

引用格式: 樊礼谦, 焦文海, 孟轶男. 基于 Kalman 滤波的导航星座集中式守时算法研究[J]. 时间频率学报, 2023, 46(1): 21-31.

基于 Kalman 滤波的导航星座集中式 守时算法研究

樊礼谦¹, 焦文海^{2,*}, 孟轶男²

(1. 信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450001;
2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 自主守时是指无地面段支持情形下, 仅利用星间测距和通信维持卫星导航系统时间。首先介绍了基于卡尔曼 (Kalman) 滤波的集中式自主守时算法, 然后采用哈达玛 (Hadamard) 方差估计了星载原子钟的噪声系数, 最后利用 IGS (International GNSS Service) 精密钟差进行了自主守时仿真试验, 评估了整体时间漂移、频率稳定度等自主守时性能。结果表明, 集中式 Kalman 滤波自主守时算法可实现星座内时间基准统一, 通过对预报性能较好的氢钟的噪声参数进行优化可以提升自主守时性能, 自主运行 60 d 后时间漂移约 11.4 ns, 天稳定度优于 5.0×10^{-15} , 优于任意单一主钟的预报漂移精度和频率稳定度。

关键词: 集中式卡尔曼滤波; 自主守时; 哈达玛方差; 星间链路

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-01-0021-11

Research on centralized time-keeping algorithm for navigation constellations based on Kalman filter

FAN Li-qian¹, JIAO Wen-hai^{2,*}, MENG Yi-nan²

(1. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;
2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Autonomous time-keeping refers to the use of inter-satellite ranging and communication to maintain the satellite navigation system time without ground segment support. This contribution first introduces the centralized autonomous time-keeping algorithm based on Kalman filter, then estimates the noise parameters of the on-board atomic clock using Hadamard variance. Finally, the IGS precise clock biases are used for autonomous time-keeping simulation experiments to evaluate the overall time drift, frequency instability, and other autonomous time-keeping performance. The results show that the centralized Kalman filter autonomous time-keeping algorithm can realize unified time reference, and the autonomous time-keeping performance can be improved by optimizing the noise parameters of the hydrogen clocks with better forecast capability. The time drift after 60 days of autonomous operation is approximately 11.4 ns and the instability is less than 5.0×10^{-15} at 1 day

intervals, which are better than the forecast drift accuracy and frequency instability of any single master clock.

Key words: centralized Kalman filter; autonomous time-keeping; Hadamard variance; inter-satellite link

0 引言

20 世纪 80 年代, 美国在建设全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 的同时设计了星间链路方案, 并且提出自主导航的概念^[1]。基于 GPS 星座设计的超高频 (ultrahigh frequency, UHF) 星间测距技术, M. P. Ananda 和 M. D. Menn 等人^[2-3]进行了自主导航模拟试验, D. Martoccia^[4]则对星间时间同步算法进行了较为完整的阐述, 通过仿真数据对算法进行了验证, 在星间测距精度 0.75 m 时能够实现优于 1 m 的时间同步精度。W. Andy^[5]通过模拟试验对自主导航钟差进行了估计, 在 95% 的概率下, 时间同步误差小于 3.8 ns, 无外部干预条件下 24 颗卫星 7 d 时间漂移小于 13.34 ns, 相比于单星原子钟精度, 综合原子钟精度提升了 1.5~2.2 倍。针对 UHF 频段抗干扰性差、精度低的问题, GPS BLOCK III 卫星设计了精度更高、抗干扰能力更强的 Ka 频段星间链路^[6-7], 可实现星间精密测距和高速信息传输^[8-9]。

欧洲伽利略卫星导航系统 (Galileo Navigation Satellite System, GALILEO) 的自主导航尚在设计阶段, 目前没有 GALILEO 卫星装备可运行的星间链路载荷, 但其星间链路测距技术被验证是可行的。欧空局很早就提出了“GNSS+”和 ADVISE 项目^[10-12], 同时还进行了光量子星间链路的论证工作^[13-14]。为了解决区域监测网局限性问题, 俄罗斯的格洛纳斯卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GLONASS) 也设计了星间链路, 具备自主导航的能力^[15]。GLONASS-M 卫星和 GLONASS-K 卫星分别搭载 S 频段星间链路和激光星间链路载荷, 目前两种方案都处于试验阶段, 未形成运行能力。

北斗三号全球卫星导航系统 (BeiDou-3 Navigation Satellite System, BDS-3) 于 2020 年 6 月 23 日完成全球组网, 2020 年 7 月 31 日起向全球提供服务。BDS-3 卫星搭载 Ka 频段星间链路相控阵载荷, 采用时分多址 (time division multiple access, TDMA) 结构的双单向伪距测量体制。相比仅使用监测站数据, 星间伪距数据的加入能够显著提升轨道和钟差精度^[16-17]。不同学者^[18-21]利用星间链路实测数据进行钟差预报研究, 取得较好的预报精度。在噪声估计方面, 帅平和曲广吉等人^[22-23]基于阿伦 (Allan) 方差建立了适用于卫星自主时间同步的 Kalman 滤波算法, 然而 Allan 方差建立的二参数模型对甚低频噪声不收敛, 为了克服这个缺点, 顾亚楠^[24]提出了基于 Hadamard 方差拟合噪声扩散系数建立的三参数误差模型, 能够把星座时间同步精度提高 20%。自主导航的核心任务是产生并更新导航星历, 自主守时是自主导航的重要任务, 对星载原子钟噪声的准确估计可提升守时性能。本文拟研究基于 Hadamard 方差估计星载钟噪声方法, 评估集中式 Kalman 滤波自主守时性能, 并得出有益结论。

1 集中式自主守时算法

1.1 基于 Kalman 滤波的集中式自主守时方法

1) 观测方程

BDS-3 卫星搭载了 Ka 频段星间链路相控阵载荷, 采用 TDMA 体制的双单向测距模式, 每条星间链路分配一个 3 s 时隙以执行测距和通信, 正向链路在前 1.5 s 内完成, 相应的反向链路在后 1.5 s 内完成^[25-27]。由于双向测距无法做到两颗卫星同时收发信号, 故需要将双向测距数据进行历元归算。归算之后的双向伪距测量方程为

$$\begin{cases} \bar{\rho}'_{ji} = \left| \bar{\mathbf{R}}^i(t_0) - \bar{\mathbf{R}}^j(t_0) \right| + c(\delta t_0^i - \delta t_0^j) + c(\tau_s^j + \tau_r^i) + \Delta\delta_{ji} + \varepsilon_{ji} \\ \bar{\rho}'_{ij} = \left| \bar{\mathbf{R}}^j(t_0) - \bar{\mathbf{R}}^i(t_0) \right| + c(\delta t_0^j - \delta t_0^i) + c(\tau_s^i + \tau_r^j) + \Delta\delta_{ij} + \varepsilon_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中: t_0 为归算时刻; $\bar{\rho}'_{ji}$ 和 $\bar{\rho}'_{ij}$ 分别为归算时刻卫星 j 发 i 收、 i 发 j 收的伪距观测量; \bar{R}^i 和 \bar{R}^j 分别为归算时刻卫星 i 和卫星 j 的三维位置矢量; c 为光速; δt_0^i 和 δt_0^j 分别为归算时刻卫星 i 和卫星 j 的钟差; τ_r 和 τ_s 分别为接收和发射的通道时延; $\Delta\delta$ 为测距值的可模型化误差改正, 对于星间测距, 包括卫星天线相位中心改正、相对论效应改正等; ε 为测量噪声。

式 (1) 中的两式相减消除位置信息实现钟差与轨道解耦, 仅剩下卫星钟差观测量、星间链路设备收发时延、误差模型改正以及观测噪声, 即

$$\delta t_0^i - \delta t_0^j = \frac{\bar{\rho}'_{ji} - \bar{\rho}'_{ij}}{2c} - \frac{\tau_s^j + \tau_r^i}{2} + \frac{\tau_s^i + \tau_r^j}{2} - \frac{\Delta\delta_{ji} - \Delta\delta_{ij}}{2c} + \varepsilon。 \quad (2)$$

Kalman 滤波的集中式自主守时算法需要从参与运算的钟组中选择一台钟作为主钟, 计算钟组中 $n-1$ 台钟与主钟的钟差作为滤波器的输入量, 输出的是 n 台钟与估得的时间尺度的钟差。根据式 (2) 获得所有星间链路的相对钟差后, 选择卫星编号 1 为主钟, 以相对钟差为观测量, 相对于主钟的钟差为待估参数, 通过整网平差后可得到 t_k 时刻每台钟相对于主钟的钟差 \mathbf{Z}_k 。 n 台原子钟钟差由时差、频差和频漂 3 部分进行估计, 在 t_k 时刻的观测方程为

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k。 \quad (3)$$

式 (3) 中, \mathbf{Z}_k 为每台钟相对于主钟的钟差:

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} x_1(t_k) - x_2(t_k) \\ x_1(t_k) - x_3(t_k) \\ \vdots \\ x_1(t_k) - x_n(t_k) \end{bmatrix}。 \quad (4)$$

\mathbf{H} 为当前状态到测量的转移矩阵:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}。 \quad (5)$$

\mathbf{X}_k 表示需要估计的状态:

$$\mathbf{X}_k = [x_1(t_k) \quad y_1(t_k) \quad z_1(t_k) \quad \cdots \quad x_n(t_k) \quad y_n(t_k) \quad z_n(t_k)]^T。 \quad (6)$$

x 、 y 、 z 分别为卫星钟 i 在 t_k 时刻的时差、频差、频漂, 卫星钟 i 在 t_0 时刻的初始状态为

$$\begin{cases} x_i(t_0) = x_0 \\ y_i(t_0) = y_0 \\ z_i(t_0) = z_0 \end{cases}。 \quad (7)$$

\mathbf{V}_k 表示测量噪声矩阵, 如果测量设备一致, 可认为测量噪声方差 σ_{oi}^2 是一致的, 则测量噪声协方差矩阵 \mathbf{R} 可表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_{o1}^2 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{on}^2 \end{bmatrix}。 \quad (8)$$

2) 状态方程

根据星载原子钟钟差模型,原子钟的确定性分量和随机分量均可采用卡尔曼滤波原子钟状态方程建模,原子钟的确定性分量包括时差、频差和频漂,随机分量可用过程噪声描述,其状态方程表示为

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k|k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k \quad (9)$$

式(9)中, \mathbf{X}_k 、 \mathbf{X}_{k-1} 分别为 t_k 、 t_{k-1} 时刻所有星载原子钟的状态向量,并且有 $t_k = t_{k-1} + \tau$, τ 为滤波的采样间隔, $\Phi_{k|k-1}$ 为所有原子钟的状态转移矩阵:

$$\Phi_{k|k-1} = \begin{bmatrix} \phi_{1,k} & & \\ & \ddots & \\ & & \phi_{n,k} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)中, $\phi_{i,k}$ 为原子钟 i 的状态转移矩阵:

$$\phi_{i,k} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \tau^2/2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(9)中, \mathbf{W}_k 为过程噪声矩阵,其过程噪声协方差矩阵 \mathbf{Q} 表示为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \mathbf{q}_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)中, \mathbf{q}_i 为原子钟 i 的噪声协方差矩阵:

$$\mathbf{q}_i = \begin{bmatrix} \sigma_{i,1}^2 \tau + \frac{\sigma_{i,2}^2 \tau^3}{3} + \frac{\sigma_{i,3}^2 \tau^5}{20} & \frac{\sigma_{i,2}^2 \tau^2}{2} + \frac{\sigma_{i,3}^2 \tau^4}{8} & \frac{\sigma_{i,3}^2 \tau^3}{6} \\ \frac{\sigma_{i,2}^2 \tau^2}{2} + \frac{\sigma_{i,3}^2 \tau^4}{8} & \sigma_{i,2}^2 \tau + \frac{\sigma_{i,3}^2 \tau^3}{3} & \frac{\sigma_{i,3}^2 \tau^2}{2} \\ \frac{\sigma_{i,3}^2 \tau^3}{6} & \frac{\sigma_{i,3}^2 \tau^2}{2} & \sigma_{i,3}^2 \tau \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(13)中, 3个噪声系数 $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ 与星钟 Hadamard 方差有关。

由此可得集中式 Kalman 滤波的递推形式为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} \mathbf{X}_{k-1} \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k|k-1}^T + \mathbf{Q} \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \\ \mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_{k|k-1}) \\ \mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: \mathbf{K}_k 为 Kalman 滤波增益矩阵; \mathbf{P}_k 为估计协方差矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵。可以证明以上算法确

定的综合原子时是唯一的，与主钟的选择无关^[28]。

Kalman 滤波集中式处理模式利用全部星载钟的信息在节点星上估计所有卫星钟的状态，以精密钟差为基准，通过对所有卫星滤波状态计算的钟差取平均的方式获得星上自主时间尺度相对于地面时间尺度的偏差：

$$T_{\text{ref}}^{\text{ANT}}(t_k) = \text{mean}(T_{\text{ref}}^i(t_k) - T_{\text{ANT}}^i(t_k))。 \quad (15)$$

式(15)中： i 为卫星序号；mean表示对该历元所有卫星取平均； T_{ref}^i 为卫星 i 的精密钟差，本文采用的是德国地学研究中心（Deutsches GeoForschungs Zentrum, GFZ）提供的精密钟差； T_{ANT}^i 为卫星 i 相对自主时间尺度的钟差，由滤波状态计算获得； $T_{\text{ref}}^{\text{ANT}}$ 为自主时间尺度相对于精密钟差的偏差。

1.2 基于 Hadamard 方差的噪声估计方法

原子钟模型可由确定性分量和随机性分量组成，确定性分量可通过多项式进行建模，随机性分量可用随机过程噪声描述。随机性分量常用幂律谱噪声模型^[29-30]来描述：

$$S_y(f) = \sum_{\alpha=-4}^2 h_{\alpha} f^{\alpha} \quad (0 \leq f \leq f_h)。 \quad (16)$$

式(16)中： h_{α} 为7种能量谱噪声系数强度； f 为傅里叶频率，上限值为 f_h ； α 为与噪声类型对应的幂数，7种噪声与 α 的关系如表1所示。

表1 噪声类型与幂数 α 的关系

噪声类型	α
调相白噪声（white phase noise, WPM）	2
调相闪变噪声（flicker phase noise, FPM）	1
调频白噪声（white frequency noise, WFM）	0
调频闪变噪声（flicker frequency noise, FFM）	-1
调频随机游走噪声（random walk frequency noise, RWFM）	-2
调频闪变游走噪声（flicker walk frequency noise, FWFM）	-3
调频随机奔跑噪声（random run frequency noise, RRFM）	-4

Allan 方差可以描述前5种噪声，对于铷钟受到的甚低频噪声，如FWFM和RRFM，可通过Hadamard方差描述。基于采样间隔为 τ 的时差数据序列 $\{x(i), i=1, 2, 3, \dots, N\}$ 的Hadamard方差表示为

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{6\tau^2(N-3)} \sum_{i=1}^{N-3} [x_{i+3} - 3x_{i+2} + 3x_{i+1} - x_i]^2 = \frac{1}{6\tau^2} E[(x_{i+3} - 3x_{i+2} + 3x_{i+1} - x_i)^2]。 \quad (17)$$

Kalman 滤波过程中3个噪声系数 $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ 分别为用于描述WFM、RWFM以及RRFM的常数，而测量噪声WPM可以用 σ_0 来描述， σ_0 、 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 与星钟Hadamard方差的关系为

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{10\sigma_0^2}{3\tau^2} + \frac{\sigma_1^2}{\tau} + \frac{\sigma_2^2\tau}{6} + \frac{11\sigma_3^2\tau^3}{120}。 \quad (18)$$

得到不同平滑时间 τ 下的Hadamard方差后，通过最小二乘即可得到噪声扩散系数 σ_0 、 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 。

2 自主守时性能分析

选取 GFZ 提供的采样间隔为 5 min 的 24 颗 BDS-3 的中圆地球轨道 (medium Earth orbit, MEO) 卫星精密钟差进行 60 d 自主守时性能分析, 评估时间段为 2021-11-13 至 2022-01-11, 分别采用一阶和二阶多项式模型拟合氢钟和铷钟的初始值, 并以预报性能较好的氢钟为主钟, 所有卫星钟差和主钟钟差作差并叠加均值为 0 标准差为 0.3 ns 的高斯白噪声的方式产生星间链路钟差观测值。

2.1 基于主钟钟差预报的自主守时性能分析

BDS-3 不同类型的星载原子钟具备不同的预报特征和性能, 相比于星载铷钟, 星载氢钟的漂移率更小, 预报性能更好。可将部分长期性能较优的卫星钟进行长期预报得到预报钟差, 其他卫星钟利用星间钟差观测量与主钟进行校正, 从而充分发挥星载氢原子钟的高性能优势, 把时间基准控制在高性能星载氢原子钟上。本文分别以预报性能较好的星载氢钟为主钟通过一阶多项式模型进行 60 d 的钟差预报, 其他卫星钟以 5 min 的间隔和主钟进行比对, 根据式 (15) 计算的各种情形下 60 d 的自主时间尺度相对于地面时间尺度的偏差如图 1 所示, 同时统计了不同自主时间尺度的最大偏差和天稳定度以及单一主钟的天稳定度, 结果如表 2 所示。

结果表明, 不考虑星载原子钟噪声的影响, 仅通过相对钟差观测值以及主钟的预报钟差, 星座内时间能够实现同步。由表 2 可知, 部分主钟对应的自主守时偏差较大却可以获得较好的天稳定度, 可能原因是主钟的漂移率较小。由于不同主钟的预报性能不同以及拟合的初始值精度影响, 守时性能存在差异, 自主运行 60 d 后的时间尺度漂移最大可达 323.87 ns, 最小约 15.41 ns, 主钟的天稳定度与其对应的自主时间尺度天稳定度基本一致, 其中以 C26、C28、C29、C34 为主钟的守时性能较好, 60 d 的自主时间尺度最大偏差分别为 23.18、19.15、33.99、15.41 ns, 天稳定度分别为 6.26×10^{-15} 、 6.41×10^{-15} 、 7.24×10^{-15} 、 6.66×10^{-15} 。

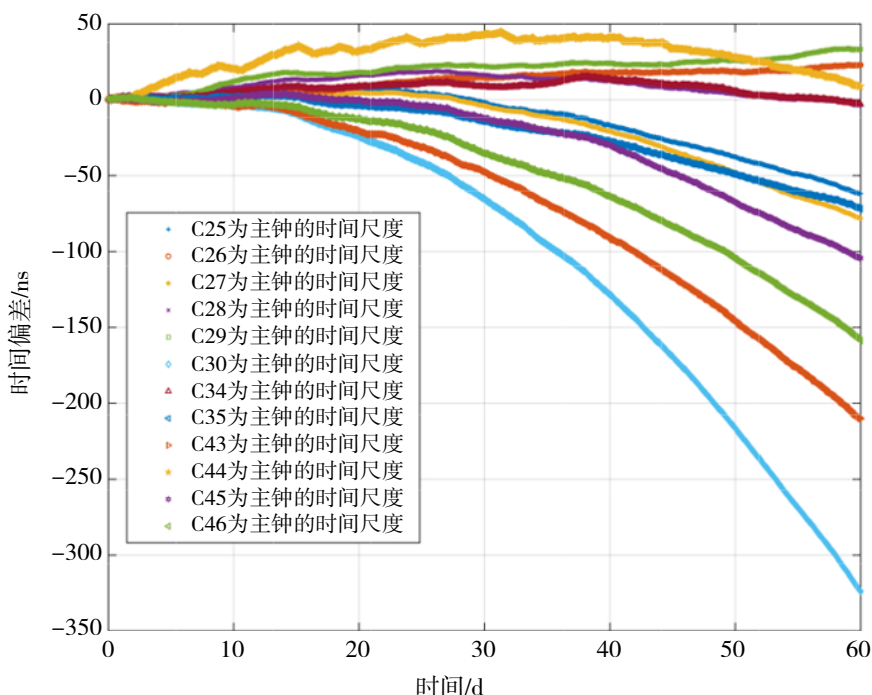


图 1 自主时间尺度漂移

表 2 不同主钟时间尺度偏差和稳定度

主钟	时间尺度最大偏差/ns	时间尺度天稳定度	主钟天稳定度
C25	61.90	6.09×10^{-15}	6.10×10^{-15}
C26	23.18	6.26×10^{-15}	6.31×10^{-15}
C27	78.02	6.58×10^{-15}	6.39×10^{-15}
C28	19.15	6.41×10^{-15}	6.41×10^{-15}
C29	33.99	7.24×10^{-15}	7.28×10^{-15}
C30	323.87	7.09×10^{-15}	6.83×10^{-15}
C34	15.41	6.66×10^{-15}	6.82×10^{-15}
C35	71.87	5.15×10^{-15}	5.27×10^{-15}
C43	210.24	7.98×10^{-15}	8.19×10^{-15}
C44	45.26	1.60×10^{-14}	1.56×10^{-14}
C45	104.50	7.56×10^{-15}	7.87×10^{-15}
C46	158.89	7.05×10^{-15}	7.11×10^{-15}

2.2 基于集中式 Kalman 滤波的自主守时性能分析

时间尺度算法可综合钟组内各种噪声得到噪声水平优于任一台钟的虚拟钟，对星载钟噪声特性的精确描述有利于提升自主时间尺度的稳定度。采用 GFZ 提供的 200 d 的 BDS-3 精密钟差产品，数据采样间隔为 5 min，通过 Hadamard 方差表征 24 颗 MEO 卫星钟的频率稳定度，采用最小二乘估计各卫星钟的噪声扩散系数。卫星钟的主动调频行为会对稳定度的估计造成影响，为了准确估计卫星钟的频率稳定度，钟差数据按照文献[31]的方式进行预处理后再进行 Hadamard 方差的计算，各卫星的 Hadamard 方差曲线图以及噪声系数如图 2 和表 3 所示。

由图表可知，星载氢钟主要受 WFM 的影响，星载铷钟主要受 WFM 和 RWFM 的影响。对于 WFM，不同卫星钟噪声系数在同一量级，系数大小基本在 $(1\sim 3) \times 10^{-24}$ 范围内，氢钟 σ_1^2 的平均值为 1.67×10^{-24} ，铷钟 σ_2^2 的平均值为 1.68×10^{-24} 。由图 2 可见，因观测噪声和钟噪声无法分离，平滑时间小于 1 ks 时主要体现观测噪声的影响，导致氢钟优良的短期稳定性不能很好的体现。对于 RWFM，铷钟的噪声系数存在一定差异，最大可相差 3 个数量级，铷钟 σ_2^2 的平均值为 2.10×10^{-32} 。本文忽略 RRFM 以及氢钟受到的 RWFM 的影响，在试验中将这两类噪声系数设为零。

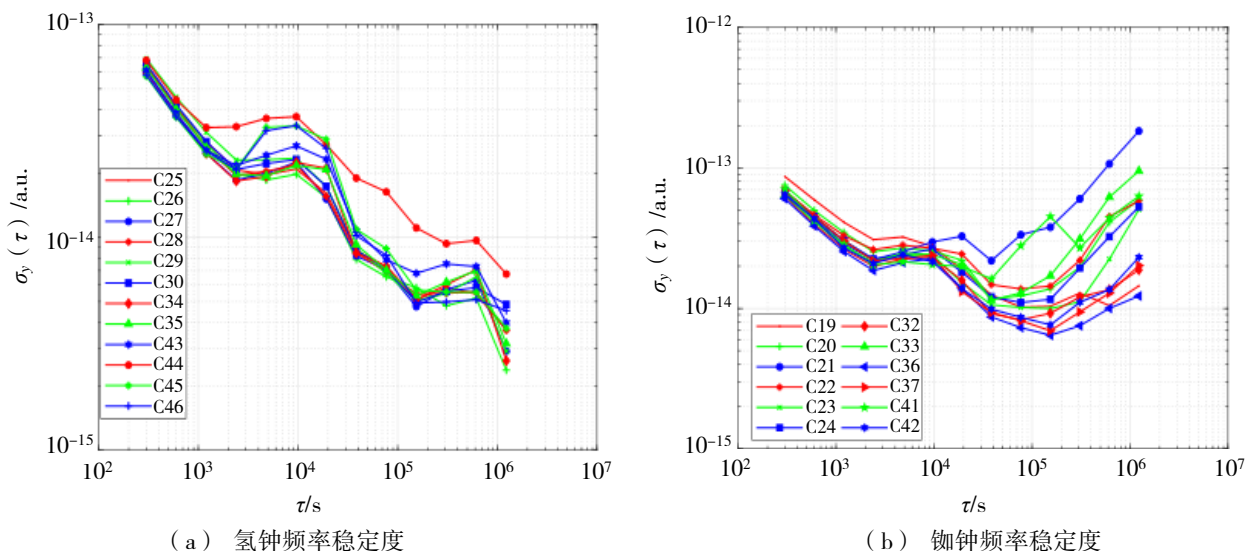


图 2 频率稳定度

表 3 卫星钟噪声系数

PRN	σ_1^2	σ_2^2	PRN	σ_1^2	σ_2^2
C19	2.93×10^{-24}	1.36×10^{-33}	C32	1.37×10^{-24}	4.56×10^{-34}
C20	2.00×10^{-24}	2.27×10^{-32}	C33	1.35×10^{-24}	4.13×10^{-32}
C21	1.43×10^{-24}	1.16×10^{-31}	C34	1.22×10^{-24}	0
C22	2.12×10^{-24}	2.35×10^{-32}	C35	1.29×10^{-24}	0
C23	1.60×10^{-24}	7.67×10^{-33}	C36	1.27×10^{-24}	3.93×10^{-34}
C24	1.63×10^{-24}	1.62×10^{-32}	C37	1.56×10^{-24}	7.21×10^{-34}
C25	1.31×10^{-24}	0	C41	1.48×10^{-24}	1.98×10^{-32}
C26	1.18×10^{-24}	0	C42	1.44×10^{-24}	1.77×10^{-33}
C27	1.17×10^{-24}	0	C43	1.66×10^{-24}	0
C28	1.26×10^{-24}	0	C44	3.25×10^{-24}	0
C29	1.67×10^{-24}	0	C45	2.34×10^{-24}	0
C30	1.46×10^{-24}	0	C46	2.24×10^{-24}	0

考虑各星噪声对守时的影响, 验证 Kalman 滤波集中式自主守时算法的时间同步功能。平滑时间小于 1 ks 时氢钟稳定度的设计指标相对于铷钟应提升 3 倍, 但因观测噪声影响导致计算的指标差别不明显, 为此对预报性能较好的 C26、C28、C29、C34 四台氢钟的 σ_1 缩小 3 倍以分析自主守时性能提升效果, 设置两种场景如表 4 所示。

表 4 集中式自主守时场景设置

场景	钟噪声
Case1	各星钟根据噪声特性分别设置, 具体见表 3
Case2	Case1 中 C26、C28、C29、C34 四台氢钟 σ_1 缩小 3 倍, 即氢钟 σ_1^2 缩小 9 倍

对每台钟的噪声系数进行设置, 集中式 Kalman 滤波自主守时算法能够实现星座时间同步。根据式 (15) 计算的两种场景 60 d 的自主时间尺度相对于地面时间尺度的偏差如图 3 所示。

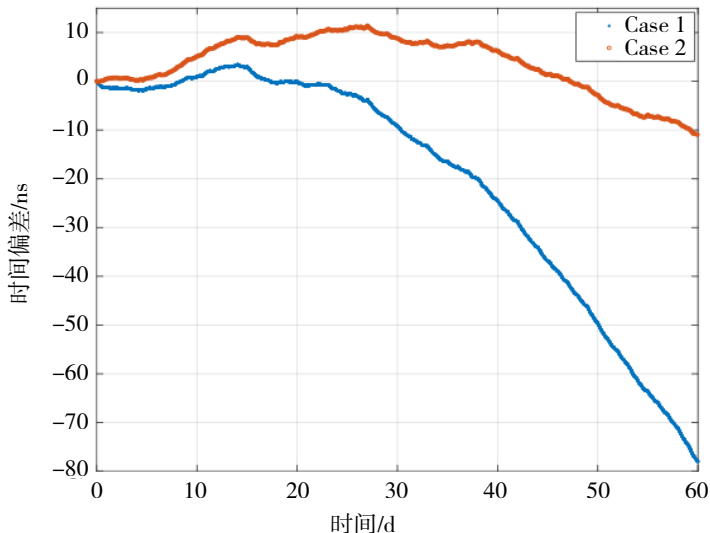


图 3 自主时间尺度漂移

结果表明, Case1 和 Case2 的自主时间尺度最大偏差分别为 78.0 ns 和 11.4 ns, Case1 中最大自主守时偏差大于预报性能较好的单一氢钟的钟差预报漂移的最大值, 可能原因是星载钟噪声系数估计存在误差, 没有充分发挥不同类型星载原子钟的性能。Case2 中通过对预报性能较好的氢钟的噪声系数进行优化可以减少时间基准漂移, 维持的最大自主时间尺度漂移小于任意单一主钟的最大钟差预报漂移偏差。

对两种场景下的自主时间尺度的稳定度进行分析, 同时给出了单星的频率稳定度曲线, 结果如图 4 所示。可以看出, 天稳定度以下指标提升显著, 不同的自主时间尺度相较于单星都可以获得更高的频率稳定度, 天稳定度优于 5.0×10^{-15} 。

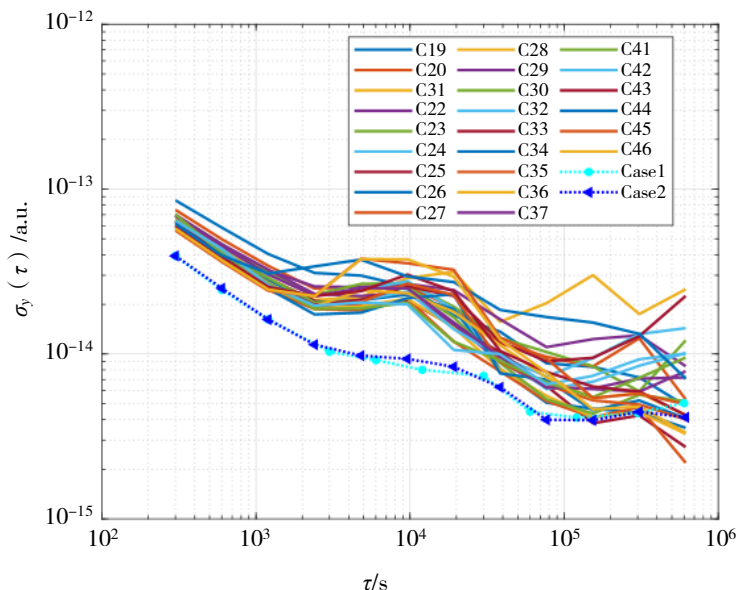


图 4 各卫星钟和自主时间尺度 Hadamard 方差

3 结语

自主守时是实现导航卫星自主运行的关键因素之一, 维持稳定的天基时间尺度有利于增强卫星导航系统的生存能力。本文采用 BDS-3 的 MEO 卫星 200 d 的精密钟差数据进行星载钟噪声分析, 在不同场景下进行 60 d 自主守时试验, 可以得到以下结论:

① 指定预报性能较好的单一氢钟为主钟进行 60 d 钟差预报, 各星钟和主钟进行比对的守时模式可以获得较好的守时性能, 这说明将来以空间站原子钟为基准降低导航星座时间漂移, 可以作为天基自主守时的备选方案。

② 对于集中式 Kalman 滤波自主守时模式, 对预报性能较好的氢钟的噪声系数进行优化可以获得更好的守时性能, 维持的自主时间尺度漂移优于 11.4 ns, 小于任意单一主钟的最大钟差预报漂移偏差, 且频率稳定度提升显著, 天稳定度优于 5.0×10^{-15} 。下一步需要优化噪声估计模型, 充分发挥不同类型星载钟的性能, 进一步提升自主守时能力。

致谢: 感谢 GFZ 提供精密钟差产品, 感谢中国科学院微小卫星创新研究院和中国空间技术研究院提供北斗三号卫星时频技术支持。

参考文献:

- [1] ANANDA M P, BERSTEIN H, BRUCE R W. Autonomous navigation of the Global Positioning System satellite[C]//AIAA Guidance and Control Conference, Seattle: WA, 1984.
- [2] ANANDA M P, BERSTEIN H, CUNNINGHAM K E, et al. Global Positioning System (GPS) autonomous navigation[C]//IEEE Position Location & Navigation Symposium, IEEE, 1990: 497-508.
- [3] MENN M D, BERNSTEIN H. Ephemeris observability issues in the Global Positioning System (GPS) autonomous navigation (AUTONAV)[C]// Proceedings of 1994 IEEE Position, Location and Navigation Symposium-PLANS'94, IEEE, 1994: 677-680.
- [4] MARTOCCIA D, BERNSTEIN H, CHAN Y, et al. GPS satellite timing performance using the autonomous navigation (autonav)[C]// Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1998), 1998: 1705-1712.
- [5] WU A. Estimate of the GPS block IIR AutoNav clock behavior[C]//Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium (Cat. No. 99CH36313), IEEE, 1999(1): 279-282.
- [6] MAINE K P, ANDERSON P, LANGER J. Crosslinks for the next-generation GPS[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, IEE, 2003(4): 1589-1596.
- [7] RAJAN J A, ORR M, WANG P. On-orbit validation of GPS IIR autonomous navigation[C]//Proceedings of the 59th Annual Meeting of the Institute of Navigation and CIGTF 22nd Guidance Test Symposium (2003), 2003: 411-419.
- [8] CLARK J, LANGER J, POWELL T. What GPS might have been, and what it could become[J]. Crosslinks, 2010, 11(1): 70-77.
- [9] BRINKMANN G, CREVALS S, FRYE J. An independent set approach for the communication network of the GPS III system[J]. Discrete Applied Mathematics, 2013, 161(4): 573-579.
- [10] SANCHEZ M, PULIDO J A, AMARILLO F, et al. Inter-satellite ranging and communication links in the frame of the GNSS infrastructure evolutions[C]//Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2008), 2008: 2538-2546.
- [11] FERNANDEZ F A. Inter-satellite ranging and inter-satellite communication links for enhancing GNSS satellite broadcast navigation data[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(5): 786-801.
- [12] D'ANGELO P, FERNANDEZ A, GUARDABRAZO T, et al. Enhancement of GNSS navigation function by the use of inter-satellite links[C]// 2012 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk Netherlands: IEEE, 2012: 1-6.
- [13] BONINO L. Application of optical quantum links to GNSS, an ESA study[EB/OL]. (2015-03-31)[2015-05-06]. http://www.ienit/~brida/Quantum_2012/doc/Bonino.Pdf.
- [14] GERLIN F, LAURENTI N, NALETTO G, et al. Design optimization for quantum communications in a GNSS intersatellite network[C]// NavSAS Group, 2013 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Turin: IEEE, 2013: 1-6.
- [15] IGNATOVICH E I, SCHEKUTIEV A F. Analysis of opportunities of GNSS GLONASS ephemerides-time maintenance modernization using intersatellite measurement system[C]// 13th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2006-Proceedings, 2006: 229-236.
- [16] 阮仁桂, 魏子卿, 贾小林. 星间单程伪距联合监测站数据确定北斗三号卫星轨道和钟差[J]. 测绘学报, 2019, 48(3): 269-275.
- [17] RUAN R G, JIA X L, FENG L P, et al. Orbit determination and time synchronization for BDS-3 satellites with raw inter-satellite link ranging observations[J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 81-92.
- [18] PAN J Y, HU X G, ZHOU S S, et al. Time synchronization of new-generation BDS satellites using inter-satellite link

- measurements[J]. *Advances in Space Research: the Official Journal of the Committee on Space Research (COSPAR)*, 2018, 61(1): 145-153.
- [19] PAN J Y, HU X G, ZHOU S S, et al. Full-ISL clock offset estimation and prediction algorithm for BDS3[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(4): 1-14.
- [20] YANG Y F, YANG Y X, HU X G, et al. BeiDou-3 broadcast clock estimation by integration of observations of regional tracking stations and inter-satellite links[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2): 1-12.
- [21] 杨宇飞, 杨元喜, 陈金平, 等. 北斗三号星座拟稳钟差测定及其预报[J]. *测绘学报*, 2021, 50(12): 1728-1737.
- [22] 帅平, 曲广吉. 导航星座自主导航的时间同步技术[J]. *宇航学报*, 2005, 26(6): 768-772.
- [23] 帅平, 曲广吉, 陈忠贵. 导航星座自主导航技术研究[J]. *中国工程科学*, 2006, 8(3): 22-30.
- [24] 顾亚楠, 陈忠贵, 帅平. 基于 Hadamard 方差的导航星座自主时间同步算法研究[J]. *中国空间科学技术*, 2010, 30(1): 1-9.
- [25] YANG Y F, YANG Y X, HU X G, et al. Inter-satellite link enhanced orbit determination for BeiDou-3[J]. *Journal of Navigation*, 2020, 73(1): 115-130.
- [26] CHEN J P, HU X G, TANG C P, et al. SIS accuracy and service performance of the BDS-3 basic system[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, 63(6): 105-116.
- [27] XIE X, GENG T, ZHAO Q L, et al. Orbit and clock analysis of BDS-3 satellites using inter-satellite link observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(7): 1-18.
- [28] GREENHALL C A. A Kalman filter clock ensemble algorithm that admits measurement noise[J]. *Metrologia*, 2006, 43(4): 311-321.
- [29] ALLAN D W. Time and frequency (time-domain) characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators[J]. *IEEE Transactions Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control*, 1987, 34(6): 647-654.
- [30] 李孝辉, 张慧君, 边玉敬. 一种频率源噪声频谱拟合方法的研究[J]. *陕西天文台台刊*, 2002, 25(2): 110-117.
- [31] 樊礼谦, 焦文海, 蔡洪亮, 等. 北斗三号卫星钟长期稳定性分析[J]. *导航定位学报*, 2022, 10(4): 11-19.