

DOI:10.13203/j.whugis.20150806



文章编号:1671-8860(2017)09-1256-08

BDS 星载原子钟频率稳定性分析

王 宁¹ 王宇谱^{1,2} 李林阳¹ 翟树峰¹ 吕志平¹

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450052

2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

摘 要:卫星导航系统中星载原子钟作为系统的星上时间基准,其性能直接决定着导航定位的精度。北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)目前处于全面建设阶段,对系统星载原子钟的性能进行评估非常重要。结合评价星载铷原子钟稳定性的哈达玛(Hadamard)方差、重叠哈达玛方差和哈达玛总方差,分别基于 5 min 和 15 min 采样间隔的北斗精密钟差数据,综合三种方差的计算结果对北斗卫星导航系统星载原子钟频率稳定性进行较为全面的评估,得到了一些有益的结论。

关键词:北斗卫星导航系统;星载原子钟;稳定性分析;数据采样间隔

中图法分类号:P228

文献标志码:A

在卫星导航定位中,精确位置的测量关键是精确时间的测量^[1],高精度的时频由高精度的原子钟来建立和维持。星载原子钟作为导航系统测距的星上时间基准,又是卫星导航系统有效载荷的核心部分,其性能直接决定用户的导航定位授时精度^[2]。因此,对卫星导航系统星载原子钟的时频特性进行分析具有重要的意义。

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)是中国自行研制的全球卫星导航系统,星载原子钟配备的是国产铷钟^[3],同时该系统由具有不同功能和轨道高度的三类卫星(GEO 卫星、MEO 卫星和 IGSO 卫星)组成,其星载原子钟及其钟差呈现出异于其它系统的一些新特征。目前全球定位系统(global positioning system, GPS)系统和格洛纳斯(GLONASS)系统由于长期运行积累了大量的精密钟差数据,已有相当多关于其卫星钟性能评估的研究成果^[4],而针对 BDS 星载原子钟性能评估的研究还相对较少。同时由于不同导航系统星载原子钟在硬件构造、原子钟类型和设备性能指标等方面均存在差异,不能直接照搬 GPS/GLONASS 相关研究成果来讨论 BDS 卫星钟的性能^[5]。此外,已有的研究仍然存在诸多不足,例如目前对卫星钟性能的分析,大多集中在某个指标值或某一个特性方面,如何对多个性能指标进行合理的综合分析,实现

对星载原子钟性能更加科学的评估,尚无成果可参考。本文在考虑 BDS 卫星钟使用铷原子钟这一特点的基础上,给出了适合星载铷原子钟频率稳定性分析的哈达玛(Hadamard)方差、重叠 Hadamard 方差和 Hadamard 总方差的数学原理;采用 BDS 卫星钟 5 min 和 15 min 采样间隔的精密钟差数据(数据来自多系统实验项目(the multi-GNSS experiment, MGEX)中武汉大学 GNSS 数据处理中心提供的数据产品(ftp://cd-dis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex)计算了三种方差,综合计算结果较全面地分析了 BDS 星载原子钟的频率稳定性。

1 星载原子钟频率稳定性分析方法

星载原子钟的频率稳定性是描述原子钟输出频率由于受噪声影响而产生的随机起伏情况,星载原子钟频率稳定度的表征主要是在时域采用时域方差方法来实现^[6-7]。

1.1 频率稳定性分析中方差的选取

表征星载原子钟时域频率稳定性的时域方差主要有阿伦(Allan)系列方差(包括 Allan 方差、重叠 Allan 方差、修正 Allan 方差和 Allan 总方差)和 Hadamard 系列方差(包括 Hadamard 方差、重叠 Hadamard 方差和 Hadamard 总方差)

收稿日期:2016-05-09

第一作者:王宁,硕士生,主要从事导航卫星钟差数据处理理论与方法研究。376820438@qq.com

通讯作者:吕志平,博士,教授。ssscenter@126.com

等^[6]。

目前在原子钟的频率稳定性分析中,常选用 Allan 方差进行计算。Allan 方差对常见的调频闪变噪声和调频随机游走噪声收敛,但当平滑时间较长时,对于调频随机奔跑噪声不收敛^[1,15]。我国星载原子钟是铷原子钟,其原子钟频率漂移较大。Allan 方差估计受频率漂移项的影响,若剔除漂移将会使较长平滑时间的 Allan 方差估计引入偏差,且偏离程度跟频率估计有关。对任意给定的原子钟频标数据,估计潜在的噪声非常困难。因此在对 BDS 星载原子钟进行稳定性分析时采用三次采样方差——Hadamard 系列方差。同时,Hadamard 系列方差不受线性频漂的影响,且对调频随机奔跑噪声是收敛的。当频率的漂移大于频标噪声影响时,Hadamard 系列方差也能给出很好的估计结果。

1.2 Hadamard 方差

设有一相对频率偏差数据序列 $\{y_n, n=1, 2, \dots, M\}$, 其采样间隔为 τ_0 , M 为数据总个数。那么,基于相对频率偏差数据的 Hadamard 方差定义为^[8-10]:

$$H\sigma_y^2(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{M'-2} [\bar{y}_{i+2m}(m) - 2\bar{y}_{i+m}(m) + \bar{y}_i(m)]^2}{6(M' - 2)} \quad (1)$$

式中,平滑时间 $\tau = m\tau_0$; m 为平滑因子,一般取 $1 \leq m \leq M/3$; M' 为 $\bar{y}_i(m)$ 的个数,且 $M' = \text{int}(M/m) + 1$; $\bar{y}_{i+m} = \sum_{j=i}^{i+m-1} y_j/m$ 。

Hadamard 方差对星载原子钟的钟差数据做了三次差分计算去除了线性频率漂移项的影响,从而减少了线性频漂的影响。在差分计算中,Hadamard 方差对甚低频能量谱噪声是收敛的;当频漂项比较明显甚至淹没能量谱噪声时,用 Hadamard 方差进行稳定性分析能给出有意义的结果。但 Hadamard 方差是三次差分,想得到精度相当的估计结果需要更多的数据。因此短期稳

定性分析中不采用 Hadamard 方差。

1.3 重叠 Hadamard 方差

设有一采样间隔为 τ_0 的相对频率偏差数据序列 $\{y_n, n=1, 2, \dots, M\}$, M 为数据总个数。那么,基于相对频率偏差数据的重叠 Hadamard 方差定义为^[6]:

$$H\sigma_y^2(\tau) = \frac{\sum_{j=1}^{M-3m+1} \sum_{i=j}^{j+m-1} [y_{i+2m} - 2y_{i+m} + y_i]^2}{6m^2(M - 3m + 1)} \quad (2)$$

式中, $\tau = m\tau_0$ 为平滑时间; m 为平滑因子,一般取 $1 \leq m \leq \text{int}(M/3)$ 。

重叠 Hadamard 方差通过形成所有可能的二次采样对来最大限度地利用现有数据提高估计的精确度。通过形成所有可能的三次采样对来最大限度地利用现有数据,以提高估计的置信度。

1.4 Hadamard 总方差

当平滑因子 $m = \text{int}((N-1)/3)$ 时,即平滑时间接近于时间序列总长度 T 的 $1/3$ 时,Hadamard 方差估计只有一项,于是 Hadamard 方差的置信度将大大降低。为提高 Hadamard 方差的置信度,引入 Hadamard 总方差,在不增加时间序列长度的情况下,通过映射进行映射数据延伸来提高估计的置信度,尤其是较长平滑时间时估值的置信度^[1,11]。

将 IGS 提供的精密钟差相位数据通过频相转化后记为数据序列, M 为数据总个数。Hadamard 总方差的步骤^[6]如下。

步骤 1 提取 $M-3m+l$ 个 $3m$ 点相对频率偏差数据子序列 $\{y_i\}_n = \{y_i, i=n, \dots, (n+3m-1)\}$;

步骤 2 剔除 $3m$ 点相对频率偏差数据子序列中线性趋势项(线性频漂) c_1 , 得到去除线性趋势项后的 $3m$ 点子序列 $\{^0y_i = y_i - c_1 i, i=n, \dots, n+3m-1\}$ 。前后两半数据求均值,两者之差除以时间间隔的一半即可求得线性趋势项;

步骤 3 对去除线性趋势项的 $3m$ 点相对频率偏差数据子序列进行正向偶映射,得到延伸后的 $9m$ 点子序列:

$$\begin{cases} ^0y_j^\# = ^0y_i, j = n, \dots, (n+3m-1) \\ ^0y_{n-l}^\# = ^0y_{n+l-1}, ^0y_{n+3m+l-1}^\# = ^0y_{n+3m-l}, l = 1, \dots, 3m \end{cases} \quad (3)$$

步骤 4 计算 $9m$ 点子序列的重叠 Hadamard 方差;

差求均值,求得 Hadamard 总方差。

步骤 5 对 $M-3m+1$ 个重叠 Hadamard 方

由此基于频率数据的 Hadamard 总方差可表达为:

$$H\sigma_{\text{total}}^2(\tau) = \frac{\sum_{n=1}^{M-3m+1} \left\{ \frac{\sum_{i=n-3m}^{n+3m-1} [^0y_{i+3m}^\#(m) - 2(^0y_{i+m}^\#(m)) + ^0y_{i+2m}^\#(m)]^2}{6m} \right\}}{6(M - 3m + 1)} \quad (4)$$

式中, $\tau = m\tau_0$ 为平滑时间; m 为平滑因子, 一般取

$$1 \leq m \leq \text{int}(M/3); \bar{y}_n^\#(m) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} y_{n+j}^\#.$$

当平滑因子为 $m = \text{int}(N/3)$ 时, 式(4)的外层循环只有一项, 但内层循环有 $6m$ 项, 此时有足够数据用于 Hadamard 方差估计, 提高了估计的置信度, 尤其是提高了中长期估计的置信度。Hadamard 总方差同样不受线性频率漂移项的影响, 当存在明显的线性漂移时仍能给出很好的估值^[1]。

2 BDS 原子钟频率稳定性分析

本文采用 IGS (国际 GNSS 服务) 多 GNSS 实验室项目 (the multi-GNSS experiment, MGEX) 提供的 BDS 星载原子钟精密钟差数据。选取 2014 年 12 月 3 日~2014 年 12 月 24 日共 22 d 的 5 min 和 15 min 采样间隔的数据, 通过实验进行卫星钟的稳定性分析。BDS 采用的是中国首创的“GEO+IGSO+MEO”星座模式, 提高星座控制率, 使得 BDS 整体的精度控制大大提高, 最大限度的降低了中国缺少全球布站和高精度原子钟对高精度轨道测量的影响。BDS 星载原子钟各卫星之间的数据质量不同, 在选择实验时优先选用数据质量较好的精密钟差数据。质量好的原子钟是 BDS 星载原子钟的趋势, 能够表现未来 BDS 原子钟性能。少量的钟差数据间断对钟差预报^[12-15]存在影响, 但对原子钟的稳定性分析影响不大。选用这一时间段内数据连续、完整的 GEO 卫星 C04、C05; IGSO 卫星 C08、C09 和 MEO 卫星 C11、C12 精密钟差数据; C11、C12 是同时发射的两颗卫星, 其星载原子钟可能为同一批次, 为了使实验更加科学选用了存在数据间断的 MEO 卫星 C14, 并对数据进行了内插处理。利用实验数据分别进行 Hadamard 系列方差的计算。由于 IGS 提供的 C04 卫星 15 min 精密钟差数据出现无数据段和数据间隔太长, 没有给出 C04 号卫星的方差计算值。计算了 13 颗卫星的天稳值, C13 卫星该时段内无数据, 本文没有给出 C13 卫星的天稳值。图 1 给出了同一卫星不同方差计算结果的比较图(5 min 采样间隔)。

图 1 分析可知, 对同一颗卫星使用 Hadamard 系列方差分析北斗卫星原子钟的稳定性, 其表征原子钟稳定性的变化趋势基本相同, 从图中可以看出 Hadamard 总方差的变化趋势更加明显, Hadamard 总方差变化的幅度更容易表现出

原子钟相位频率随时间和数据量增加的变化特点, 对原子钟在运行阶段受到的噪声类型的确定更加准确。从第二部分可知, 重叠 Hadamard 方差优于非重叠 Hadamard 方差使用, 实验也验证了两者有相同的期望值, 但前者的置信度较高。当平滑时间较长, 接近于或大于 $T/2$ 时, 用总方差提高长期平滑时间估计的置信度, 故 Hadamard 总方差置信度最高。在长时间北斗卫星原子钟频率稳定性分析中, 采用 Hadamard 总方差的效果是最好的。

图 2 给出了 7 颗卫星的 Hadamard 总方差稳定性变化值(5 min 采样间隔)。图 3 给出了在 Hadamard 总方差下, 不同卫星的频率稳定性比较图(5 min 采样间隔); 图 4 给出了 5 min 采样间隔和 15 min 采样间隔数据 Hadamard 总方差数据的比较图。图 5 给出了 13 颗卫星的天稳值(5 min 采样间隔)。

由图 2 可以看出, 这 7 颗卫星的星载原子钟都受到周期变化的影响, 不同卫星原子钟对环境变化的反映程度不同。但在所有平滑时间(τ)的频率稳定性(方差(σ))分析图上, 周期震荡特性能明显的表现出来。

由图 3 可知, C11、C12 和 C14 卫星属于北斗导航系统的 MEO 卫星, 其方差随平滑时间的增大结果越来越小, 随后增加, 3 颗卫星方差变化趋势相同, 说明这 3 颗卫星稳定性相同, 同时段原子钟受到的噪声类型相同。虽然 C14 卫星的实验结果变化趋势与前 2 颗卫星相同, 但实验数据明显比所有卫星都大, 这与 C14 卫星在该时段数据异常较多有关, 其数据质量比其他 6 颗卫星较差, 这也说明处理后数据对频率稳定性分析的影响。MEO 卫星 C13 在这 22 天内无数据, 本文未做分析。C08 和 C09 卫星是北斗导航卫星的 IGSO 卫星, C08 卫星的 Hadamard 总方差一直在减小, C09 卫星的方差数据先减小后明显上升, 说明 C08 卫星和 C09 卫星原子钟的稳定性不同, 后半段受不同噪声影响, 可见 IGSO 卫星的原子钟稳定性相差明显。C04 卫星和 C05 卫星是北斗导航系统的 GEO 卫星, 其变化趋势相同, 从图可以看出两颗卫星的方差值比较接近, 由此可见, 北斗 GEO 卫星的稳定性和所受噪声类型基本相同。

由图 4 可知, 5 min 和 15 min 采样间隔的 IGS 数据得到的北斗卫星原子钟频率稳定度变化趋势相同, 原子钟噪声类型相同。5 min 采样间隔的数据前期变化明显且数值质量较好, 15 min 采样间隔的数据后期变化明显。这种结果的原因

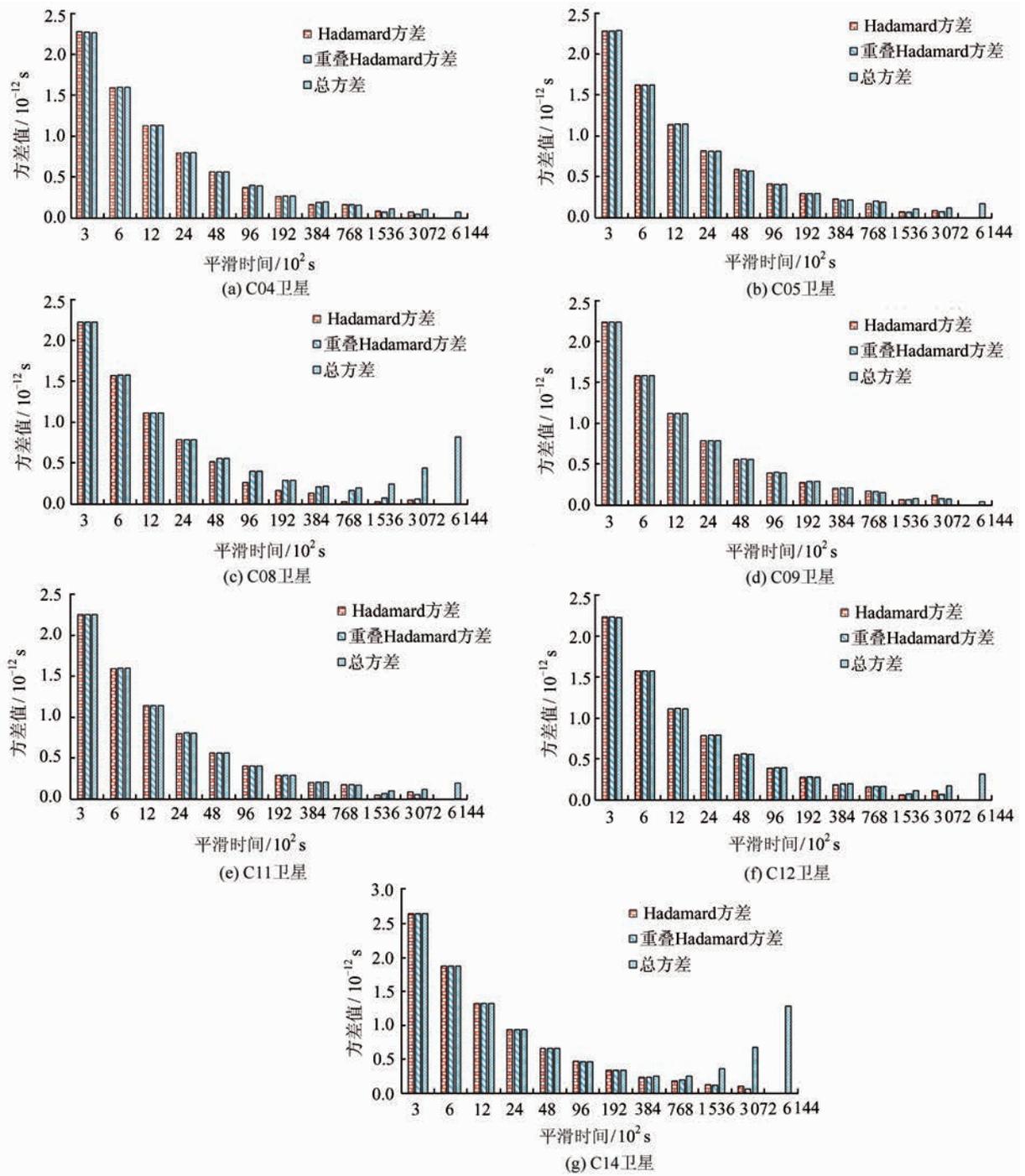


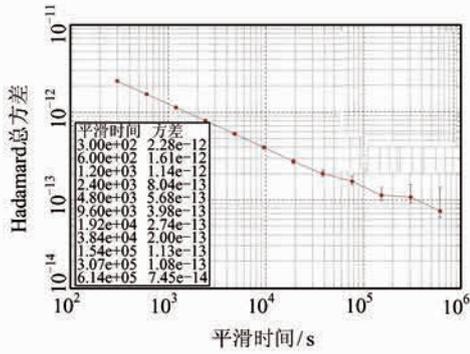
图 1 三种方差比较图

Fig. 1 Comparison of Three Kinds of Variance

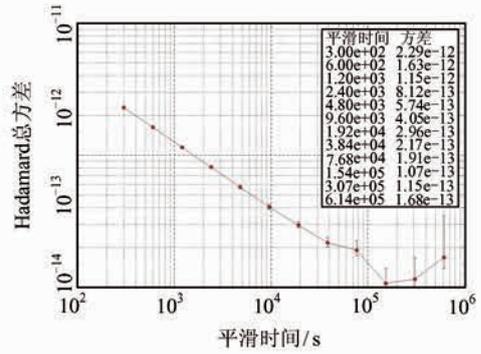
主要为,一是北斗原子钟精密钟差数据跳变和间隔比较明显,5 min 采样间隔的数据量比较多。二是北斗卫星导航系统的原子钟数据存在较大的数据跳变,经常会出现无数据段和数据间隔。在对北斗原子钟进行稳定性分析时,经常会因为数据质量比较差,只能选取特定时间段中数据质量较完整的数据进行原子钟的稳定性分析,在实际实验中,5 min 采样间隔的数据由于数据量相对较多,便于进行数据预处理进而得到可靠的钟差

数据。所以在实验计算时,若数据质量较差,采用 5 min 采样间隔的数据进行计算,经过预处理可以得到真实可靠的实验结果。若实验所选取时间段内数据质量较好,建议采用 15 min 采样间隔的数据进行原子钟时频稳定性分析。

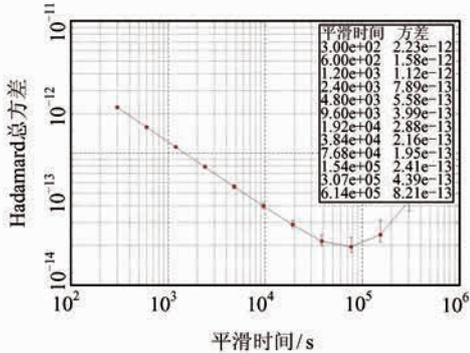
由图 5 可知,该时段 13 颗卫星的天稳值在 10^{-13} 量级,说明北斗导航卫星各个星载原子钟稳定性处在一个量级。IGSO 卫星的天稳值相差不多,而 GEO 和 MEO 卫星各星间原子钟天稳值相



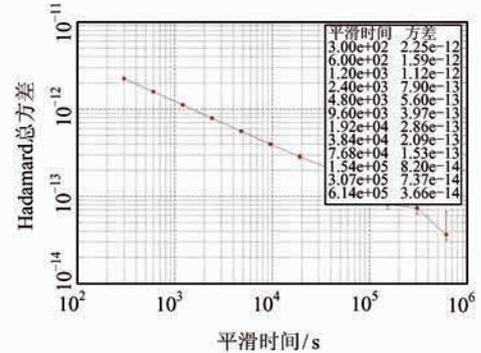
(a) C04卫星



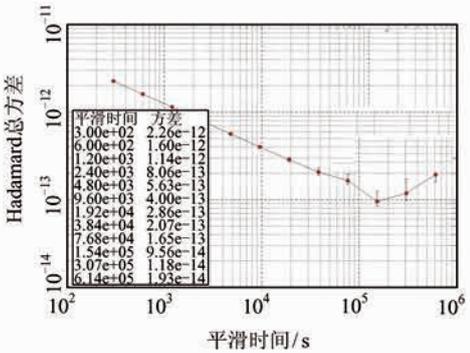
(b) C05卫星



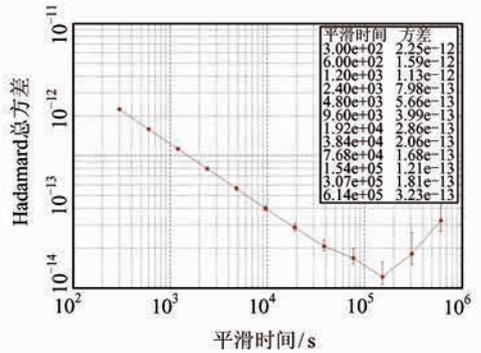
(c) C08卫星



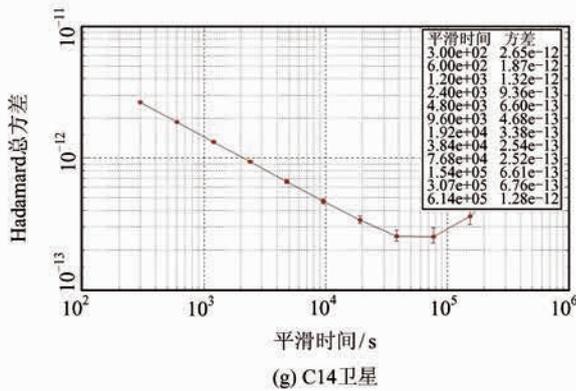
(d) C09卫星



(e) C11卫星



(f) C12卫星



(g) C14卫星

图2 稳定性变化图

Fig. 2 Stability Variation

差比较明显。由文献[4]可知,GPS和GLO-NASS的天稳都在 10^{-14} 量级,说明我国北斗星载原子钟的天稳要比GPS和GLONASS原子钟低一个数量级。

3 结语

Hadamard 方差、重叠 Hadamard 方差和

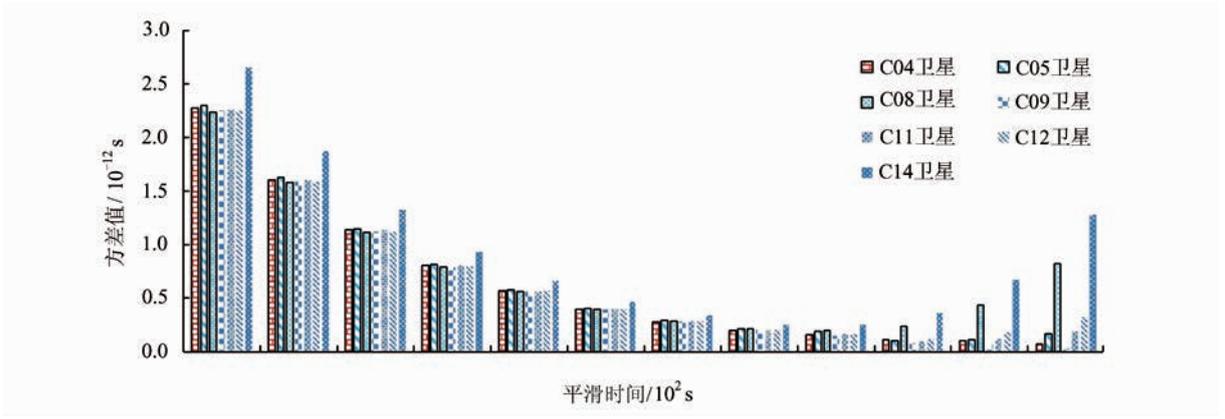


图 3 7 颗卫星总方差比较图

Fig. 3 Comparison of Total Variance for 7 Satellites

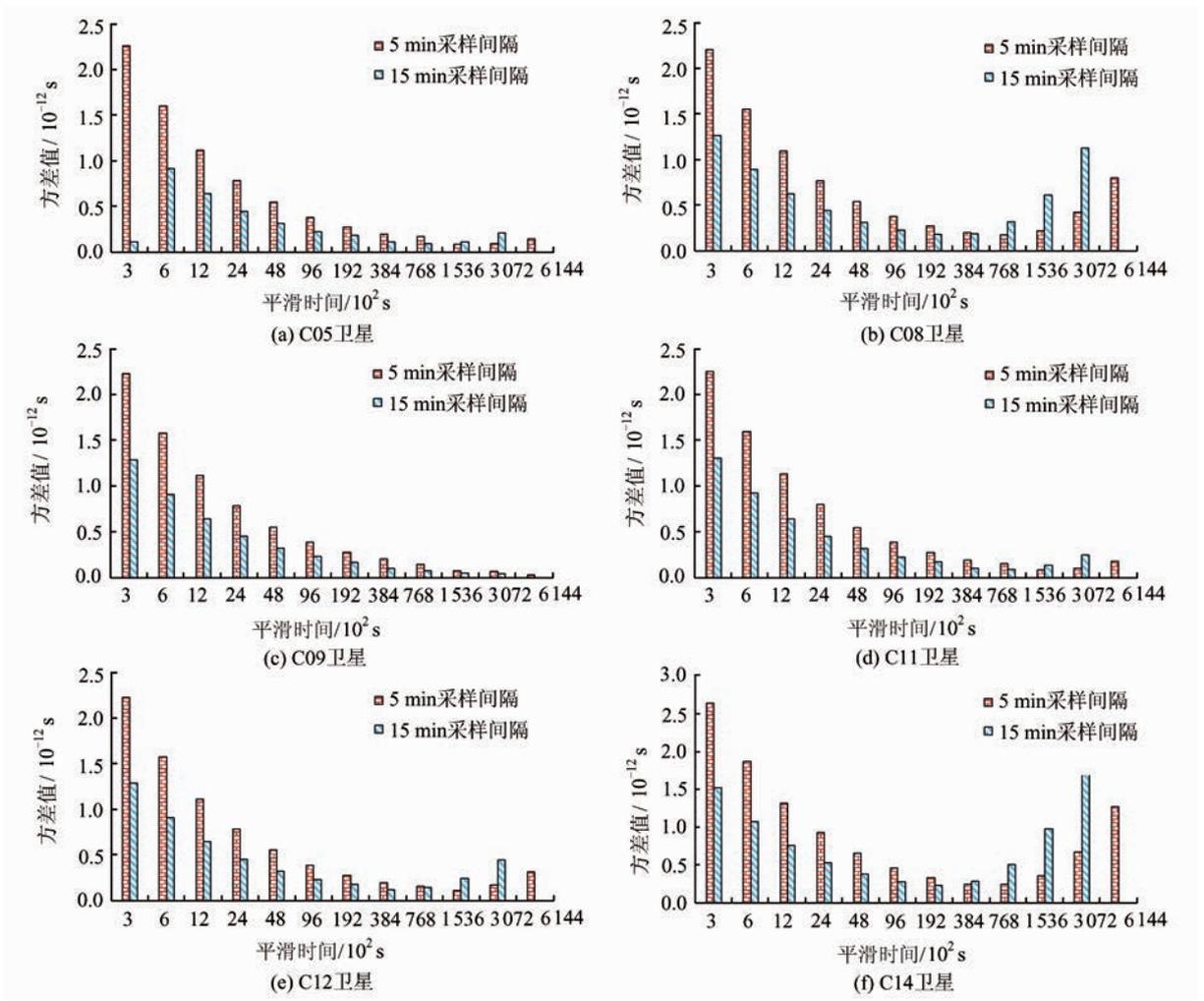


图 4 采样间隔比较图

Fig. 4 Comparison of Different Sampling Intervals

Hadamard 总方差都能很好地描述原子钟的时频稳定性特征,其变化趋势和所确定的原子钟所受噪声类型相同,但 Hadamard 总方差得出的变化趋势相比其他两种方差更加明显,且置信度在三

种方差中最可靠。因此,在 BDS 星载原子钟的时频特性分析中,当平滑时间较长时,建议优先选取 Hadamard 总方差。

北斗的 GEO 卫星原子钟的稳定性及所受噪

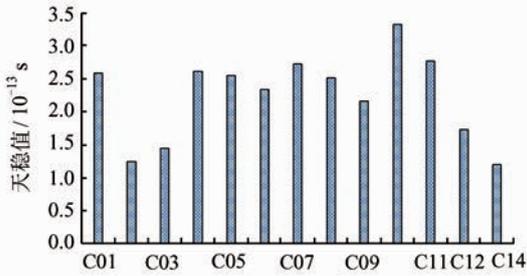


图5 13颗卫星天稳值

Fig. 5 Day Stability for 13 Satellites

声类型基本相同;MEO卫星不仅稳定性和所受噪声类型相同而且其方差值也很相似;而IGSO卫星,不同卫星的时频稳定性差异明显,所受噪声类型各不相同。因此,在分析北斗原子钟性能时,当选取时段内精密钟差数据质量比较差时,可以选取同类GEO和MEO卫星中数据质量较好的。从实验对比结果可以得出,当数据质量较好时采用15min采样间隔的数据进行试验分析,当数据质量较差时采用5min采样间隔的数据进行试验分析,这样可以保证数据的准确性。从天稳数据可知我国北斗星载原子钟天稳要比GPS和GLONASS系统的星载原子钟低一个数量级,提高我国原子钟的物理性能是提高北斗导航系统定位精度一个亟待解决的问题。

参 考 文 献

[1] Guo Hairong. Study on the Theory and Method of the Character Analysis of Navigation Satellite[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] Huang Guanwen. Research on Algorithms of Precise Clock Offset and Quality Evaluation of GNSS Satellite Clock[D]. Xi'an; Chang'an University, 2012(黄观文. GNSS星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安:长安大学,2012)

[3] Gao Weiguang, Lin Yuting, Chen Gucang, et al. The Performances Assessment Methods and Results of In-Orbit Atomic Clocks of BDS[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*. 2014, 31(4): 342-346(高为广, 蔺玉亭, 陈谷仓, 等. 北斗系统在轨卫星钟性能评估方法及结论[J]. 测绘科学技术学报. 2014, 31(4): 342-346)

[4] Zhang Qinghua, Wang Yuan, Sun yangyang, et al. Characteristic Analysis of Detection and Reparation of Cycle Slips Based on Ionosphere Residual Error Method[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(2): 62-64(张清华, 王源, 孙阳阳,

等. BDS与GPS/GLONASS星载原子钟性能的比较分析[J]. *海洋测绘*, 2015, 35(2): 62-64)

[5] Fu Wenju. Research on Prediction and Characteristics of GNSS Satellite Clock on Orbit [D]. Xi'an; Chang'an University, 2014(付文举. GNSS在轨卫星钟特性分析及钟差预报研究[D]. 西安:长安大学,2014)

[6] Feng Suiliang. Study on the Methods of Data Pre-processing and Performance Analysis for Atomic Clocks [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2013(冯遂亮. 原子钟数据预处理与钟性能分析方法研究[D]. 郑州:信息工程大学,2013)

[7] Guo Hairong, Yang Sheng, He Haibo. Analyses of Frequency Drift Characteristic for Atomic Clocks of Navigation Satellites[J]. *Global Positioning System*, 2007, 06, 002; 5-10(郭海荣, 杨生, 何海波. 导航卫星原子钟频率漂移特性分析[J]. 全球定位系统, 2007, 06, 002; 5-10)

[8] Wang Tian. Performance Evaluation of the Atomic Clock of the Beidou Navigation System [J]. *Surveying and Mapping*, 2013: s40-s43(王天. 北斗导航系统卫星原子钟性能评估[J]. 测绘通报, 2013(增刊): 40-43)

[9] Heo Y J, Cho J, Heo M B. Improving Prediction Accuracy of GPS Satellite Clocks with Periodic Variation Behavior[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(7): 3001-3008.

[10] Wang Yupu, Lv Zhiping, Chen Zhengsheng, et al. Study on the Wavelet Neural Network Algorithm for Satellite Clock Error Prediction[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(3): 20-28(王宇谱, 吕志平, 陈正生, 等. 卫星钟差预报的小波神经网络算法研究[J]. 测绘学报, 2013, 42(3): 20-28)

[11] Mao Yue, Chen Jianpeng, Dai Wei, et al. Analysis of the Stability of the Satellite Borne Atomic Clock[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(10): 182-186(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): 182-186)

[12] XU Guochang. GPS Theory, Algorithms and Application[M]. Germany: Springer, 2007: 76-77

[13] Wang Yupu, Lv Zhiping, Chen Zhengsheng, et al. Satellite Clock Error Prediction Based on Grey Model and Wavelet Neural Network[J]. *Geodetic and Global Dynamics*, 2014, 34(2): 132-136(王宇谱, 吕志平, 陈正生, 等. 基于灰色模型与小波神经网络的卫星钟差预报方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(2): 132-136)

[14] Wang Yupu, Lv Zhiping, Chen Zhengsheng, et al. A New Method for the Prediction and Interpolation

of Satellite Clock Error[J]. *Geodetic Measurements and the Earth Dynamics*, 2013, 33 (4): 112-116(王宇谱, 吕志平, 陈正生, 等. 一种新的导航卫星钟差预报与内插方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(4):112-116)

[15] Wang Qinghua, Droz Fabien, Rochat Pascal. SPT

on Board Atomic Clocks and Timing Systems in GNSS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(10):1 177-1 181(王庆华, Droz Fabien, Rochat Pascal. 用于 GNSS 的 SPT 星载原子钟及时间系统介绍[J], 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(10):1 177-1 181)

Stability Analysis of the Space-borne Atomic Clock Frequency for BDS

WANG Ning¹ WANG Yupu^{1,2} LI Linyang¹ ZHAI Shufeng¹ LV Zhiping¹

1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China

2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China

Abstract: Space-borne atomic clocks act as satellite time reference in satellite navigation systems, and their performance directly determines navigation and positioning accuracy. The Chinese BeiDou satellite navigation system (BDS) is in full construction phase. Thus, it is very important to evaluate the performance of the system. Combining the calculated results of the Hadamard Variance, the Overlapping Hadamard Variance, and the Hadamard Total Variance, currently available for evaluating the stability of space-borne rubidium atomic clocks, this paper comprehensively evaluates the frequency stability of BDS satellite clocks by using precise satellite clock bias data with 5-min and 15-min sampling intervals. Meaningful conclusions are drawn.

Key words: BeiDou satellite navigation system; satellite atomic clock; stability analysis; sample interval

First author: WANG Ning, postgraduate, specializes in studying the theory and method of navigation satellite clock data processing. E-mail: 376820438@qq.com

Corresponding author: LV Zhiping, PhD, professor. E-mail: ssscenter@126.com