

建立 GNSS 时间基准的构想和思考

伍贻威^{1,2}, 朱祥维¹, 龚航¹, 孙广富¹, 欧钢¹

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 北京卫星导航中心, 北京 100005)

摘要: 本文论述了作者对建立全球导航卫星系统(GNSS, Global Navigation Satellite System)的系统时间 GNSST, 守时实验室的时间基准 TA(k) 和 UTC(k) (k 为实验室代号) 的整体构想和一些思考, 并论述了时间尺度算法, 驾驭算法, 钟差预测算法是如何在其中发挥作用的. 以北斗系统为例, 提出了使用两级驾驭算法建立北斗系统时间 BDT(Beidou System Time) 的方法. 以国家授时中心(NTSC, National Time Service Center) 为例, 详细描述了建立 TA(NTSC) 和 UTC(NTSC) 的整体构想, 方法, 原理和理论依据. 分析了 TA(NTSC) 对 UTC(NTSC) 的性能影响; 以及假如用 UTC(NTSC) 驾驭产生 BDT 时, UTC(NTSC) 对 BDT 时间同步精度和频率稳定度性能的影响; 最后给出了同时使用 UTC(NTSC) 和 UTC(BSNC) 来驾驭产生 BDT 的设想, 从理论上分析了采用该方案对 BDT 性能提升的影响.

关键词: GNSS; 守时实验室; 时间基准; TA(k); UTC(k); 时间同步精度, 频率稳定度

中图分类号: TP228 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)08-1818-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.08.003

Concepts and Thoughts of Forming a GNSS Time Scale

WU Yi-wei^{1,2}, ZHU Xiang-wei¹, GONG Hang¹, SUN Guang-fu¹, OU Gang¹

(1. School of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;
2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100005, China)

Abstract: The paper describes our thoughts of forming the system time of a Global Navigation Satellite System (GNSS), which is denoted by GNSST, and the time references TA(k) and UTC(k) of a timing laboratory where k characterizes the specific national laboratory. We also describe the roles of time scale algorithms, clock steering algorithms, and clock prediction algorithms in forming these time scales. We take Chinese Beidou satellite navigation system time (denoted BDT) as an example, and propose a twice steering algorithm to form BDT. We take the national time service center (NTSC) of China as an example to describe the idea, method, principle and theory of forming a TA(k) and a UTC(k). Then we analyze the impact of TA(NTSC) on UTC(NTSC), and the impact of UTC(NTSC) on the time synchronization precision and frequency stability performances of BDT if we steered BDT to UTC(NTSC). We also propose an idea of steering BDT to a paper time scale formed from UTC(NTSC) and UTC(BSNC). The performance is theoretically analyzed.

Key words: GNSS; timing laboratory; time reference; TA(k); UTC(k); time synchronization precision; frequency stability

1 引言

建立和维持时间基准在守时实验室和全球导航卫星系统(GNSS)中发挥着重要作用^[1,2]. GNSS 是通过测量时间差进行定位和授时的. 为了保证导航定位的解算, 必须保证系统内的时间同步, 所以需要建立一个系统时间, 记为 GNSST. 同时, 为了保证 GNSST 与国际协调世界时(UTC)的整秒内的偏差不至于过大, 授时、以

及不同 GNSS 互操作的需要, GNSST 又需要和 UTC 保持整秒同步. 以北斗为例, 北斗系统时间 BDT 是整个系统的时间基准^[3,4]; 所有地面站和卫星的时间都必须和 BDT 同步; 而 BDT 又需要和 UTC 保持整秒同步.

建立 GNSST 和建立守时实验室时间基准的原理基本类似, 但也略有不同, 其中核心算法都是时间尺度算法、钟差预测算法和驾驭算法. 本文中首先详细论述这些算法; 然后, 将完整展示建立 GNSST、以及守时实验

室 TA(k) 和 UTC(k) 的完整理论框架、算法原理、性能指标,以及作者的整体构想和一些思考.本文中,“建立一个时间尺度”,“产生一个时间尺度”和“生成一个时间尺度”等表述是同一个意思,本文中不加以区分.

2 算法

2.1 时间尺度算法

时间尺度算法的目的是为了综合钟组中所有的原子钟,生成一个可靠性、频率稳定度更高的自由的纸面时间^[5,6].单台钟和纸面时间都可以视为是一个时间尺度;没有被驾驭的时间尺度称为自由的时间尺度.所以说,使用时间尺度算法是为了“生成”一个新的时间尺度,而不是“估计”或“预测”一个原有的时间尺度.生成的时间尺度一般通过它与某一台钟之间的时差来表示.算法通常不考虑该时间尺度的频率准确度;这个任务留给驾驭算法来完成^[5,6].

时间尺度算法分为两大类:(1)一类是加权平均算法,包括:国际权度局(BIPM)采用的 ALGOS 算法^[7-9]、美国国家标准与技术研究院(NIST)采用的 AT1 算法^[9,10];(2)一类是 Kalman 滤波器算法,包括:NIST 在 1980 年代使用的标准 Jones-Tyron 型 Kalman 滤波器算法^[11],和在此基础上改进得到的一系列 Kalman 滤波器算法^[12-17].研究表明:NIST 的 Kalman 滤波器算法实际上也是加权平均算法,文献[14]给出了由 Kalman 增益来表示的权重^[14].作者在文献[19]中提出了单状态变量 Kalman 滤波器时间尺度算法,清晰地展示该 Kalman 滤波器算法和加权平均算法等价.任何由加权平均算法建立的时间尺度都可以化简,最终由时间尺度基本方程来表达.

时间尺度基本方程 BSTE(Basic Time Scale Equation)^[9,13]表示为:

$$TA(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i (h_i(t) + h_i'(t)) \quad (1)$$

其中,TA(t)是生成的纸面时间; $h_i(t)$ 代表第*i*台原子钟的钟面读数, $h_i'(t)$ 代表第*i*台原子钟的钟面读数的预测值; ω_i 为第*i*台原子钟的权重,*N*为钟组中原子钟的数量.

式(1)中, $h_i'(t)$ 中确定性趋势项(时差、频差和频漂)和 $h_i(t)$ 中确定性趋势项的符号相反,其物理含义是:TA的钟面读数是对去除确定性趋势项后只含有噪声分量的钟面读数的加权平均值.

分析式(1),对于加权平均时间尺度算法,需要:(1)通过设置合理的权重来提高时间尺度的频率稳定度^[13];为了提高时间尺度的可靠性,避免某一台钟的权重过大,通常会给每台钟设置一个权重的上限;(2)通过设计钟差预测算法来获取预测值,以此来抑制时间

尺度在两个相邻的时间段内由于权重改变,或是有原子钟加入或剔除出钟组时引起的时差和频差的跳变,保证时间尺度在时间和频率上的连续性^[13].

文献[18]以[TAI-TA(NTSC)]为例展示了时间尺度算法的效果.TA(NTSC)是NTSC使用时间尺度算法,对多台已经去除频漂的氢钟和多台铯钟经过加权平均后生成的自由的纸面时间.关于TA(NTSC)的详细说明可以参见文献[20].

2.2 钟差预测算法

(1) 原子钟噪声对时间同步精度的影响

原子钟随机微分方程 SDEs(Stochastic Differential Equations)^[5,21-23]的闭合解表示为:

$$\begin{cases} X_1(t) = x_0 + y_0 \cdot t + 1/2 \cdot d \cdot t^2 + \sigma_1 \\ \quad \cdot W_1(t) + \sigma_2 \cdot \int_0^t W_2(s) ds \\ X_2(t) = y_0 + d \cdot t + \sigma_2 \cdot W_2(t) \end{cases} \quad (2)$$

各参数的严格定义如下: X_1 、 X_2 分别为两个状态变量.其中 X_1 代表时时差, X_2 代表瞬时频差的随机游走部分,即不含频率白噪声(WFM)的频差. x_0 和 y_0 分别代表时差和频差的初值; d 代表频漂. $W_1(t)$ 和 $W_2(t)$ 分别代表两个独立的维纳过程,并且有 $W(t) \sim N(0, t)$,即每个维纳过程服从均值为0,方差为时间*t*的正态分布; σ_1 和 σ_2 分别是这两个维纳过程的扩散系数(diffusion coefficient),用于表明噪声的强度.

式(2)的第一个方程中,最后第二项代表频率白噪声(WFM),最后一项代表频率随机游走噪声(RWFM),即:维纳过程 $W_1(t)$,以及 $W_2(t)$ 对时间*t*的积分在状态变量 X_1 上分别表现为WFM和RWFM.大量实验表明:典型的氢钟和铯钟的噪声主要是WFM和RWFM.所以实际应用中,氢钟和铯钟都可以用式(2)来描述.

文献[22]还详细推导了扩散系数与Allan方差的关系,结论如下:

$$\sigma_y^2(\tau) = \sigma_1^2/\tau + 1/3 \cdot \sigma_2^2 \cdot \tau \quad (3)$$

其中, $\sigma_y^2(\tau)$ 代表平滑时间为 τ 时的Allan方差.

式(2)中,原子钟噪声的方差表示为^[5,21]:

$$\text{var}(\sigma_1 \cdot W_1(t) + \sigma_2 \cdot \int_0^t W_2(s) ds) = \sigma_1^2 \cdot t + \sigma_2^2 \cdot \frac{t^3}{3} \quad (4)$$

式(4)表明:WFM的方差是时间*t*的一次函数;RWFM的方差是时间*t*的三次函数;因此它们都是色噪声而不是白噪声,其方差都随着时间的增大而增大.

进一步,对比式(4)和(3)得到^[5]:

$$\text{var}(\sigma_1 \cdot W_1(t) + \sigma_2 \cdot \int_0^t W_2(s) ds) = \sigma_y^2(t) \cdot t^2 \quad (5)$$

式(5)表明:原子钟噪声方差可以由Allan方差和时间来表示.

为了更清晰地说明这一点,采用文献[24]的方法

生成参数相同的 100 台铯钟(确定性分量 $x_0 = y_0 = d = 0$). 每台仿真铯钟的平方扩散系数为 $(\sigma_1^2, \sigma_2^2) = (4.8 \times 10^{-23} \text{ s}, 1.9 \times 10^{-36} \text{ s}^{-1})$. 这些扩散系数符合 NTSC 铯钟 2142 的参数^[25].

图 1 描述了这 100 台铯钟的时差, 以及由式(4)的 1 倍和 2 倍平方根计算得到的 1σ 和 2σ 噪声标准差(图中黑色加粗曲线). 图 1 表明: 即使在确定性分量 $x_0 = y_0 = d = 0$ 的情况下, 随着时间 t 的变大, 受噪声影响, 100 台铯钟的时差都逐渐偏离了零. 如果以噪声标准差来定义时间同步精度, 那么随着时间的变大, 时间同步精度也变差. 这说明: 即使不考虑对原子钟时差、频差和频漂的估计误差, 仅仅是由于原子钟噪声, 随着时间的变长, 时间同步精度也会越来越差. 由式(5), 频率稳定度的提升, 直接对应着时间同步精度的提升.

(2) 钟差预测基本原理

钟差预测算法通过过去时间段 $[t_0 - T, t_0]$ 的观测钟差, 估计出确定性部分参数(时差, 频差等), 对未来时间段 $[t_0, t_0 + t_p]$ 的钟差进行预测. 其中, t_p 为预测时间.

以线性模型为例, 在估计得到了预测起点时刻 t_0 的瞬时时差 \hat{x}_0 和瞬时频差 \hat{y}_0 后, 在 t_p 时刻的钟差预测值为:

$$\hat{X}_1(t_p) = \hat{x}_0 + \hat{y}_0 \cdot t_p \quad (6)$$

显然, \hat{x}_0 和 \hat{y}_0 都是随机变量, 所以预测值 \hat{X}_1 是 t_p 的随机过程. 由式(2)的第一个方程, 真实值也是一个随机过程. 于是, 由[预测值-真实值]定义的预测误差, 也是一个随机过程. 因此, 对于每一个 t_p 的预测值, 都对应着一个理论上的预测不确定度. 1σ 预测不确定度和 2σ 预测不确定度从统计意义代表了预测误差的 68% 和 95% 的置信区间.

预测不确定度包含了确定性部分和随机性部分两部分. 平方预测不确定度^[21]表示为:

$$u^2(t_p) = u_{Dete}^2(t_p) + u_{Stoc}^2(t_p) \quad (7)$$

其中 u 代表预测不确定度, 下标 *Dete* 和 *Stoc* 分别代表其确定性部分和随机性部分.

确定性部分预测不确定度是由过去时间段 $[t_0 - T, t_0]$ 的参数估计的不确定度在未来时间段 $[t_0, t_0 + t_p]$ 进行传播而引起. 按照不确定度传播公式^[26], 它的平方表示为:

$$u_{Dete}^2(t_p) = u_{\hat{x}_0}^2 + u_{\hat{y}_0}^2 \cdot t_p^2 + 2u_{(\hat{x}_0, \hat{y}_0)} \cdot t_p \quad (8)$$

其中, $u_{\hat{x}_0}$ 为时差的估计不确定度, $u_{\hat{y}_0}$ 为频差的估计不确定度, $u_{(\hat{x}_0, \hat{y}_0)}$ 为时差与频差的互相关估计不确定度.

随机性部分预测不确定度是原子钟在未来时间段 $[t_0, t_0 + t_p]$ 的噪声引起, 代表以 t_0 为起始时刻, 在 $t_0 + t_p$ 时刻的噪声标准差. 由式(4), 它的平方表示为^[18, 21, 25]:

$$\begin{aligned} u_{Stoc}^2(t_p) &= \text{var}(\sigma_1 \cdot W_1(t_p) + \sigma_2 \cdot \int_0^t W_2(s) ds) \\ &= \sigma_1^2 \cdot t_p + \sigma_2^2 \cdot \frac{t_p^3}{3} \end{aligned} \quad (9)$$

将式(8)和(9)代入式(7), 得到平方预测不确定度, 表示为:

$$\begin{aligned} u^2(t_p) &= u_{Dete}^2(t_p) + u_{Stoc}^2(t_p) \\ &= u_{\hat{x}_0}^2 + u_{\hat{y}_0}^2 \cdot t_p^2 + 2 \cdot u_{(\hat{x}_0, \hat{y}_0)} \cdot t_p + \sigma_1^2 \cdot t_p + \sigma_2^2 \cdot \frac{t_p^3}{3} \end{aligned} \quad (10)$$

预测不确定度是式(10)的平方根.

评价一个钟差预测算法, 主要是评价预测不确定度. 预测不确定度越小, 说明预测性能越好. 分析式(10), 可以得出以下结论:

(a) 确定性部分和随机性部分预测不确定度都随着预测时间 t_p 的增大而增大.

(b) 预测不确定度总是大于随机性部分预测不确定度, 因为确定性部分预测不确定度不可能为零(显然参数估计的误差不可能为零). 所以随机性部分预测不确定度决定了预测不确定度的理论下限.

(c) 钟差预测算法需要通过降低对原子钟确定性分量的估计误差, 来降低确定性部分预测不确定度, 以此来降低总的预测不确定度. 不同钟差预测算法的性能差异也主要在于确定性部分预测不确定度的差异.

(3) 预测不确定度的解析表达式

作者在文献[18]中推导了在线性模型中, 平方预测不确定度的解析表达式为:

$$\begin{aligned} u_{lin}^2(t_p) &= \sigma^2 + \left(\frac{\sigma_1^2}{T} + \sigma_2^2 \cdot \frac{T}{3} + \frac{2 \cdot \sigma^2}{T^2} \right) \cdot t_p^2 \\ &\quad + \frac{2\sigma^2}{T} \cdot t_p + \sigma_1^2 \cdot t_p + \sigma_2^2 \cdot \frac{t_p^3}{3} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 σ^2 为测量噪声方差, T 为估计频差时的观测间隔. 预测不确定度是式(11)的平方根.

作者在文献[25]中推导了在二次多项式模型中, 平方预测不确定度的解析表达式为:

$$\begin{aligned} u_{quad}^2(t_p) &= \sigma^2 + \left(\frac{\sigma_1^2}{T_1} + \sigma_2^2 \cdot \frac{T_1}{3} + \frac{2 \cdot \sigma^2}{T_1^2} \right) \cdot t_p^2 \\ &\quad + \frac{1}{4} \left(\frac{2 \cdot \sigma_1^2}{T_2^3} + \frac{2 \cdot \sigma_2^2}{3T_2} + \frac{6 \cdot \sigma^2}{T_2^4} \right) \\ &\quad \cdot (T_1 \cdot t_p + t_p^2)^2 \\ &\quad + \frac{2\sigma^2}{T_1} \cdot t_p + \frac{\sigma^2}{T_2^2} \cdot (T_1 \cdot t_p + t_p^2) \\ &\quad + \frac{1}{T_2} \left(\frac{\sigma_1^2}{T_1} + \sigma_2^2 \cdot \frac{T_1}{3} + \frac{\sigma^2}{T_1 T_2} \right) \cdot (T_1 \cdot t_p^2 + t_p^3) \\ &\quad + \sigma_1^2 \cdot t_p + \sigma_2^2 \cdot \frac{t_p^3}{3} \end{aligned} \quad (12)$$

其中 T_1 和 T_2 分别为估计频差和频漂时的观察间隔. 预测不确定度是式(12)的平方根.

对比式(11)和(12)可以看出:对于同一台没有明显频漂的原子钟,采用线性模型时,预测不确定度比采用二次多项式模型时小,主要原因是:采用二次多项式模型时,估计频漂时会引入很大的估计不确定度. 所以对于频漂不明显的铯钟,推荐采用线性模型. 进一步,文献[25]的实验结论表明:不论线性模型还是二次多项式模型,在预测时间较短时,随机性部分预测不确定度起主导作用.

总结本节,得出以下结论:

(I)即使不考虑参数估计的不确定度,仅仅是由于原子钟噪声,时间同步精度也会随着预测时间变长而变差. 如果再叠加上确定性部分预测不确定度,预测不确定度会变得更大.

(II)采用同一模型时,原子钟噪声越小,预测不确定度也越小. 因此,使用多台原子钟组成钟组时,钟组的噪声小于单台原子钟的噪声,预测不确定度也相应地变小.

(III)守时实验室如果综合多台原子钟组成钟组,使用时间尺度算法生成 $TA(k)$,那么, $[UTC-TA(k)]$ 的预测不确定度也会小于预测单台钟时的预测不确定度.

2.3 驾驭算法

驾驭算法包括两大类:开环驾驭算法^[21,27,28]和基于控制论的闭环驾驭算法^[29-35].

开环驾驭算法的核心是设计一个钟差预测算法^[21,27,28].

闭环驾驭属于自动控制方法,是通过反馈控制的方式来实现的,需要实时的观测值^[35]. 此时必须保证参考时间是实时的,而不能像 UTC 那样是滞后的.

闭环驾驭算法和开环驾驭算法都需要计算出调整量. 闭环驾驭算法的优势在于:可以通过设计传递函数,同时考虑时间同步精度和频率稳定度^[35]的指标.

闭环驾驭算法包括多种,例如:(1)美国海军天文台(USNO)采用线性高斯二次型 LGQ(Linear Gaussian Quadratic)算法^[29],用 UTC(USNO)来驾驭自由的“GPST”(使用 Kalman 滤波器算法,综合系统内多台原子钟而得到),得到受驾驭的纸面时间,即 GPST;(2)GPS 采用开关(Bang-Bang)控制^[30]算法,用 GPST 驾驭 GPS 主控站的主钟,得到 GPST 的物理实现. 在这两个例子中,参考时间 UTC(USNO)和 GPST,前者是物理时间,后者是纸面时间,但是都是实时的;(3)作者在文献[34]和[35]中提出的二阶 2 类 DPLL 和三阶 3 类 DPLL 方法. 目前 DPLL 方法用于锁相振荡器和授时接收机的较多^[36,37],而用于时间尺度闭环驾驭的

很少. 这里的“2 类”和“3 类”是指环路中有 2 个和 3 个积分器.

一个二阶 2 类的 DPLL 在 Z 域中的开环系统传递函数表示为:

$$G(z) = \frac{K_1 \cdot z^{-1}(1-z^{-1}) + K_2 \cdot T \cdot z^{-2}}{(1-z^{-1})^2} \quad (13)$$

闭环系统传递函数表示为:

$$H(z) = \frac{G(z)}{1+G(z)} \\ = \frac{K_1 \cdot z^{-1} \cdot (1-z^{-1}) + K_2 \cdot T \cdot z^{-2}}{(1-z^{-1})^2 + K_1 \cdot z^{-1} \cdot (1-z^{-1}) + K_2 \cdot T \cdot z^{-2}} \quad (14)$$

其中, K_1 和 K_2 都是 DPLL 的系数.

以用铯钟驾驭氢钟为例,由开环系统传递函数,在时域中驾驭后氢钟和氢钟的时差表示为:

$$Hm_steered(i) \\ = Hm(i) + \sum_{j=1}^i (K_1 \cdot Err(j)) \\ + \sum_{k=1}^{j-1} K_2 \cdot T \cdot Err(k)$$

其中, $Hm_steered$ 和 Hm 分别代表驾驭后氢钟和氢钟的时差,式(15)同时也表明了每次对氢钟的时差和频差的调整量.

按照控制论^[39,40],此时的 DPLL 相当于一个比例-积分(PI)控制器,其增益 K_1 和 K_2 决定了 DPLL 的性能;在已知氢钟和铯钟噪声参数时,通过 DPLL 的传递函数,可以从理论上计算驾驭后氢钟和铯钟之间的时间同步精度,以及驾驭后氢钟的频率稳定度.

图 2^[34]描述了采用二阶 2 类 DPLL 方法时,氢钟、铯钟和驾驭后氢钟的时差和 Allan 偏差. 可以看出:驾驭后氢钟和铯钟保持了时间同步(时间同步精度小于 10ns),并且综合了氢钟的中期频率稳定度和铯钟的长期频率稳定度.

3 建立 GNSS 系统时间

3.1 建立 GNSST

使用时间尺度算法,综合系统内多台原子钟,生成自由的“GNSST”.

用 UTC(k)驾驭自由的“GNSST”和用铯钟驾驭氢钟的原理类似. 由于 UTC(k)是 UTC 的本地实现,所以和 UTC 一样,具有较高的长期频率稳定度和频率准确度;自由的“GNSST”综合了系统内的多台原子钟,具有较高的中长期频率稳定度. 这时,UTC(k)可以看成是图 1 中的铯钟,自由的“GNSST”可以看成图 1 中的氢钟,通过 DPLL 驾驭算法,得到受驾驭的纸面时间即为 GNSST.

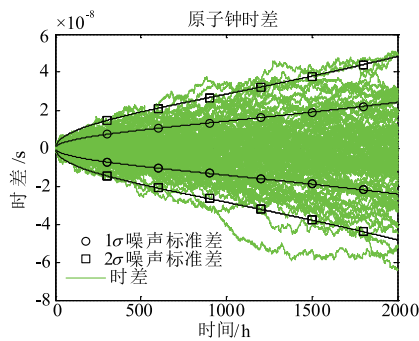
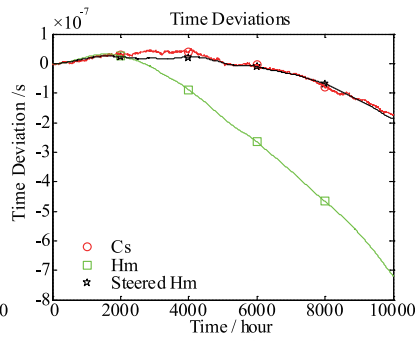
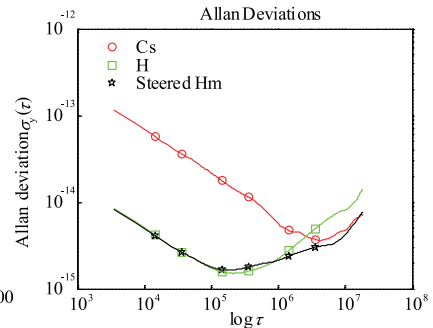


图1 100台仿真铯钟的时差、1σ和2σ理论噪声标准差



(a) 时差



(b) Allan偏差

图2 氢钟、铯钟、驾取后氢钟的时差和Allan偏差

此时 GNSST 和 UTC(k) 同步,并综合了自由的“GNSST”的中长期频率稳定性和 UTC(k) 的长期频率稳定性. 由于 UTC(k) 比单台铯钟的频率稳定性更高,自由的“GNSST”比单台氢钟的频率稳定性更高,按照控制论^[39,40], [UTC(k)-GNSST] 的时间同步精度将优于用驾取后氢钟相对于铯钟的时间同步精度.

3.2 使用两级驾取建立 GNSST 和 GNSST(MC)

在得到了 GNSST 之后,下一步需要得到 GNSST 的物理实现 GNSST(MC).

这里提出一种使用两个 DPLL 级联起来的两级驾取的构想. 第一级 DPLL 用于使用 UTC(k) 对自由的“GNSST”进行驾取,产生 GNSST;第二级 DPLL 用于使用 GNSST 驾取主控站主钟,产生 GNSST(MC). 最终使用两级驾取算法得到的 GNSST 和 GNSST(MC) 都将与 UTC(k) 保持时间同步;而 GNSST(MC) 将综合了主控站主钟(主动型氢钟)的中短期频率稳定性,自由的“GNSST”的中长期频率稳定性,和 UTC(k) 的长期频率稳定性. 作者在文献[41]中,仿真生成一台铯钟,一台氢钟,一个数控振荡器(NCO)验证了两级驾取算法的理论性能.

图3以北斗系统为例描述了两级驾取构想. 从图3中可以看出:这两个 DPLL 的传递函数中的参数值是不同的,需要根据实际情况来选取合理的参数值.

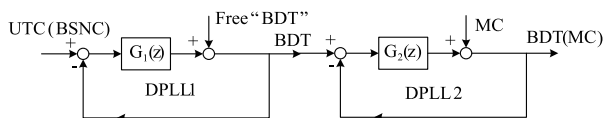


图3 两级驾取构想

最后需要指出的是,图3中的 DPLL 是数学上的 DPLL,而不是实际的物理上的 DPLL,它的作用是为了计算出每次的控制量. 作为数学上的 DPLL,只要获取了每次 UTC(BSNC)-BDT 和 BDT-BDT(MC) 之间的钟差,就可以通过传递函数自动计算出每次的控制量,通过反馈控制自动产生 BDT 和 BDT(MC). 其中,对于第一级 DPLL,计算出调整量后,只需要在数学上(纸面上)对 BDT 进行调整,因为 BDT 是一个纸面时间;而对

于第二级 DPLL,计算出调整量后,需要在物理上(一般是使用相位微跃计)调整主钟.

4 守时实验室 TA(k) 和 UTC(k) 的建立及其对 GNSST 的影响

如本文第3节所述,GNSST 是使用 UTC(k) 驾取自由的“GNSST”来生成的,所以 UTC(k) 的性能直接影响着 GNSST 的性能. 本节将详细描述建立守时实验室 TA(k) 和 UTC(k) 的原理,分析它们对于 GNSST 的影响.

4.1 建立 TA(k) 和 RTA(k)

TA(k) 是使用时间尺度算法建立的自由的纸面时间,可以用于监测物理钟的性能^[6].

由于 UTC 的发布是滞后的,所以需要来预测主钟或 TA(k) 相对于 UTC 的钟差,预测时间最长为 45 天. 按照文献[25], [UTC(NTSC)-Hm4946] (4926 是 NTSC 某一台氢钟的代号) 的平方扩散系数为 $(\sigma_1^2, \sigma_2^2) = (3.4 \times 10^{-23} \text{ s}, 1.3 \times 10^{-35} \text{ s}^{-1})$, [UTC(NTSC)-Cs2142] 的平方扩散系数为 $(\sigma_1^2, \sigma_2^2) = (4.8 \times 10^{-23} \text{ s}, 1.9 \times 10^{-36} \text{ s}^{-1})$. 首先仿真生成一台与 [UTC(NTSC)-Hm4946] 相同参数的氢钟作为主钟;另外仿真生成多台与 [UTC(NTSC)-Cs2142] 相同参数的铯钟组成钟组,使用时间尺度算法生成 TA(k). 设置观测噪声方差为 $\sigma^2 = 1 \times 10^{-20} \text{ s}^{-2}$. 然后使用二次多项式模型预测 [UTC-MC] 的钟差,使用线性模型预测 [UTC-TA(k)] 的钟差;分别通过式(11)和(12)计算得到它们的预测不确定度,如表1所示.

表1 预测不确定度(单位:ns)

	10d	30d	45d
1 台 H	7.45	20.1	31.5
1 台 Cs	7.08	14.5	19.8
4 台 Cs	3.54	7.24	9.88
10 台 Cs	2.24	4.58	6.25
16 台 Cs	1.77	3.62	4.94
32 台 Cs	1.26	2.56	3.50

分析表 1, [UTC-TA(k)] 的预测不确定度明显小于 [UTC-MC]. 当组成 TA(k) 的钟组中包含 16 台铯钟时, 其 45 天的预测不确定度小于 5ns. 然后, 对 TA(k) 进行调整, 得到与 UTC 同步的 RTA(k). 通过上述分析, 假如当第 t_0 天时 [UTC-TA(k)] (模 1s) 为零, 并且不对 RTA(k) 进行调整, 这时有 95% 以上的概率, 在第 $(t_0 + 45)$ 天的 [UTC-RTA(k)] (模 1s) 的绝对值小于 10ns (2σ), 因此是很容易把 [UTC-RTA(k)] (模 1s) 控制在 $\pm 20\text{ns}$ (4σ) 之内的. 然而, 当组成 TA(k) 的铯钟数量较少时, 这个目标就比较难以实现. 综上, [UTC-TA(k)] 的预测不确定度决定了 [UTC-RTA(k)] 的时间同步精度. 提高 [UTC-RTA(k)] 的时间同步精度最有效的办法是增加组成 TA(k) 的铯钟的数量.

4.2 建立 UTC(k)

建立了 TA(k) 和 RTA(k) 之后, 下一步的目标是建立 UTC(k).

采用开环驾驭方式时, 需要预测 [RTA(k)-MC], 然后根据预测值调整主钟, 生成 UTC(k). 把 [UTC-RTA(k)] 的时间同步精度记为 $\sigma_{\text{RTA}(k)}$; 把 [RTA(k)-UTC(k)] 时间同步精度记为 $\sigma_{\text{UTC}(k)}$; 把 [UTC-UTC(k)] 的时间同步精度记为 $\sigma_{(k)}$. 由上述分析, $\sigma_{(k)}$ 可以近似表示为:

$$\sigma_{(k)} = \sqrt{\sigma_{\text{UTC}(k)}^2 + \sigma_{\text{RTA}(k)}^2} \quad (16)$$

例如, 当 k 代表 NTSC 时, 式 (16) 表述为: $\sigma_{(\text{NTSC})} = \sqrt{\sigma_{\text{UTC}(\text{NTSC})}^2 + \sigma_{\text{RTA}(\text{NTSC})}^2}$.

事实上, [RTA(k)-MC] 的预测间隔可以选得非常短, 例如 1 小时预测一次, 然后对主钟调整一次. 此时, 由式 (11) 和 (12), 因为预测时间 t_p 很短, [RTA(k)-MC] 的 1 小时的预测不确定度将远小于 [UTC-TA(k)] 的预测不确定度. 此时, 可以认为 [UTC-UTC(k)] 的时间同步精度 $\sigma_{(k)}$ 几乎完全由 [UTC-RTA(k)] 的时间同步精度 $\sigma_{\text{RTA}(k)}$ 来决定.

采用闭环驾驭方式时, 需要设计合理的传递函数来同时优化时间同步精度和频率稳定度. 例如采用 DPLL 方法时, 可以将主钟“锁定”在 RTA(k) 上, “锁定”后的主钟即为 UTC(k), 其原理如图 4 所示. 此时 UTC(k) 将综合 RTA(k) 的长期频率稳定度和主钟的中短期频率稳定度, 并和 RTA(k) 同步; [RTA(k)-UTC(k)] 的时间同步精度 $\sigma_{\text{UTC}(k)}$ 可以从理论上计算得出^[35]. 通过上述分析, RTA(k) 的长期频率稳定度决定了 UTC(k) 的长期频率稳定度; 于是 TA(k) 的长期频率稳定度很大程度上决定了 UTC(k) 的长期频率稳定度.

综上, 推荐采用闭环驾驭的方式来生成 UTC(k), 通过选取合理的 DPLL 参数和带宽, 使 UTC(k) 能综合 RTA(k) 的长期频率稳定度和主钟的中短期频率稳定

度, 同时 [UTC-UTC(k)] 的时间同步精度 $\sigma_{(k)}$ 相比 [UTC-RTA(k)] 的时间同步精度 $\sigma_{\text{RTA}(k)}$ 没有明显恶化, 根据实际情况确保时间同步精度和频率稳定度有一个折中.

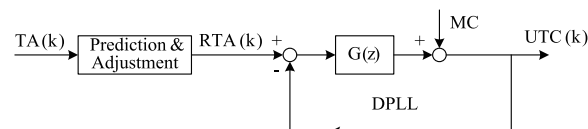


图4 UTC(k)建立原理

4.3 守时实验室 TA(k) 和 UTC(k) 对 GNSST 的影响

以假如用 UTC(NTSC) 驾驭产生 BDT 为例, 分析 TA(NTSC) 和 UTC(NTSC) 对 BDT 的影响. 实际上目前 BDT 是由 UTC(BSNC) 驾驭产生的, 和 UTC(NTSC) 没有关系. BSNC 是北京卫星导航中心的代号. 结合图 3 和图 4, 图 5 描述了建立 BDT 和 BDT(MC) 的构想.

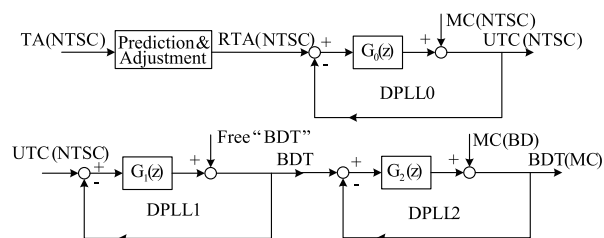


图5 BDT和BDT(MC)建立原理

首先分析频率稳定度性能. 由图 5, 结合第 4.1 和 4.2 节的分析, UTC(NTSC) 的长期频率稳定度由 RTA(NTSC) 决定, 中短期频率稳定度由 NTSC 主钟决定; BDT 的长期频率稳定度由 UTC(NTSC) 决定, 中短期频率稳定度由北斗自己维持的纸面时间——自由的“BDT”决定. 综上, 可以得出结论: RTA(NTSC) 的长期频率稳定度决定了 BDT 的长期频率稳定度, 于是 TA(NTSC) 的长期频率稳定度很大程度上决定了 BDT 的长期频率稳定度; 而如果要进一步提升 BDT 的中短期频率稳定度, 一方面依赖于设计合理的时间尺度算法, 来优化自由的“BDT”的中短期频率稳定度; 另一方面也依赖于 DPLL1 传递函数的设计.

然后分析时间同步精度性能. 把 [UTC(NTSC)-BDT] 的时间同步精度记为 $\sigma_{\text{BDT}(\text{NTSC})}$, 把 [UTC-BDT] 的时间同步精度记为 σ_{BDT} , 结合图 5 和式 (16) 可以近似得到:

$$\sigma_{\text{BDT}} = \sqrt{\sigma_{\text{BDT}(\text{NTSC})}^2 + \sigma_{(\text{NTSC})}^2} \quad (17)$$

由式 (17), [UTC-BDT] 的时间同步精度 σ_{BDT} 是由 [UTC-UTC(NTSC)] 的时间同步精度 $\sigma_{(\text{NTSC})}$ 和 [UTC(NTSC)-BDT] 的时间同步精度 $\sigma_{\text{BDT}(\text{NTSC})}$ 共同决定的, 且 σ_{BDT} 相比 $\sigma_{(\text{NTSC})}$ 有一定的恶化.

进一步地, 把式 (16) 代入式 (17), 可以近似得到:

$$\sigma_{\text{BDT}} = \sqrt{\sigma_{\text{BDT(NTSC)}}^2 + \sigma_{\text{UTC(NTSC)}}^2 + \sigma_{\text{RTA(NTSC)}}^2} \quad (18)$$

这说明:[UTC-BDT]的时间同步精度 σ_{BDT} 是由1)[UTC-RTA(NTSC)]的时间同步精度记为 $\sigma_{\text{RTA(NTSC)}}$ (由噪声特性和钟差预测算法性能决定)、2)把[RTA(NTSC)-UTC(NTSC)]时间同步精度记为 $\sigma_{\text{UTC(NTSC)}}$ (由噪声特性和DPLL0传递函数决定)、3)[UTC(NTSC)-BDT]的时间同步精度 $\sigma_{\text{BDT(NTSC)}}$ (由噪声特性和DPLL1传递函数决定)共同决定的.这三部分时间同步精度是相互独立计算得到的.

需要指出的是:式(17)和(18)中,没有考虑远程比对引入的链路噪声,而实际上链路噪声可以通过设计算法来部分滤除.

综上,这时同样可以通过选取一个合理的DPLL1的带宽,使 $\sigma_{\text{BDT(NTSC)}}$ 小于 σ_{NTSC} ,[UTC-BDT]的时间同步精度 σ_{BDT} 主要由[UTC-UTC(NTSC)]的时间同步精度 σ_{NTSC} 决定,同时又保证BDT的中短期频率稳定度相比自由的“BDT”没有明显恶化,根据实际情况确保BDT的时间同步精度和频率稳定度有一个折中.

5 同时使用 UTC(NTSC) 和 UTC(BSNC) 驾驭产生 BDT

本节提出了同时使用UTC(NTSC)和UTC(BSNC)驾驭自由的“BDT”来产生BDT的构想.这时不仅可以提高BDT的稳健性,还可以提高BDT的时间同步精度和频率稳定度.

由于可以实时获取[UTC(NTSC)-BDT]和[UTC(BSNC)-BDT]的钟差,于是也就可以实时获取BDT相对于UTC(NTSC)和UTC(BSNC)加权平均后的纸面时间的钟差.把该纸面时间记为UTC(NTSC,BSNC),由下式计算得到:

$$\text{UTC(NTSC,BSNC)} = \omega_1 \cdot \text{UTC(NTSC)} + \omega_2 \cdot \text{UTC(BSNC)} \quad (19)$$

其中 ω_1 和 ω_2 为权重,且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$.

这样,由式(19),[UTC-UTC(NTSC,BSNC)]的时间同步精度表示为:

$$\sigma_{\text{NTSC,BSNC}} = \sqrt{\omega_1^2 \cdot \sigma_{\text{NTSC}}^2 + \omega_2^2 \cdot \sigma_{\text{BSNC}}^2} \quad (20)$$

假如从优化频率稳定度的角度来取权,由式(19),可以保证UTC(NTSC,BSNC)的长期频率稳定度最优.如第4节所述,UTC(NTSC,BSNC)的长期频率稳定度决定了BDT的长期频率稳定度.所以,这时生成的BDT的长期稳定度将得到提高.

假如从优化时间同步精度的角度来取权,由式(20),同样可以保证[UTC-UTC(NTSC,BSNC)]的时间同步精度 $\sigma_{\text{NTSC,BSNC}}$ 最优.于是[UTC-BDT]的时间同步精度表示为:

$$\sigma_{\text{BDT}} = \sqrt{\sigma_{\text{BDT(NTSC,BSNC)}}^2 + \sigma_{\text{NTSC,BSNC}}^2} \quad (21)$$

按照控制论^[39,40],随着UTC(NTSC,BSNC)频率稳定度的提升,[UTC(NTSC,BSNC)-BDT]的时间同步精度 $\sigma_{\text{BDT(NTSC,BSNC)}}$ 的值也变小了.这样式(21)等号右边根号内的两项的值都变小了,最终 σ_{BDT} 也会变小,即[UTC-BDT]的时间同步精度也会提高.

综上,权重选取时需要同时考虑BDT的时间同步精度和频率稳定度的指标,使BDT的时间同步精度和频率稳定度提升的水平有个折中.

6 结束语

本文论述了作者对建立GNSST,守时实验室TA(k)和UTC(k)的一些思考;以北斗和NTSC为例,给出了建立BDT,TA(NTSC),RTA(NTSC)和UTC(NTSC)的总体构想,关键技术,方法步骤和对应的理论基础,详细分析了BDT的时间同步精度和频率稳定度是受哪些因素影响的.虽然本文完整地描绘了建立守时实验室和GNSS时间基准的整体构想和关键技术,作者也对部分关键技术做了深入研究,但是这些工作只是万里长征的第一步.根据本文的分析,后续还有大量的理论分析和实验需要开展.作者期望能和国内外同行共同努力,为北斗系统的建设做出更大贡献!希望本文的研究成果对于北斗的建设有推动作用.

参考文献

- [1] Pratap Misra, Per Enge. Global Positioning System: Signals, Measurement, and Performance (Second Edition) [M]. Lincoln (USA): Ganga Jamuna Press. 2006. 1-20.
- [2] 吴海涛,李孝辉,卢晓春,华宇,杨旭海. 卫星导航系统时间基础[M]. 北京:科学出版社,2011. 1-5.
- [3] Dong Shaowu, Wu Haitao, Li Xiaohui, Guo Shuren, Yang Qiangwen. The compass and its time reference system [J]. Metrologia, 2008, 45(6): 47-50.
- [4] Han Chunhao, Yang Yuanxi, Cai Zhiwu. Dou Bei Navigation satellite system and its time scales [J]. Metrologia, 2011, 48(4): 213-218.
- [5] Patrizia Tavella. Statistical and mathematical tools for atomic clocks [J]. Metrologia, 2008, 45(6): 183-192.
- [6] Peter B Whibberley, John A Davis, Setnam L Shemar. Local representations of UTC in national laboratories [J]. Metrologia, 2011, 48(4): 154-164.
- [7] G Panfilo, F Arias. Studies and possible improvements on the EAL algorithm [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Contr, 2010, 57(1): 154-160.
- [8] Gianna Panfilo, Aurelie Harmegnies, Laurent Tisserand. A new prediction algorithm for the generation of International Atomic Time [J]. Metrologia, 2012, 49(1): 49-56.

- [9] P Tavella, C Thomas. Comparative study of time scale algorithms [J]. *Metrologia*, 1991, 28(2): 57–63.
- [10] Thomas E. Parker, Judah Levine. Impact of new high stability frequency standards on the performance of the NIST AT1 time scale [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1997, 44(6): 1239–1244.
- [11] Richard H Jones, Peter V Tryon. Estimating time from atomic clocks [J]. *Journal of Research of the National Bureau of the Standards*, 1983, 88(1): 17–24.
- [12] K R Brown. The theory of the GPS composite clock [A]. *Proc Albuquerque (USA): ION-GPS [C]*. 1991. 223–241.
- [13] Lorenzo Galleani, Patrizia Tavella. Time and the Kalman filter [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2010, 30(2): 44–65.
- [14] Charles A Greenhall. Forming stable timescales from the Jones-Tryon Kalman filter [J]. *Metrologia*, 2003, 40(3): 335–341.
- [15] Charles A Greenhall. A Kalman filter clock ensemble algorithm that admits measurement noise [J]. *Metrologia*, 2006, 43(4): 311–321.
- [16] Matthias Suess, Charles A Greenhall. Congruence of two Kalman filter composite clocks [J]. *Metrologia*, 2013, 50(5): 499–508.
- [17] Matthias Suess, Charles A Greenhall. Combined covariance reductions for Kalman filter composite clocks [J]. *Metrologia*, 2012, 49(4): 588–596.
- [18] Wu Yiwei, et al. Uncertainty derivation and performance analyses of clock prediction based on mathematical model method [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(10): 2792–2801.
- [19] 伍贻威, 等. 单状态变量和两级 Kalman 滤波器时间尺度算法 [J]. *中国科学(物理学, 力学, 天文学)*, 2016, 46(6): 069502-1–069501-11.
WU Yi-wei, et al. One-state and twice Kalman filter time scale algorithms [J]. *Science China Physica Mechanica & Astronomica*, 2016, 46(6): 069502-1–069501-11. (in Chinese)
- [20] Wang Zhengming. Experiments on a time scale algorithm for introducing hydrogen masers into an ensemble of caesium clocks [J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): 38–41.
- [21] G Panfilo, P Tavella. Atomic clock prediction based on stochastic differential equations [J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): 108–116.
- [22] Cristina Zucca, Patrizia Tavella. The clock model and its relationship with the allan and related variances [J]. *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2005, 52(2): 289–296.
- [23] L Galleani, L Sacerdote, P Tavella, C Zucca. A mathematical model for the atomic clock error [J]. *Metrologia*, 2003, 40(3): 257–264.
- [24] Kasdin N J. Discrete simulation of colored noise and stochastic processes and 1/f power law noise generation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1995, 83(5): 802–827.
- [25] Wu Yiwei, et al. Optimal observation intervals for clock prediction based on mathematical model method [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(1): 132–143.
- [26] 袁书明, 杨晓东, 程建华. 导航系统应用数学分析方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. 245–283.
- [27] L Gornaeva, N Koshelyaevsky, E Zagirova, UTC (SU) steering time scale: Current status and further improvements [A]. *Braunschweig (Germany): Proceedings of the 20th EFTF [C]*. 2006. 486–488.
- [28] J A Davis, S L Shemar, P B Whibberley. A Kalman filter UTC(k) prediction and steering algorithm [A]. *Joint Conf. of IEEE IFCS and EFTF, San Francisco (USA) [C]*. 2011.
- [29] Paul Koppang, Robert Leland. Linear quadratic stochastic control of atomic hydrogen masers [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1999, 46(3): 517–522.
- [30] Marcello Farina, Lorenzo Galleani, Patrizia Tavella, Sergio Bittanti. A control theory approach to clock steering techniques [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(10): 2257–2270.
- [31] Lorenzo Galleani. Control of clock signals [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2009, 346(5): 449–469.
- [32] Seung Woo Lee, Chang Bok Lee, Sung Hoon Yang. A new approach for steering UTC (KRIS) [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2009, 58(4): 1247–1251.
- [33] Seung-Woo Lee. Real-time formation of a time scale using GPS carrier-phase time transfer network [J]. *Metrologia*, 2009, 46(6): 693–703.
- [34] Wu Yiwei, et al. A DPLL method applied to clock steering [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(6): 1331–1342.
- [35] Wu Yiwei, et al. A clock steering method: using a third-order type 3 DPLL equivalent to a Kalman filter with a delay [J]. *Metrologia*, 2015, 52(6): 864–877.
- [36] 晏辉, 张忠培. 低信噪比下锁频锁相器性能分析及改进 [J]. *电子学报*, 2011, 39(1): 1–6.
Yan Hui, ZHANG Zhong-pei. Performance analysis and improvement of phase and frequency detector at low SNR [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(1): 1–6. (in Chinese)
- [37] 李罡, 吕晶, 常江, 李广侠. 静态用户精密授时问题的探

- 讨[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2243 - 2247.
- LI Gang, LV Jing, CHANG Jiang, LI Guang-xia. Discussion of precise time transfer of stationary user terminal [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(10): 2243 - 2247. (in Chinese)
- [38] W Lewandowski, E F Arias. GNSS time and UTC [J]. Metrologia, 2011, 48(4): 219 - 224.
- [39] Floyd M. Garder, Phase-lock Techniques (Third Edition) [M]. John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [40] Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering (Second Edition) [M]. Upper Saddle River (USA): Prentice Hall, Inc, 1990.
- [41] 伍贻威, 等, 原子钟两级驾驭算法及在建立 GNSS 时间基准中的应用 [J]. 电子学报, 2016, 44(7): 1331 - 1342.
- WU Yi-wei, et al, Twice atomic clock steering algorithm and its application in forming a GNSS time scale [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(7): 1331 - 1342. (in Chinese)

作者简介



伍贻威 (通信作者) 男, 1987 年出生, 博士生, 出生于上海市, 分别于 2009 年 6 月和 2011 年 12 月获得国防科技大学工学学士和工学硕士学位. 主要研究方向为 GNSS 时间基准的建立与维护. 到目前为止, 以第一作者在 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 和 Metrologia 等国际 SCI 期刊上发表论文 4 篇.
E-mail: Yiwei_Wu_sh@126.com

朱祥维 男, 1980 出生, 博士, 副研究员, 出生于山东日照. 主要研究方向为原子钟与时间频率技术、GNSS 信号处理技术等.
E-mail: zhuxiangwei@nudt.edu.cn

龚航 男, 1984 年出生, 博士, 讲师, 出生于江苏徐州. 主要研究方向为原子钟与时间频率技术.
E-mail: gong_hang@163.com

孙广富 男, 1970 年出生, 博士, 研究员, 博士生导师, 出生于黑龙江. 主要研究方向为 GNSS 系统、信号处理、信息处理技术等.

欧钢 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 出生于湖南株洲. 主要研究方向为 GNSS 信号处理、信息处理、接收机技术等.
E-mail: ougang1969@163.com