

引用格式: 崔海波, 王伟, 武建锋, 等. 机动状态下国产铯原子钟稳定性分析[J]. 时间频率学报, 2024, 47(1): 26-33.

机动状态下国产铯原子钟稳定性分析

崔海波^{1,2}, 王伟³, 武建锋^{1,2}, 李帅辰^{1,4}, 李冲⁵, 王康^{1,2}

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国人民解放军 91034 部队, 宣城 242056;
3. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 101408;
4. 中国科学院大学 集成电路学院, 北京 101408;
5. 北京卫星导航中心, 北京 100094

摘要: 车载机动状态下的守时系统可以满足一些特殊应用场合的实际需求, 其核心部分便是原子钟。主要利用守时车辆在三级道路上移动前后的数据, 分析了国产小型铯原子钟在无溯源车载机动状态下的动态 Allan 标准偏差 (ADEV) 以及噪声的幂律谱, 为未来国产小型铯原子钟的移动应用提供支撑。结果表明, 铯原子钟车载机动状态对铯原子钟的频率稳定度有一定的影响, ADEV 的采样时间 τ 为 1~1 000 s 频率稳定度最大恶化了 1.15×10^{-11} , 恶化约一个数量级; 采样时间 $\tau \geq 1\ 000$ s 稳定度恶化相对较小, 最大恶化了 8.74×10^{-13} , 恶化一倍左右。在噪声方面, 铯原子钟机动状态主要受到白色调相噪声的影响。

关键词: 车载可搬移守时; 铯原子钟; 动态 Allan 标准偏差; 幂律谱

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-01-0026-08

Analysis of frequency stability of home-made cesium clocks in maneuver state

CUI Hai-bo^{1,2}, WANG Wei³, WU Jian-feng^{1,2}, LI Shuai-chen^{1,4}, LI Chong⁵, WANG Kang^{1,2}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Chinese People's Liberation Army 91034 Unit, Xuancheng 242056, China;
3. College of Electrical and Electronic Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;
4. College of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;
5. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

Abstract: The timekeeping system in the maneuvering can meet the actual needs of some special applications, and the core part of the mobile timekeeping system is the atomic clock. This article mainly used the data before and after in-vehicle mobile timekeeping moves on the third-class road, analysis of the dynamic Allan deviation (ADEV) and power-law spectrum of the noise of the home-made small cesium atomic clock in the vehicle-mounted maneuver state without traceability and provide support for mobile applications of home-made small cesium atomic clocks in the future. The results show that the maneuvering state of the cesium atomic clock

收稿日期: 2023-04-25; 接受日期: 2023-05-30

基金项目: 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目

has a certain influence on the frequency stability of the cesium atomic clock, the sampling time τ of Allan deviation is 1~1 000 s, and the maximum frequency stability deteriorates by 1.15×10^{-11} , which is about an order of magnitude worse; the deterioration of the stability of the sampling time $\tau \geq 1\ 000$ s is relatively small, and the maximum is 8.74×10^{-13} , which is about twice deteriorated. The maneuver state of the cesium atomic clock is mainly affected by the phase modulation white noise.

Key words: vehicle-mounted removable timekeeping; cesium atomic clock; dynamic Allan deviation; power-law spectrum

高精度的时间、频率在国家发展中的地位日益重要^[1],而原子钟作为提供高精度时间的关键设备,其性能直接影响着国家军事实力、经济发展、日常生活等诸多方面。例如,北斗卫星导航系统依靠星载氢原子钟和铷原子钟与地面站守时实验室联合守时^[2],电力系统依靠数台氢原子钟和铯原子钟组成电力时间系统^[3]。目前,多数守时系统是由氢原子钟与铯原子钟联合守时,氢原子钟有着优异的短期稳定度,一般在守时系统中作为主钟,而铯原子钟有着优于氢原子钟的中、长期稳定度,被用来去除氢原子钟的长期漂移^[4],二者依据自身优势相互配合使用,共同参与守时。常用的小型商用铯原子钟目前分为磁选态和光抽运两类,早期小铯钟主要以磁选态为主,代表型号有瑞士 Osciquartz 公司的 OSA3230B 和美国 Microsemi 公司的 5071A 等。光抽运小铯钟没有了磁选态小铯钟的束光学系统和倍增器,取而代之的是激光,降低了机械制造难度,但所需电子技术水平较高^[5-9]。小型铯原子钟多年来一直依赖进口,国外对于高性能小型铯原子钟一直采取技术封锁,国内众多机构对于磁选态和光抽运小铯钟的成功研制都已经给出了自己的方案,取得了阶段性的研究成果^[5,10]。

为了满足在特殊条件下提供各类精密时间服务的能力以及设备国产化的需求,我们构建了一种新型可搬移守时系统。可搬移守时系统与目前主流的静态守时实验室的守时系统最大的不同就是增加了守时系统的灵活性,可在指定的任意位置提供精密时间服务,但同时也增加了移动过程中的噪声,如何减少这些移动过程的噪声影响是可搬移守时系统最大的难点。本文对可搬移守时系统中的国产小型铯原子钟进行频率稳定度性能分析,包括车载

静止状态、车载移动状态和车载移动后恢复静止状态 3 个阶段,为将来如何消除可搬移守时系统中原子钟的噪声提供理论依据和技术支撑,从而构建更加完善的可搬移守时系统。

1 可搬移守时系统总体架构设计及测试方法

1.1 可搬移守时系统组成及测试方法

本次守时系统机动测试选取在一辆守时车内,车内各设备连接如图 1 所示。守时车内部硬件组成主要分为 3 大系统:综合保障分系统由工控机、服务器、温湿度维持系统、UPS (uninterruptible power supply) 以及供电系统组成,工控机和服务器提供数据采集和监控各分系统运行状态的功能,对各分系统进行数据采集显示关键信息并保存到服务器,同时提供原子时控制驾驭和数据比对处理软件的工作平台,UPS 和供电系统为车辆内部提供不间断稳定的电力,温湿度维持系统维持温湿度的稳定;溯源分系统主要由卫星双向时间比对调制解调器和 GNSS (Global Navigation Satellite System) 共视接收机组成,通过北斗卫星与地面站进行数据交换,可得到可搬移守时系统的本地时间与地面站时间的偏差;信号产生分系统由两台氢原子钟、3 台铯原子钟、多通道间隔计数器、多通道比相仪、无损切换器、相位微跃计、频率分配器、脉冲分配器、网络精密时间服务器和 IRIG-B 码产生器组成,通过工控机控制无损切换器和相位微跃计对 5 台原子钟输出的时间频率信号进行选择 and 驾驭,将进行选择提纯后的原子钟时间频率信号作为多通道间隔计数器和多通道比相仪的测量参考输入,并将测量参考输出到频率信号分配器和脉冲信号分配器供给

网络精密时间服务器以及 IRIG-B 码产生器等其他设备, 为用户输出网络时间协议 (network time

protocol, NTP)/IEEE 1588 精密时间协议 (precise time protocol, PTP) 信号和 B 码等精密时间信号。

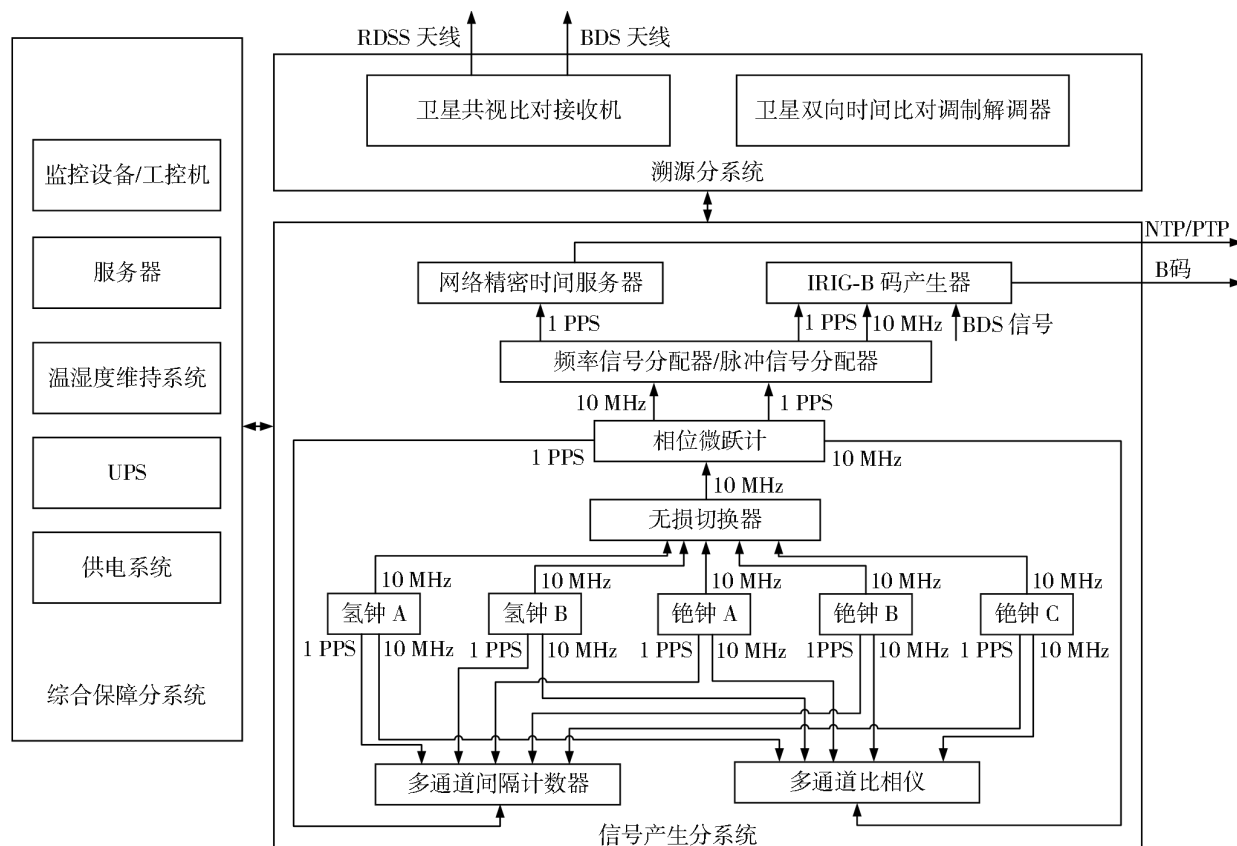


图 1 可搬移守时硬件系统组成

可搬移守时系统采用氢原子钟和铯原子钟联合参与守时。氢原子钟有着很高的短期频率稳定度, 相位噪声远小于铯原子钟, 它的长期稳定度差, 但在可搬移守时系统静止状态时可以接入溯源参考信号, 此时选择氢原子钟作为主钟, 既可以发挥其短期稳定度优势, 又有利于通过溯源分系统进行远程时间比对。铯原子钟的长期稳定度好, 短期稳定度相对较差, 在可搬移守时系统移动时, 系统不能接入溯源信号, 为了保持系统在长时间无溯源状态下原子钟组输出信号的频率稳定度, 故采用铯原子钟作为移动状态的主钟^[1]。

考虑到守时车辆的负载能力以及保证可搬移守时系统一定的钟组误差容错空间, 故选取两台氢原子钟和 3 台铯原子钟一起组成联合守时钟组。

可搬移守时系统采用氢原子钟和铯原子钟联合参与守时, 其车内放置方式如图 2 所示。两台氢原子钟置于车载恒温箱内, 3 台铯原子钟置于有温湿度调节系统的车内机柜中, 5 台原子钟均有做减

震处理。车载静止状态选择频率稳定度优于 $5.0 \times 10^{-15}/10\,000\text{ s}$ 的氢原子钟作为主钟, 车载移动状态选择频率稳定度优于 $8.5 \times 10^{-14}/10\,000\text{ s}$ 的铯钟作为主钟, 主钟在同类型钟中参与原子时的计算时占的权重大, 其他同类型守时钟的权重相对较小。车辆开始移动时使用无损切换器进行主钟的切换, 选择铯原子钟作为移动状态下的主钟, 移动完成后将主钟切换回氢钟。守时车采用多通道间隔计数器测量 1 PPS 信号、多通道比相仪测量 10 MHz 信号。车辆处于移动状态时, 无法进行溯源参考输入, 所以通过无损切换器对 5 台原子钟输出的 10 MHz 信号依据日常监控所得数据进行择优, 选择 3 台铯原子钟内稳定度和钟速率最好的钟作为主钟, 将选择后的原子钟 10 MHz 信号输入相位微跃计通过原子钟频率驾驭算法进行驾驭, 驾驭之后相位微跃计产生的 10 MHz 和 1 PPS 信号分别输入多通道间隔计数器和多通道比相仪作为测量参考。铯钟比测设备连接如图 3 所示, 为了区分各台铯原子钟, 将之命名为铯

钟 A、铯钟 B、铯钟 C。

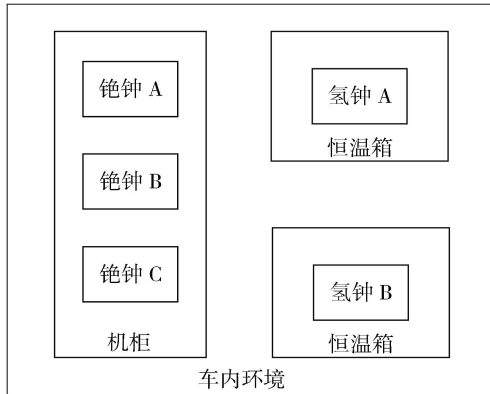


图 2 原子钟组放置方式

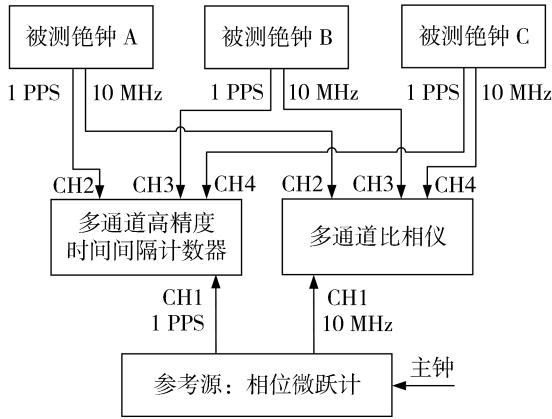


图 3 铯钟比测连接图

测试内容总共分为 3 个阶段，车辆移动前静止状态、车辆移动状态、车辆由移动状态回到静止状态，如图 4 所示。本次实验移动前、移动中和移动后恢复静止状态车内全程环境维持在温度 21℃~25℃、湿度 40%~60%RH。车辆移动状态保持车内环境在静止状态下的恒温恒湿的状态，在三级公路上保持时速在 60 km/h 左右，持续移动 8 h，车辆行驶完后回到原停放地点。

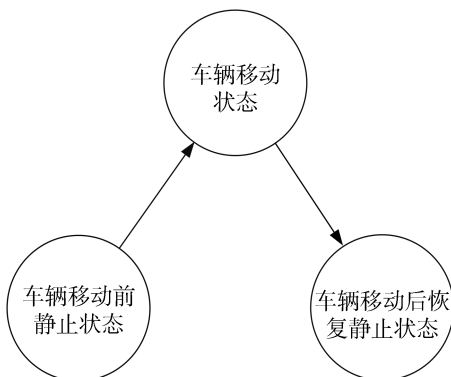


图 4 车辆测试状态图

1.2 频率稳定度分析方法

评估铯原子钟的性能常用频率稳定度。频率稳定度表示原子钟输出的频率信号在一定时间内的波动大小，通常通过 Allan 标准偏差 (ADEV) 进行表示^[12]，标准的 ADEV 公式为

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (1)$$

式 (1) 中： τ 为采样的时间间隔， M 表示测量的样本数， $y_i (i=1, 2, \dots, M)$ 表示测量时间间隔 τ 内频率的均值。ADEV 的另一种相位测量公式为

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

式 (2) 中： τ 为采样的时间间隔， $N = M + 1$ 表示测量的样本数， $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 表示测量时间间隔 τ 内相位的均值。

Allan 方差通常是以信号为平稳信号为前提，但当原子钟处于动态环境中时，原子钟内部的不稳定性使得原子钟输出数据含有许多非平稳信号。动态 Allan 方差是可以用来表征原子钟稳定性随时间变化的量，弥补 Allan 方差无法准确描绘信号的各种非平稳性因素的不足^[13]。动态 Allan 方差的本质是使用窗函数在多个时间段内重复计算 Allan 方差，然后综合各个时间段内获得的 Allan 方差并显示在同一三维图像内，便可得到随机信号的动态 Allan 方差，具体过程如下。

设 $x(n)$ 为一段长度为 N 的随机信号，用长度为 T ，中心点为 $n = t_1$ ，窗口为 $n - T/2 \leq t_1 \leq n + T/2$ 的矩形窗进行截断，得到截断信号 $x(n, t_1)$ 为

$$x(n, t_1) = x(n)P_T(n - t_1) \quad (3)$$

式 (3) 中： $P_T(n - t_1)$ 是长度为 T 的矩形窗：

$$P_T(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

对截断信号 $x(n, t_1)$ 计算 Allan 方差。设截断信号 $x(n, t_1)$ 可分为 m 个采样时间为 t_0 的数据段 $x_i(n, t_0)$ ，取其中 k 个连续的数据为一个数据段，数据段长度 τ 等于 $t_0, 2t_0, \dots, kt_0$ ，且满足 $(0 < \tau \leq \tau_{\max})$ ，共有 $m - k + 1$ 个这样的数据段，对其中一段数据段 p 求得平均值为

$$\bar{x}_p(n, \tau) = \frac{1}{k} \sum_{i=p}^{p+k} x_i(n, t_0) \quad (5)$$

式(5)中: τ 表示数据的时间长度, $\bar{x}_p(n, \tau)$ 表示始于第 p 个点的数据段的段平均。两个相邻的数据段的段平均值之差为

$$\xi_{p+1,p} = \bar{x}_{p+1}(n, \tau) - \bar{x}_p(n, \tau)。(6)$$

一个窗口内所有数据段、数据的时间长度为 τ 的所有段的段方差为

$$\sigma^2(n, \tau) = \frac{1}{2(m-k-1)} \sum_{p=1}^{m-k+1} (\xi_{p+2,p+1} - \xi_{p+1,p})^2。(7)$$

取 τ 等于 $t_0, 2t_0, \dots, kt_0$, 便可得到 $\sigma(n, \tau)$ 与 τ 的相互关系, 时间轴移动矩形窗反复计算 $\sigma(n, \tau) - \tau$ 按时间顺序排列便可得到动态 Allan 方差的三维模型^[14]。

1.3 原子钟噪声类型

频率稳定度常用来描述原子钟输出频率信号受 5 种典型噪声影响的大小。公认的幂律谱噪声模型的公式为

$$s_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^2 h_{\alpha} f^{\alpha}。(8)$$

式(8)中: h_{α} 代表噪声类型强度的系数, f 为傅里叶频率, α 为代表噪声类型的整数, α 取值为 -2~+2 分别对应这 5 种噪声, 依次为随机游走调频噪声(RWFM)、闪烁调频噪声(FFM)、白噪声(WFM)、闪烁调相噪声(FPM)和白噪声(WPM)^[15]。根据功率谱密度 $s_y(f)$ 与 Allan 方差之间的关系可以得到 Allan 方差与噪声类型的关系

$$\sigma_y^2(\tau) = K_{\alpha} \cdot \tau^{\mu}。(9)$$

式(9)中: K_{α} 为与 α 值对应的常数, μ 为代表噪声类型指数。 μ 与 α 的关系可以表示为 $\mu = -\alpha - 1$ ($-3 < \alpha \leq 1$); $\mu = -2(\alpha > 1)$ ^[15], Allan 标准偏差(ADEV)表征原子钟的各类噪声的幂律谱曲线参见图 5。

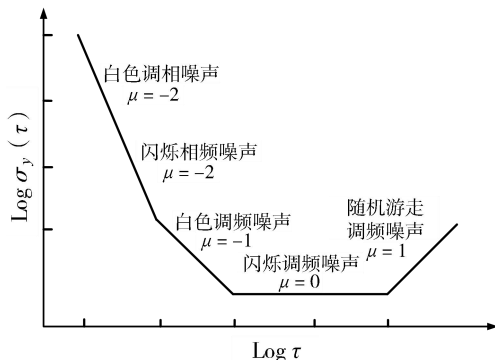


图 5 ADEV 表征原子钟各类噪声幂律谱曲线

一些研究表明, 铯原子钟的主要噪声为白噪声、随机游走调频噪声和白噪声^[16]。文献[16]中详细推导了时差观测量与 Allan 方差之间的关系:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{3\sigma^2}{\tau^2} + \frac{\sigma_1^2}{\tau} + \frac{1}{3}\sigma_2^2\tau + \frac{1}{2}d^2\tau^2 + A^2 \frac{\sin^4(\pi f_0 \tau)}{(\pi f_0 \tau)^2}。(10)$$

式(10)中: 等式右边第 1 项为白噪声; 第 2 项为白噪声; 第 3 项为随机游走调频噪声; 第 4 项为原子钟频漂; 第 5 项为周期性波动在 Allan 方差中的分量。由式(10)可知白噪声、白噪声和随机游走调频噪声在对数 Allan 方差图中的斜率分别为 -2、-1 和 1, 但在对数 Allan 偏差图中的斜率分别为 -1、-1/2 和 1/2。

2 铯原子钟各状态频率稳定度结果及噪声分析

2.1 主备钟切换噪声分析

可搬移守时系统可通过工控机操作无损切换器进行氢钟组和铯钟组的选择, 因铯原子钟的相位噪声比氢原子钟的相位噪声大, 所以在可搬移守时系统切换主钟后系统的相位噪声会增大。选取可搬移守时系统静止状态主备钟切换前后 2 h 数据, 绘制成动态 Allan 标准偏差三维图如图 6 所示, 截取出 τ 为 100 s 的动态 ADEV 曲线如图 7 所示。

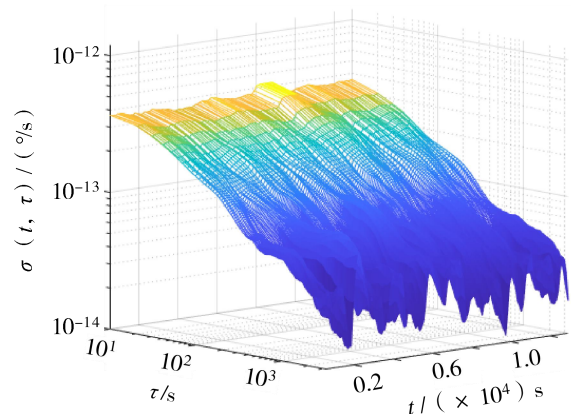


图 6 主备钟切换前后的动态 Allan 标准偏差

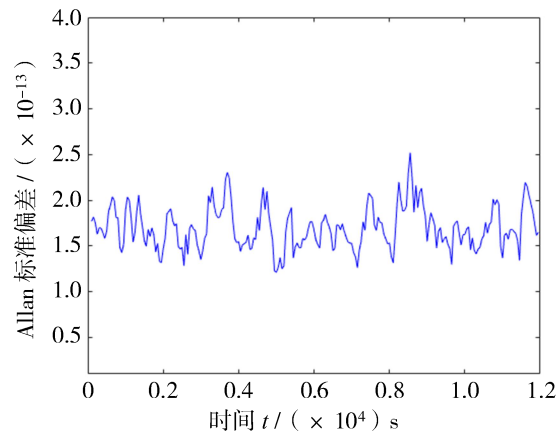


图 7 主备钟切换前后 τ 为 100 s 的动态 Allan 标准偏差

主备钟切换的时间点在 $T = 6000\text{ s}$ 附近，可以从图 6 和图 7 中看出主备钟切换前后，ADEV 的短期稳定度虽略有增加但很快又恢复基本一致，主备钟切换前后频率的变化量为 2.32×10^{-16} 。故主备钟切换时引入的噪声较小，相比于守时系统移动状态引入的噪声可忽略不计。

2.2 可搬移守时系统铯原子钟频率稳定度分析

根据连续采集的车辆移动前、后 2 天静止状态和车辆移动期间 8 h 相差数据由公式 (2) 计算求得频率稳定度，由公式 (6) 计算求得动态 Allan 标准偏差的三维模式。表 1 为移动前静止状态各铯原子钟频率稳定度统计表，其中标称指标为铯钟恒温实验室静止状态下的官方标称指标，表 2 为移动中各铯原子钟的频率稳定度统计表，表 3 为移动后恢复静止状态各铯原子钟频率稳定度统计表，图 8 为各铯原子钟各阶段频率稳定度比对图，图 9、图 10 和图 11 为 3 台铯原子钟各阶段的动态 ADEV 图。

从表 1 静止状态频率稳定度结果可看出，各台铯原子钟在采样时间 τ 为 1~10 s 频率稳定度均满足标称指标，但在采样时间 τ 为 10~1 000 s 频率稳定度基本满足标称指标，个别指标因为车内温湿度、电磁等环境劣于恒温恒湿的守时实验室环境故存在一定偏差。

表 1 移动前静止状态各铯原子钟频率稳定度

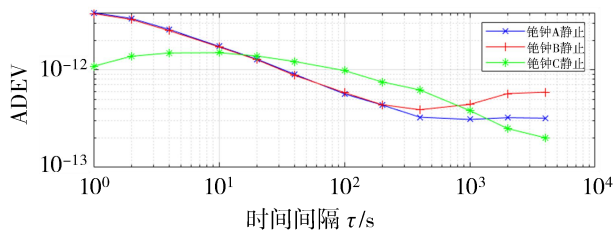
时间间隔/s	铯钟 A 移动前	铯钟 B 移动前	铯钟 C 移动前	标称指标
1	3.82×10^{-12}	3.75×10^{-12}	1.08×10^{-12}	5.00×10^{-12}
10	1.73×10^{-12}	1.71×10^{-12}	1.49×10^{-12}	2.70×10^{-12}
100	5.65×10^{-13}	5.83×10^{-13}	9.79×10^{-13}	8.50×10^{-13}
1 000	3.09×10^{-13}	4.41×10^{-13}	3.81×10^{-13}	2.70×10^{-13}

表 2 移动中各铯原子钟频率稳定度

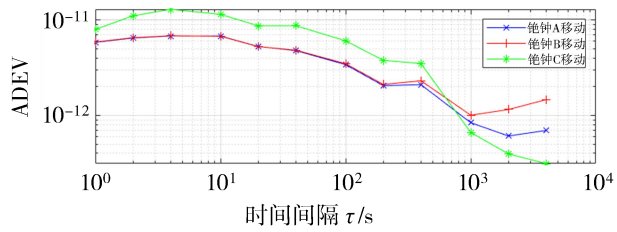
时间间隔/s	铯钟 A 移动前	铯钟 B 移动前	铯钟 C 移动前
1	5.85×10^{-12}	5.90×10^{-12}	8.00×10^{-12}
10	6.82×10^{-12}	6.78×10^{-12}	1.15×10^{-11}
100	3.41×10^{-13}	3.49×10^{-13}	6.08×10^{-12}
1 000	8.38×10^{-13}	1.00×10^{-13}	6.61×10^{-13}

表 3 移动后静止状态各铯原子钟频率稳定度

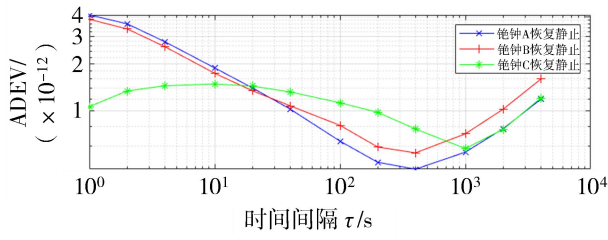
时间间隔/s	铯钟 A 移动前	铯钟 B 移动前	铯钟 C 移动前
1	4.11×10^{-12}	3.84×10^{-12}	1.07×10^{-12}
10	1.89×10^{-12}	1.72×10^{-12}	1.49×10^{-12}
100	6.43×10^{-13}	7.81×10^{-13}	1.13×10^{-12}
1 000	5.48×10^{-13}	6.40×10^{-13}	5.78×10^{-13}



(a) 铯钟静止



(b) 铯钟移动



(c) 铯钟恢复静止

图 8 各个阶段 3 台铯原子钟频率稳定度对比图

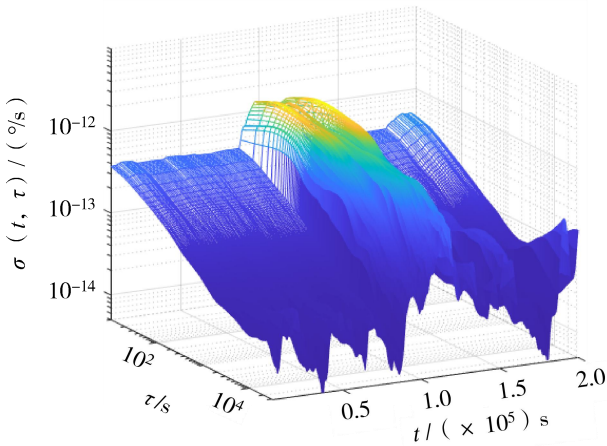


图 9 铯钟 A 各阶段动态 ADEV

由表 1、表 2、表 3 和图 8 分析可知, 铯钟 A 和铯钟 B 的频率稳定度变化较为相似, 铯钟 C 在采样时间 τ 为 1~10 s 和 $\tau \geq 1\,000$ s 区间内频率稳定度优于另外两台铯钟, 但在移动状态下铯钟 C 的频率稳定度下降幅度稍大, 降低了一个数量级, 大于铯钟 A 和铯钟 B 的频率稳定度的下降幅度。表明铯钟 C 的抗噪声性能相对稍差, 而 3 台铯钟中铯钟 A 的抗噪声性能好。

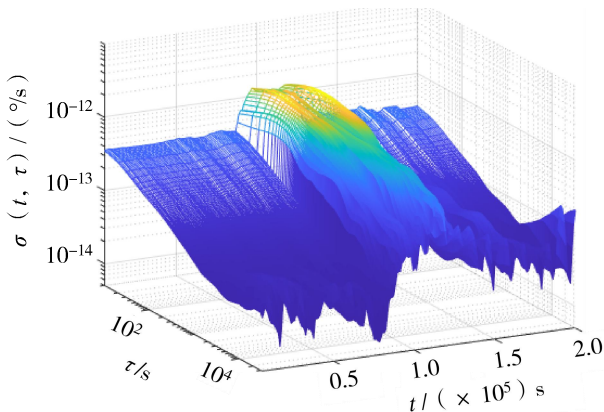


图 10 铯钟 B 各阶段动态 ADEV

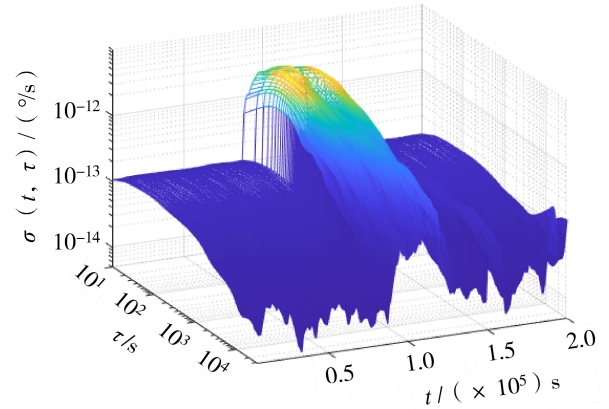


图 11 铯钟 C 各阶段动态 ADEV

由图 9、图 10 和图 11 可知, 守时系统在 $t = 0.88 \times 10^5$ s 附近开始移动, $t = 1.28 \times 10^5$ s 附近停止移动, 从图中可看出移动期间 3 台铯原子钟的频率稳定度均有明显恶化。其中在采样时间 $\tau = 1 \sim 10$ s 时, 铯钟 C 恶化幅度最大频稳恶化了 1.15×10^{-11} , 幅度达了一个数量级, 恶化幅度最小为铯钟 A 频稳恶化了 5.07×10^{-12} , 相比静止状态频稳恶化了 3 倍左右。在采样时间 $\tau = 10 \sim 1\,000$ s 时, 3 台铯钟均相对于静止状态频稳恶化了 5 倍左右, 其中最大值为铯钟 C 的 5.10×10^{-12} , 最小值为铯钟 A 的 2.85×10^{-12} 。而采样时间 $\tau \geq 1\,000$ s 影响幅度相对较小, 普遍频稳恶化幅度小于 8.74×10^{-13} , 恶化了一倍左右。车辆恢复静止状态之后, 采样时间 $\tau = 1 \sim 1\,000$ s 频率稳定度恢复到静止时候的水平, 此时恶化幅度最大为 2.75×10^{-13} , 相比于静止状态频率稳定度恶化不超过一倍, 但采样时间 $\tau \geq 1\,000$ s 频率稳定度回落较慢和静止状态下相比, 最大为铯钟 C 恶化为 1.01×10^{-12} , 恶化的一个数量级左右。

白色调相噪声、白色调频噪声和随机游走调频噪声在对数 Allan 标准偏差图中的斜率分别为 -1、-1/2 和 1/2, 可以通过斜率分别拟合出公式 (10) 中 σ 、 σ_1 和 σ_2 的值。通过斜率拟合出的铯钟移动状态和静止状态噪声大小如表 4 所示。

通过表 4 可知, 铯原子钟移动状态与静止状态相比, 3 台铯钟的白色调相噪声普遍增大一到两个数量级; 白色调频噪声在 3 台铯钟上增大均不超过一个数量级; 随机游走调频噪声虽也均有增大, 但仅在铯钟 C 上增大了一个数量级, 铯钟 A 和铯钟 B 增长幅度都不大。可见铯原子钟在移动状态下主要受到白色调相噪声的影响。

表 4 铯原子钟移动和静止状态噪声对比

噪声种类	铯钟 A 静止	铯钟 A 移动	铯钟 B 静止	铯钟 B 移动	铯钟 C 静止	铯钟 C 移动
白色调相噪声	7.25×10^{-12}	2.38×10^{-10}	7.09×10^{-12}	2.61×10^{-10}	1.08×10^{-11}	1.87×10^{-10}
白色调频噪声	5.69×10^{-12}	2.65×10^{-11}	3.32×10^{-11}	2.15×10^{-11}	1.24×10^{-11}	5.53×10^{-11}
随机游走调频噪声	1.69×10^{-12}	2.35×10^{-14}	2.29×10^{-14}	4.46×10^{-14}	1.88×10^{-12}	1.39×10^{-11}

总体而言，车辆移动期间的各种噪声振动对铯原子钟的频率稳定度有一定影响。在 ADEV 的采样时间 $\tau = 1 \sim 1\,000\text{ s}$ 内，车辆移动对铯原子钟的频率稳定度影响最大，而采样时间 $\tau \geq 1\,000\text{ s}$ 影响幅度相对较小，铯原子钟在车辆移动状态主要受到白色调相噪声较大的影响。恢复静止后，采样时间 $\tau = 1 \sim 1\,000\text{ s}$ 内频率稳定度很快恢复到静止水平，但采样时间 $\tau \geq 1\,000\text{ s}$ 的频率稳定度恶化稍大，没有恢复到原来静止状态，这可能是原子钟本身状态没有恢复到原来状态，也可能是采用的数据主钟切换成氢原子钟后速率拟合不准确，导致的铯原子钟相对于主钟偏差数据中存在速率漂移。

3 结语

本文以两台氢原子钟和 3 台铯原子钟组成车载守时系统，通过对 5 台原子钟输出的 10 MHz 信号进行驾驭作为守时系统的频率参考信号，对 3 台国产小型铯原子钟在车载移动状态下的频率稳定度进行了分析。结果表明铯原子钟在车载移动状态频率稳定度有一定影响，ADEV 在采样时间 $\tau = 1 \sim 1\,000\text{ s}$ 内频率稳定度恶化稍大，主要受到白色调相噪声的影响，对采样时间 $\tau \geq 1\,000\text{ s}$ 频率稳定度的影响稍小。当车辆静止下来之后，在采样时间 $\tau = 1 \sim 1\,000\text{ s}$ 频率稳定度恢复至恒温恒湿静止状态水平，所受噪声的影响大幅降低，但采样时间 $\tau \geq 1\,000\text{ s}$ 的频率稳定度回落较慢，与移动前静止状态相比有一定偏差。因此对于移动的守时系统应对铯钟加强减震措施，降低震动对守时系统的影响。由于本次车载可搬移守时系统测试时间有限，对于小型铯原子钟移动状态的频率稳定度进行更全面的分析和评估，需要更为长期的测试，开展更加深入的研究。

参考文献：

[1] 董绍武. 守时中的若干重要技术问题研究[D]. 西安：

中国科学院研究生院(国家授时中心), 2007.
[2] 董文, 赵当丽, 胡永辉, 等. 国产激光抽运铯原子钟的性能分析[J]. 时间频率学报, 2019, 42(4): 319-326.
[3] 曹远洪, 杜润昌, 赵杏文, 等. 原子钟技术在电力系统应用—中国电力系统时间同步体系建设方案初探[C]//第十二届中国卫星导航年会论文集, 南昌: 第十二届中国卫星导航年会组委会, 2021: 29-36.
[4] 赵书红, 董绍武, 袁海波, 等. 异地多站联合守时方法研究[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 288-299.
[5] 曹远洪. 光抽运小铯钟及其在 PNT 应用[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 83-88.
[6] 赵杏文, 韦强, 李东旭, 等. 激光抽运小型铯原子钟研制进展[J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 1-8.
[7] 陈徐宗, 贺轩, 袁志超, 等. 北京大学小型化光抽运热、冷铯束原子钟研究进展[J]. 时间频率学报, 2022, 45(2): 104-109.
[8] 汪中, 陈景标. 基于相干滤波和相干布居数囚禁原理的激光原子钟[J]. 时间频率学报, 2022, 45(2): 124-128.
[9] 陈江, 马沛, 王骥, 等. 小型磁选态铯原子钟产品化进展[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(3): 12-16+45.
[10] 陈江, 王骥, 马沛, 等. LIP Cs3000C 磁选态铯原子钟的测试[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 190-193.
[11] 王正明, 袁海波. 氢钟和铯钟联合守时初探[J]. 天文学报, 2007, 48(1): 71-83.
[12] 王一彬, 袁海波, 李宗源, 等. 国产铯原子钟性能分析[C]//第十三届中国卫星导航年会论文集, 西安: 第十三届中国卫星导航年会组委会, 2022.
[13] 崔逸群, 覃方君, 丰仕林. 基于动态 Allan 方差的光纤陀螺稳定性分析[J]. 电子设计工程, 2018, 26(6): 161-164.
[14] 张娜, 李绪友. 动态 Allan 方差的理论改进及其应用研究[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 70-75.
[15] 张敏. 原子钟噪声类型和频率稳定度估计的自由度分析与探讨[D]. 西安: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2008.
[16] 伍貽威, 杨斌, 肖胜红, 等. 原子钟模型和频率稳定度分析方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(8): 1226-1232.