



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: 北斗三号卫星星载原子钟频率特性评估  
作者: 孙乐园, 杨俊, 郭熙业, 黄文德  
DOI: 10.13203/j.whugis20200486  
收稿日期: 2022-03-10  
网络首发日期: 2022-04-11  
引用格式: 孙乐园, 杨俊, 郭熙业, 黄文德. 北斗三号卫星星载原子钟频率特性评估 [J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200486>



**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。

## 引用格式：

孙乐园，杨俊，郭熙业，等. 北斗三号卫星星载原子钟频率特性评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版，2022，DOI: 10.13203/j.whugis20200486 (SUN Leyuan, YANG Jun, GUO Xiye, et al. Frequency Performance Evaluation of BeiDou-3 Satellite Atomic Clocks[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20200486)

# 北斗三号卫星星载原子钟频率特性评估

孙乐园<sup>1</sup> 杨俊<sup>1</sup> 郭熙业<sup>1</sup> 黄文德<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国防科技大学, 湖南 长沙, 410073

<sup>2</sup> 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安, 710000

**摘要:**随着北斗三号全球系统的全面建成，其星载原子钟逐渐进入稳定运行状态，对星载原子钟进行性能评估对提升其全球服务性能至关重要。本文建立了星载原子钟频率特性评价指标，然后基于北斗三号卫星多星精密定轨 (Multi-satellite Orbit Determination, MPOD) 和双向卫星时间频率传递 (Two-way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT) 钟差数据分析了钟差测定精度以及星载原子钟的频率特性。分析结果表明：TWSTFT 钟差的随机噪声水平在 0.2~0.25ns, MPOD 钟差随机噪声水平均不大于 0.02ns; TWSTFT 钟差测定精度为 0.35~0.42ns, MPOD 钟差测定精度为 0.1~0.18ns; 星载原子钟频率准确度在  $10^{-12}$ ~ $10^{-11}$  量级; 氢钟频率漂移性能和长期频率稳定度整体优于铷钟，氢钟 30 天的频率漂移量均不超过  $10^{-13}$  量级，天稳达到  $10^{-15}$  量级，而铷钟普遍表现出明显的频率漂移。

**关键词:** 北斗三号; 星载原子钟; 卫星钟差; 频率特性  
**中图分类号:** TN714

**文献标志码:** A

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 作为基于时间测量的测距定位系统，其精确的时间维持与传递是提供高精度定位、导航和授时 (Positioning, Navigation and Timing, PNT) 服务的基础。为此各大 GNSS 系统均建立并维持了各自的系统时间，卫星上配置高性能原子钟维持本地时间，并溯源于各自的系统时间<sup>[1-2]</sup>。在卫星对外播发的导航信号中承载着各自的时间基准信息，因此星载原子钟成为了影响 PNT 服务性能的核心要素。

星载原子钟性能评估是卫星导航系统建设与应用的一项基础性工作，国内外均开展了大量相关研究，并且形成了针对 GPS、Galileo、北斗二号区域系统以及北斗三号试验星等在轨星载原子钟的性能评估成果，主要评估内容包括星载原子钟的周期特性<sup>[3-4]</sup>和频率特性<sup>[5-7]</sup>。而针对原子钟的频率特性主要关注频率准确度、频率漂移以及频率稳定度<sup>[8]</sup>。

贾小林等<sup>[9-10]</sup>介绍了频率准确度、频率稳定度以及频率漂移率等星载原子钟频率特性指标的定义及相应计算方法，并分析了 GPS 和北斗星载原子钟的频率特性。王宇谱<sup>[11]</sup>对比分析了北斗二号卫星和 GPS Block IIF 星载原子钟频率准确度、频率漂移率和频率稳定度的长期特性。

原子钟频率稳定度评估方法包括频域评估方法和时域评估方法。频域评估方法通过谱密度来表征频率稳定性能<sup>[12]</sup>。常用的星载原子钟频率稳定度时域评估指标包括 Allan 方差、Hadamard 方差、重叠 Hadamard 方差等<sup>[13-16]</sup>。Wang<sup>[17]</sup>利用武汉大学 IGS/MGEX 分析中心联合定轨钟差产品分析了北斗二号卫星原子钟平滑时

间在一天以内的频率稳定度。Wu<sup>[18]</sup>利用 GPS 和 Galileo 的 IGS/MGEX 钟差产品和北斗三号试验卫星双向卫星时间频率传递 (Two-way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT) 方法解算的钟差对比分析了三类系统星载原子钟的频率特性。钦伟瑾<sup>[19]</sup>分析了伽利略系统正式运行期间所有可用星载氢原子钟的频率稳定度稳定度。

随着北斗三号全球系统的全面建成，其星载原子钟逐渐进入稳定运行状态，对星载原子钟进行性能评估对提升其全球服务性能至关重要。由于星载原子钟的频率信息需要通过对钟差的测定间接得到，卫星钟差测定精度将会影响到星载原子钟的性能评估结果。北斗三号卫星钟差测定方法主要包括多星精密定轨 (Multi-satellite Orbit Determination, MPOD) 和双向卫星时间频率传递 (Two-way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT) 两种<sup>[20]</sup>。本文对两类钟差的测定精度及误差特性进行分析对比，进而根据所建立的频率特性评价指标对北斗三号星载原子钟性能进行评估。

## 1 钟差测定方法

### 1.1 MPOD 钟差

精密定轨同步解算钟差是最常用的导航卫星精密钟差确定方法，GPS、Galileo 和 GLONASS 系统均采用该方法实现导航卫星与地面站之间的时间同步。其基本原理是在利用伪距和载波相位观测值进行卫星轨道

收稿日期：2022-03-10

项目资助：地理信息工程国家重点实验室开放基金项目资助 (SKLGIE2018-Z-1-2)

第一作者：孙乐园，博士，主要从事卫星导航系统时间频率传递研究工作。sly\_nudt@163.com

确定的过程中同步解算卫星相对地面站的钟差，本文将基于这种方法测定的钟差称为MPOD钟差。伪距和载波相位的消电离层组合观测方程为：

$$\begin{aligned} P_k^i &= \rho_k^i + cx_k - cx^i + \delta\rho_k^i + v_{k,P}^i \\ \lambda\Phi_k^i &= \rho_k^i + cx_k - cx^i + \delta\rho_k^i + \lambda N_k^i + v_{k,\Phi}^i \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $k$ 和 $i$ 分别为测站和卫星编号； $x_k$ 和 $x^i$ 分别为测站和卫星钟差， $v_{k,P}^i$ 和 $v_{k,\Phi}^i$ 分别为伪距和载波相位观测噪声； $\delta\rho_k^i$ 为大气延迟等路径误差； $\lambda$ 为载波波长， $N_k^i$ 为整周模糊度； $\rho_k^i$ 为测站与卫星之间的几何距离，其中包含了卫星的轨道信息。精密定轨的测量值中钟差和轨道信息耦合，目前北斗卫星的轨道模型精度还不足以分离定轨过程中的轨道和钟差参数，导致钟差解算结果中吸收了较大的卫星轨道误差。加之地面区域监测站对MEO卫星跟踪弧段有限，导致这一问题更加突出。

## 1.2 TWSTFT钟差

除了精密定轨同步解算钟差以外，北斗卫星导航系统同时采用卫星双向时间频率传递技术测定卫星相对地面站的钟差，本文将基于该方法测定的卫星钟差称为TWSTFT钟差。由地面站和卫星互发L波段测距信号，将上下行伪距测量值归算到同一时刻后，可解算卫星相对地面站的钟差：

$$x_i = \frac{1}{2c}(\rho_{\text{up}} - \rho_{\text{down}}) + \Delta\tau_L \quad (2)$$

其中， $c$ 为真空光速， $\rho_{\text{up}}$ 和 $\rho_{\text{down}}$ 分别为归算后的上下行伪距， $\Delta\tau_L$ 为设备时延、相位中心偏移、大气延迟、相对论效应等系统误差修正量。由于地面站维持的是北斗系统时间，因此 $x_i$ 可认为是卫星 $i$ 相对北斗的钟差。

相对于MPOD钟差，虽然星地双向时间同步采用伪码测距值引入了更大的随机误差，但通过双向测量实现了钟差和空间距离信息的解耦，因而有效抑制了卫星轨道、站坐标误差对钟差解算的影响，同时利用上下行信号传播路径的对称性抑制了大气延迟等公共路径误差的影响。

然而在地面区域监测站的限制下，仅通过星地TWSTFT无法获取北斗MEO和IGSO卫星全弧段的钟差测定值。需要借助星间链路TWSTFT实现对卫星境外弧段的间接观测，从而得到全弧段的钟差测定值。基于星间链路的星间TWSTFT由两颗建链卫星轮番互发Ka波段测距信号，将双单向伪距测量值归算到同一时刻并作差得到卫星之间的相对钟差：

$$x^{ij} = \frac{1}{2c}(\rho_{ji} - \rho_{ij}) + \Delta\tau_{\text{Ka}} \quad (3)$$

其中， $\rho_{ji}$ 和 $\rho_{ij}$ 为卫星 $i$ 、 $j$ 之间归算后的双单向伪距测量值。 $\Delta\tau_{\text{Ka}}$ 为设备时延、相位中心偏移、相对论效应等系统误差修正量。与星地双向时间同步类似，基于星间链路的双向时间同步也抑制了卫星轨道误差以及公共路径误差对星间相对钟差解算的影响。

当卫星 $j$ 运行到境外，可与可见的境内卫星 $i$ 建立星间链路进行星间双向时间比对，如图1。联合星地星间双向时间比对钟差，得到卫星 $j$ 相对系统时间的钟差：

$$x^j = x^i - x^{ij} \quad (4)$$

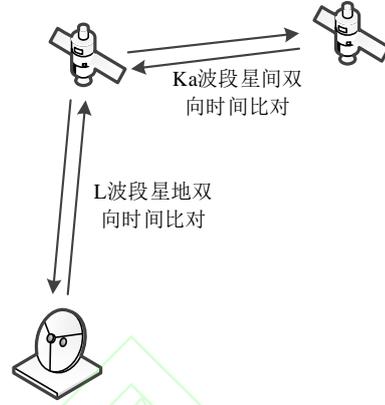


图1 星地星间联合双向时间比对

Fig.1 Joint time comparison with inter-satellite and satellite-ground links

## 2 星载原子钟性能评估指标

### 2.1 频率准确度

频率准确度即原子钟的实际输出频率与标称频率的一致性。原子钟的实时频率无法直接测量，通过钟差数据转换得到的频率数据中包含了原子钟固有噪声以及由测量引入的随机噪声，并不能真实地体现频率准确度性能以及频率的漂移特性。为了准确评估星载原子钟的频率准确度和频率漂移，基于最小二乘准则，以一元线性方程 $x(t) = a_0 + a_1 \cdot t$ 对每小时的钟差序列 $x(t+m\tau)$ ， $m=0,1,\dots,M$ （ $M$ 为一小时内的历元数）进行拟合，可得一小时内 $M$ 个历元的平均频率准确度：

$$a_1 = \frac{\sum_{m=0}^M [x(t+m\tau) - \bar{x}](t+m\tau - \bar{t})}{\sum_{m=0}^M (t+m\tau - \bar{t})^2} \quad (5)$$

其中，钟差均值 $\bar{x} = \sum_{m=0}^M x(t+m\tau) / (M+1)$ ，采样时刻均值 $\bar{t} = \sum_{m=0}^M (t+m\tau) / (M+1)$ 。

### 2.2 频率稳定度

除了频率漂移以外，星载原子钟输出频率还受到原子钟固有噪声的影响，原子钟频率稳定度则是指原子钟输出频率受到固有噪声影响而随机起伏的情况。

通常利用经典方差或标准差评估随机变量的稳定性。但在各类原子钟噪声的影响下，原子钟频率的方差会随着时间无限增长，例如，频率随机游走噪声的方差与时间成正相关<sup>[21]</sup>。因此无法用经典方差对原子钟的频率稳定性进行评估。

Allan方差是最常用的原子钟频率稳定度时域评估方法。但Allan方差仅对频率进行一次差运算，频率线性偏移以及甚低频噪声影响将导致在较长的平滑时间下原子钟固有的噪声特性被淹没或计算结果不收敛。星载铷原子钟具有明显的频率线性漂移特性，将淹没固有的甚低频噪声。

Hadamard方差通过频率二次差克服了Allan方差对频率线性漂移敏感以及对甚低频噪声不收敛的缺点。在此基础上，为了提高频率稳定度估计的置信度，重叠Hadamard方差不对原始数据重采样，而是利用所有的以 $\tau$ 为采样间隔钟差四次采样值进行计算，即：

$$H\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{6(N-3m)m^2\tau_0^2} \sum_{i=1}^{N-3m} [x_{i+3m} - 3x_{i+2m} + 3x_{i+m} - x_i]^2 \quad (6)$$

此处的 $\{x_i, i=1, 2, \dots, N\}$ 为间隔为 $\tau_0$ ，长度为 $N$ 的原始钟差序列。在实际所得到的钟差测定数据中，由于数据中断或野值，导致最终得到钟差序列并非均匀等间隔采样。对于扣除的粗差点可通过内插修复，但数据中断则不宜采用插值修复，因此仅利用采样间隔为 $\tau$ 的四次钟差采样计算重叠Hadamard方差。

由于采用任何方法测定的钟差都会引入解算方法误差，因此基于(6)式的重叠Hadamard方差的计算值不仅取决于原子钟固有的随机特性，还受到钟差测定方法误差的影响，计算出的时域方差均会大于原子钟固有的噪声水平。而不同钟差测定方法的区别则在于由解算方法引入的误差是否会淹没原子钟固有噪声。根据不同钟差解算方法的误差特性，本文采用组合重叠Hadamard偏差(Combined Overlapping Hadamard Deviation, COHDEV)评估原子钟的频率稳定度：

$$CH\sigma_y(\tau) = \min[H\sigma_{y,MPOD}(\tau), H\sigma_{y,TWSTFT}(\tau)] \quad (7)$$

其中， $H\sigma_{y,MPOD}(\tau)$ 和 $H\sigma_{y,TWSTFT}(\tau)$ 分别表示由MPOD钟差和TWSTFT钟差计算得到的重叠Hadamard偏差。

### 3 北斗三号卫星原子钟性能评估

#### 3.1 钟差测定精度

以北斗三号在轨MEO卫星搭载的4台星载氢原子钟和4台星载铷原子钟为例进行性能评估，卫星基本信

息见表1。采集2019年10月份共31天的星地星间联合TWSTFT钟差和MPOD钟差，采用中位数法对钟差数据进行预处理。

表1 在轨卫星信息

PRN	轨道类型	星载原子钟类型	制造商
C20	MEO	Rb	CAST
C21	MEO	Rb	CAST
C23	MEO	Rb	CAST
C24	MEO	Rb	CAST
C27	MEO	PHM	CAS
C28	MEO	PHM	CAS
C34	MEO	PHM	CAS
C35	MEO	PHM	CAS

CAST: China Academy of Space Technology, 中国空间技术研究院  
CAS: China Academy of Science, 中国科学院

预处理后的钟差如图2所示，图中扣除了所有原子钟的初始钟差。在31天内，8颗卫星原子钟基本处于正常运行状态。除了原子钟调整期间的数据间断以外，仅通过星地双向时间同步进行卫星钟差测定，MEO卫星钟差可测弧段不足50%，而增加星间链路辅助测量后，通过星地星间联合观测有效解决了卫星境外弧段的钟差测定问题，实现了对卫星钟差的全弧段观测。

为进一步分析两种钟差测定结果的随机噪声水平，对钟差数据进行逐小时二次拟合，拟合残差均方根(Root mean square, RMS)统计结果见表2。由统计结果可知，仅星地TWSTFT钟差的随机噪声水平小于0.15ns，增加境外弧段的星地星间联合TWSTFT钟差测定值后，MEO卫星全弧段钟差的随机噪声水平在0.2~0.25ns。而MPOD钟差的解算过程由于采用的载波相位测量值，钟差随机噪声水平均不大于0.02ns，比TWSTFT钟差随机噪声水平低一个数量级。

表2 钟差逐小时拟合残差(RMS)

PRN	L TWSTFT 钟差/ns	L+Ka TWSTFT 联合钟差/ns	MPOD 钟差/ns
C20	0.128	0.205	0.017
C21	0.138	0.221	0.020
C23	0.143	0.238	0.014
C24	0.138	0.228	0.014
C27	0.148	0.236	0.014
C28	0.145	0.228	0.015
C34	0.143	0.219	0.014
C35	0.142	0.208	0.017

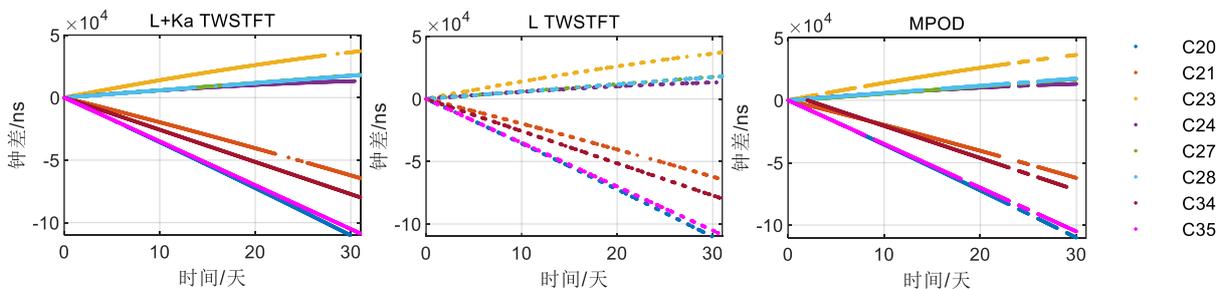


图2 北斗三号在轨MEO卫星对地钟差  
Fig.2 Satellite-ground clock bias of BDS-3 MEO satellites

在卫星钟差的测定值中包含了钟差趋势项以及残余的系统误差，由于卫星在轨运动的周期性，导致残余系统误差通常表现出与轨道周期相关的周期性变化。为评估卫星钟差测定精度，对卫星钟差进行逐日二次拟合以扣除星载原子钟自身的趋势性变化，扣除趋势项后的残差如图3所示。对于仅星地双向时间同步测定的钟差，虽然通过上下行路径的对称性，基本消除了卫星轨道、站坐标以及对流层延迟等公共误差的影响。但是由于上下行伪距测量频率的差异，导致钟差测定值中残留了电离层延迟非对称量的影响，钟差拟合残差并非完全表现出随机变化，而具有的一定的趋势性。同时，与入射高度角相关的上下行伪距测量值偏差也将影响最终的钟差测定结果<sup>[2]</sup>。

根据表3对拟合残差的统计结果可知，L波段星地双向时间同步的钟差测定精度均优于0.3ns。星间双向时间同步在抑制公共轨道误差的同时，星间Ka波段的

测距频率高，并且几乎不受大气延迟的影响，所得到的相对钟差测定精度应当更高。但为了得到卫星相对系统时间的钟差，联合星地星间测量解算卫星钟差导致误差累积，因此星地星间联合TWSTFT钟差的测定精度差于仅星地TWSTFT钟差。通过“境内：L星地双向时间同步测定值”+“境外：L星地+Ka星间联合双向时间同步测定值”的组合方式得到钟差的全弧段测定值。根据表3，MEO卫星的全弧段钟差测定精度为0.35~0.42ns，显然这一测定精度将随着地面测站对卫星测量弧段的生长而提高。

虽然MPOD钟差解算所采用的载波相位测量噪声明显小于TWSTFT伪码测量噪声，但MPOD钟差的解算精度仍然在0.1~0.18ns之间。其逐日拟合残差存在幅值 $\pm 0.3 \sim \pm 0.5$ ns的周期性变化，这是由于精密定轨同步解算的钟差吸收了卫星轨道误差。同时由于定轨弧段的影响，MPOD钟差存在每日跳变。

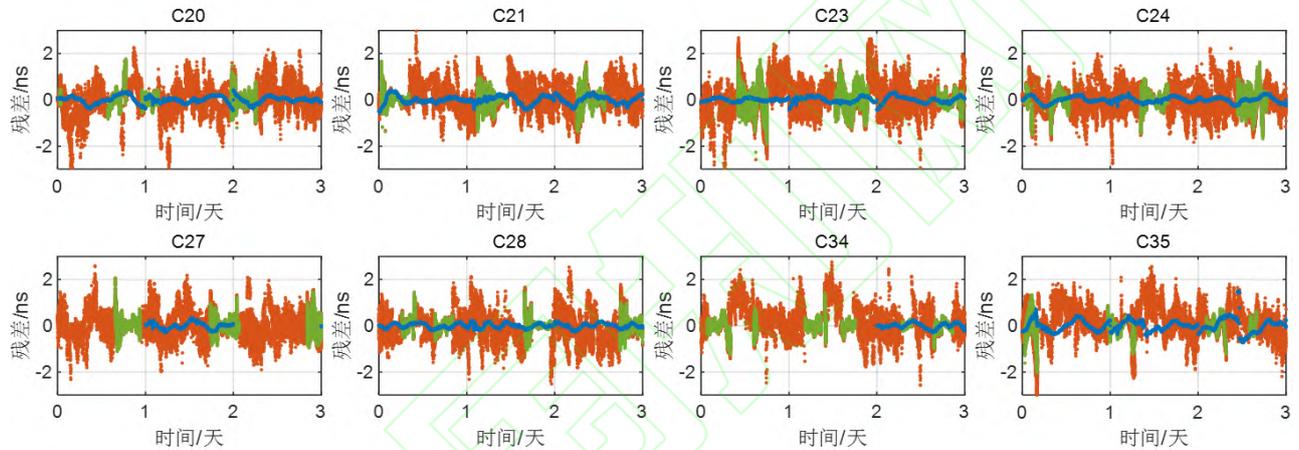


图3 钟差逐日拟合残差(红色: Ka+L TWSTFT; 绿色: L TWSTFT; 蓝色: MPOD)

Fig.3 Daily Fitting residual of clock bias (Red: Ka+L TWSTFT; Green: L TWSTFT; Blue: MPOD)

表3 钟差逐日拟合残差 (RMS)

Tab.3 Daily fitting residual of clock bias (RMS)

PRN	L TWSTFT 钟差/ns	L+Ka TWSTFT 联合钟差/ns	MPOD 钟差 ns
C20	0.256	0.362	0.121
C21	0.280	0.389	0.140
C23	0.278	0.398	0.137
C24	0.268	0.363	0.155
C27	0.274	0.368	0.164
C28	0.275	0.383	0.144
C34	0.250	0.376	0.143
C35	0.291	0.415	0.175

### 3.2 频率准确度

通过最小二乘拟合计算平均频率准确度可抑制TWSTFT钟差中的随机误差，采用TWSTFT钟差进行频率准确度计算。图4给出了一个月内在轨北斗三号星原子钟的频率准确度变化，其中C24、C27、C28原子钟频率准确度均在 $10^{-12}$ 量级，其余为 $10^{-11}$ 量级。

在连续运行过程中，星载原子钟的频率准确度将会随着运行时间出现单调变化，即频率漂移，而随运

行时间单调增加或减小的速率即为原子钟的频率漂移率。表4列出了1天、10天和30天的频率漂移率。无论是从长期还是短期频率漂移来看，星载氢钟整体的频率漂移性能优于星载铷钟。氢钟30天的频率漂移量均小于 $10^{-13}$ s/s，星载铷钟频率表现出明显的漂移趋势，30天的频率变化量达到 $10^{-12}$ s/s量级。

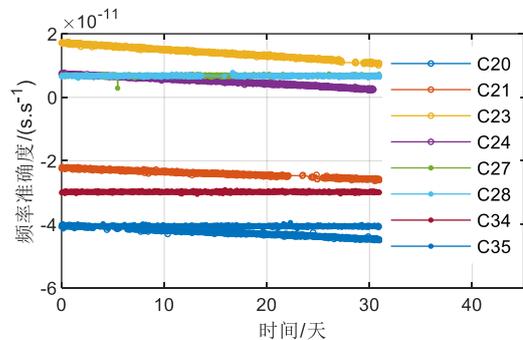


图4 北斗三号在轨原子钟频率准确度

Fig.4 Frequency accuracy of BDS-3 on-board satellite clocks

表4 北斗三号在轨原子钟频率漂移率

Tab.4 Frequency drift of BDS-3 on-board satellite clocks		漂移率		
PRN	原子钟类型	1天	10天	30天
C20	Rb	$-1.36 \times 10^{-13}$	$-1.36 \times 10^{-12}$	$-4.08 \times 10^{-12}$
C21	Rb	$-1.17 \times 10^{-13}$	$-1.17 \times 10^{-12}$	$-3.52 \times 10^{-12}$
C23	Rb	$-2.06 \times 10^{-13}$	$-2.06 \times 10^{-12}$	$-6.18 \times 10^{-12}$
C24	Rb	$-1.57 \times 10^{-13}$	$-1.57 \times 10^{-12}$	$-4.72 \times 10^{-12}$
C27	PHM	$-8.03 \times 10^{-16}$	$-8.03 \times 10^{-15}$	$-2.41 \times 10^{-14}$
C28	PHM	$-1.21 \times 10^{-15}$	$-1.21 \times 10^{-14}$	$-3.64 \times 10^{-14}$
C34	PHM	$-9.91 \times 10^{-16}$	$-9.91 \times 10^{-15}$	$-2.97 \times 10^{-14}$
C35	PHM	$-1.87 \times 10^{-15}$	$-1.87 \times 10^{-14}$	$-5.62 \times 10^{-14}$

### 3.3 频率稳定度

由上述分析可知，TWSTFT钟差解算抑制了轨道误差影响，但采用伪距测量值，具有更大的随机误差。MPOD钟差随机误差较小，更能够体现原子钟的短期频率特性，但吸收了较大的轨道误差，同时由于一天的定轨长度导致每天的钟差数据之间存在跳变。这些限制因素将各自影响原子钟短期和中长期频率稳定度性能的评估。因此本文结合TWSTFT和MPOD两类钟差测定值的误差特性，采用组合重叠Hadamard偏差来评估北斗三号星载原子钟的频率稳定度。

图5分别给出了铷钟和氢钟的频率稳定度计算结果，分别按照标准差0.2ns和0.014ns生成TWSTFT和MPOD钟差中由测量引入的相位白噪声，图中“TWSTFT噪声”和“MPOD噪声”分别为相应噪声的Hadamard偏差。

根据频率稳定度曲线，当平滑时间小于4000s，由时间比对过程引入到星地星间联合TWSTFT钟差中的相位白噪声起主导作用，湮没了原子钟固有噪声，无法反映出原子钟的短期频率稳定度。而MPOD钟差中由于钟差解算方法引入的随机噪声对频率稳定度的影响弱于原子钟的固有噪声，因此能够体现出原子钟的短期稳定度性能。

当平滑时间大于4000s，由于吸收了轨道周期性误差，MPOD钟差所表现出的频率稳定度开始恶化，并在10000s附近表现出非幂律谱特征。由于抑制了与轨道相关的公共误差，随着平滑时间增大，时间比对噪声的影响减弱，TWSTFT钟差体现出原子钟自身的频率稳定度性能。然而，在10000s附近TWSTFT钟差的频率稳定度显著差于MPOD钟差，这可能与TWSTFT钟差误差中表现出一定的趋势性，存在未建模误差有关。当平滑时间增大到40000s，两种钟差反映出的频率稳定度性能相当。

因此，针对平滑时间小于40000s的短期频率稳定度，组合重叠Hadamard偏差采用了MPOD钟差，而针对平滑时间大于40000s的长期频率稳定度，则采用了TWSTFT钟差。对于30秒、1000秒以及10000秒的短期频率稳定度，在氢钟和铷钟均表现出相似的性能，分别为 $10^{-13}$ 、 $10^{-14}$ 和 $10^{-14}$ 量级。氢钟的天稳均达到 $10^{-15}$ 量级，C23铷钟的天稳同样达到 $10^{-15}$ 量级，其他卫星的铷钟均在 $10^{-14}$ 量级。

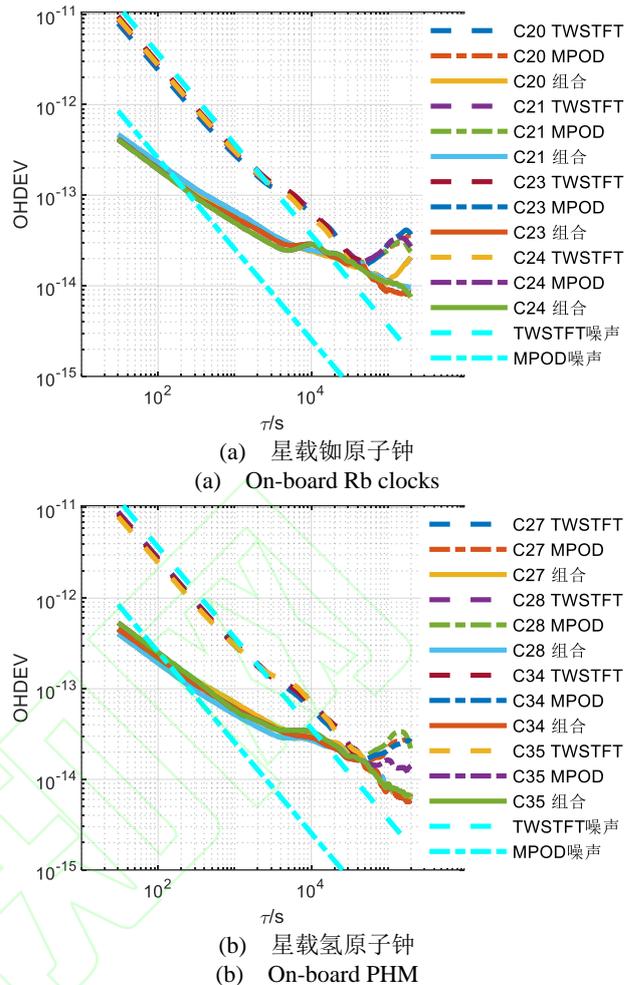


图5 北斗三号在轨原子钟频率稳定度  
Fig.5 Frequency stability of BDS-3 on-board satellite clocks

## 4 结论

星载原子钟频率性能是制约卫星导航系统服务性能的关键要素之一，而对星载原子钟频率信息的获取需要通过对钟差的测定实现。本文分析了北斗三号卫星MPOD和TWSTFT钟差测定精度，并结合两类钟差的误差特性对星载原子钟的频率特性进行了评估：

(1) TWSTFT全弧段钟差的随机噪声水平在0.2~0.25ns，MPOD钟差随机噪声水平平均不大于0.02ns；TWSTFT一个月弧段钟差测定精度为0.35~0.42ns，MPOD钟差解算精度在0.1~0.18ns之间；

(2) 星载原子钟频率准确度在 $10^{-12}$ ~ $10^{-11}$ 量级；氢钟频率老化性能整体优于铷钟，30天的频率漂移量均不超过 $10^{-13}$ s/s量级，而铷钟频率普遍表现出明显的频率漂移；

(3) 氢钟和铷钟的短期频率稳定度相当，而所有氢钟的天稳达到 $10^{-15}$ 量级，整体优于铷钟。

## References (参考文献)

[1] China Satellite Navigation Office. Development of the BeiDou Navigation Satellite System (Version 4.0) [EB/OL]. 2019-12-27

- [2] Yan Jianhua, Dong Zhe, Li Shuo, et al. Comparative Study of Major Foreign Satellite Navigation Time-Frequency Systems [C]// China Time and Frequency Symposium, 2011 (闫建华, 董哲, 李硕, 等. 国外主要卫星导航时频系统比较研究[C]// 全国时间频率学术会议, 2011)
- [3] Senior K L, Ray J R, Beard R L. Characterization of Periodic Variations in the GPS Satellite Clocks[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(3): 211-225
- [4] Zhao Q L, Wang C, Guo J, et al. Precise Orbit and Clock Determination for BeiDou-3 Experimental Satellites with Yaw Attitude Analysis[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22: 4
- [5] Steigenberger P, Hugentobler U, Hauschild A, et al. Orbit and Clock Analysis of Compass GEO and IGSO Satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(6): 515-525
- [6] Gong H, Ni S J, Mou W H, et al. Estimation of COMPASS on-board clock short-term stability[C]//2012 European Frequency and Time Forum. Gothenburg, Sweden. 2012: 383-386
- [7] Wang D X, Guo R, Xiao S H, et al. Atomic Clock Performance and Combined Clock Error Prediction for the New Generation of BeiDou Navigation Satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(9): 2889-2898
- [8] 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): 277-284 (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): 277-284)
- [9] Jia Xiaolin, Feng Laiping, Mao Yue, et al. Performance Evaluation of GPS On-Board Clock[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2010, 33(2): 115-120 (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): 115-120)
- [10] Wang Shengchao, Jia Xiaolin, Ai Qingsong, et al. Performance Evaluation and Analysis of BDS In-Orbit Satellite Atomic Clocks[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2018, 6(1): 60-66 (王省超, 贾小林, 艾青松, 等. BDS在轨卫星原子钟性能评估分析[J]. 导航定位学报, 2018, 6(1): 60-66)
- [11] Wang Yupu. *Research on Modeling and Prediction of the Satellite Clock Bias and Performan Evaluation of GNSS Satellite Clocks*[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2017 (王宇谱. GNSS星载原子钟性能分析与卫星钟差建模预报研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017)
- [12] Guo Hairong. *Study on the Analysis Theories and Algorithms of the Time and Frequency Characterization for Atomic Clocks of Navigation Satellites*[D]. Zhengzhou: PLA 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: 解放军信息工程大学, 2006)
- [13] Hauschild A, Montenbruck O, Steigenberger P. Short-Term Analysis of GNSS Clocks[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(3): 295-307
- [14] Mao Yue, Chen Jianpeng, Dai Wei, et al. Analysis of On-Board Atomic Clock Stability Influences[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(10): 1182-1186 (毛悦, 陈建鹏, 戴伟, 等. 星载原子钟稳定性影响分析[J]. 武汉大学学报 信息科学版, 2011, 36(10): 1182-1186)
- [15] 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): 1256-1263 (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): 1256-1263)
- [16] Luo Fan, Li Jianwen, Huang Hai, et al. Frequency Stability Analysis and Noise Identification of BD Satellite Clock[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2014, 31(1): 34-37 (罗璠, 李建文, 黄海, 等. 北斗卫星钟稳定性分析及噪声识别[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(1): 34-37)
- [17] Wang B, Lou Y D, Liu J N, et al. Analysis of BDS Satellite Clocks in Orbit[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4): 783-794
- [18] Wu Z Q, Zhou S S, Hu X G, et al. Performance of the BDS3 Experimental Satellite Passive Hydrogen Maser[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(2): 1-13
- [19] Qin Weijin, Ge Yulong, Yang Xuhai. Performance Evaluation of Galileo On-Board Passive Hydrogen Maser[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(10): 93-99 (钦伟瑾, 葛玉龙, 杨旭海. 伽利略星载被动型氢原子钟性能评估[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 93-99)
- [20] Zhou S S, Hu X G, Liu L, et al. Applications of Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer in the BeiDou Navigation Satellite System[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, 59(10): 1-9
- [21] Tavella P. Statistical and Mathematical Tools for Atomic Clocks[J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): S183-S192
- [22] Wanninger L, Beer S. BeiDou Satellite-Induced Code Pseudorange Variations: Diagnosis and Therapy[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4): 639-648

---

# Frequency Performance Evaluation of BeiDou-3 Satellite Atomic Clocks

SUN Leyuan<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, GUO Xiye<sup>1</sup>, HUANG Wende<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National University of Defense Technology, Changsha, 410073

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an, 710000

**Abstract:** With the full completion of the BeiDou-3 satellite navigation system, its satellite atomic clocks have gradually entered stable operating states. Performance evaluation of the satellite-borne atomic clocks is crucial to improving its global service performance. This paper established the evaluation index of the frequency characteristics of the satellite atomic clock and the corresponding calculation method. The average frequency fitted hourly is used to reflect the frequency accuracy and frequency drift characteristics of the satellite-borne atomic clock, and considering the error characteristics of different clock bias products, the combined Hadamard deviation is proposed to accurately evaluate the frequency stability of the satellite-borne atomic clock. The accuracy of the clock bias determination and the frequency performance of the satellite clocks were evaluated based on the BeiDou-3 multi-satellite precision orbit determination (MPOD) and two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) clock products. The analysis results have demonstrated that, the random noise level represented by the root mean square (RMS) of hourly fitting residual of the TWSTFT clock bias is 0.2~0.25ns, and the random noise level of the MPOD clock bias is not larger than 0.02ns; the measurement accuracy represented by the RMS of daily fitting residual of the TWSTFT clock bias is 0.35~0.42ns, and of the MPOD is 0.1~0.18ns; the frequency accuracy of the satellite atomic clock is in the order of  $10^{-12}$ ~ $10^{-11}$ ; the daily frequency drift of the passive hydrogen maser (PHM) is in the order of  $10^{-15}$ ~ $10^{-16}$ , the 30-day frequency drift of the PHM does not exceed the order of  $10^{-13}$ , and the daily frequency stability reaches the order of  $10^{-15}$ , while the rubidium clock frequency generally shows obvious frequency drift, and daily frequency drift reaches the order of  $10^{-13}$ . The frequency drift characteristics and long-term frequency stability of the BeiDou-3 PHM are overall better than the rubidium clocks.

**Key words:** BeiDou-3 Satellite Navigation System; Satellite Atomic Clock; Satellite Clock Bias; Frequency Performance

**First author:** SUN Leyuan, PhD, specialized in time and frequency transfer of GNSS. E-mail: sly\_nudt@163.com

**Foundation support:** The State Key Laboratory of Geo-Information Engineering (SKLGIIE2018-Z-1-2)

网络首发:

标题: 北斗三号卫星星载原子钟频率特性评估

作者: 孙乐园, 杨俊, 郭熙业, 黄文德

DOI: 10.13203/j.whugis20200486

收稿日期: 2022-03-10

引用格式:

孙乐园, 杨俊, 郭熙业, 等. 北斗三号卫星星载原子钟频率特性评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20200486 (SUN Leyuan, YANG Jun, GUO Xiye, et al. Frequency Performance Evaluation of BeiDou-3 Satellite Atomic Clocks[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20200486)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

---

您感兴趣的其他相关论文:

顾及一次差分数据结构特征的钟差预报模型

黄博华, 杨勃航, 李锡瑞, 朱祥维, 王宇谱

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(8): 1161-1169

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190116>