

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 利用不同时间同步体制钟差评估北斗三号星载原子钟性能
作者: 阚昊宇, 胡志刚, 吕逸飞, 谢新, 周仁宇, 赵齐乐
DOI: 10.13203/j.whugis20210286
收稿日期: 2021-06-03
网络首发日期: 2021-08-18
引用格式: 阚昊宇, 胡志刚, 吕逸飞, 谢新, 周仁宇, 赵齐乐. 利用不同时间同步体制钟差评估北斗三号星载原子钟性能. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20210286>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

利用不同时间同步体制钟差评估北斗三号星载原子钟性能

阚昊宇^{1,2} 胡志刚^{2,3} 吕逸飞^{2,3} 谢新^{2,3} 周仁宇^{2,3} 赵齐乐^{2,3}

1 武汉大学测绘学院, 湖北, 武汉, 430079

2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北, 武汉, 430079

3 国家卫星定位系统工程技术研究中心, 湖北, 武汉, 430079

摘要：全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）星载原子钟性能的优劣直接影响 GNSS 观测信号质量、测距精度、钟差预报与卫星自主导航能力，从而间接影响整个导航系统的服务性能。本文结合北斗三号系统独特的星间链路（Inter-Satellite Link, ISL）和星地时间双向比对（Two-Way Time Transfer, TWTT）体制以及常用的精密轨道与钟差确定（Orbit Determination and Time Synchronization, ODS）体制所估计的精密钟差数据，深入分析评估了北斗三号在轨原子钟服务性能。基于本文试验数据的研究结果表明，三种钟差确定体制评估的频率准确度和漂移率结果基本一致，所有卫星频率准确度在 $(-4\sim 2) \times 10^{-11}$ 范围以内，氢钟频率准确度优于铷钟，ISL 钟差评估的频率漂移率精度略优于 ODS。在评估原子钟稳定度方面，三种钟差确定体制各有优势。短期稳定度方面，ODS 钟差评估优于 ISL 钟差，基于 ODS 评估的 3000 s 稳定度可达 3×10^{-14} ，且氢钟的短期稳定性优于铷钟。中长期稳定度方面，当平滑时间大于 1×10^4 s 时，采用 ISL 体制的钟差评价中长期稳定度更接近于北斗三号星载原子钟的实际情况。对于 7 天以上的长期稳定度评估，基于 TWTT 的广播钟差评估结果接近于 ISL，可用于快速评估。

关键词：北斗三号；原子钟性能评估；精密钟差；星间链路；星地双向时间同步；精密定轨与时间同步

中图分类号：P228

文献标志码：A

DOI:10.13203/j.whugis20210286

星载原子钟是维持全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）时间基准的重要载荷，其性能的优劣直接影响到整个导航系统的服务性能^[1]。星载原子钟性能与 GNSS 观测信号质量、测距精度、钟差预报与卫星自主导航等均直接相关^[2]。

按北斗系统三步走发展战略，我国于 2012 年建成服务于我国及周边地区的北斗二号卫星导航系统（Second Generation BeiDou Navigation Satellite System, BDS-2）^[3]。该系统全部搭载了我国自主研发的国产铷原子钟^[4]。黄观文等利用武汉大学分析中心提供的精密钟差数据分析表明^[5]，BDS-2 三种轨道类型的铷钟万秒稳定度相差不大，其万秒稳定度均值

收稿日期：2021-06-03

项目资助：国家自然科学基金（42030109）；中国博士后科学基金（2020M682482）。

第一作者：阚昊宇，硕士生，主要从事北斗系统性能评估方法的研究。kanhaoyu@whu.edu.cn

通讯作者：胡志刚，博士，副教授。Zhigang.hu@whu.edu.cn

约为 2.37×10^{-13} 。刘帅等进一步利用国际 GNSS 监测评估系统(International GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS) 提供的事后精密钟差数据评估了 BDS-2 铷钟性能, 其天稳定度在 $(2 \sim 4) \times 10^{-14}$ 量级, 与 Block IIR 卫星铷钟精度相当^[6]。2020 年建成的北斗三号(Third Generation BeiDou Navigation Satellite System, BDS-3) 卫星搭载了新型铷原子钟和性能更优的氢原子钟^[7]。杨玉峰等通过分析武汉大学分析中心提供的精密钟差产品, 表明 BDS-3 卫星钟频率准确度、漂移率以及稳定度性能均优于 BDS-2^[8]。Wei Wang 等从原子钟系统性特征、生产厂家和钟差周期性等方面评估了 BDS-3 中轨道(Medium Earth Orbit, MEO) 卫星, 认为其性能已与 GPS III-A、Galileo-FOC 卫星处于同一水平^[9]。毛亚等利用 iGMAS 卫星钟差数据分析对比了 BDS-2 和 BDS-3 卫星钟频率稳定性, 表明 BDS-3 卫星的频率稳定性相比 BDS-2 提升了 20.85%~75.09%^[10]。

以上文献的评估数据均采用精密定轨与时间同步(Orbit Determination and Time Synchronization, ODTS)体制获得的精密钟差产品。这些产品精度较高且易于通过网络免费获取, 也是目前评估原子钟性能的主要数据源^[8, 9, 11-15]。值得注意的是, ODTS 钟差是利用 L 波段进行精密定轨得到, 因而轨道误差和钟差误差存在强相关性。文献[11]研究表明, 受到周期性变化的轨道误差影响, 基于 ODTS 体制的星地观测数据获得的精密钟差计算的稳定度在 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ s 之间存在明显的“凸起”。ODTS 钟差估值精度不但与定轨策略密切相关, 还与采用的地面跟踪站数量和分布有关, 因而采用不同分析中心的精密钟差产品所评估的结果存在一定差异^[13]。为降低对地面站的数量与分布客观限制, 北斗二号卫星系统采用了自主创新的基于 L 波段星地双向时间比对(Two-Way Time Transfer, TWTT)体制^[7]进行广播钟差预报。TWTT 通过上行和下行伪距作差求取卫星钟差, 可消除公共误差源的影响, 如对流层延迟、卫星轨道误差和地面测站坐标误差等^[16], 电离层的影响也大幅度减小, 进而可高精度确定卫星钟相对于主控站建立保持的北斗时(BeiDou Time, BDT)的偏差。为适应服务星座从区域扩展到全球范围, 北斗三号全球系统增加了基于 Ka 波段的星间链路(Inter-Satellite Link, ISL)时间同步体制。陈金平等研究表明 ISL 钟差测定精度可达 0.2ns^[8], 这对于提高星上自主时间维持精度具有重要意义。北斗三号三种钟差确定体制的比较如表 1 所示。

综上所述, 针对采用 ODTS 体制的精密钟差进行原子钟性能评估易受到周期性的轨道误差影响的现象^[11, 16], 本文结合北斗三号系统的特性, 对比分析了基于 ODTS、ISL 及 TWTT 三种体制估计的钟差结果在准确度、漂移率以及在不同平滑时间尺度上的稳定度性能指标的一致性, 尤其是中长期稳定度指标的特性表现, 为北斗系统在轨卫星原子钟性能评估和监测提供参考。

表 1 北斗系统不同钟差确定体制比较

Tab. 1 Comparison of Different Clock Bias Determination System of BDS

钟差确定体制	信号传输 波段	频率范围 /GHz	观测模式	观测模型	与定轨误差 影响	典型精度/ns
ODTS	L	1~2	星-地单向	非差或双差伪距 和载波	大	优于 0.2 ^[17]
ISL	Ka	20~30	星-星双向	双向伪距作差	小	优于 0.2 ^[7, 11]
TWTT	L	1~2	地-星-地双向（卫星中转）	上行和下行伪距 作差	小	1.0（广播星历） ^[18]

1 评估方法

1.1 数据预处理

星载原子钟在轨运行期间由于受到外界环境变化、设备故障、硬件老化等异常情况的影响，钟差序列可能出现粗差甚至中断，因此在评估星载原子钟性能前，需要对于原始钟差数据进行预处理：调频或长时间的数据中断的卫星不纳入分析范围；偶然出现的单个或数个采样中断通过线性插值进行拟合；粗差直接删除处理。其中，粗差检测方法采用中位数法（median absolute deviation, MAD）^[9]，检测的对象是原始钟差相位数据转换得到的频率数据，具体计算方法如式（1）所示：

对于 $N+1$ 个钟差相位数据，可以通过下式转换得到 N 个频率数据

$$y_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \quad (1)$$

其中， y 为频率数据， x 为相位数据， Δt 为两次采样间隔之差。在得到的频率序列中，满足下式的频率值被视为粗差予以剔除：

$$|y_i| > m + n \cdot MAD \quad (2)$$

式（2）中， m 为 y 序列的中位数， $MAD = Median(|y_i - m|) / 0.6745$ ， n 为经验取值，一般为 3~5，本文中取 3。

在实际计算中，有时会出现频率漂移率过大导致常规 MAD 检测方法失效，此时可以采用去除线性趋势项的频率数据进行检测。需要注意的是，粗差同时也可能对线性趋势项计算造成严重影响，故去除粗差和去除线性趋势项步骤需迭代进行，直至无粗差值被检测出为止。以 C23（铷钟，频率漂移率较大）、C27 卫星（氢钟，频率漂移率较小）的 ODTS

体制精密钟差为例，采样间隔为 300 s，C23 和 C27 卫星钟差数据预处理前见图 1 (a)、1 (b) 以及预处理后见图 1 (c)、1 (d)，可见该预处理方法粗差别除效果较好，且能保留绝大部分的数据，在本例中数据剔除率小于 0.4%。

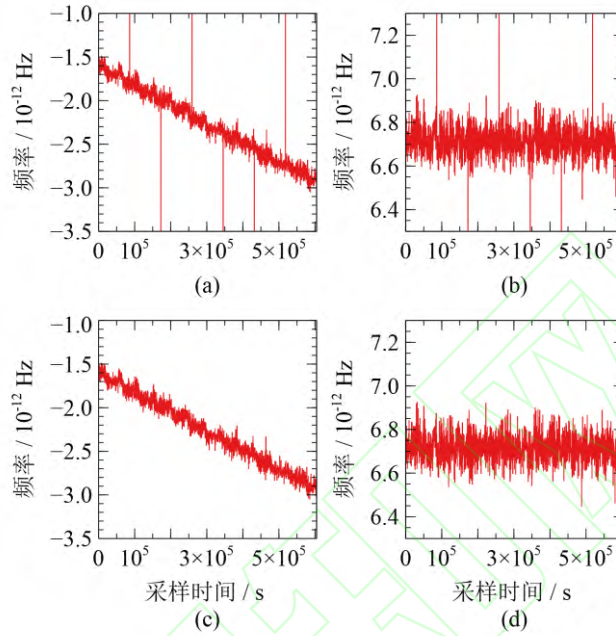


图 1 预处理前后频率数据对比

Fig. 1 Frequency Data Before / After Preprocessing

1.2 卫星钟性能评估指标

衡量卫星钟性能的指标，主要包括频率准确度、频率漂移率和频率稳定度^[1, 19]。

1.2.1 频率准确度

频率准确度指实际输出频率与标称频率的一致程度，定义为

$$A = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (3)$$

式中， A 为频率准确度， f 为实际频率， f_0 为标称频率。对于给定时段 T ，卫星钟差相位数据 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的频率准确度计算公式如式 (4) 所示：

$$A_T = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (4)$$

式中， $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为卫星钟差相位数据； $t_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为采样时序； N 为采样个

数： $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ ； $\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$ 。由（4）式对卫星钟相位数据进行拟合得到的频率准确度为相对频率偏差，可视为给定时段 T 内的典型值。考虑到卫星系统频标准确度较高，在实际评估时可以近似地认为相对频率偏差就是星载原子钟频率准确度^[19]。由于受频标内在因素和外部环境因素的共同影响，频标的实际输出频率不是一个固定不变的值，而是在一定范围内变化。因此应尽量采用较长平均时间来测量，以减少随机变化影响。但时间长度 T 也不宜取太长，以避免受频率漂移率影响，本文时段长度采用 1 天。

1.2.2 频率漂移率

频率漂移率表征原子钟输出频率随时间单调增加或减少的线性变化率，其计算公式如式（5）^[6]：

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (5)$$

其中， D 为频率漂移率， $y_i (i=1,2,3\dots N)$ 为 t_i 时刻的频率数据，实际测量中可由相位数据推算； τ 为取样时间； $t_i (i=1,2,\dots,N)$ 为取样时序； $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ ； $\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$ 。

1.2.3 频率稳定性

频率准确度及频率漂移率反映原子钟的系统性变化分量，经过评估后在短时间内可以通过建模较好地消除其影响，而原子钟的随机性变化分量一般通过频率稳定度表示。为了提高长期稳定性评估的置信度^[20]，本文采用了 Allan 总方差与 Hadamard 总方差两种方式计算频率稳定性。

对于一组 N 个时差（相位）偏差数据序列 $\{x_n, n=1,2,\dots,N\}$ ，其采样间隔为 τ_0 ，该序列的 Allan 总方差计算如下^[1]：将原始时差序列 $\{x_n\}$ 映射产生一个延伸序列 $\{x_n^*\}$ ：

$$\begin{cases} x_n^* = x_n & n=1,\dots,N \\ x_{1-j}^* = 2x_1 - x_{1+j} & x_{N+j}^* = 2x_N - x_{N-j} & j=1,\dots,N-2 \end{cases} \quad (6)$$

其平滑时间为 $\tau = m\tau_0$ 的 Allan 总方差计算如下：

$$\sigma_{total}^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2(N-2)} \sum_{i=2}^{N-1} [x_{i-m}^* - 2x_i^* + x_{i+m}^*]^2 \quad (7)$$

该序列的 Hadamard 总方差计算如下^[1]：首先选取 x_i 子序列

$\{x_i\}_n = \{x_i, i = n, \dots, n+3m\}$ ，去除线性趋势项后得到子序列 $\{^0x_i\}_n = \{^0x_i, i = n, \dots, n+3m\}$ ；然后对去除线性趋势项后的子序列按下式映射，得到延伸序列 $\{^0x_i^*\}$ ：

$$\begin{cases} ^0x_j^* = ^0x_j & j = n, \dots, n+3m \\ ^0x_{n-l}^* = 2(^0x_n) - ^0x_{n+l} & ^0x_{n+3m+l}^* = 2(^0x_{n+3m}) - ^0x_{n+3m-l} \quad l = 1, \dots, 3m \end{cases} \quad (8)$$

其平滑时间为 $\tau = m\tau_0$ 的 Hadamard 总方差计算如下：

$$H\sigma_{total}^2(\tau) = \frac{1}{6(m\tau_0)^2(N-3m)} \sum_{n=1}^{N-3m} \left\{ \frac{1}{6m} \sum_{i=n-3m}^{n+3m-1} \left[^0x_{i+3m}^* - 3(^0x_{i+2m}^*) + 3(^0x_{i+m}^*) - ^0x_i^* \right]^2 \right\} \quad (9)$$

注意，评估稳定度时需将（7）、（9）式计算的方差进行开方，取其标准差。

2 评估结果

本文选取了不同钟差确定体制下的钟差产品，分析北斗三号系统卫星钟性能：（1）精密钟差产品（ODTS 体制）采用国际 GNSS 服务（International GNSS Service, IGS）武汉大学分析中心提供的 WUM 最终精密钟差产品，采样间隔为 300 s；（2）广播星历钟差数据（TWTT 体制）采用 iGMAS 数据中心提供的北斗综合广播星历（B1I/B3I 播发），采样间隔为 3600 s（仅考虑数据龄期 AODE \leq 1 的情况）；（3）北斗三号星间链路精密钟差（ISL 体制）数据，采样间隔为 300 s。上述三种钟差数据时段均为 2019 年年积日 170 天到 2019 年年积日 230 天，一共 61 天的钟差数据。

2.1 频率准确度

根据第二节的方法将原始钟差数据进行预处理剔除粗差后，按公式（4）计算得到三种钟差确定体制的不同卫星频率准确度（限于篇幅，仅选取部分典型卫星），其 61 天频率准确度的平均值与标准差结果见表 2。由表 2 可知，使用三钟体制得到的频率准确度统计结果一致性很好，所有卫星的频率准确度在 $(-4\sim 2) \times 10^{-11}$ 范围以内。按铷钟和氢钟分类统计结果来看，北斗三号首次采用的氢钟其频率准确度表现比铷钟更加优异，其标准差比铷钟高出两个数量级。铷钟卫星的频率准确度的标准差显著大于氢钟，这可能与较大的频率漂移率有关。

表 2 三种钟差确定体制得到的频率准确度（按天计算）及统计值

Tab. 2 Frequency Accuracy (Calculated by Day) and Statistics Obtained by the Three Clock Bias Determination

卫星 PRN	Systems					
	频率准确度 / 10^{-12}					
	ODTS		ISL		TWTT	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
C20	-27.75	3.03	-27.93	2.95	-28.02	2.95

C21	-13.29	2.23	-13.14	2.25	-13.22	2.26
C22	-34.04	2.92	-34.09	2.92	-34.19	2.93
C23	2.04	3.87	1.85	4.03	1.74	4.03
C32	1.29	3.53	0.57	3.77	0.44	3.77
C33	-23.93	1.74	-24.22	1.72	-24.27	1.73
C37	-35.34	3.14	-36.13	3.16	-36.23	3.17
铷钟平均值	-18.72	2.92	-19.01	2.97	-19.11	2.98
C25	-12.50	0.05	-12.50	0.03	-12.51	0.05
C26	13.91	0.03	13.91	0.02	13.90	0.03
C28	6.79	0.03	6.79	0.01	6.77	0.03
C29	5.28	0.03	5.27	0.02	5.27	0.03
C30	6.43	0.05	6.43	0.03	6.42	0.05
氢钟平均值	3.98	0.04	3.98	0.02	3.97	0.04

2.2 频率漂移率

三种钟差确定体制的频率漂移计算结果如图 2，其中使用氢钟的卫星 PRN (Pseudorandom Noise, 伪随机码)用“*”标注。整体上判断，三种钟差确定体制的频率漂移率统计值规律非常一致，即铷钟频率漂移率范围约 $(-1\sim-3)\times 10^{-13}/\text{d}$ ，而氢钟更小，约 $(1\sim 2)\times 10^{-14}/\text{d}$ 。此外，铷钟的频率漂移率系统性地呈负值。但从统计标准差来看，无论是铷钟还是氢钟，基于 ISL 体制的频率漂移率标准差比 ODTS 要小 3~4 倍，这表明本试验基于 ISL 体制钟差评估的频率漂移率精度优于 ODTS。对于频率漂移率较大的铷钟，基于 TWTT 体制得到的频率漂移率标准差介于 ISL 和 ODTS 之间，但对于氢钟而言，其标准差并没有得到相应的减小，反而比 ODTS 的标准差略差（具体原因须进一步研究）。

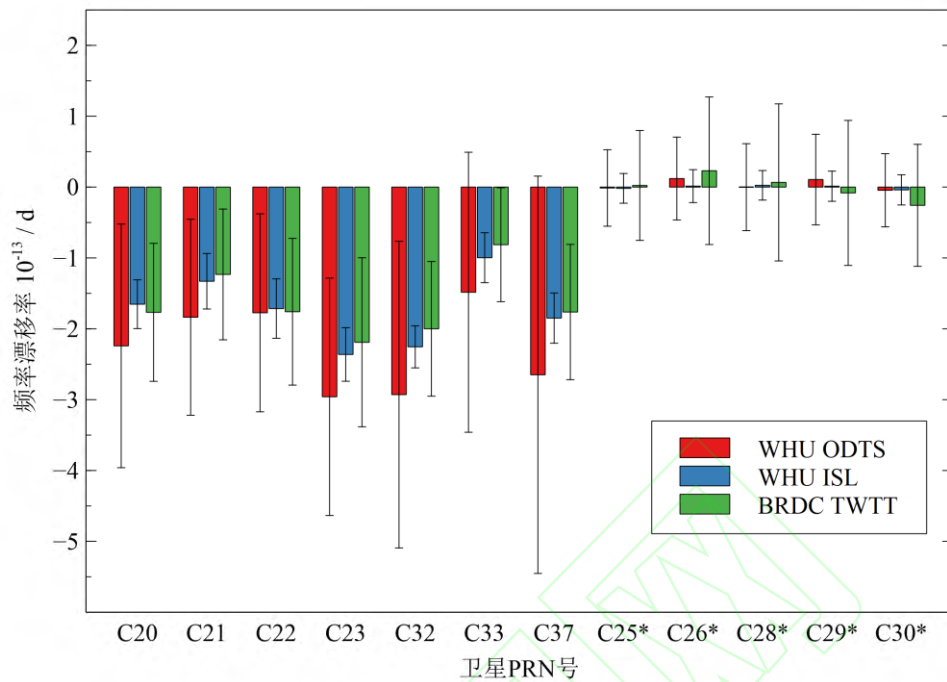


图 2 三种钟差确定体制得到的频率漂移率结果对比 (PRN 上标注为*的卫星钟为氢钟)

Fig. 2 Comparison of Frequency Drift Obtained by the Three Clock Bias Determination Systems (Satellites with Hydrogen Clock are Marked “*” on PRN)

2.3 频率稳定度

由本文前节评估结果可知，北斗三号卫星搭载的铷钟和氢钟频率漂移率统计结果表现出较大的差异。根据这一特性，本文采用了 Allan 总标准差与 Hadamard 总标准差两种方法评估以上两种原子钟稳定度性能，评估结果如图 3、图 4 所示。

Allan 总标准差与 Hadamard 总标准差评估结果相比较：铷钟在平滑时间 $\tau = 1 \times 10^4$ s 以后其趋势就出现明显的上扬。其主要原因是 Allan 总标准差仍是基于相对频率偏差的一次差分数据，容易受到频率漂移率的影响。评估结果显示北斗三号铷原子钟的线性频漂较大，线性频漂会引起 Allan 总标准差的评估误差与平滑时间成近似正比，平滑时间越长，其评估的结果偏离真值越远。本例表明，对于平滑时间超过 3×10^3 s 时，不宜采用 Allan 总标准差评估北斗三号铷原子钟，而应该采用受线性频漂影响很小的 Hadamard 总标准差(见图 4)。氢钟在平滑时间 $\tau < 1 \times 10^5$ s 时采用 Allan 总标准差和 Hadamard 总标准差评估的稳定度一致性较好，但在 $\tau > 3 \times 10^5$ s 时，Allan 总标准差评估结果出现了与图 3 铷钟类似的“上扬”，而采用 Hadamard 总标准差不存在这一现象。可能原因是随着平滑时间的增加，未考虑频漂改正的 Allan 总标准差对氢钟稳定度评估仍然有一定影响。

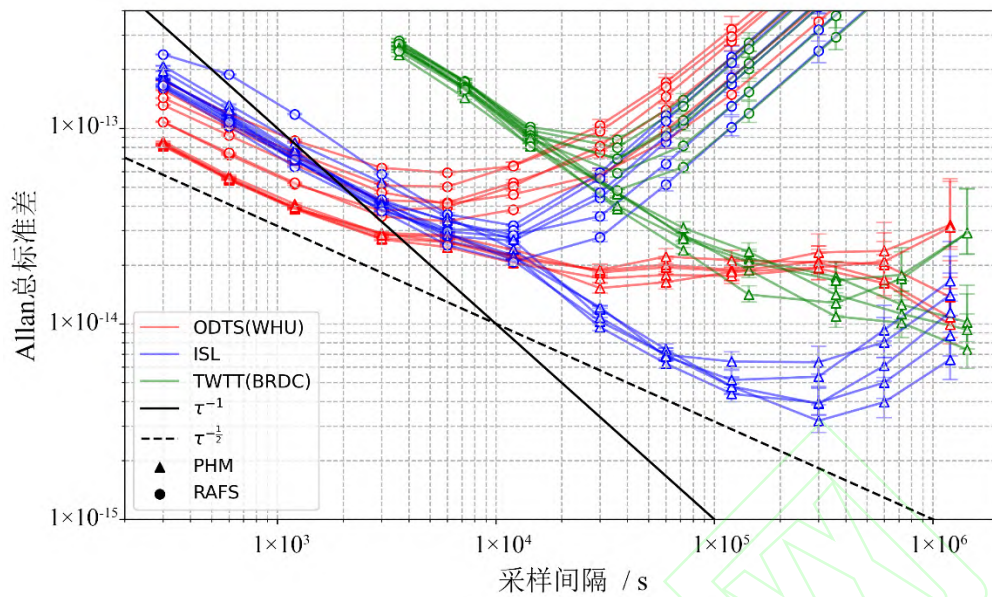


图 3 基于 Allan 总标准差的频率稳定度评估结果（红色为精密轨道与钟差确定体制，蓝色为星间链路体制，绿色为星地时间双向对比体制）

Fig. 3 Frequency Stability Based on Total Allan Deviation(Blue: ISL result, Red: ODTS result, Green: TWTT result)

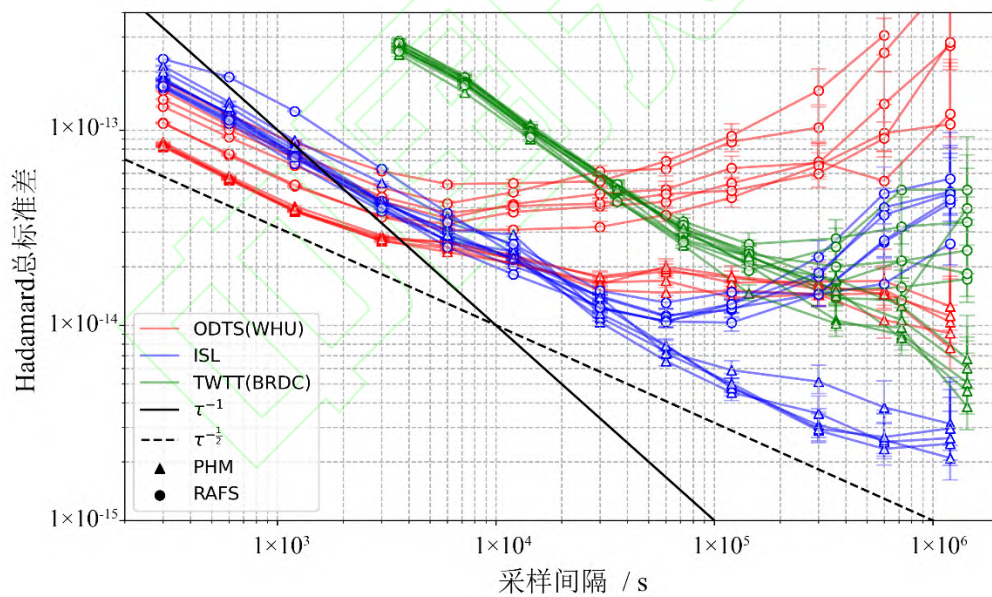


图 4 基于 Hadamard 总标准差的频率稳定度评估结果（红色为精密轨道与钟差确定体制，蓝色为星间链路体制，绿色为星地时间双向对比体制）

Fig. 4 Frequency Stability Based on Total Hadamard Deviation(Blue: ISL result, Red: ODTS result, Green: TWTT result)

对 ODTS、TWTT、ISL 三种体制的钟差评估结果相比较（见图 4），可得如下规律：

- 1) 短期稳定度方面，当平滑时间 $\leq 1 \times 10^4$ s 时，基于 ODTS 体制精密钟差评估的短期稳定度优于 ISL 体制。基于 ODTS 体制精密钟差评估的 300 s 稳定度优于 1×10^{-13} ，3000 s 稳定

度可达 3×10^{-14} ，且氢钟的短期稳定性优于铷钟。ISL 短期稳定性评估结果偏低可能原因是 ISL 的 Ka 测距精度约为 $0.03 \sim 0.05 \text{ m}^{[11]}$ ，而 ODTS 得益于 mm 级高精度载波观测值，其短期稳定度评估结果更接近卫星钟的实际性能。北斗广播钟差精度较低且采样间隔为 3600 s ，因此其频率稳定度平滑时间只能从 3600 s 开始，这决定了其不能用于评估短时稳定性。

2) 中长期稳定度方面，当平滑时间 $> 1 \times 10^4 \text{ s}$ 时，基于 ODTS 的铷钟稳定度评估值随平滑时间的增加其误差迅速增大。相反，采用 ISL 体制的铷钟稳定度评估值随着平滑时间的增加其评估指标得到显著提高，铷钟和氢钟万秒稳定度约 $(2 \sim 3) \times 10^{-14}$ ，天稳定度铷钟约 1×10^{-14} ，而氢钟为 5×10^{-15} ，10 天稳定度氢钟可达 2×10^{-15} ，这与 TWTT 体制的结果逐渐靠近。整体而言，氢钟的中长期稳定度性能明显优于铷钟，这对于卫星系统长时间自主运行保持时间同步十分重要。就本文所采用的三种体制数据而言，采用 ISL 体制的钟差评价中长期稳定度更接近于北斗三号星载原子钟的实际情况。如果参与 ODTS 解算的北斗地面站越来越多，分布越来越均匀时，其精密钟差评估结果将得到进一步改善。

3) 钟差随机特性对频率稳定度的影响。当平滑时间 $\tau < 4 \times 10^3 \text{ s}$ 时，无论是 Allan 总标准差还是 Hadamard 总标准差，其氢钟和铷钟稳定度随平滑时间的变化关系（斜率）接近 $-1/2$ （图 4 中虚线），这表明在该平滑时间段内两种评估方法均不受频率漂移率的影响，且其频率噪声表现为频率白噪声^[16, 21]；当平滑时间 $5 \times 10^3 \text{ s} < \tau < 2 \times 10^4 \text{ s}$ 时，无论是氢钟还是铷钟，利用 ODTS、ISL 两种体制钟差计算的 Hadamard 总标准差均存在“凸起”现象，这一现象在北斗二号和北斗三号以及其他 GNSS 系统均有发现^[16, 22, 23]，主要原因是受到轨道周期的影响^[21]。ISL 体制的钟差受轨道周期性误差影响较小，但在不同的平滑时间上也出现了一定程度“凸起”现象，这表明除了上述轨道周期性误差影响外，还可能与星载原子钟本身的状态有关。受到周期性太阳光照引起的卫星表面温度变化可能是造成卫星钟性能波动的原因之一^[16]。

就评估结果而言，在整个平滑时段上，评估短期稳定度建议采用 ODTS 体制钟差；中期稳定度优先考虑 ISL 体制钟差，ODTS 次之；对于 7 天以上的长期稳定度评估，三种体制的钟差均可采用。针对不同平滑时间段，评估稳定度时建议采用的钟差确定体制见表 3。

表 3 不同平滑时间段适宜采用的钟差确定体制

Tab. 3 The Clock Bias Determination System Suitable for Different Averaging Time

平滑时间 τ / s	ODTS	ISL	TWTT
$< 3 \times 10^3$	适宜	一般	不适宜
$3 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$	一般	适宜	不适宜
$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$	一般	适宜	一般

3 结语

本文结合北斗三号系统独特的观测手段，采用精密轨道与钟差确定（ODTS）、星间链路（ISL）和星地时间双向比对（TWTT）三种体制确定的钟差产品，分析评估了北斗三号在轨原子钟准确度、漂移率和稳定度等服务性能。基于本文试验数据的评估结果，可得如下结论：

1) 三种钟差确定体制均可用于评估在轨原子钟频率准确度，其统计结果一致性好，所有卫星钟的频率准确度在 $(-4\sim 2) \times 10^{-11}$ 范围以内。北斗三号首次采用的氢钟其频率准确度优于铷钟，其标准差比铷钟高出两个数量级。

2) 三种钟差确定体制均可用于评估在轨原子钟频率漂移率，其统计规律基本一致，铷钟频率漂移率范围约为 $(-1\sim 3) \times 10^{-13}/\text{d}$ ，而氢钟更小，约为 $(1\sim 2) \times 10^{-14}/\text{d}$ 。统计表明，无论是铷钟还是氢钟，基于 ISL 体制的频率漂移率标准差比 ODTS 要小 3~4 倍，这表明本试验基于 ISL 钟差评估的频率漂移率精度优于 ODTS。

3) 三种钟差确定体制的数据在评估在轨星钟稳定度方面各有优势。短期稳定度方面，基于 ODTS 体制精密钟差评估的短期稳定度优于 ISL 体制，其 300 s 稳定度优于 1×10^{-13} ，3000 s 稳定度可达 3×10^{-14} ，且氢钟的短期稳定性优于铷钟。中长期稳定度方面，当平滑时间大于 1×10^4 s 时，基于 ODTS 体制的钟差易受到较明显的轨道周期性误差影响，采用 ISL 体制的钟差评价中长期稳定度更接近于北斗三号星载原子钟的实际情况。对比分析进一步表明，对于 7 天以上的长期稳定度评估，还可采用基于 TWTT 体制广播钟差进行快速评估，其评估结果接近于 ODTS 和 ISL。

随着北斗三号全球卫星导航系统的正式开通，北斗三号特有的星间链路体制、星地时间双向比对体制（广播钟差）和经典的星地单向精密轨道和钟差确定体制将长期并存，为多种手段同时评估在轨卫星原子钟的各项服务性能、排查系统问题、监测原子钟状态提供了更为有效的途径。

参考文献

- [1] Guo Hairong. Study on the Analysis Theories and Algorithms of the Time and Frequency Characterization for Atomic Clocks of Navigation Satellites [D]; Zhengzhou: Information Engineering University, 2006. (郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2006.)
- [2] Wang Yupu, Li Bo, Bai Wenqian, et al. A Review of Navigation Satellite Clock Bias Prediction; proceedings of the 9th China Satellite Navigation Conference, Harbin, Heilongjiang, China, F, 2018 [C]. (王宇谱, 李博, 白文乾, 等. 导航卫星钟差预报研究综述; proceedings of the 第九届中国卫星

导航学术年会, 黑龙江哈尔滨, 2018

- [3] CSNO. Report on the Development of BeiDou Navigation Satellite System (version 2.1) [Z]//OFFICE C S N. Beijing. 2012)
- [4] YANG Y, TANG J, MONTENBRUCK O. Chinese Navigation Satellite Systems [M]//TEUNISSEN P J G, MONTENBRUCK O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Cham; Springer International Publishing. 2017: 273-304.
- [5] Huang Guanwen, Yu Hang, Guo Hairong, et al. Analysis of the Mid-long Term Characterization for BDS On-orbit Satellite Clocks[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(7): 982-8. (黄观文, 余航, 郭海荣, 等. 北斗在轨卫星钟中长期钟差特性分析 [J]. 武汉大学学报-信息科学版, 2017, 42(7): 982-8.)
- [6] Liu Shuai, Jia Xiaolin, Sun Dawei. Performance Evaluation of GNSS On-board Atomic Clock [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(2): 277-84. (刘帅, 贾小林, 孙大伟. GNSS 星载原子钟性能评估 [J]. 武汉大学学报-信息科学版, 2017, 42(2): 277-84.)
- [7] Chen Jinping, Hu Xiaogong, Tang Chengpan, et al. Orbit Determination and Time Synchronization for New-generation BeiDou Satellites: Preliminary Results[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2016, 46(11): 85-95. (陈金平, 胡小工, 唐成盼, 等. 北斗新一代试验卫星星钟及轨道精度初步分析 [J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2016, 46(11): 85-95.)
- [8] Yang Yufeng, Peng Yong, Liu Menghan, et al. Performance Evaluation and Analysis of BDS-3 On-orbit Satellite Clock [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 53-60. (杨玉锋, 彭勇, 刘梦晗, et al. BDS-3 在轨卫星钟性能评估与分析 [J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 53-60.)
- [9] WANG W, WANG Y, YU C, et al. Spaceborne atomic clock performance review of BDS-3 MEO satellites [J]. Measurement, 2021, 175.
- [10] Mao Ya, Wang Qianxin, Hu Chao, et al. Analysis of the Characterization for BDS-3 Satellite Clock Error [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(1): 53-61. (毛亚, 王潜心, 胡超, 等. BDS-3 卫星钟差特性分析 [J]. 武汉大学学报-信息科学版, 2020, 45(1): 53-61.)
- [11] XIE X, GENG T, ZHAO Q, et al. Orbit and clock analysis of BDS-3 satellites using inter-satellite link observations [J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(7).
- [12] Chen Guotong, Zhang Pu, Zhang Xiaoxu, et al. Evaluation of Spaceborne Atomic Clock Performance Based on iGMAS[J]. Radio Engineering, 2018, 48(10): 831-836. (陈国通, 张璞, 张晓旭, 等. 基于 iGMAS 的星载原子钟性能评估 [J]. 无线电工程, 2018, 48(10): 831-836.)
- [13] Cheng Tong, Wang Qianxin, Hu Chao, et al. Analysis of the Atomic Clock Characteristics of BDS-2 and BDS-3 satellites [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(12): 69-76. (程彤, 王潜心, 胡超, 等. BDS-2 和 BDS-3 卫星原子钟特性分析 [J]. 测绘科学, 2020, 45(12): 69-76.)
- [14] Ding Yitao, Guo Meijun. Performance Analysis and Evaluation of GNSS Satellite Clock Based on Clock Products from Different Institutions [J]. Journal of Time and Frequency, 2020, 43(1): 72-84. (丁毅涛, 郭美军. 基于不同机构钟差产品的 GNSS 星载钟性能分析与评估 [J]. 时间频率学报, 2020, 43(1): 72-84.)
- [15] Jiang Qiuchen, Zhao Linlin, Liu Wanke, et al. Long-Term Performance Assessment of BD-2 On-Board Atomic Clocks [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(10): 1047-52. (姜秋晨, 赵琳琳, 刘万科, 等. BD-2 星载原子钟长期在轨性能评估 [J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(10): 1047-52.)
- [16] Wang Bin. Analysis of BDS Satellite Clock in Orbit, Modelling and its Prediction Research [D]; Wuhan University, 2016. (王彬. BDS 在轨卫星钟特征分析、建模及预报研究 [D]; 武汉大学, 2016.)
- [17] LV Y, GENG T, ZHAO Q, et al. Evaluation of BDS-3 Orbit Determination Strategies Using Ground-

- Tracking and Inter-Satellite Link Observation [J]. Remote Sensing, 2020, 12(16): 2647.
- [18] GUO C, RENYU Z, ZHIGANG H, et al. Statistical characterization of the signal-in-space errors of the BDS: a comparison between BDS-2 and BDS-3 [J]. GPS Solutions, 2021, 25(3).
- [19] Jia Xiaolin, Feng Laiping, Mao Yue, et al. Performance Evaluation of GPS On-board Clock [J]. Journal of Time and Frequency, 2010, 33(2): 115-20. (贾小林, 冯来平, 毛悦, 等. GPS 星载原子钟性能评估 [J]. 时间频率学报, 2010, 33(2): 115-20.)
- [20] Wang Ning, Wang Yupu, Li Linyang, et al. Stability Analysis of the Space-borne Atomic Clock Frequency for BDS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(9): 1256-63. (王宁, 王宇谱, 李林阳, 等. BDS 星载原子钟频率稳定性分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(9): 1256-63.)
- [21] Wu Yiwei, Yang Bin, Xiao Shenghong, et al. Atomic Clock Model and Frequency Stability Analysis [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(8): 1226-32. (伍贻威, 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): 1226-32.)
- [22] WU Z, ZHOU S, HU X, et al. Performance of the BDS3 experimental satellite passive hydrogen maser [J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 43.
- [23] LV Y, GENG T, ZHAO Q, et al. Characteristics of BeiDou-3 Experimental Satellite Clocks [J]. Remote Sensing, 2018, 10(11).

Performance Evaluation of BeiDou-3 Spaceborne Atomic Clock

Using Different Time Synchronization Systems

KAN Haoyu^{1,2} HU Zhigang^{2,3} LÜ Yifei^{2,3} XIE Xin^{2,3}
ZHOU Renyu^{2,3} ZHAO Qile^{2,3}

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan, 430079, China

2 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 National Engineering Center for Satellite Positioning System, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: The performance of the GNSS spaceborne atomic clock affects the entire navigation system, by having direct impact on GNSS measurement quality, ranging precision, clock prediction and satellite autonomous navigation capabilities. Different time Synchronization systems may have different impact on the evaluation of spaceborne atomic clock. Precise clock bias data determined by inter-satellite link (ISL), two-way time transfer (TWTT) and orbit determination and time synchronization (ODTS) system are used to further evaluate the performance of Beidou-3 on-orbit atomic clock. **Methods:** Quadratic polynomial model and total Allan / Hadamard variance are used to analyze the performance of the Beidou-3 satellite clock data of the three different time synchronization systems. **Results:** The result shows that the frequency accuracy and frequency drift of the above three clock bias determination systems are consistent. The frequency accuracy of all satellites is within the range of $(-4\sim 2)\times 10^{-11}$. Frequency accuracy of hydrogen clock is better than that of rubidium clock. The frequency drift based on the ISL system is slightly better than that of the ODTS; the three clock determination systems have their own advantages in evaluating the stability of the atomic clock, respectively. For short-term stability, the ODTS whose 3000s stability reaches 3×10^{-14} is better than that of ISL, and hydrogen clock is better than rubidium clock. For medium-term and long-term stability, when the averaging time is greater than 1×10^4 s, the result of ISL is closer to the actual condition of the Beidou-3 spaceborne clock; for long-term stability more than 7 days, the broadcast ephemeris bias based on TWTT system can be used for rapid evaluation, which result is close to ODTS and ISL. **Conclusions:** The three clock bias determination systems can be used to evaluate the frequency accuracy and frequency drift of on-orbit atomic clocks with basically consistent statistical results. The three clock bias determination systems have their own advantages in assessing the stability of the orbiting satellite clock when selecting different averaging time.

Key words: BeiDou-3; atomic clock performance evaluation; precise clock bias; inter-satellite link; two-way time transfer; orbit determination and time synchronization

First Author: KAN Haoyu, postgraduate, mainly focuses on performance evaluation of BeiDou system. E-mail: kanhaoyu@whu.edu.cn

Corresponding Author: HU Zhigang, PhD, associate professor. E-mail:Zhigang.hu@whu.edu.cn

Foundation Support: The National Natural Science Foundation of China (42030109) ;China Postdoctoral Science Foundation (2020M682482).

