

氢原子钟的频率驾驭算法研究*

尹东山^{1,2,3†} 赵书红^{1,2} 高玉平^{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 以氢钟作为主钟系统的频率源,可产生短期稳定度更好的本地时间UTC(k),氢钟通常具有频率漂移效应,这使得氢原子钟的长期稳定度随着时间的推移不断降低,进而影响UTC(k)的稳定度与准确度.为解决这一问题,比较分析了氢钟和铯钟的性能,改进了氢钟参与时间尺度计算的算法,并提出了基于主钟为氢钟的频率驾驭算法.通过搭建试验系统,编制相关的软件,对该算法进行了检验.测试结果表明当氢钟参与原子时计算时,可有效改善参考时间尺度的短期稳定度,同时主钟频率源为氢钟比主钟频率源为铯钟产生的本地时间UTC(k)具有更好的短期频率稳定度.

关键词 天体测量学, 时间, 氢原子钟, 时间保持, 方法: 数据分析

中图分类号: P127; **文献标识码:** A

1 引言

中国科学院国家授时中心(National Time Service Center, NTSC)的时间保持系统由氢、铯原子频率标准组成(32台HP5071A铯原子钟和6台主动型氢原子钟),并通过GNSS(Global Navigation Satellite System)共视比对(GNSS CV)、GNSS精密单点定位(GNSS PPP)和卫星双向时间频率比对(TWSTFT)与国际标准时间UTC相联系,从而完成高精度国际溯源,对国际原子时TAI的保持做出贡献.

长期以来,在国家授时中心基准实验室的时间保持工作中,铯钟一直发挥着很重要的作用,但由于氢钟频漂的影响,氢钟参与度比较低,氢钟特性的施展是时间保持工作的难点.

纵观全世界各时间实验室的原子钟权重分配情况^[1],在2014年之前,参与TAI计算的铯钟总权重很大,占85%左右,而氢钟参与TAI计算的总权重比重过小,仅占到10%左右.在2014年之后,为更好地发挥氢原子钟的特性,国际权度局BIPM更换了权重计算方法^[2],使得参与TAI计算的铯钟总权重由原先的85%降低到50%,而氢钟的总权重

2016-01-06收到原稿, 2016-02-13收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11303032)、西部之光项目(XAB2015B19)资助

[†]yds@ntsc.ac.cn

由10%提升到50%, 改变了以往铯原子钟占据过大权重的情况, 提高了氢原子钟在TAI计算中的地位, 这说明了国际上也愈来愈重视氢钟在时间实验室中的作用. 同时依据连续几年的BIPM频率年报分析^[1,3-4], 保持精度较高的时间实验室钟组配置的共性是: 原子钟组的数量不断增加, 特别是氢钟的数量增长迅速, 并且绝大多数实验室的主钟频率源由原先的铯钟更换为氢钟, 这足以说明了氢钟的重要性.

而在国内, 氢钟的研制技术日趋完善, 氢钟的精度不断提高, 且数量也在逐年增加. 因此如何最大限度地发挥氢钟的特性, 对于改善时间尺度的稳定性和地方协调时UTC(k)的高精度保持具有重要意义.

为了进一步提高地方协调时UTC(k)的准确性和稳定性, 文中比较分析了氢钟和铯钟的性能, 改进了氢钟参与时间尺度计算的算法, 并提出了基于主钟为氢钟的频率驾驭算法. 通过搭建试验系统, 编制相关的软件, 对该算法进行了测试检验.

2 氢钟的性能分析

氢原子钟具备优良的短期稳定性和低噪声特性, 但存在频率漂移, 这使得氢原子钟的长期稳定度随着时间的推移不断降低. 而铯原子钟具有良好的长期稳定性, 但短期噪声比较大, 因此为更加合理地利用这两类频率标准, 我们从两种不同角度来分析这两类原子钟的性能.

2.1 从噪声角度分析

我们选取了2015年1月1日到2015年6月30日的两台原子钟(一台MHM-2010氢钟HM297、一台HP5071A铯钟Cs2959)与NTSC主钟系统输出信号UTC(NTSC)的相位比对数据, 分别记作UTC(NTSC)-HM297和UTC(NTSC)-Cs2959, 利用这两组数据分析铯钟与氢钟的噪声特性.

目前, NTSC主钟系统是由主钟频率源、相位微调器两个设备组成, 每一种设备都有自己的噪声, 噪声的均方根分别记作 σ_1 、 σ_2 , 比对设备为时间间隔计数器, 它的噪声均方根记为 σ_{TIC} , 参与比对的第 i 台原子钟的噪声均方根记为 $\sigma_{\text{Clock}(i)}$, 因此最终UTC(NTSC)-Clock(i)噪声的均方根 $\sigma_{\text{SUM}(i)}$ 为^[5-6]:

$$\sigma_{\text{SUM}(i)} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_{\text{TIC}}^2 + \sigma_{\text{Clock}(i)}^2}. \quad (1)$$

利用Vondrak滤波方法对这两组原子钟的比对数据进行平滑滤波^[7], 扣除趋势项后得到的残差进行统计分析, 符合正态分布, 认为噪声属于相位白噪声, 图1和图2分别为两组数据扣除趋势项后的残差图. 从图1可以看出, 在MJD为57126之后的噪声大幅减小, 这是由于在2015年4月14日(MJD=57126)时, 主钟频率源由铯钟更换成氢钟导致, 即当主钟频率源为氢钟的输出信号UTC(k)比铯钟明显具有更加优良的短期稳定度. 而图2在MJD为57126前后没有明显的变化, 主钟频率源由铯钟更换成氢钟, UTC(k)的噪声变化已经淹没在铯钟的噪声中, 即氢钟HM297的噪声远远小于铯钟Cs2959的噪声. 我们取MJD=57126之后的两组原子钟比对数据分别计算比对系统的噪声均方根分别为 $\sigma_{\text{SUM}(\text{HM297})} = 0.133 \text{ ns}$ 和 $\sigma_{\text{SUM}(\text{Cs2959})} = 0.55 \text{ ns}$.

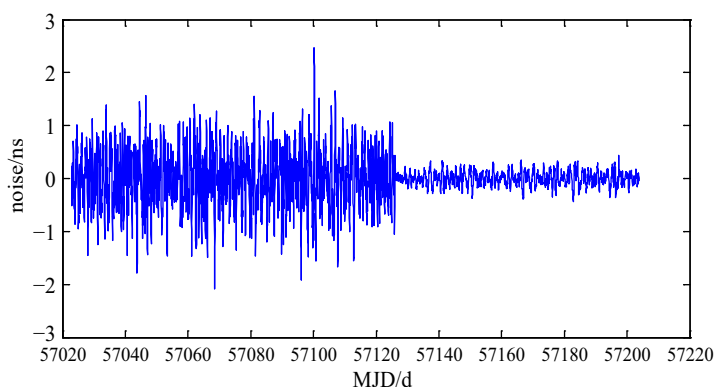


图1 UTC(NTSC)-HM297扣除趋势项后的残差

Fig. 1 The fitting residuals of UTC(NTSC)-HM297

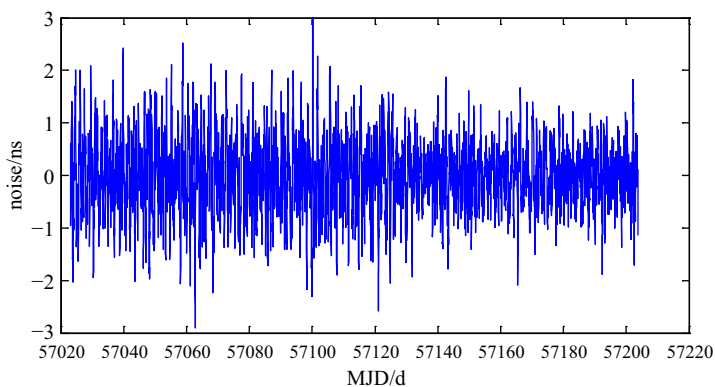


图2 UTC(NTSC)-Cs2959扣除趋势项后的残差

Fig. 2 The fitting residuals of UTC(NTSC)-Cs2959

2.2 从频率预报的角度分析

在时间频率研究领域中,通常频率预报的目的有两个:一是预报每台钟相对于一个参考标准的频率,用于参与原子时计算,最终得到一个稳定、准确的原子时尺度;二是对原子钟进行频率驾驭,最为常见的是对主钟频率源进行频率驾驭,最终获得高精度的输出信号 $UTC(k)$ 。鉴于上述两种目的,对不同原子钟的频率预报分析,需要从具体目的来考虑,这两种目的关键在于预报时间的长度。

我们选取了2015年5月1日到2015年5月30日的两台原子钟(氢钟HM297、铯钟Cs2959)与NTSC保持的地方原子时尺度TA(NTSC)的比对数据,记为TA(NTSC)-HM297, TA(NTSC)-Cs2959。分别对这两组数据进行一次差分,分析这两台原子钟相对于地方原子时尺度TA(NTSC)的日频率波动情况^[8]。从图3可以看出,铯钟Cs2959相对于地方原子时尺度TA(NTSC)的日频率波动没有斜向变化的趋势,主要表现在均值附近波动,且相比于氢钟,铯钟波动幅度比较大;而氢钟HM297相对于地方原子时尺度TA(NTSC)有明显的斜向变化,其斜向线性变化率记为氢钟的频率漂移量。

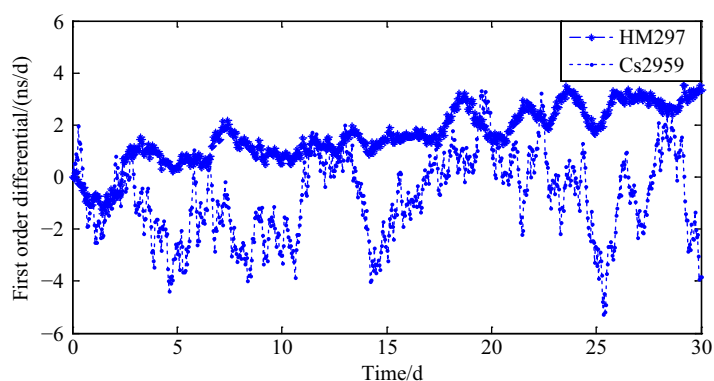


图 3 氢钟、铯钟相对于TA(NTSC)的日频率波动

Fig. 3 The daily frequency fluctuations of hydrogen maser and cesium clocks in reference to TA(NTSC)

对铯钟Cs2959和氢钟HM297相对于地方原子时尺度TA(NTSC)的比对数据进行二次差分, 分析铯钟与氢钟相对于地方原子时尺度TA(NTSC)的日频漂波动情况. 从图4可以看出, 铯钟Cs2959相对于地方原子时尺度TA(NTSC)基本没有频率漂移, 即铯钟Cs2959存在频率波动, 频率漂移量为0, 而氢钟HM297相对于地方原子时尺度TA(NTSC)的二次差分在均值附近波动, 频率漂移量为 0.1 ns/d^2 .

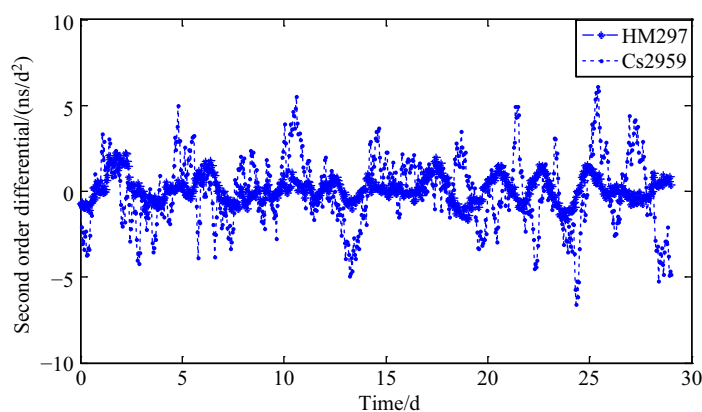


图 4 氢钟、铯钟相对于TA(NTSC)的频率漂移

Fig. 4 The frequency drifts of hydrogen maser and cesium clocks in reference to TA(NTSC)

综上所述, 铯钟一般不存在频率漂移, 短期波动比较大, 而氢钟短期波动小, 但普遍存在频率漂移, 因此对于铯钟和氢钟的频率预报方法应该是不同的. 但目前大多实验室采用的频率预测方法是假定任何类型的原子钟在计算时间内频率为常数, 也就是说尽管氢钟受频率漂移的影响, 但在计算时间间隔内依然假定氢钟的频率是常量, 这显然是不合理的. 因此, 我们需要将频率漂移考虑到氢钟频率预报算法中, 即氢钟采用二次多项式模型, 铯钟采用线性模型, 进而融合到原子时算法中, 这样要比原先的算法更加适用于所有类型的原子钟.

3 用于监控UTC(k)的参考原子时算法

时间实验室的主要功能是产生和保持本地的系统时间, 系统时间有纸面时间和实时物理信号两种表现形式. 纸面时间是通过各个原子钟的钟差表现, 都是滞后的. 而实时物理信号是以纸面时间为参考, 对主钟系统的主钟频率源进行频率驾驭, 产生实时的物理信号. 因此, 纸面时间是提供准确的实时物理信号的参考.

为提高氢钟的参与程度, 纸面时间主要参考2014年BIPM改进的国际原子时的新算法, 即“可预报性”原则^[9]. 对国家授时中心的4台MHM-2010氢原子钟和2台上海天文台产氢原子钟, 利用上节提到的二次多项式预报模型, 生成一个氢原子钟组成的时间尺度TA(Hm). 同时, 利用32台铯原子钟组以及经过TAI速率校正后综合产生的原子时尺度TA(Cs). 这两个时间尺度互为参考, 利用TA(Hm)减小铯原子钟的短期波动, 而利用TA(Cs)扣除掉TA(Hm)的长期漂移, 综合两者得到最终稳定性和准确度最优的纸面时间, 记为参考原子时RTA.

我们选取了2015年1月1日到2015年6月30日的原子钟比对数据, 记作UTC(NTSC)–Clock(i), 利用上述算法计算得到参考原子时RTA, 如图5所示.

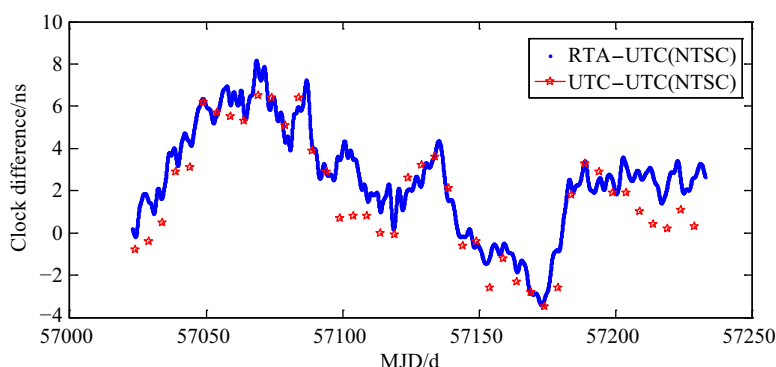


图5 参考原子时RTA相对于UTC(NTSC)的钟差

Fig. 5 The clock difference between reference atomic time RTA and UTC(NTSC)

从图5可以看出, 新的参考原子时算法产生的时间尺度RTA相对于UTC(NTSC)的相位偏差在 ± 10 ns, 并且与UTC–UTC(NTSC)的趋势是保持一致, 这可以说明RTA计算结果的准确性. 表1给出了RTA相对于UTC(NTSC)的Allen偏差(ADEV), 从中可以看出, RTA相对于UTC(NTSC)的稳定度结果是比较好的, 即说明了RTA是可以作为监控UTC(NTSC)的重要参考.

4 氢钟频率驾驭方法

当主钟频率源为氢钟时的输出信号UTC(k)明显比铯钟具有优良的短期稳定度, 这也就是越来越多的时间实验室的主钟频率源选为氢钟的原因, 但氢钟也有自身的弊端. 由于大多数的氢钟都具有长期漂移, 因此如何很好地将长期漂移扣除, 以及很好地发挥出短期稳定度好的特点, 这是氢钟作为主钟的驾驭算法研究的重点. 氢钟在40 d稳定度

大约 10^{-15} , 因此简单估算在40 d左右, 时间偏差大约4 ns以内.

$$10^{-15} \times 86400 \times 40 \times 10^9 \approx 4 \text{ ns}. \quad (2)$$

为保证输出信号UTC(k)的独立性, 外部参考选择UTC或快速UTC(UTC_r), 但UTC、UTC_r的频率稳定度也是影响UTC(k)控制精度的一个重要组成部分, 且链路的不稳定性也需要考虑在内^[10].

表 1 UTC(NTSC)相对于RTA(NTSC)的稳定度结果
Table 1 The frequency stability of UTC(NTSC)–RTA(NTSC)

Time interval/hour	ADEV(RTA–UTC(NTSC))
1	1.69×10^{-14}
2	9.35×10^{-15}
4	6.15×10^{-15}
8	4.99×10^{-15}
16	3.13×10^{-15}
32	1.35×10^{-15}
64	8.24×10^{-15}
128	6.9×10^{-15}
256	8.12×10^{-15}
512	9.56×10^{-15}
1024	1.16×10^{-16}

4.1 氢钟频率驾驭算法

对氢钟的驾驭量从3方面考虑: 第一是每日驾驭, 由于氢原子钟存在频率漂移, 因此需要估计氢钟相对于参考原子时RTA的频率以及频漂, 并扣掉这个频率以及频漂. 但仅利用这个驾驭氢钟, 驾驭后的UTC(k)只是基于参考原子时RTA实现的秒长来生成; 第二是每周驾驭, 利用UTC(k)与UTC_r的相位偏差估计合适的驾驭量, 使得UTC(k)与UTC_r的相位偏差保持在很小的范围内; 第三是每月驾驭, 利用UTC(k)与UTC的相位偏差估计合适的驾驭量, 使得UTC(k)与UTC的相位偏差保持在很小的范围内. 具体的频率驾驭方法为^[11–14]:

(1) 主钟频率驾驭参考时间尺度RTA计算

(a) BIPM数据获取: 获取国际权度局BIPM每月公布的UTC–UTC(NTSC)结果、每周公布的UTC_r–UTC(NTSC)结果以及每台原子钟相对于TAI的速率;

(b) 本地原子钟比对数据分析: 获取主钟与原子钟组中每台原子钟比对数据, 对比对数据进行预处理, 如异常点剔除、补齐缺失的数据、数据降噪等;

(c) 利用上述的参考原子时算法计算参考时间尺度RTA.

(2) 主钟频率驾驭量计算

(a) 根据主钟相对于RTA数据, 利用数学方法线性拟合, 计算出主钟相对于RTA下一时刻的频率预报值, 记为驾驭补偿量offset1;

- (b) 计算补偿时间尺度RTA相对于UTC(NTSC)的相位偏差 ΔT , 记为驾驭补偿量offset2;
- (c) 缩小UTC(k)相对于UTC_r的相位偏差, 记为驾驭补偿量offset3;
- (d) 缩小UTC(k)相对于UTC的相位偏差, 记为驾驭补偿量offset4;
- (e) 将补偿量offset1、offset2、offset3以及offset4组合成最终主钟频率补偿量.
- (3) 主钟频率驾驭量输入, 在程序控制下通过标准RS232C串口, 将主钟频率驾驭量输入到相位微调仪实现主钟频率驾驭.

4.2 试验结果分析

依据上述氢钟频率驾驭流程, 编制了相应的软件, 软件每小时自动运行一次, 计算出频率补偿值, 将计算得到的频率补偿值加载到相位微调器上, 实现对主钟(氢钟)的频率驾驭, 从而实现自动监控UTC(NTSC)^[15-16].

根据BIPM发布的Circular T公报, 我们绘制了UTC(NTSC)相对于UTC的钟差曲线图, 如图6. 可以看出, 在MJD=57126之前, 即主钟为铯钟时, UTC-UTC(NTSC)的相位偏差基本保持在 ± 8 ns之内, RMS为3.87 ns. 而在MJD=57126之后, 即主钟由铯钟更换成氢钟并采用新的频率驾驭算法后, UTC-UTC(NTSC)的相位偏差基本保持在 ± 5 ns之内, RMS为2.16 ns.

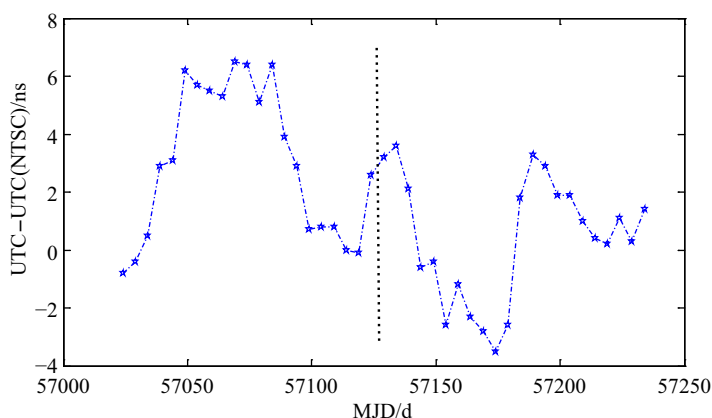


图6 UTC(NTSC)相对于UTC的相位偏差

Fig. 6 The time difference between UTC(NTSC) and UTC

而从表2可以看出, UTC(NTSC)相对于UTC的Allan偏差, 达到了预期主钟频率控制的目标. 铯钟为主钟以及氢钟为主钟时, UTC(NTSC)相比于UTC的稳定度基本相当, 铯钟为主钟时略微好一些, 主要原因是铯钟的长期稳定度比氢钟好. 从表2中只能给出5 d以上的稳定度, 5 d以下的稳定度无法分析, 因此选用UTC(USNO)为参考, 来评定UTC(NTSC)的短期稳定度.

为了分析UTC(NTSC)的短期稳定度情况, 我们选用GNSS PPP时间传递方法获取UTC(NTSC)相较于UTC(USNO)的比对数据, 其中GNSS PPP是目前国际时间比对采用最为广泛的方法之一^[17-18].

表 2 更换主钟类型前后UTC(NTSC)相对于UTC的Allan偏差的比较结果
Table 2 The Allan deviation of UTC(NTSC)–UTC before and after changing master clock type

Time interval/day	Before (cesium as master clock)	After (hydrogen maser as master clock)
5	3.21×10^{-15}	3.19×10^{-15}
10	1.79×10^{-15}	2.57×10^{-15}
15	1.705×10^{-15}	2.51×10^{-15}
20	1.72×10^{-15}	2.31×10^{-15}

选取BIPM公布的德国技术物理研究院(PTB)和美国海军天文台(USNO)的PPP时间比对数据(UTC(PTB)–UTC(USNO)), 以及PTB和NTSC的PPP时间比对数据(UTC(PTB)–UTC(NTSC)), 利用如下(3)式获取UTC(NTSC)相较于UTC(USNO)的比对数据. 时间跨度为2015年1月1日(MJD= 57023)到2015年7月30日(MJD=57233).

$$\text{UTC(NTSC)} - \text{UTC(USNO)} = [\text{UTC(PTB)} - \text{UTC(USNO)}] - [\text{UTC(PTB)} - \text{UTC(NTSC)}]. \quad (3)$$

从图7可以看出, 在MJD=57126之后, 即主钟由铯钟更换成氢钟后, UTC(NTSC)–UTC(USNO)的短期波动明显变小, 这也解释了越来越多的时间实验室会选择氢钟作为主钟频率源的原因.

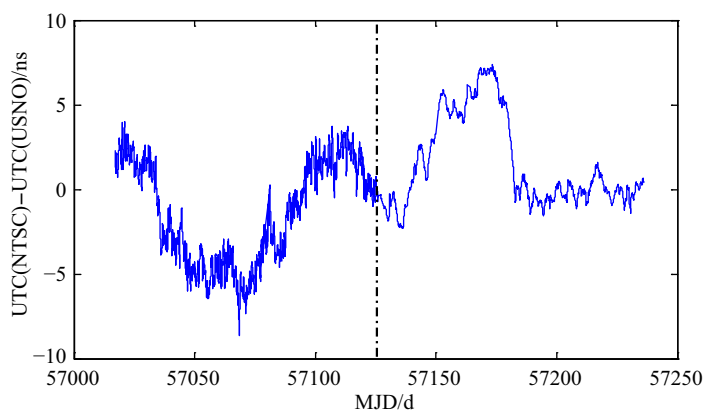


图 7 UTC(NTSC)–UTC(USNO)的比对数据

Fig. 7 The time difference of UTC(NTSC)–UTC(USNO)

从稳定度结果分析, 如图8和表3所示, 当主钟由铯钟更换成氢钟时, 提高了UTC(NTSC)的短期稳定度(<7 d). 但长期稳定度(>7 d)不够理想, 这是由于主钟频率驾驭的周期设置所造成的.

5 结论

当主钟频率源为氢钟时的输出信号UTC(k)明显比铯钟具有优良的短期稳定度, 同时当氢钟参与到原子时计算中, 可以提高参考时间尺度的稳定性. 通过搭建试验系统, 并

编制相应软件, 进行了主钟频率驾驭试验. 经过试验测试表明, 氢钟为主钟频率源的频率驾驭算法可以实现 $UTC(k)$ 相对于 UTC 的相位偏差保持在 $\pm 10\text{ ns}$ 之内, 且能够大大提高 $UTC(k)$ 的短期稳定度.

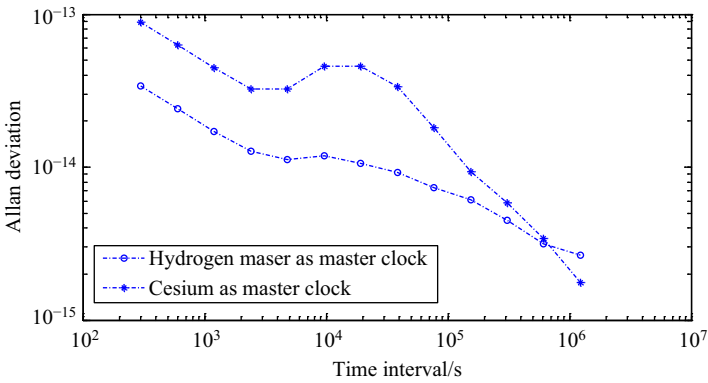


图 8 更换主钟类型前后 $UTC(NTSC)$ 相对于 $UTC(USNO)$ 的稳定度结果比较

Fig. 8 The stabilities of $UTC(NTSC)$ relative to $UTC(USNO)$ before and after changing master clock type

表 3 更换主钟类型前后稳定度结果比较

Table 3 The frequency stability comparison before and after changing master clock type

Time interval/hour	Before (cesium as master clock)	After (hydrogen maser as master clock)
300	8.88×10^{-14}	3.40×10^{-14}
600	6.3×10^{-14}	2.41×10^{-14}
1200	4.47×10^{-14}	1.71×10^{-14}
2400	3.26×10^{-14}	1.27×10^{-14}
9600	4.59×10^{-14}	1.18×10^{-14}
19200	4.59×10^{-14}	1.05×10^{-14}
38400	3.37×10^{-14}	9.19×10^{-15}
76800	1.81×10^{-14}	7.31×10^{-15}
153600	9.34×10^{-15}	6.10×10^{-15}
307200	5.83×10^{-15}	4.50×10^{-15}
614400	3.42×10^{-15}	3.17×10^{-15}
1228800	1.75×10^{-15}	2.67×10^{-15}

参考文献

[1] Arias E F, Jiang Z, Lewandowski W, et al. BIPM Annual Report on Time Activities for 2014. France: BIPM Publication, 2015

- [2] Panfilo G, Harmegnies A. IEEE International Frequency Control Symposium & European Frequency and Time Forum, 2013: 652
- [3] Arias E F, Jiang Z, Lewandowski W, et al. BIPM Annual Report on Time Activities for 2013. France: BIPM Publication, 2014
- [4] Arias E F, Jiang Z, Lewandowski W, et al. BIPM Annual Report on Time Activities for 2012. France: BIPM Publication, 2013
- [5] 王正明, 袁海波. 天文学报, 2007, 48: 71
- [6] Wang Z M, Yuan H B. ChA&A, 2007, 31: 308
- [7] 黄坤仪, 周雄. 天文学报, 1981, 22: 120
- [8] 屈俐俐. 时间频率学报, 2012, 35: 82
- [9] Panfilo G, Harmegnies A, Tisserand L. Metrologia, 2014, 51: 285
- [10] Demetrios M, Mihran M, Paul A. Proceedings of the IAIN World Congress and the 56th Annual Meeting of the Institute of Navigation, 2000: 791
- [11] Breakiron L A, Demetrios M. Proceedings of the 31st Annual Precise Time and Time Interval Meeting, 1999: 277
- [12] Riley W J. Handbook of Frequency Stability Analysis. Washington: U. S. Government printing office, 2008
- [13] Laurent-Guy B. Proceedings of the 19th European Frequency and Time Forum, 2005: 438
- [14] Bernier L G. Proceedings of the 35th Annual Precise Time and Time Interval Meeting, 2003: 221
- [15] 赵书红, 王正明, 尹东山. 天文学报, 2014, 55: 313
- [16] Zhao S H, Wang Z M, Yin D S. ChA&A, 2015: 118
- [17] 宋会杰, 董绍武, 王正明, 等. 天文学报, 2015, 56: 628
- [18] Song H J, Dong S W, Wang Z M, et al. ChA&A, 2016, in press

Research on the Steering Strategy for Hydrogen Maser

YIN Dong-shan^{1,2,3} ZHAO Shu-hong^{1,2} GAO Yu-ping^{1,2}

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

ABSTRACT In the master clock system, the local standard time UTC(k) with a better short-term stability will be generated, if the hydrogen maser is set as a frequency source of the master clock. But the hydrogen maser always exhibits an apparent frequency drift, thus its long-term stability gets poor with time, therefore the stability and accuracy of UTC(k) become worse. To solve this problem, we compare the performance of hydrogen maser with cesium clocks, and modify the time scale algorithm when the hydrogen maser is involved, we also propose a new steering strategy when hydrogen maser is used as the frequency source of master clock. We set up an experiment system and write programs, and finally the new steering strategy is testified with the laboratory data. Results show that when the hydrogen maser is involved in the atomic time scale calculation, the short-term frequency stability of reference time scale will be improved. Meanwhile, the local time UTC(k) has a better short-term frequency stability when the frequency source of the master clock uses hydrogen maser instead of cesium clock.

Key words astrometry, time, hydrogen maser, time keeping, methods: data analysis