星载原子钟磁致频移影响在轨评估

林宝军^{1,2,3,4}, 李绍前^{1,2,4*}, 董日昌¹, 刘迎春¹, 龚文斌¹

1. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210;

4. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

*联系人, E-mail: lisq@microsat.com

收稿日期: 2020-06-30; 接受日期: 2020-09-01; 网络出版日期: 2020-11-24

上海市青年科技英才扬帆计划(编号: 19YF1446300)资助项目

摘要 星载原子钟作为磁敏感设备, 外界磁场变化会导致星载原子钟输出频率发生变化. 本文采用星载主备原子钟比相法评估了10颗配置星载氢原子钟的MEO导航卫星原子钟频率稳定度, 短期稳定度平均值优于 $1 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$, 天稳均优于 7×10^{-15} . 基于该稳定度水平, 本文针对导航卫星原子钟磁致频移进行了初步评估, 得到磁力矩器工作情况下原子钟磁致频移达到 1×10^{-13} 量级, 磁力矩器持续工作1 h将引起钟差预报误差0.4 ns. 本文将在轨磁力矩器工作状态等效为磁致频移噪声, 仿真分析了其对星载原子钟稳定度的影响, 仿真结果表明, 该磁致频移噪声将恶化星载原子钟长期稳定度, 尤其对稳定度更高的原子钟恶化更明显. 本文最后就如何降低磁致频移对星载原子钟的影响进行了讨论.

关键词 星载原子钟, 钟差预报, 频率稳定度, 磁致频移

PACS: 06.20.Dk, 06.30.Ft, 91.10.By, 91.10.Fc

1 引言

星载原子钟在卫星导航、空间引力波探测、深空探测等前沿基础学科和高科技领域有着重要和广泛的应用需求^[1-3]. 以导航卫星为代表的航天器广泛采用铷钟、铯钟及被动氢钟作为星载原子钟. 经过几十年的发展, 各类星载原子钟的性能均得到大幅度提升, 星载铷钟短期稳定度已经优于 $1 \times 10^{-12}/s$, 长期稳定度优于 $1 \times 10^{-14}/d$; 而高精度星载被动氢钟长期稳定度更是

优于 $5 \times 10^{-15}/d$ ^[1,4], 与GPS-3星载脉冲光抽运铯钟相当^[5]. 未来包括汞离子微波钟、积分球冷原子钟等新型星载原子钟性能指标将进一步提高^[6-8].

原子钟易受温度、磁场等物理环境变化影响, 通过改进物理系统结构设计、优化电路参数调试, 星载原子钟温度系数已经达到 $1 \times 10^{-14}/^{\circ}C$ 量级; 通过采用高精度高稳定度原子钟控温技术, 星载原子钟工作温度起伏可以控制在 $\pm 0.05^{\circ}C$ ^[9]. 因此, 温度变化对星载原子钟稳定度的贡献小于 1×10^{-15} , 可以忽略不计. 但

引用格式: 林宝军, 李绍前, 董日昌, 等. 星载原子钟磁致频移影响在轨评估. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019514

Lin B J, Li S Q, Dong R C, et al. On-orbit evaluation of influence of magnetic-induced frequency shift on space borne atomic clock (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019514, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0225](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0225)

是卫星磁力矩器工作产生磁场会致使原子跃迁能级发生二阶塞曼频移^[10,11], 通过在星载原子钟内部安装多层磁屏蔽壳可以降低原子钟对外界磁场的敏感性, 但是磁敏感系数仍然达到 $1 \times 10^{-13}/\text{Gs}$ 量级. 另外, 卫星在轨姿态控制阶段用于动量轮卸载的磁力矩器在原子钟所在位置产生的磁场强度达到 1 Gs 量级, 相应磁力矩器工作产生的磁场对星载原子钟的磁致频移贡献达到 1×10^{-13} 量级. 磁力矩器工作模式自主切换, 持续时间均不确定, 工作持续时间从几分钟到几小时不等, 以典型工作时间 1 h 为例, 带入钟差模型公式, 磁致频移引起的钟差预报误差为 0.4 ns 左右. 另外, 由于磁力矩器工作模式切换时刻随机, 影响星钟频率稳定度, 尤其是长期稳定度, 严重制约更高性能星载原子钟的在轨表现. 为了解决磁致频移影响星载原子钟频率稳定性的问题, 本文对星载原子钟磁致频移进行了精确评估, 并提出了星载原子钟磁致频移实时动态补偿技术方案.

2 星载原子钟稳定度评估

根据上述分析, 星载原子钟磁致频移的大小预期为 1×10^{-13} 量级, 为了精确评估该磁致频移, 星钟频率评估稳定度通常需要优于 3×10^{-14} . 星载原子钟频率稳定度(即阿兰方差)随积分时间变化, 被动型原子钟稳定度满足 $\tau^{-1/2}$ 变化关系. 以磁力矩器典型工作时间 1 h 为例, 需要星钟频率稳定度满足 $<3 \times 10^{-14}/1 \text{ h}$. 文献[12]详细介绍了评估星载原子钟性能常用的两种方法: 星地双向时间比对法(Two-Way Time Transfer, TWTT)和精密定轨与时间同步法(Orbit Determination and Time Synchronization, ODS).

TWTT相对ODTS可以消除电离层延迟、轨道误差等公共误差, 评估精度较高. 但是两种方法仍然耦合了发射机时延、接收机时延、微波信号处理及传递时延等误差, 中短期稳定度大于 $3 \times 10^{-14}/1 \text{ h}$ ^[1,12], 不能真实地反映星载原子钟水平, 利用其中短期稳定度水平评估磁致频移误差较大.

为了准确评估星钟磁致频移, 本文采用了星载主备钟比相方法评估星钟频率稳定度. 原子钟磁致频移主要受与其C场同方向的磁场影响, 由于卫星配置了两种类型的原子钟且安装方位互相垂直, 因此主备钟磁致频移不同. 卫星在轨主钟与备钟同时开机工作,

并实时测量主钟与备钟相位差, 通过遥测回传到地面, 对相位差数据进行处理得到

$$\sigma_{\text{总}} = \sqrt{\sigma_{\text{主}}^2 + \sigma_{\text{备}}^2}, \quad (1)$$

其中, $\sigma_{\text{主}}$ 为星载主钟稳定度(阿兰标准差), $\sigma_{\text{备}}$ 为星载备钟稳定度. 本文仅针对主钟配置被动氢钟的MEO卫星钟进行评估, 备钟为高精度铷钟. 星载氢钟相比铷钟频率漂移率更小, 长期稳定度更高, 本文采用Hadamard方差统计, 去掉频率漂移影响后, 中短期稳定度水平一致, 因此得到

$$\sigma_{\text{主}} = \sigma_{\text{备}} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{总}}^2}{2}}. \quad (2)$$

本文采用该方法评估了10颗配置星载氢钟的MEO卫星钟稳定度, 如图1所示, 1 h 积分时间稳定度均优于 2×10^{-14} , 满足预期磁致频移评估精度需要.

3 星载原子钟磁致频移评估及影响分析

为了定性说明磁力矩器工作对星载原子钟频率的影响, 本文统计了一段导航卫星星载氢钟在轨遥测与磁力矩器工作状态遥测对应关系, 如图2所示, 其中, 氢钟二次谐波起伏体现星载氢钟工作频率变化, 磁力矩器工作状态切换时, 氢钟二次谐波产生明显跳跃台阶, 磁力矩器每段工作时间持续 1 h 左右后关闭, 氢钟二次谐波重新跳回到初始状态量.

图1 (网络版彩图) 10颗配置星载氢钟的MEO卫星钟稳定度

Figure 1 (Color online) Stability of 10 MEO satellites clocks equipped with hydrogen clocks.

图 2 (网络版彩图)氢钟二次谐波遥测量与磁力矩器开关状态关系
Figure 2 (Color online) Relationship between the second harmonic remote measurement of hydrogen clock and the switching state of magnetorquers.

原子钟频率偏移与磁场强度的关系可以表示为

$$\Delta f=kB, \tag{3}$$

其中, k 表示磁敏感系数, B 表示磁场强度. 由于本文采用星载氢钟与铷钟比相数据评估磁致频移, 而磁场对氢钟和铷钟均会产生频率偏移, 因此频移评估结果反映主备钟相对磁致频移.

卫星在3个方向共安装有4个磁力矩器(编号X, Y, Z1, Z2), 每个磁力矩器有正向开、负向开和关闭3种状态, 如表1所示, 对应星载原子钟环境磁场共有81种状态, 星载原子钟频率变化与81种磁力矩器工作状态一一对应.

本文以C27导航卫星为例进行磁致频移评估, 如图2所示, 采用2018年12月25日–2018年12月29日时间段遥测数据进行分析. 对在轨主备原子钟比相数据进

行处理得到主备钟相对频差数据, 分别统计对应图2磁力矩器工作前后相等时间段(~1 h)的频差均值, 如表2所示, 磁力矩器工作引起原子钟频率偏移 1×10^{-13} 左右, 误差小于 2×10^{-14} , 与预期结果相符.

表2中实例1和实例2为在磁力矩器状态变化相同的两次测试中的结果, 从结果中可以看出, 同样的磁力矩变化对星载钟频率的影响相同.

本文以上述星载原子钟磁致频移评估结果为基础, 结合卫星在轨磁力矩器工作状态遥测, 选取一组磁力矩器典型时变工作状态, 如图3所示, 初步统计了20 d左右的磁力矩器工作状态遥测量. 其中, 电压值2对应磁力矩器正向电流工作状态, 电压值–2对应磁力矩器负向电流工作状态, 电压值0对应磁力矩器关机状态.

以图3中磁力矩器Z2工作状态为基础, 模拟产生磁致频移时变噪声, 其中, 磁致频移幅度设定为 1×10^{-13} , 依次调制到星载氢原子钟地面测试频差数据、模拟频差数据1 ($1\times10^{-12}\tau^{-1/2}$)、模拟频差数据2 ($3\times10^{-13}\tau^{-1/2}$), 分别仿真分析了该噪声对上述三类典型原子钟频率稳定度的影响. 如图4所示, 对比分析了磁力矩器工作对星载原子钟稳定度的影响, 黑色点划线表示地面氢钟测试稳定度, 红色点划线表示氢钟调制磁力矩器工作产生磁致频移(1×10^{-13})噪声后稳定度的

表 1 不同磁力矩器开关状态组合

Table 1 Switch state combination of different magnetorquers

磁力矩器状态	磁力矩器X	磁力矩器Y	磁力矩器Z1	磁力矩器Z2
正向	X正	Y正	Z1正	Z2正
关	X关	Y关	Z1关	Z2关
反向	X反	Y反	Z1反	Z2反

表 2 星载原子钟频率与磁力矩器工作状态的关系初步评估结果

Table 2 Preliminary evaluation results of the relationship between the frequency of the atomic clock on board and the working state of the magnetorquers

实例1		实例2		实例3	
磁力矩器状态	频率变化	磁力矩器状态	频率变化	磁力矩器状态	频率变化
X _关 Y _关 Z1 _关 Z2 _关	-3.2531×10^{-10}	X _关 Y _关 Z1 _关 Z2 _关	-3.2822×10^{-10}	X _关 Y _关 Z1 _关 Z2 _关	-3.2869×10^{-10}
X _关 Y _正 Z1 _正 Z2 _正	-3.2541×10^{-10}	X _关 Y _正 Z1 _正 Z2 _正	-3.2831×10^{-10}	X _正 Y _关 Z1 _反 Z2 _反	-3.2858×10^{-10}
X _关 Y _关 Z1 _关 Z2 _关	-3.2531×10^{-10}	X _关 Y _关 Z1 _关 Z2 _关	-3.2823×10^{-10}	X _关 Y _关 Z1 _关 Z2 _关	-3.2870×10^{-10}

图 3 (网络版彩图)卫星磁力矩器工作状态随时间变化图
Figure 3 (Color online) Working state of satellite magnetorquers versus time.

图 4 (网络版彩图)磁力矩器开关对氢原子钟稳定度影响. 黑色点划线: 星载氢原子钟地面测试典型稳定度曲线; 红色点划线: 施加磁致频移幅度为 1×10^{-13} , 特性如图3的噪声后的氢原子钟稳定度
Figure 4 (Color online) Influence of magnetorquers switch on the stability of hydrogen atomic clock. Black dot line: typical stability curve of hydrogen atomic clock on the ground; red dot line: the stability of hydrogen atomic clock with the noise that the applied magnetic frequency shift amplitude is 1×10^{-13} , and the characteristics are as shown in Figure 3.

变化, 模拟在轨磁力矩器工作对星载原子钟的稳定度影响. 仿真结果显示磁致频移噪声对原子钟中长期稳定度恶化2倍左右. 对比分析图5和6, 可以预期, 该噪声对更高性能的星载原子钟稳定度恶化效果更加严重.

4 讨论与结论

解决由于星载原子钟磁致频移导致的原子钟长期稳定度恶化问题主要有两种方法: 一种方法是增加磁屏蔽防护层厚度, 但需要增加卫星重量, 仅可在未发射的卫星上实施; 另一种方法是对星载原子钟在轨磁致频移实时动态补偿, 可通过卫星软件在轨重构解决, 原理如图7所示.

图 5 (网络版彩图)模拟磁力矩器工作对原子钟稳定度影响. 黑色点划线: 模拟原子钟稳定度满足 $1 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$; 红色点划线: 磁致频移幅度为 1×10^{-13} , 特性如图3的噪声对模拟原子钟稳定度的影响.
Figure 5 (Color online) Simulated influence of magnetorquers on the stability of hydrogen atomic clock. Black dot line: the stability of the simulated atomic clock is $1 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$; red dot line: the stability of simulated atomic clock with the noise that the applied magnetic frequency shift amplitude is 1×10^{-13} , and the characteristics are as shown in Figure 3.

图 6 (网络版彩图)模拟磁力矩器工作对原子钟稳定度影响. 黑色点划线: 模拟原子钟稳定度满足 $3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$; 红色点划线: 磁致频移幅度为 1×10^{-13} , 特性如图3的噪声对模拟原子钟稳定度的影响

Figure 6 (Color online) Simulated influence of magnetorquers on the stability of hydrogen atomic clock. Black dot line: the stability of the simulated atomic clock is $3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$; red dot line: the stability of simulated atomic clock with the noise that the applied magnetic frequency shift amplitude is 1×10^{-13} , and the characteristics are as shown in Figure 3.

该算法利用星载原子钟在轨测试TWTT比对数据或ODTS结算钟差数据及在轨磁力矩器工作状态遥测数据, 精确评估卫星姿轨控阶段磁力矩器工作前后星载原子钟频率的变化.

基于该磁致频移评估结果, 建立星载原子钟频率

图 7 星载原子钟磁致频移实时补偿算法

Figure 7 Real-time compensation algorithm of magnetic frequency shift of satellite atomic clock.

变化与磁力矩器工作状态对应的状态矩阵, 并在传统钟差模型基础上添加磁致频移项, 建立改正钟差模型, 实现实时动态补偿磁致频移 δ , 抑制磁力矩器产生的磁场跳变对星载时频系统的影响.

本文针对导航等航天器星载原子钟磁致频移实时动态补偿的迫切需求, 利用星载主备钟比相技术评估了不受星地时频传递链路时延、接收机时延、发射机时延、微波处理过程时延影响的星载原子钟稳定度, 中期稳定度优于 $2 \times 10^{-14}/1$ h. 基于该稳定度水平初步评估了主备钟相对磁致频移, 结果为 1×10^{-13} 量级, 与预期相符. 基于该磁致频移幅度及在轨磁力矩器工作状态等效噪声, 仿真分析了磁致频移对星载原子钟稳定度的影响, 结果表明, 该类型频移噪声对星载原子钟中长期稳定度恶化明显, 尤其限制高性能星载原子钟的性能发挥, 影响导航卫星钟差预报精度.

参考文献

- Guo S R, Cai H L, Meng Y N, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance (in Chinese). *Acta Geodaet Cartogr Sin*, 2019, 48: 810–821 [郭树人, 蔡洪亮, 孟铁男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能. *测绘学报*, 2019, 48: 810–821]
- Delva P, Puchades N, Schönemann E, et al. Gravitational redshift test using eccentric *Galileo* satellites. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 231101, arXiv: 1812.03711
- Herrmann S, Finke F, Lulf M, et al. Test of the gravitational redshift with *Galileo* satellites in an eccentric orbit. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 231102, arXiv: 1812.09161
- Shuai T, Xie Y H. The onboard passive hydrogen master for navigation satellite (in Chinese). *Science: Shanghai*, 2016, 68: 11–15 [帅涛, 谢勇辉. 导航卫星星载氢原子钟. *科学: 上海*, 2016, 68: 11–15]
- Liu C B. 2017 Year in review: Foreign navigation satellites (in Chinese). *Space Int*, 2018, 470: 33–38 [刘春宝. 2017年国外卫星导航卫星发展综述. *国际太空*, 2018, 470: 33–38]
- Liu P, Meng Y, Wan J, et al. Scheme for a compact cold-atom clock based on diffuse laser cooling in a cylindrical cavity. *Phys Rev A*, 2015, 92: 062101, arXiv: 1509.07650
- Wang Y, Meng Y, Wan J, et al. Optical-plus-microwave pumping in a magnetically insensitive state of cold atoms. *Phys Rev A*, 2018, 97: 023421
- Wang D, Guo R, Xiao S, et al. Atomic clock performance and combined clock error prediction for the new generation of BeiDou navigation satellites. *Adv Space Res*, 2019, 63: 2889–2898
- Lin S F, Li K, Jiang G Z, et al. Method of temperature control and its validation for atomic clock cabin on navigation satellite (in Chinese). *Chin J*

- Space Sci, 2019, 39: 381–387 [林士峰, 李楷, 蒋桂忠, 等. 导航卫星原子钟舱温度控制方法及其验证. 空间科学学报, 2019, 39: 381–387]
- 10 Dong R, Wei R, Du Y, et al. Magnetic field measurement by weak magnetic-sensitive Zeeman splitting. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 152402
- 11 Wang W, Dong R, Wei R, et al. Measuring magnetic field vector by stimulated Raman transitions. *Appl Phys Lett*, 2016, 108: 122401
- 12 Wang W, Wang Y P, Wang B, et al. Accuracy evaluation of BDS satellite precise clock bias (in Chinese). *J Nav Posit*, 2020, 8: 20–25 [王威, 王宇谱, 王彬, 等. BDS卫星精密钟差性能综合评定. 导航定位学报, 2020, 8: 20–25]

On-orbit evaluation of influence of magnetic-induced frequency shift on space borne atomic clock

LIN BaoJun^{1,2,3,4}, LI ShaoQian^{1,2,4*}, DONG RiChang¹, LIU YingChun¹ & GONG WenBin¹

¹ Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

⁴ Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

The output frequency of an on-board atomic clock changes with a change in the external magnetic field as it is a magnetic sensitive device. In this paper, the phase comparison method is employed for the main and standby atomic clocks to evaluate the frequency stability of 10 Medium Earth Orbit (MEO for short) navigation satellite atomic clocks equipped with hydrogen atomic clocks. The average short-term stability is higher than $1 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$, and the daily stability is higher than 7×10^{-15} . Based on this stability level, this paper presents a preliminary evaluation of the magnetic frequency shift in the atomic clock in the navigation satellite. The magnetorquer can cause a shift in the magnetic frequency of the atomic clock to an order of 1×10^{-13} . In addition, the continuous operation of the magnetic torque converter for 1 h will cause the prediction error of the clock difference to be 0.4 ns. In this paper, the working state of the on-orbit magnetorquer is equivalent to the magnetic frequency shift noise, and its influence on the stability of the on-board atomic clock is simulated and analyzed. The simulation results show that the magnetic frequency shift noise worsens the long-term stability of the on-board atomic clock, especially for those with higher stability. Furthermore, the possible ways of minimizing the effect of the magnetic frequency shift on the atomic clock are discussed.

on board atomic clock, clock prediction, frequency stability, magnetic frequency shift

PACS: 06.20.Dk, 06.30.Ft, 91.10.By, 91.10.Fc

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0225](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0225)