时间信号的要求通过测试实验获得,例如,希望对频率信号的短期稳定性破坏得小一点,这时候,阻尼因子选取要大一点,反之,对时间信号的性能要求高的话,阻尼因子要取得小一点,在本文,阻尼因子取值为 2,是为了结合二者的最佳表现。

3 压控晶振控制实现方式

根据压控晶振参数估计方法和调节策略,对压控晶振的控制是通过调节压控晶振的压控电压实现的,依此我们设计实现了压控晶振工作电路,由于压控晶振与参考钟之间的时间偏差是通过卫星全视的方式获得的,这样就有了以压控晶振为频率源的超远距离时间频率复现,最终设计实现了超远距离时间复现终端,在零基线下对超远距离时间复现终端进行了测试。

通过卫星全视和实时数据交互获得压控晶振与 UTC(NTSC)之间的时间偏差,这个时间偏差作为压控晶振工作电路的总数据输入口,依此通过一系列的计算得到压控晶振的调整量,其工作原理实现见图 2。MCU(microcontroller unit)通过串口、I2C 及 SPI 等通信接口采集时间偏差数据,当得到两个连续的时间偏差数据后,就利用一次最小二乘参数拟合方法,计算出压控晶振的频率调整量,最后根据“乒乓”控制策略,

经过 DA 芯片将频率调整量转化为电压值,直接控制压控晶振产生的频率信号。压控晶振产生的 10 MHz 频率信号分为两路,一路直接提供给用户使用,另外一路经过数字分频产生 1 PPS 时间信号,作为本地的时间信号源^[9]。

最终将设计实现的以压控晶振为频率源的超远距离时间复现终端进行零基线测试评估,超远距离时间复现终端的零基线测试是在国家授时中心所在地临潼进行的,其测试原理如图 3 所示。待超远距离时间复现终端运行稳定后,一般需要 1~2 h,使用时间间隔测量设备(SR620)测试压控晶振产生的 1 PPS 信号与 UTC(NTSC)主钟输出的 1 PPS 信号之间的时间差,同时,通过 5125A 测试压控晶振输出的 10 MHz 频率信号。

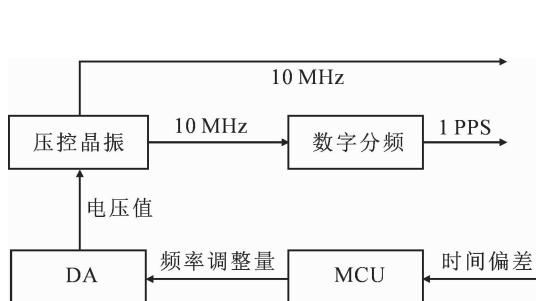


图 2 压控晶振工作电路实现原理图

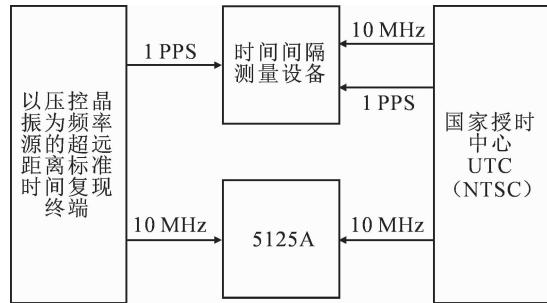


图 3 超远距离时间频率复现终端测试工作图

对压控晶振输出 10 MHz 频率信号与产生 1 PPS 时间信号进行零基线测试的目的,是分析基于卫星全视比对技术和压控晶振控制策略实现的超远距离时间频率复现信号,其时间信号与标准时间的实际差值以及频率信号的短期稳定度受损情况和长期稳定度改善状况。

4 实验结果

为了对比分析压控晶振在受控情况下其产生时间频率信号的性能,测试了压控晶振在自由运行时其产生 1 PPS 时间信号与 UTC(NTSC) 之间的时间差,这项测试工作是参考文献[8]发表时完成的,本文进行了直接引用,其测试结果如图 4 所示,压控晶振在自由运行时 1 d 时间偏离参考信号为 17.6 μs ,由此说明了两个问题,压控晶振在自由运行时产生的时间信号已超过了时间复现的意义,同时它的频率长期稳定度并没有得到改善。因此在标准时间信号作为参考时,调节控制压控晶振,对其复现出类参考时间信号与改善其频率长期稳定度才会有重要的意义。

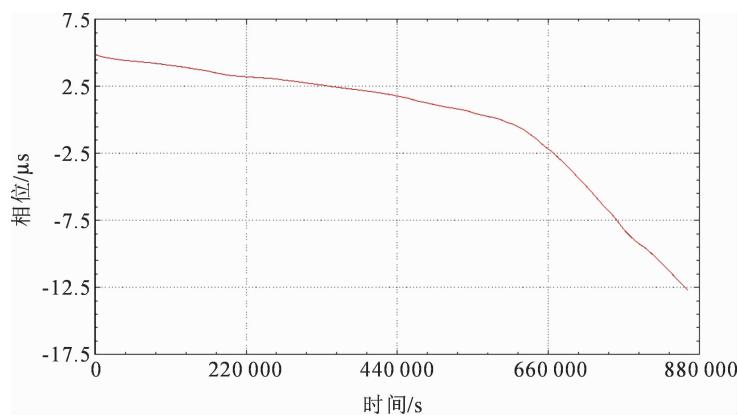


图 4 压控晶振自由时产生 1 PPS 与 UTC(NTSC) 之间的时差图

在 UTC(NTSC) 作为参考时间信号时,基于卫星全视比对技术和压控晶振控制策略,实现的以压控晶振为频率源的超远距离时间频率复现终端,在终端开机运行 2 h 稳定后,使用时间间隔测量设备测量压控晶振复现的时间信号与 UTC(NTSC) 之间的时间差值,其时差如图 5 所示,同时使用 5125A 稳定度分析仪测

试压控晶振输出的 10 MHz 频率信号,其 Allan 标准偏差如图 6 所示。由图 5 和图 6 可以看出,压控晶振受控稳定后的标准差优于 0.8 ns,最大时间间隔误差优于 $5.03 \text{ ns}/1 \text{ d}$,10 MHz 频率信号的秒稳定度为 1.25×10^{-12} ,百秒稳定度为 3.01×10^{-12} ,千秒稳定度为 1.57×10^{-12} ,经计算的万秒稳定度为 6.17×10^{-14} 。最后对比分析了压控晶振在受控与自由运行时其输出 10 MHz 频率信号的稳定度,对比分析结果见表 1。

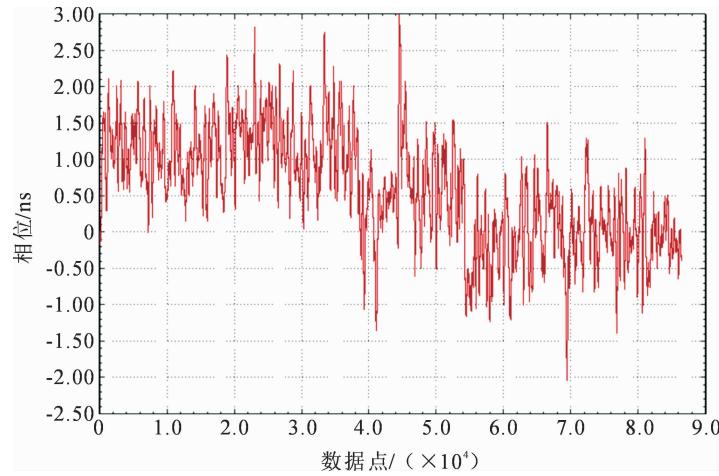


图 5 受控压控晶振稳定后产生的 1 PPS 与 UTC(NTSC)之间的时差图



图 6 受控压控晶振输出 10 MHz 的 Allan 标准偏差图

表 1 压控晶振在受控与自由运行时 ADEV 值对比表

时间	ADEV(受控)	ADEV(不受控)
1 s	1.25×10^{-12}	2.50×10^{-12}
10 s	1.75×10^{-12}	5.56×10^{-11}
100 s	3.01×10^{-12}	1.08×10^{-11}
1 ks	1.57×10^{-12}	2.69×10^{-11}
10 ks	6.17×10^{-14}	8.27×10^{-11}

由图5、图6及表1对比可以看出,以UTC(NTSC)为参考时间信号,采用压控晶振控制策略和卫星全视比对技术,设计实现的以压控晶振为频率源的超远距离时间频率复现设备,其产生的时间信号与UTC(NTSC)之间时间偏差的标准差优于0.8 ns,最大时间间隔误差优于 $5.03\text{ ns}/1\text{ d}$,10 MHz频率信号稳定度为 $1.25\times 10^{-12}/1\text{ s}$, $3.01\times 10^{-12}/100\text{ s}$ 和 $6.17\times 10^{-14}/10\text{ ks}$,该压控晶振出厂测试报告给出的秒稳定度优于 2.5×10^{-12} ^[13]。综上,可以看出来采用压控晶振控制策略和卫星全视比对技术实现的以压控晶振频率源的超远距离时间频率复现设备,其复现出的1 PPS时间信号与UTC(NTSC)国家标准时间信号保持了同步,同时其输出的10 MHz频率信号,在保持了压控晶振短期稳定性优良的情况下,它的长期稳定度得到了大幅度的改善。

5 结论

以UTC(NTSC)作为参考时间信号的情况下,通过压控晶振控制策略和卫星全视比对技术,实现的以压控晶振为频率源的超远距离时间频率复现设备,其复现的时间信号与标准时间1 d的最大偏差优于2.5 ns,产生的频率信号秒稳定度优于 1.25×10^{-12} ,万秒稳定度可达到 6.17×10^{-14} 。实现了在保持压控晶振短期稳定性优良的情况下,结合UTC(NTSC)参考信号改善了其长期稳定性,同时,其复现的时间信号与国家标准时间同步,对于时间频率用户而言,实现了压控晶振短期稳定性与国家授时中心主钟长期稳定性的巧妙结合,而低成本的压控晶振降低了时间用户的成本,此外,国产压控晶振的性能优于国际同行,实现了国内时间用户终端的国产化。这种时间频率信号超远距离实现方法,为增强型罗兰授时信号监测终端和超远距离时间同步提供了可靠的解决方案,同时,复现设备的低成本与高精度,有助于各行各业时间用户提升自己的时间频率性能,具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 李孝辉,杨旭海,刘娅,等.时间频率信号的精密测量[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 燕保荣,李云,郭伟,等.我国西部罗兰台站定位性能分析[J].天文学报,2021,62(3):57-66.
- [3] 燕保荣,李云,郭伟,等.长波传播时延特性及差分授时可行性分析[J].宇航计测技术,2021,41(1):15-19+47.
- [4] 高皓.改进的ALGOS算法在TA(NTSC)归算中的应用研究[D].西安:中国科学院大学(国家授时中心),2016.
- [5] 刘娅,陈瑞琼,赵志雄,等.UTC(NTSC)远程高精度复现方法研究与工程实现[J].时间频率学报,2016,39(3):178-192.
- [6] 许龙霞.基于共视原理的卫星授时方法[D].西安:中国科学院大学(国家授时中心),2012.
- [7] 杜畔.基于卫星全视的国家标准时间复现方法研究[D].西安:中国科学院大学(国家授时中心),2020.
- [8] 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,44(1):26-32.
- [9] 樊多盛,施韶华,李孝辉,等.基于GPS接收机的铷原子钟驾驭方法研究[J].电子测量与仪器学报,2013,27(10):980-985.
- [10] 樊多盛,施韶华,李孝辉.Kalman滤波的铷原子钟控制算法[J].宇航学报,2015,36(1):90-95.
- [11] FAN D S, SHI S H, ZHAO Z X, et al. Research method of the VCXO disciplined base on UTC(NTSC)[C]//IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Qingdao: IEEE, 2016: 1400-1404.
- [12] BARNES J A. The measurement of linear frequency drift oscillator[C]//Proceeding of the 15th Annual PTTI Meeting, 1983: 551-582.
- [13] 科码通信.KOH series high stability OCXO[EB/OL].(2019-07-18)[2021-10-05].<http://www.szkoma.com/ocxo.html>.