

引用格式: 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.

基于晶振的高性能时间保持方法研究

樊多盛^{1,2}, 刘娅^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}, 陈瑞琼^{1,2}

- (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: 以晶振作为时钟时间源, 经外部参考时间源驯服后, 在参考时间源中断的情况下, 通过对晶振的老化和温度补偿, 实现晶振的高性能时间保持。本文采用一颗秒稳优于 5×10^{-11} 的晶振作为试验对象, 经过驯服后, 在参考时间中断的情况下, 根据历史时间偏差数据和环境温度变化量对该款晶振进行老化和温度补偿, 将晶振自主保持 24 h 约 20.05 μs 提高至补偿后的 0.4 μs 。实验结果对比表明晶振经驯服后在保持状态下, 利用本文提出的晶振老化和温度补偿技术, 基于晶振的时间保持能力得到了明显的提升, 具有一定的应用价值。

关键词: 时间保持; 老化; 温度补偿; 压控晶振

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-01-0026-07

Research of high performance time keeping method based on crystal oscillator

FAN Duo-sheng^{1,2}, LIU Ya^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, CHEN Rui-qiong^{1,2}

- (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: Using the crystal oscillator as the clock time source, when the reference time source is interrupted, the high performance time keeping of the crystal oscillator controlled by the external reference time source is achieved by aging and temperature compensation of the crystal oscillator. In this paper, a crystal oscillator with stability better than $5 \times 10^{-11}/\text{s}$ is used as the test object. After the crystal oscillator is controlled by reference time source, compensates for the aging and temperature of the crystal oscillator are achieved based on historical time deviation data and the amount of ambient temperature change when the reference time is interrupted. Compared with the result of 20.05 μs within 24 hours for the uncontrolled case, the precision of the crystal oscillator self-maintenance is better than 0.4 μs within 24 hours. The comparison of the experimental results shows that after the crystal oscillator is controlled, under the holding state, through the aging and temperature compensation of the crystal proposed in this paper, its time retention ability has been significantly improved and the long-term

stability of the frequency of the crystal has been improved. The research has certain application value.

Key words: time keeping; aging; temperature compensation; voltage controlled crystal oscillator

0 引言

目前,很多时间用户维持时间的频率源是高性能压控晶振,如移动通信普通基站中的频率源是压控晶振,将其溯源到 GPS 或 BDS 卫星系统,以维持基站自身的时间。尤其是 5G 移动通信中,压控晶振作为基站维持时间的频率源,通过无线或者有线溯源到上一级时间基准,对本地基站的时间同步和时间保持性能提出了更高的要求,在 5G 载波聚合、多点协同和超短帧中要求时间同步的相对精度优于 $260 \text{ ns}^{[1-2]}$;同时,5G 的室内定位增值服务对时间同步的相对精度要求更高,要求在一定区域内基站间时间同步的相对精度要优于 $10 \text{ ns}^{[3-5]}$ 。

因晶振自身的老化、易受环境影响等因素,晶振作为频率源,使基站本身的时间保持有一定风险,该风险是在溯源链路中断时,晶振该怎样工作,才可以对基站自身的时间性能影响最小,且具有充分的容错时间。

高性能的压控晶振,如本文采用的秒稳为 5×10^{-11} 的压控晶振,其在室温环境中,因自身的老化,24 h 偏离国家标准时间 (UTC (NTSC)) 约为 $20 \mu\text{s}$,在基站时间链路中断的情况下,用自由运行的晶振维持基站时间,显然已经不能满足基站的时间保持能力,而在移动通信发展的 5G 时代,通信网络对时钟频率的稳定性和精确度要求越来越高,要求参考时间源的时间保持能力优于 $\pm 1.5 \mu\text{s}/24 \text{ h}$ 之内^[6-8]。因此需要在基站链路中断的情况下,对自由运行的晶振进行控制,才可以满足基站的时间保持能力。

本文通过历史时间偏差数据对晶振老化参数的拟合和实时对其运行环境温度变化进行补偿,使得晶振的时间保持能力优于 $500 \text{ ns}/1 \text{ d}$ 。通过该方法提升晶振自身的时间保持能力,远优于通信业界对基站时间保持能力为 $\pm 1.5 \mu\text{s}/1 \text{ d}$ 的时间保持期望。

1 晶振保持控制系统

晶振保持控制,是指通过获得晶振与参考时间源之间的时间偏差(参考时间源减去晶振的时间之差),根据时间偏差估算出晶振的状态参数,依据状态参数对晶振加以控制,使得晶振产生的时间信号与参考时间源之间的时间保持同步。在时间偏差数据链路中断的情况下,依据晶振的历史状态参数与实时温度变化量,对晶振进行控制,使其进行自保持。晶振保持控制系统原理如图 1 所示。

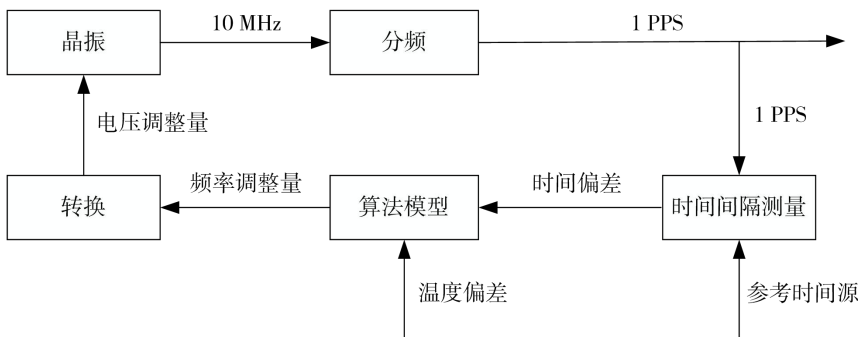


图 1 晶振保持控制系统原理图

对晶振驯服的目的在于计算出晶振的频偏和老化参数, 在时间偏差链路中断后, 利用该频偏和老化参数对晶振的老化进行补偿, 提升晶振的时间保持能力。

2 晶振老化补偿模型

对于晶振的控制方法, 以最小二乘法为核心, 通过最小二乘法拟合解算出晶振的状态参数, 对晶振的频偏进行修正同时对老化进行补偿。对于晶振, 它的时间偏差规律可以用二次多项式表示:

$$T(t) = a_0 + a_1 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_2 \cdot t^2 + \zeta(t), \quad (1)$$

式(1)中, $\zeta(t)$ 是噪声, 包括各种不确定因素的影响。 a_0 是初始时刻晶振与参考时间的偏差; a_1 是晶振的频率与标准频率的偏移率, 即频偏。 a_2 是频率漂移, 即老化, 它是因晶振自身的参数老化等原因产生的, 在频率上呈现为线性的偏离标准频率, 在时间上表现为二次项的趋势偏离标准时间。通常压控晶振的短期稳定性在 10 min 内表现得最佳, 因此, 在驯服状态下, 短时间内晶振的 $\zeta(t)$ 和 a_2 是可以忽略不计的, 所以, 晶振的初始相位和频偏可以用式(2)表示为:

$$T(t) = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (2)$$

在规定的时间内, $T(t)$ 和 t 之间的关系可以近似认为是一条直线, 因此, 可以通过最小二乘法一次拟合解出晶振的初始相位和频偏, 解算过程如下。

假定在 t_1 时刻得到的时间偏差数据为 T_1 , t_2 时刻得到的时间偏差数据为 T_2 , t_1 到 t_2 这个时间段为晶振与参考时间源的测量时间间隔, 在应用场景选定的情况下, t_1 到 t_2 这个时间段为常数, 记为 Δt 。因此, 这些量同晶振状态参数 a_0 、 a_1 的联系可用公式(3)表示:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由式(3)可以解算出晶振的频偏系数:

$$a_1 = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}, \quad (4)$$

即:

$$a_1 = \frac{T_2 - T_1}{\Delta t}. \quad (5)$$

同时, 由式(5)可以解算出晶振的初始相位系数:

$$a_0 = \frac{T_1 \cdot t_2 - T_2 \cdot t_1}{\Delta t}. \quad (6)$$

对于式(6), 算法模型是从 0 时刻开始运行, 因此式(6)可以简化为

$$a_0 = T_1. \quad (7)$$

通过式(5)和式(6)结算出了晶振的频偏和初始相位, 晶振在驯服状态下对其频率进行调整, 实现晶振与参考信号的时间同步^[9-11]。

在参考信号链路中断的情况下, 无法实时拟合晶振的频偏和初始相位, 此时, 根据式(1)基于长期的历史时间偏差数据, 可以拟合出晶振的频偏和老化参数, 对晶振的频率进行补偿, 实现晶振在无参

考信号时的时间保持。

晶振在参考信号链路中断时频率补偿如式 (8) 所示：

$$a_{11} = a_1 + \frac{1}{2} \cdot a_2 \cdot t' , \quad (8)$$

式 (8) 中的 a_1 和 a_2 分别是根据长时间历史时间偏差数据拟合而得的晶振的频偏和老化参数。

对保持时刻晶振残余频偏的消除，是指晶振在突然断开参考链路时，进入保持状态，最后一次驯服时刻的频率调整量有可能调多了或调少了，因此需要对晶振进入保持状态后，其最后一次驯服的频率调整量进行补偿，否则会影响晶振在保持状态下其频率偏离的速度。假设晶振在开始保持前的一个时刻其调整量为 P_1 ，进入保持后第一个时刻消除晶振频偏的调整量为 P_2 ，两者的关系如公式 (9)：

$$P_2 = -\phi \times P_1 , \quad (9)$$

式 (9) 中， ϕ 为调节系数，根据测试经验，此参数一般情况下取 0.5。

3 晶振温度补偿模型

晶振的实时温度偏差计算，是晶振在正常被参考源驯服时，采集晶振周围的环境温度，通过累积求平均的方式产生参考温度，参考温度滑动更新，开始进入保持时刻，所采集的晶振周围温度与参考温度作差，从而计算出晶振周围的温度偏差。通过累积求平均的方式产生参考温度，累积时长与晶振短期稳定性息息相关。

令采集的晶振周围温度为 r_i ，参考温度如公式 (10) 所示：

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i , \quad (10)$$

式 (10) 中， \bar{r} 表示参考温度， N 表示累积时长， r_i 为晶振周围环境温度。

因此，晶振进入保持后其周围环境温度变化偏差如公式 (11) 所示：

$$\partial r = r_i - \bar{r} , \quad (11)$$

式 (11) 中， ∂r 表示保持时刻晶振周围环境温度的变化量，即温度偏差。

温度偏差与晶振控制量之间关系，即将温度偏差转换为晶振的压控电压，该压控电压弱化因温度变化引起的晶振的频率偏离，从而提高晶振的时间保持能力，根据本文实验，温度偏差与控制量之间的关系可以用公式 (12) 表示：

$$P = -\beta \times \partial r , \quad (12)$$

式 (12) 中， P 为晶振的频率控制量， β 为调节系数，该调节系数是经验值，不同型号的晶振其值不同。

4 晶振保持实验结果

晶振保持控制系统采用中国科学院国家授时中心主钟输出的 1 PPS 信号作为基准，对晶振进行驯服，驯服时间 24 h 后，在基准信号链路中断的情况下，晶振进行自保持。晶振保持控制系统测试原理图见图 2 所示。时间间隔测量设备测量国家授时中心主钟输出的 1 PPS 与晶振产生的 1 PPS 之间的钟差，计算机采集时间间隔测量设备测量值，将测量值发送给晶振保持控制系统用于晶振的驯服，在计算机停止

给晶振保持控制系统发送测量值后,计算机继续通过时间间隔测量设备测量了晶振输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 的钟差,对晶振的时间保持性能进行评估^[9,12]。

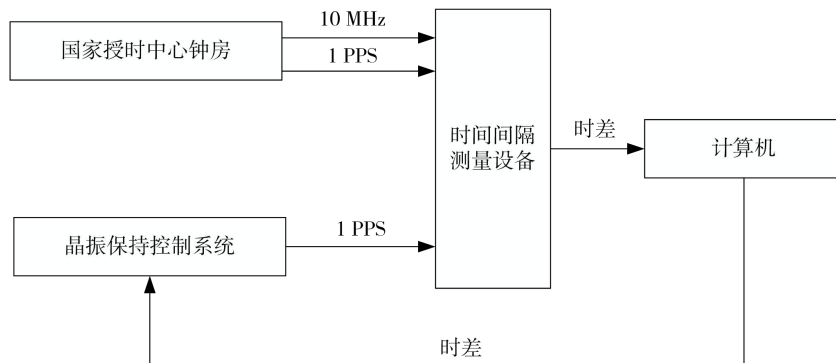


图 2 晶振保持控制系统测试原理图

晶振保持控制系统测试原理图中所提及的时间间隔测量设备是指 SR620。其时间间隔测量的精度优于 50 ps, 满足该测试系统要求^[9,12]。

晶振保持控制系统在室温环境中运行,晶振自由运行 24 h,其偏离标准时间的峰峰值为 20.05 $\mu\text{s}/1 \text{ d}$, 去除一次频偏后其残差的峰峰值为 556.5 ns/1 d, 其晶振自由运行 24 h 偏离标准时间的时差图如图 3 所示, 去除一次频偏后的残差图如图 4 所示。

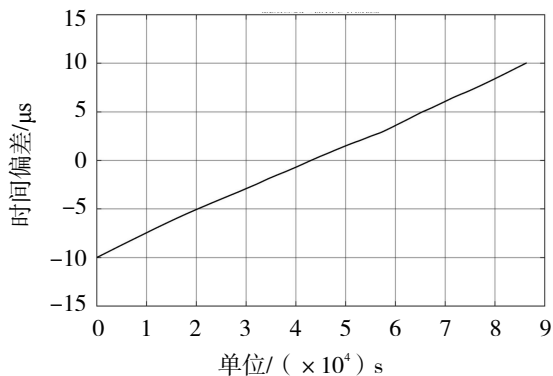


图 3 晶振自由运行 24 h 偏离标准时间的时差图

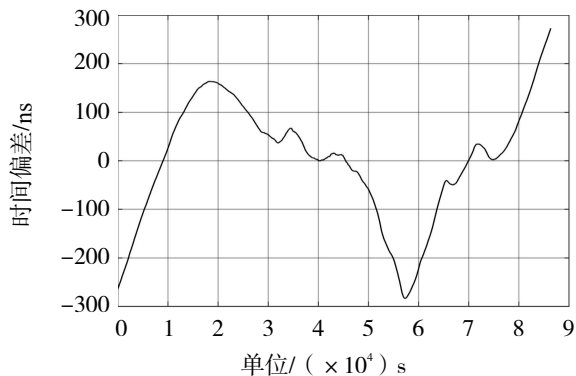


图 4 晶振自由运行 24 h 偏离标准时间的时差去除一次频偏后的残差图

为了评估晶振的时间保持性能,使用时间间隔测量设备测量晶振工作系统输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 之间的钟差值,测量钟差见图 5。晶振驯服状态下其输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 的钟差见图 6, 晶振进入保持状态后,运行 24 h 其输出的 1 PPS 与 UTC (NTSC) 的钟差见图 7, 以时间偏差 1 μs 为门限进行统计,晶振输出的 1 PPS 与 UTC (NTSC) 的钟差见图 8。晶振驯服时长 56 h 时,驯服状态下其输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 的钟差优于 10 ns。晶振进入保持状态后,运行 24 h 其输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 的钟差优于 380 ns, 以 1 μs 为统计门限,晶振运行约 38 h 其输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 的钟差优于 1 μs 。

由图 4 至图 8 及表 1 和表 2 可以看出,晶振驯服 56 h 后进入保持状态,保持 24 h 其输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 的钟差最大值不超过 380 ns; 晶振进入保持后短期稳定性破坏最小的情况下,其 10 s 采样的 Allan 偏差 ADEV 为 6.49×10^{-12} , 10 000 s 采样的 ADEV 为 5.83×10^{-12} , 10 s 采样的最大时间间隔误差 MTIE 为 1.35×10^{-9} , 10 000 s 采样的 MTIE 为 1.93×10^{-7} 。

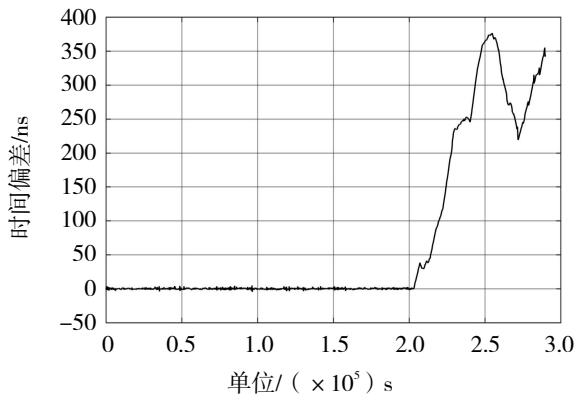


图 5 晶振工作系统产生 1 PPS 与 UTC (NTSC) 之间的钟差图

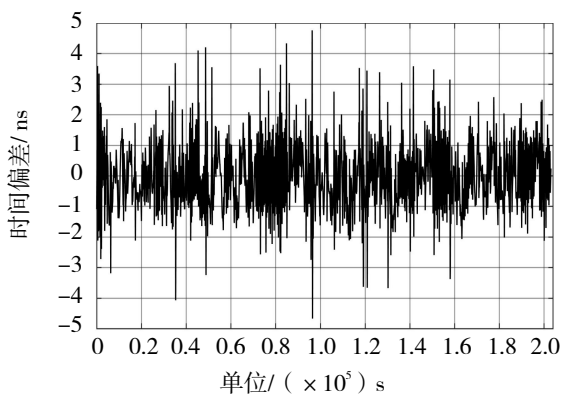


图 6 晶振驯服状态下其输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 之间的钟差图

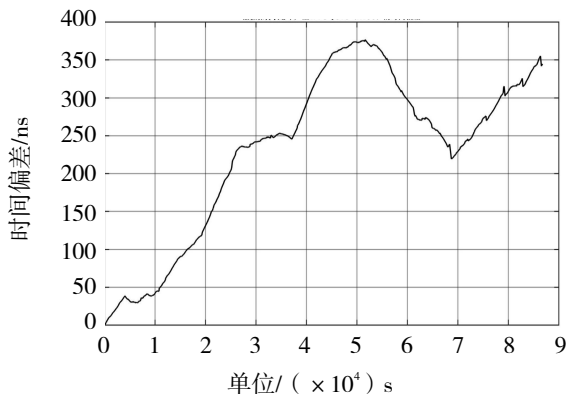


图 7 晶振进入保持后 24 h 其输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 之间的钟差图

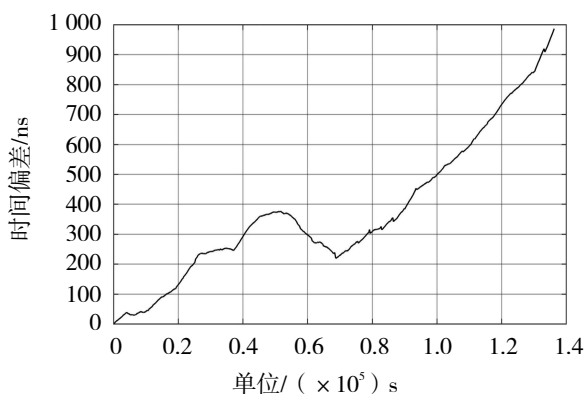


图 8 晶振进入保持后不超过 1 μs 其输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 之间的钟差图

表 1 晶振进入保持状态运行 24 h 其 ADEV 比较

取样时间	晶振保持状态	晶振自由运行
ADEV/10 s	6.49×10^{-12}	5.3×10^{-12}
ADEV/100 s	7.43×10^{-12}	2.44×10^{-12}
ADEV/1 000 s	4.41×10^{-12}	6.94×10^{-12}
ADEV/10 000 s	5.83×10^{-12}	1.26×10^{-11}

表 2 晶振进入保持状态运行 24 h 其 MTIE 比较

取样时间	晶振保持状态	晶振自由运行
MTIE/10 s	1.35×10^{-9}	7.77×10^{-9}
MTIE/100 s	1.05×10^{-8}	6.78×10^{-8}
MTIE/1 000 s	2.46×10^{-8}	5.41×10^{-7}
MTIE/10 000 s	1.93×10^{-7}	7.85×10^{-6}

表 1 和表 2 对比分析了晶振在保持状态下与自由运行时其 ADEV 和 MTIE 的情况,从表 1 可以看出,晶振在自保持状态下 10 000 s 的 ADEV 比在自由运行时提高了一个数量级,且短期的 ADEV 与自由运行

时相当;从表 2 可以看出,晶振在自保持状态下 10 000 s 的 MTIE 比在自由运行时提高了一个数量级,同时短期 MTIE 有明显的改善。

综上,可以看出晶振进入保持后,在没有破坏晶振短期稳定性的前提下,使晶振获得了较好的长期稳定性;同时,基于老化和温度模型对晶振进行补偿,使得晶振的时间保持能力得到了 1 个数量级的提升。

5 结论

本文主要研究了在晶振参考信号链路中断的情况下,利用最小二乘法根据长时间历史时间偏差数据对晶振的老化进行补偿,同时通过实时温度补偿削弱了环境对晶振的影响,从而提高了晶振的时间自保持能力。通过实验论证了基于老化和温度补偿模型对提高晶振的时间保持能力效果明显,实验表明,晶振在参考信号链路中断的情况下,运行 24 h 其输出 1 PPS 与 UTC (NTSC) 的钟差不超过 380 ns,在对其短期稳定性影响最小的情况下,其长期稳定性得到了改善。通过这种途径,晶振在参考信号链路中断的情况下,其时间保持能力和频率稳定性都得到了提升,对以晶振作为时间源的时间用户,起到了事半功倍的效果。

参考文献:

- [1] 秦晓杰. 5G 移动通信基站建设关键技术分析[J]. 数码世界, 2019(6): 36.
- [2] 刘禹铭. 面向 5G V2X 标准化的物理层关键技术研究与设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [3] 刘中令. 基于 5G 的高精度室内定位技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [4] 张君怡, 任鑫博. 非独立组网架构下 5G 网络在智能电网中的应用[J]. 通讯世界, 2020, 27(2): 11-12.
- [5] 舒文琼. 中国联通张贺: 5G 时间同步出现新需求, 1588v2 和北斗系统可担重任[J]. 通信世界, 2019(14): 32.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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): 194-199.
- [10] 朱峰. 卫星导航中的时间参数及其测试方法[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2015.
- [11] 樊多盛, 刘娅, 李孝辉. 基于 Kalman 滤波器对晶体振荡器的控制研究[J]. 时间频率学报, 2019, 42(3): 224-232.
- [12] 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.