

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2022.02.018

北斗星载铯钟在轨性能评估方法实践

李 炫

(中国空间技术研究院西安分院,西安 710000)

摘 要:北斗卫星导航系统装备高精度的原子钟为卫星提供高准确度、高稳定性以及低漂移率的基准频率。在某颗卫星上装备了一台铯原子钟,开机作为热备份提供备份的基准频率,在卫星上配备且提供服务的工作钟为一台氢原子钟。通过对2019年12月6日至2020年5月17日此卫星上每秒一次的主备钟相差采样数据测量值的统计、处理,以及对处理结果的分析,完成了对此卫星上星载铯原子钟的在轨性能评估。通过对处理结果的分析得出,星载铯原子钟在轨表现出的频率准确度、10 s以上的频率稳定度以及漂移率等性能与此铯原子钟在地面的测试结果基本一致。使用主备钟相差采样数据的测量值分析备份铯原子钟在轨性能方法的可行性、可信度很高。国内研发的高精度铯原子钟达到了可以为卫星提供服务的水平。

关键词:铯钟;相差;频率准确度;频率稳定度;频率漂移率

中图分类号:V11

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2022)02-0111-04

BDS spaceborne cesium clock on orbit performance evaluation method and application

LI Xuan

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: Beidou satellite navigation system equipped with a high precision atomic clock provides high accuracy, high stability and low drift rate. A cesium atomic clock is equipped on a satellite, turning as a thermal backup, providing backup of the reference frequency is equipped with a well-equipped work clock to a hydrogen atomic clock. Through the statistics, processing and analysis of the phase difference per second between main clock (H clock) and Cs clock from 6/12/2019 to 17/5/2020, then this paper evaluates the on-orbit performance of the space-borne Cs clock, the analysis of this satellite is completed. Evaluation shows that space-borne Cs clock's frequency characteristic is basically consistent as on-ground testing result, including frequency accuracy, stability above 10 seconds and frequency drift per day. The analytical method of phase difference between on-orbit main clock and Cs clock is feasible, and it has a high degree of credibility. The high-precision cesium atomic clock developed in China has reached the level of serving the satellite.

Key words: cesium clock; phase difference; frequency accuracy; frequency stability; frequency drift

0 引言

北斗系统是重要的空间基础设施,对国家安全、人民生命财产安全都有着非常重要的战略意义。从2012年12月底北斗区域卫星导航系统组网

成功,到2020年6月底国家宣布北斗全球组网成功,北斗卫星导航系统从区域走向了全球服务。在原子钟配置上北斗全球导航卫星系统在继承北斗区域导航系统,每颗星均配置4个高性能的原子钟,

收稿日期:2021-07-11; 修回日期:2022-01-13

作者简介:李炫(1985-),工程师,硕士,主要研究方向为卫星通信与导航。E-mail:27054764@qq.com

包括氢钟、铷钟,其中一台作为频率源,为整星提供高性能的时间服务,一台作为热备份且随时准备作为主钟的替换,另外两作为冷备份备用。

卫星钟的性能直接影响星上有效载荷的运行、导航定位、授时等服务精度^[1-6]。卫星在地面测试完成,随整星发射入轨后,性能可能会受空间环境影响发生变化。在星载原子钟提供服务后,地面用户可使用多种方式对星载原子钟的综合性能进行评估,原子钟的性能重要性使得这个问题成为了很多地面用户关心的问题之一^[7-10]。

基于铯原子钟在地面使用性能也较好的情况下^[11-12],北斗某星首次配置铯钟在轨作为热备份钟使用,主钟为氢钟。文章通过对主备钟相差测量的数据,对星载铯钟的频率性能做出评估。结果分析表明铯钟在轨后频率准确度、10 s 以上的频率稳定度、频率漂移率等性能与地面测试结果一致性较高,相差测量数据分析备份铯钟性能方法可行,且可信度很高。

1 星载铯钟性能评估方法

原子钟的性能评估一般使用频率准确度、频率稳定度、频率漂移率来衡量。频率准确度是输出频率与标准频率的相对偏差;频率稳定度是指输出频率相对标准频率的方差(一般用 Allan 方差或者 Hadamard 方差表征);频率漂移率是指输出频率相对于标准频率每天的偏差量^[13-14]。而相位测量是通过对两个输出频率做一个时间域的相位差测量^[15-17],在轨后容易通过相位差测量值对原子钟性能进行评估。

北斗某星上使用氢钟作为主钟,铯钟作为热备份钟,通过基准频率合成器生成卫星使用的 10.23 MHz 的标准频率源。将主、备路 10.23 MHz 信号分别与

公共晶振输出 10.229 MHz 信号混频产生主、备路 1 kHz 信号,经低通滤波、放大、过零检测、整形形成拍频 1 kHz 的 TTL 信号送到控制管理单元电路,然后用采样钟对两个 1 kHz 信号进行计数,获得两路信号之间的相位差。这个相位差是 10.23 MHz 频率信号一个周期内的变化值,范围是 $[0, 97.75 \text{ ns}]$,其中比相仪的频率分辨率为 1.5 ps。测量原理如图 1 所示。

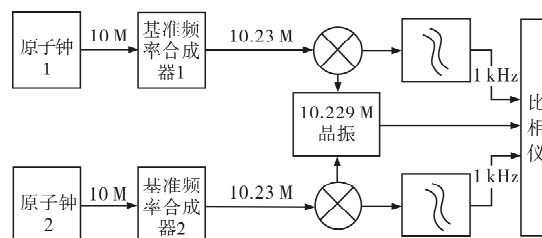


图 1 主备份钟相差测量原理框图

Fig. 1 The phase difference per second between main and backup clock measuring principle

采用卫星钟相差测量,其相对频差的计算公式为:

$$\gamma(\tau) = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_d}{f_0} \frac{\Delta x}{\tau} = \frac{1 \times 10^3}{10.23 \times 10^6} \cdot \frac{\Delta x}{\tau} = \frac{\Delta x}{10.23 \times 10^3 \cdot \tau} \quad (1)$$

式(1)中: f_0 为 10.23 MHz;

f_d 为 1 kHz;

τ 为采样时间;

Δx 为累计相位时间差。

从式(1)可知,采样时间越长,测频精度越高,实践中比相仪用于测 1 000 s 以上铷原子频标长期稳定度。且测频精度也与时差分层的最大时差 97.75 ns,比相仪相位分辨率约为 1.592 4 ps,频率准确度测量分辨率与采样时间的关系如表 1 所列。

表 1 频率准确度测量分辨率与采样时间对应关系表

Tab. 1 Relationship between frequency accuracy measurement resolution and sampling time

采样时间	1 s	10 s	100 s	1 000 s	10 000 s	86 400 s
频率准确度分辨率	1.59×10^{-12}	1.59×10^{-13}	1.59×10^{-14}	1.59×10^{-15}	1.59×10^{-16}	1.59×10^{-17}

结合表 2 铯钟地面测试的频率稳定度结果可知,使用相差测试数据采样时间在 10 s 以上都可以

满足这种关系,评估的铯钟 10 s 以上的频率稳定度结果可信。

表 2 星载铯钟频率稳定度

Tab. 2 Frequency stability of spaceborne cesium clock

	1 s	10 s	100 s	1 000 s	10 000 s	86 400 s
地面测量结果	1.19×10^{-12}	2.60×10^{-12}	1.09×10^{-12}	3.06×10^{-13}	9.45×10^{-14}	3.62×10^{-14}

通过对相差测量量进行分析可得到主备钟相对的稳定性、准确度以及漂移率等性能数据。测量精度高、测量方法可信。

2 星载铯钟相差数据分析与结果

北斗某导航卫星使用铯钟作为热备钟,氢钟作为主钟,分析 2019 年 12 月 6 日至 2020 年 5 月 17 日的主备钟相差数据,对铯钟备钟的频率特性进行评估。期间由于在轨数据的不连续性,去掉了数据不完整的 11 个小段。

实际处理数据时,使用 Stable32 软件,将相差数据转换为频差数据,并去掉野值后,频差数据如图 2 所示。

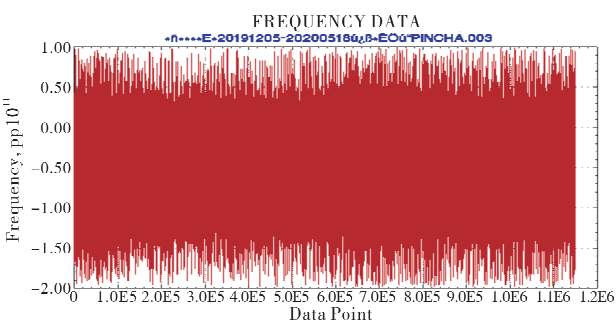


图 2 主备钟(互比)频差数据
Fig.2 Frequency difference data of main and stand-by clocks (mutual comparison)

由于数据量较大,计算稳定度时使用了 10 次平均,原始数值得到的频率特性评估数据如表 3 所列。

表 3 原始评估数据
Tab.3 Raw evaluation data

频率准确度	频率稳定度					频率漂移率
	10 s	100 s	1000 s	10000 s	86400 s	
	-4.90×10^{-12}	2.2×10^{-12}	1.03×10^{-12}	3.03×10^{-13}	1.54×10^{-13}	8.75×10^{-14}

由于工作中氢钟的稳定度优于铯钟的 3 倍,可以认为主备钟相差稳定度指标评估数据就是铯钟的频率稳定度。

铯钟地面测试结果和评估结果对比分析如表 4 所列。地面测试结果与在轨稳定性评估曲线如图 3 所示。

表 4 评估数据与地面测试数据对比表
Tab.4 Comparison between evaluation data and ground test data

项目	地面真空实测	评估数据	备注
频率准确度	/	-1.29×10^{-12}	-4.90×10^{-12}
频率稳定度	10 s	2.60×10^{-12}	2.20×10^{-12}
	100 s	1.09×10^{-12}	1.03×10^{-12}
	1000 s	3.06×10^{-13}	3.03×10^{-13}
	10000 s	9.45×10^{-14}	1.54×10^{-13}
	86400 s	3.62×10^{-14}	8.75×10^{-14}
	/天	5.73×10^{-16}	-9.8×10^{-17}

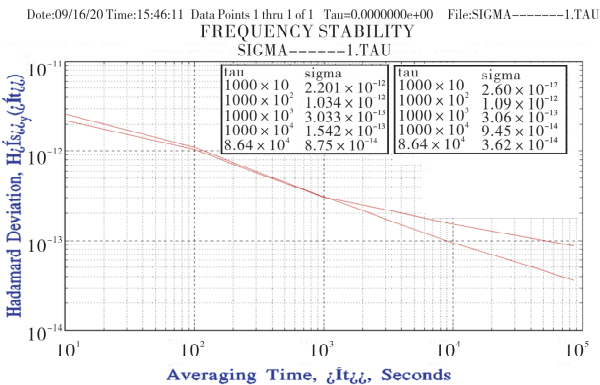


图 3 地面测试结果与在轨后稳定性评估曲线图
Fig.3 Ground test results and on orbit stability evaluation curve

3 结论

星载铯钟在轨工作,开机作为热备份钟使用,相差测量值对于频率特性的评估是目前可获得的唯一原始数据源。评估结果显示:铯钟准确度可达 10^{-12} 量级,天稳达到大系数的 10^{-14} 量级,漂移率在 10^{-16} 量级。使用相差测量法对铯钟的频率特性进行估计,评估数据与地面测试结果基本一致,评估

方法可信。从星载铯钟地面测试数据与在轨后的数据对比可以看出,国内星载铯钟的频率特性表现优异,具备在航天器上使用的条件。

参考文献:

- [1] 王庆华, DROZ F, ROCHAT P. 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): 1177-1181.
- [2] 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: 36-40.
- [3] 陈建鹏, 毛悦. 利用星地双向伪距数据进行钟差预报分析[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(3): 181-183 + 186.
- [4] 张立新, 刘宇红. GPS 的时频系统[J]. 空间电子技术, 2000(4): 20-24.
- [5] YANG Y X, LI J L, WANG A B, et al. Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of Beidou regional navigation satellite system[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(1): 144-152.
- [6] 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, 2018, 61(1): 145-153.
- [7] GAO W G, JIAO W H, XIAO Y, et al. An evaluation of the Beidou time system (BDT) [J]. Journal of Navigation, 2011, 64(S1): 31-39.
- [8] 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 + 68.
- [9] 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): 1047-1052.
- [10] 张清华, 隋立芬, 贾小林, 等. 全球定位系统 BLOCK II F 星载原子钟性能评估[J]. 导航定位学报, 2014, 2(1): 46-50.
- [11] 张军, 王向磊, 王路生, 等. 国产小铯钟比测结果分析[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 162-170.
- [12] 张洪源, 牛亚飞, 李彬, 等. 5071A 铯原子钟的铯束管替代研究[J]. 现代导航, 2020, 11(5): 325-328.
- [13] 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.
- [14] 王义遒. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [15] 孟彦春, 张立新, 孙云峰. 一种新型全数字频率传递方法[J]. 空间电子技术, 2017, 14(3): 80-84 + 102.
- [16] 赵明, 袁军, 黄剑. 一种利用锁相环及 DDS 电路产生频率综合的方法[J]. 空间电子技术, 2015, 12(5): 44-47.
- [17] 周渭. 时频测控技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.

《空间电子技术》投稿须知

《空间电子技术》创刊于1971年，由中国航天科技集团有限公司西安空间无线电技术研究所主办，国内公开发行人，双月刊。

本刊内容涵盖卫星通信、微波遥感、天线及其展开技术、卫星测控、数据传输与处理、电磁环境与可靠性、计算机应用、航天工艺及材料、空间站与载人航天、深空探测等空间电子学领域及其交叉学科。凡在理论与应用实践上具有创新的，代表我国最新空间电子学科技研究水平的学术论文、有科学依据和可靠数据的技术报告、阶段性成果报告以及属于前沿学科并对学科发展有指导意义的展望评论性文稿均可投稿。

1 总体要求

1.1 作者应保证拥有合法的著作权。合作的论文，署名须征得合作者的同意。作者必须遵守学术规范和准则，切勿一稿多投，杜绝抄袭、剽窃等。

1.2 来稿要求主题突出，观点明确，数据可靠，立论严谨，有一定的创新性。除学术水平外，文章需结构完整、文字简练、图表清晰、格式规范。

1.3 来稿不得涉及国家秘密。凡涉及国家或单位秘密内容的文章，需经脱密处理。

1.4 本刊不接收纸质投稿、邮箱投稿，请登录期刊网站<http://kjdjzs.ijournals.cn>上传稿件及相关材料。

2 内容要求

2.1 摘要

摘要是论文内容不加注释的简短陈述。摘要撰写应包含“目的”、“方法”、“结果”、“结论”四要素，有时也可增加“局限”等部分。摘要部分应突出文章的创新介绍，简明扼要的说明文章的创新之处。摘要应客观描述，列出重要数据、参数或事实，尽量避免主观评价。中文摘要要求在300字以上，英文摘要字数为300-400个英文单词，中英文摘要内容一致。

2.2 引言

引言的写作建议包括研究领域背景、已有研究成果的描述；陈述进一步研究的意义；阐述作者本项研

究的目的和创新性等，最后可给出文章写作结构。

2.3 研究方法及过程

清楚介绍研究条件、思路、设备（计算方法、参数）等，保证他人能够重复您的工作。同时通过图、表描述得到的结果并加以分析及评价。

2.4 结论

在结果的基础上总结工作得到的重要论点，尽可能给出一个清晰的结论，对每一个结论需总结论证，突出工作中的创新性，同时也可以指出工作的局限性和未来工作展望。请注意不要简单重复摘要和引言。

2.5 其他

论文中的量和单位的符号、数字、外文字母的正斜体、大小写、上下标等应符合国家标准；参考文献应引用公开出版物，且索引信息应该完整，以便阅者查证。

其他写作格式和规范的其他要求，请详见期刊网站中相关规定和说明。

3 注意事项

3.1 本刊已加入《中国学术期刊（光盘版）》等相关数据库，作者著作权使用费与稿酬一次性给付。相关合作数据库可以数字化传播本刊全文，如有异议，请提前说明。

3.2 省部级及以上基金课题项目论文，本刊提供优先发表绿色通道。上传稿件时请务必注明基金等级，以便编辑部分类处理。

3.3 作者须自留底稿及电子文件，若6个月未答复作者稿件刊用与否，作者有权自行处理，但需通知编辑部。

通信地址：陕西省西安市东长安街504号

《空间电子技术》编辑部

邮 编：710000

电 话：029-85613384

E-mail: kjdjzs504@163.com

网 址：<http://kjdjzs.ijournals.cn>

收录情况:

中国核心期刊遴选数据库

中国学术期刊综合评价数据库 (CAJCED)

中国期刊全文数据库 (CJFD)

中文科技期刊数据库 (CSTJ)

中国知网、万方数据、维普数据、超星网络等平台全网搜索

空间电子技术

SPACE ELECTRONIC TECHNOLOGY

(双月刊·1971年创刊)

第19卷 第2期 总第200期

2022年4月25日

主管单位 中国航天科技集团有限公司

主办单位 西安空间无线电技术研究所

出版发行 《空间电子技术》编辑部

地 址 西安市165信箱

邮 编 710000

电 话 029-85613384

E-mail kjdzjs504@163.com

网 址 kjdzjs.ijournals.cn

印 刷 西安创维印务有限公司



投稿网站



微信公众号

中国标准连续出版物号

ISSN 1674-7135
CN 61-1420/TN

国内定价: 12.00元