北斗导航卫星氢原子钟性能分析评估

帅涛^{1*}, 林宝军², 张军², 刘利³, 林传富¹, 谢勇辉¹, 陈鹏飞¹, 唐成盼¹, 周善石¹

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203;

3. 北京卫星导航中心, 北京 100094

*联系人, E-mail: shuait@shao.ac.cn

收稿日期: 2020-07-09; 接受日期: 2020-09-11; 网络出版日期: 2020-12-15

青年科学基金(编号: 11403078)和中国科学院青年创新促进会(编号: 2020264)资助项目

摘要 星载原子钟是导航卫星最重要的载荷之一, 负责星上时间基准的产生和维持. 我国北斗三号导航试验卫星首次配置了23 kg级被动型星载氢原子钟, 验证了氢原子钟的空间环境适应性和在轨性能, 实现在轨运行误差小于1 ns/d. 在北斗三号全球导航卫星系统中, 氢原子钟已作为主钟应用至GEO, IGSO和MEO三类导航卫星, 对系统的运行发挥至关重要的作用. 本文从氢原子钟的机理和性能评估方法出发, 比较了铷钟、铯钟和氢钟三类原子钟的性能差异, 根据地面和在轨测试数据, 给出氢原子钟在轨运行性能评估结果; 最后利用卫星遥测数据建模, 对氢原子钟健康状况和寿命进行了初步分析.

关键词 北斗三号, 星载氢原子钟, 在轨性能评估, 寿命分析

PACS: 07.57.-c, 07.57.Hm, 07.87.+v

1 引言

北斗卫星导航系统按“三步走”战略发展, 现已完成北斗三号系统(BD-3)建设, 实现全球范围提供位置和短报文服务.

星载原子钟是导航卫星播发高性能导航信号的重要基础, 其性能优劣将直接决定导航定位精度^[1]. 相对于北斗二号系统(BDS-2), BDS-3卫星载荷的一个重要改变是配置了星载氢原子钟^[2]. 在试验卫星阶段, 氢原子钟在轨适应性和性能指标得到充分验证, 在北斗三号组网卫星中, 已广泛应用至GEO, IGSO和MEO三类

导航卫星, 对系统的高精度稳定运行发挥着至关重要的作用, 并为导航卫星提供精密定位服务和长期星历预报提供了有力的技术支撑.

星载原子钟产生高稳定度的10 MHz频率信号, 经时频生成与保持单元, 生成基准频率和卫星时间. 下行导航信号由基准频率倍频并调制导航电文生成, 其中的导航电文包含卫星轨道和钟差预报信息. 在星历预报时间段内, 若卫星时间相对于预报时间出现偏差或波动, 则该误差将直接叠加至用户测距值, 导致定位精度降低; 反之, 若卫星钟误差越小, 则用户测距精度越高, 用户定位精度也越高.

引用格式: 帅涛, 林宝军, 张军, 等. 北斗导航卫星氢原子钟性能分析评估. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019513

Shuai T, Lin B J, Zhang J, et al. Performances and telemetres analysis of BD satellite passive hydrogen maser (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019513, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0226

原子钟的类型较多, 其中经过长时间考核并在卫星上实现应用的原子钟有铷钟、铯钟和氢钟. 这三类原子钟各有特点, 在卫星上应用优劣势不同. GPS和Glonass卫星配置了星载铷钟、铯钟, 伽利略卫星配置了铷钟和氢钟, BDS-2卫星仅配置了铷钟, BDS-3卫星同时配置了铷钟和氢钟. 本文以星载氢钟为参考, 基于地面测试数据, 比较了三种原子钟的频率和时间特性; 通过星地比对数据和卫星遥测数据, 分析了北斗三号星载氢钟在轨运行性能, 并初步进行了健康状况分析和寿命评估.

2 星载氢钟机理及特点

氢原子由原子核和一个价电子组成, 其能级图如图1所示, 基态电子总角动量为 $1/2$, 核自旋为 $1/2$, 因此, 氢原子基态有两个超精细能级 $F_1=0$ 和 $F_2=1$. 在外加磁场作用下, $F_2=1$ 的能级分裂为 $m_F=\pm 1, 0$ 等三个超精细磁能级, 而 $F_1=0$ 的能级仍为一个. 氢原子振荡器中采用的跃迁为 σ 跃迁($F=1, m_F=0 \leftrightarrow F=0, m_F=0$), 相应的频率为 1420.405751 MHz , 它与磁场的关系为 $\frac{\nu-\nu_0}{\nu_0} = 1.96 \times 10^{-6} H^2$. 由于跃迁频率较高, 不便作为频率基准, 通常采用锁相或锁频电路将石英晶振输出的5或10 MHz频率锁定到该频率上, 获得高精度的频率信号.

北斗三号卫星上的星载氢原子钟采用被动型氢钟技术, 物理部分由腔泡系统、真空系统、原子置备系统、磁屏蔽系统以及准直和选态系统等组成, 其中腔泡系统包括微波谐振腔、原子储存泡、变容二极管、C场线圈、加热线圈、微波耦合环及支撑结构, 真空系统包括真空吸附泵、离子泵以及支撑和密封结构, 原子置备系统包括氢瓶、镍管提纯器、电离源、准直器和磁选态器, 磁屏蔽系统由各层磁屏蔽及其支撑结构组成, 具体结构如图2所示. 电路部分主要由主电子学电路和辅助电子学电路组成. 主电路部分包括检波电路、隔离放大电路、上变频电路、数字伺服、频综电路和恒温压控晶振; 辅助电路部分包括高压电源、恒流源和恒温电路.

物理部分氢源提供氢气经镍提纯器提纯后, 在电离泡中电离成原子状态. 由准直系统和选态系统作用后, 基态高能级($F=1, m_F=0$)的氢原子射入微波谐振腔

图 1 氢原子能级图

Figure 1 Energy-level diagram of hydrogen atom.

图 2 星载氢原子钟结构图

Figure 2 Structure of space passive hydrogen maser.

中的储存泡, 电路部分将适当频率的微波信号注入微波谐振腔, 使腔内产生微波谐振, 原子在储存泡中发生受激辐射, 使腔内微波能量增加. 通过检测微波谐振腔内的微波能量, 可以将电路系统输出的微波信号锁定在原子跃迁谱线上, 从而得到具有高稳定度的频率信号. 目前使用的星载氢钟重量为23 kg, 天稳定度指标在 10^{-15} 量级.

与被动型氢原子钟不同, 地面主动型氢原子钟是一种自持振荡器, 其微波谐振腔和原子存储泡体积较大, 微波腔 Q 值高, 维持振荡的能量来自氢原子本身, 无需外部激励. 电路通过锁相技术实现石英晶振信号锁定到原子跃迁频率. 主动型氢原子钟稳定性好, 天稳定度指标可以达到 10^{-16} 量级. 但由于其体积、重量较大, 目前尚难适应卫星配置的要求.

3 原子钟性能评估方法及模型

原子钟输出的信号波形可以用式(1)表达:

$$V(t) = V \sin[(\omega_0 t + \varphi_0) + \varphi(t)], \quad (1)$$

其中, $(\omega_0 t + \varphi_0)$ 表示理想的时钟相位; $\varphi(t)$ 为时钟相位误差, 定义其对应的相位时间误差为

$$x(t) = \frac{\varphi(t)}{\omega_0}. \quad (2)$$

在时间段 $(t_k, t_k + \tau)$ 内相对频率增量为

$$\bar{y}(t_k + \tau) = \frac{x(t_k + \tau) - x(t_k)}{\tau}. \quad (3)$$

对于数字采样信号, 式(3)可以表达为

$$\bar{y}_k = \frac{x_{k+1} - x_k}{\tau}. \quad (4)$$

文献[3]给出原子钟频率稳定度评估的双采样 Allan 方差表达式, 可以写成

$$\sigma_y^2(\tau) \triangleq \left\langle \frac{(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2}{2} \right\rangle \cong \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2}{2}. \quad (5)$$

结合式(4), 可以给出由变量 $x(t)$ 表达的 Allan 方差表达式:

$$\sigma_y^2(\tau) \cong \frac{1}{2m\tau^2} \sum_{k=1}^m [x_{k+2} - 2x_{k+1} + x_k]^2. \quad (6)$$

随时间间隔 τ 的取值从秒到数天的跨度, $\sigma_y(\tau)$ 分别对应短期、中期和长期稳定度. 典型的原子钟频率稳定度曲线包含下降、平台和上升几段, 如图3所示, 从 I 到 IV 依次为白相位噪声、白频率噪声、频率闪变和频率随机游走噪声^[4], 这几类噪声分别对应噪声功率谱多项式拟合的不同分量, 在 Allan 方差上表现为随时间间隔 τ 从 τ^{-1} 至 $\tau^{1/2}$ 依次变化.

被动型氢钟采用锁频环路, 从秒至数万秒内, 主

图 3 原子钟频率稳定度的典型曲线

Figure 3 Typical frequency stability curve of atomic clock.

要受白频率噪声影响, Allan 方差基本随 $\tau^{-1/2}$ 变化, 数值与原子线宽成正比, 与信噪比的平方根成反比

$(\sigma_y \propto \frac{B}{\sqrt{SNR}})$, 通过提高原子增益、减小线宽可以实

现稳定度的提升. 由于受外界温度变化、磁场波动及物理部件老化和电路元器件时延变化等因素影响, 输出频率存在缓慢波动, 形成频率闪变和频率随机游走噪声, 通常在数万秒至数天时间段频率稳定度曲线逐渐出现平台及上升过程, 一般平台底部在 2×10^{-15} – 5×10^{-15} 范围.

铷钟和铯钟频率曲线与被动氢钟类似, 短稳至中短稳按 $\tau^{-1/2}$ 趋势变化. 铯钟短期稳定度较差, 曲线“较高”; 铷钟漂移较大, Allan 方差在万秒左右即出现平台和上升; 由于铷钟漂移在一定时间范围可以视为常数, 与频率随机游走噪声存在差异, 因此也常采用扣除漂移的 Hadamard 方差评估铷钟性能^[5].

原子钟通常用于时间参考或时间计量, 此时用户通常更关注相位或时间的性能. 文献[4]给出一种时间方差的统计表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2(\tau) &= \frac{1}{6} \langle \Delta^2 \bar{x} \rangle^2 \\ &\cong \frac{1}{6n^2(N-3n-1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \sum_{i=j}^{n+j-1} [x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i]^2. \end{aligned} \quad (7)$$

时间方差和基于相位平滑的修正 Allan 方差关系为

$$\sigma_x(\tau) = \tau \text{Mod} \sigma_y(\tau) / \sqrt{3}. \quad (8)$$

用 $\sigma_x(\tau)$ 评估被动氢钟和铯钟相位特性比较适合, 但用于评估铷钟性能时未区分频率漂移项, 万秒以上时间误差较实际情况要差. 在导航系统中, 对原子钟相位偏差采用多项式进行钟差近似估计和预报^[6,7]:

$$\Delta t_{sv} = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 + \Delta t, \quad (9)$$

式中, a_0 , a_1 和 a_2 分别对应相位误差、频率误差和频率漂移, Δt 为估计误差, 包括原子钟的相位误差、模型误差和测量误差, 对卫星钟模型, 后两者为主要部分. 氢钟和铯钟漂移小, 钟差建模用一次项模型即可; 而铷钟钟差需要采用二次及以上模型^[6]. 由于 a_2 的估计偏差引入误差随时间的平方增长, 二次项(及以上)模型不利于长期预报.

4 原子钟测试数据及性能分析

采用第3节的频率评估方法和相位拟合模型, 选取星载氢钟、星载铷钟和国产铯钟地面测试数据, 对三种原子钟进行性能分析. 图4给出了三种原子钟的频率测试曲线, 采样间隔1000 s, 总采样长度100万秒, 纵坐标代表相对频差; 图中粗线(蓝色)、斜线(绿色)和中心线(红色)分别为铯钟、铷钟和氢钟频率数据, 初始起点均调至零频偏. 可以看出, 铯钟频率噪声相对较大, 但频率中心保持平稳, 基本无频率漂移; 铷钟短期稳定度好(线条较细), 但频率漂移明显(测试数据 $-6 \times 10^{-14} \text{ d}^{-1}$); 氢钟同时具备稳定度好和漂移较小的优点.

选取三台钟的18 d测试数据, 给出Allan方差评估结果如图5所示, 从上至下依次为铯钟、铷钟和氢钟, 可以看出, 铷钟短期稳定度和氢钟接近, Allan方差受漂移影响, 在2万秒后开始向上; 铯钟Allan方差测试时间段内一直保持 $1/\sqrt{\tau}$ 规律下降, 而氢钟在10万秒开始出现平台.

图6给出了三台原子钟初始相位调至零点, 在10 d时间内的相位偏离曲线, 从上至下依次为铯钟、氢钟和铷钟, 纵坐标单位为纳秒(ns); 铯钟相位每天波动数ns至十余ns不等, 但中心基本稳定; 氢钟波动相对较小, 但也逐步偏离零点, 该段测试数据10 d时间偏离约8 ns; 铷钟相位偏离表现出明显的二次曲线特性, 10 d时间偏离260 ns; 图7和8分别为线性拟合残差和二次

图 4 氢钟、铷钟和铯钟三种原子钟频率曲线
Figure 4 Frequency curve of passive hydrogen maser, rubidium atomic clock and cesium atomic clock.

拟合残差, 可以看出铯钟线性拟合和二次拟合基本一致, 拟合残差在 $\pm 15 \text{ ns}$ 以内; 氢钟线性拟合残差在 $\pm 1.5 \text{ ns}$ 以内, 二次拟合残差在 $\pm 0.5 \text{ ns}$ 以内; 铷钟线性拟合残差为明显的二次曲线, 最大偏差约40 ns; 二次拟合后降低至 $\pm 3 \text{ ns}$ 以内.

5 氢原子钟星地比对数据分析

北斗系统采用L频段星地双向时间比对进行卫星钟差测量和参数预报[8]. 其基本原理是: 地面站A在 t_0 时刻向卫星发射测距信号, 该信号被卫星上的接收设备在 t_s 时刻接收. 另外, 卫星在 $t_0 + \Delta T_{AS}$ 时刻向地面站发

图 5 氢钟、铷钟和铯钟三种原子钟典型Allan方差曲线
Figure 5 Allan deviation of passive hydrogen maser, rubidium atomic clock and cesium atomic clock.

图 6 氢钟、铷钟和铯钟三种原子钟典型相位偏移
Figure 6 Phase shift of passive hydrogen maser, rubidium atomic clock and cesium atomic clock.

图 7 氢钟、铷钟和铯钟三种原子钟相位线性拟合残差
Figure 7 Residual error using linear fitting model of passive hydrogen maser, rubidium atomic clock and cesium atomic clock.

图 8 氢钟、铷钟和铯钟三种原子钟相位二次拟合残差
Figure 8 Residual error using quadratic fitting model of passive hydrogen maser, rubidium atomic clock and cesium atomic clock.

射测距信号, 该信号被地面站 A 在 t_A 时刻接收. 卫星将自己的观测数据发送给地面站, 经两个观测数据求差就能获得高精度的星地钟差. 考虑到各种影响可得

$$\begin{aligned} \Delta T_{AS} = & \frac{1}{2}(R_A - R_S) + \frac{1}{2}[(\tau_A^T + \tau_S^R) - (\tau_S^T + \tau_A^R)] \\ & + \frac{1}{2}(\tau_{AS}^{\text{ion}} - \tau_{SA}^{\text{ion}}) + \frac{1}{2}(\tau_{AS}^{\text{tro}} - \tau_{SA}^{\text{tro}}) \\ & + \frac{1}{2}(\tau_{AS}^G - \tau_{SA}^G) + \frac{1}{2}(\Delta\tau_{AS} - \Delta\tau_{SA}), \end{aligned} \quad (10)$$

其中, τ_A^T , τ_S^T 分别为地面站 A 和卫星的发射设备时延, τ_A^R , τ_S^R 分别为地面站 A 和卫星的接收设备时延, τ_{AS}^{ion} ,

τ_{SA}^{ion} 分别为地面站 A 到卫星和卫星到地面站 A 的电离层时延, τ_{AS}^{tro} , τ_{SA}^{tro} 分别为地面站 A 到卫星和卫星到地面站 A 的对流层时延, τ_{AS}^G , τ_{SA}^G 分别为地面站 A 到卫星和卫星到地面站 A 的引力时延, $\Delta\tau_{AS}$ 和 $\Delta\tau_{SA}$ 分别为信号由地面站 A 到卫星和由卫星到地面站 A 过程中由于观测目标运动引起的时延.

图9给出一段L频段星地比对数据(卫星标号为C29, 时间为2020.02.22–2020.03.15)和对应星载氢钟地面测试数据线性拟合残差对比. 可以看出, 星地线性拟合残差相对平坦, 而地面测试数据有 -4 ns至 $+6$ ns的二次项残差, 这是由于氢钟测试时老化时间有限, 交付前仍存在 10^{-15} d^{-1} 的漂移值, 在轨工作一段时间后, 漂移已进入 10^{-16} d^{-1} 量级.

图10(a)是星地比对数据和地面测试数据二次拟合残差比较, 可以看出, 两者包络起伏基本一致.

选取一段典型数据局部放大如图10(b)所示, 可以看出星地测量数据除了包含相位随机噪声外, 还叠加了长周期的波动, 这主要是由于卫星和地面链路复杂, 测距值除了受接收机热噪声影响外, 还有地面多径效应、电离层衰落、卫星姿态变化^[9], 甚至接收机时延变化等因素影响, 测距噪声组成复杂. 应用式(5)对两台氢钟(C27, C29)星地比对数据计算Allan方差, 和地面测试结果进行对比, 如图11所示, 可以看出星地双向比对数据和地面测试给出的Allan方差差异较大.

为了便于分析, 对地面实测数据叠加峰峰值约为

图 9 氢钟星地比对和测试数据线性拟合残差
Figure 9 Comparison of ground and onboard test data using linear fitting model of passive hydrogen maser.

图 10 氢钟星地比对和测试数据二次拟合残差. (a) 20 d 时间内, 两者二次拟合残差比较; (b) 局部放大, 可以看出星地比对数据噪声远大于地面测试结果

Figure 10 Comparison of ground and onboard test data using quadratic fitting model of passive hydrogen maser. (a) Comparison data of 20 d; (b) it can be seen from a partial enlarged view that noise of onboard test data is much bigger.

图 11 测试数据及星地数据Allan方差

Figure 11 Allan deviation of ground and onboard data.

1.5 ns的相位高斯白噪声(RMS 0.2 ns)再计算Allan方差, 和星地比对及地面测试结果放在一起对比, 可以看出测试数据叠加噪声后的模拟结果和星地比对数据基本一致, 万秒内主要受相位白噪声影响, 秒至万秒段Allan方差按 $1/\tau$ 的趋势下降, 万秒后逐渐变缓, 在10万秒左右进入 10^{-15} 量级. 由于星地比对数据包含长周期有色噪声, 万秒以上稳定度不及模拟数据计算结果. 可见测量噪声占据Allan方差计算值的主要部分, 星地比对数据较难准确评估氢钟10万秒以内的性能指标.

原子钟漂移需要较长时间累积进行计算, 计算误差相对较小. 经核算, 卫星C27, C29的两台氢钟在轨

漂移值分别为 -9.5×10^{-16} 和 $2.1 \times 10^{-16} \text{ d}^{-1}$, 相对于地面测试时的 -5.2×10^{-15} 和 $2.8 \times 10^{-15} \text{ d}^{-1}$, 在轨漂移指标已有大幅提升.

文献[10,11]给出利用北斗卫星氢钟24 h观察数据进行钟差10 h中期预报, 氢钟预报误差小于1 ns; 利用3 d数据进行10 d钟差预报, 预报误差小于3 ns; 长期预报明显好于GPS IIF铷钟和大部分伽利略卫星氢钟. 图12选取两天的星地比对数据(卫星C27, 卫星C29, 2020.02.22–2020.02.23)进行线性拟合给出星钟钟差预报模型, 再用后面实际测量数据和预报模型相减, 给出预报误差. 可以看出在第12 d, 预报误差在3 ns左右, 在18 d时间内, 最大预报误差也仅10 ns左右.

6 氢原子钟在轨遥测数据及寿命分析

星载氢原子钟主要的遥测参数有晶振压控电压、变容二极管电压、电离泡光强、二次谐波幅度和高压源电流、微波腔温度等. 晶振压控电压反映了晶振频率老化的过程和趋势, 数据向上和向下趋势均正常. 变容二极管电压体现物理部分微波腔频率变化, 通常随应力释放频率降低, 起调谐作用的变容二极管电压遥测值普遍上升. 随氢钟老化, 电离泡壁透光性会逐步降低, 导致电离泡光强均下降, 该下降不影响氢气电离过程, 对性能无影响. 二次谐波反映了物理部分原子跃迁信号强度, 基本表现为逐步上升后趋稳或下

降的过程. 图13给出已长时间运行的6台氢钟在入轨60 d后主要的遥测归一化后的变化趋势. 从遥测数据看, 氢钟各个主要遥测参数均在正常范围区间, 不同氢钟遥测一致性较好, 产品健康状况良好.

对各遥测参数, 在无其他突变因素影响下, 可建立数学模型进行拟合和外推. 电离泡光强老化规律呈明显非线性, 通过指数函数($ae^{bx}+ce^{dx}$)可以得到较好的拟合; 其余遥测在稳定后基本为线性变化, 采用一次多项

式($ax+b$)进行线性拟合. 通过拟合及外推, 给出10年寿命时间内各遥测参数变化趋势如图14所示. 图中, 晶振压控电压趋势各异, 有一台钟晶振压控电压变化较快, 10年寿命末期电压将下降约70%, 但仍在可控范围内; 变容二极管电压最大变化幅度为上升0.8倍, 小于设定1.5倍的上限值; 氢钟预留了微波腔温度调整指令, 可通过改变微波腔温度等方法提高腔频变化适应范围. 电离泡光强均呈指数下降趋势, 寿命末期光强将下降

图 12 北斗三号卫星氢钟预报误差. (a) C27号卫星氢钟; (b) C29号卫星氢钟

Figure 12 BDS-3 long-term clock fitting and prediction accuracy. (a) Passive hydrogen maser of C27 satellite; (b) passive hydrogen maser of C29 satellite.

图 13 氢钟主要遥测参数归一化数据. (a) 晶振压控电压; (b) 变容二极管电压; (c) 电离泡光强; (d) 二次谐波幅度

Figure 13 Normalized telemetry parameter of passive hydrogen maser. (a) Voltage of VCXO; (b) voltage of varactor; (c) light intensity of ionization source; (d) amplitude of second harmonic.

图 14 遥测参数拟合及外推. (a) 晶振压控电压; (b) 变容二极管电压; (c) 电离泡光强; (d) 二次谐波幅度

Figure 14 Telemetry parameter fitting and prediction. (a) Voltage of VCXO; (b) voltage of varactor; (c) light intensity of ionization source; (d) amplitude of second harmonic.

至初始光强的30%–60%，由于仅为透光性改变，产品性能指标不受影响。二次谐波变化趋势为三个缓慢向上，三个缓慢向下；其中两台下落较快，按目前的变化速率，10年寿命末期将降至初始值的85%，此时氢钟短期稳定度指标可能会略有下降，但仍能满足使用需求。

7 结论

本文介绍了星载氢原子基本原理和三类原子钟性能差异；分析了地面和在轨测试数据，进行了在轨性能评估；统计并拟合了在轨遥测数据，对健康状况和运行

寿命进行了初步分析，得出结论如下。

(1) 铷钟、氢钟和铯钟三类原子钟各有特点，在卫星上应用优劣势不同：铷钟有频率漂移，但稳定度好；铯钟漂移最小，但稳定度较差；氢钟漂移较小，稳定度最好。

(2) 氢钟在轨星地比对数据表明，氢钟在轨漂移率好于地面测试结果，并逐渐进入 10^{-16} d^{-1} 量级，星载氢钟钟差适合采用一次项建模并可进行长期预报。

(3) 从目前遥测数据看，氢钟工作稳定，健康状况良好，未出现寿命衰退现象。由于氢原子钟在轨工作时间相对有限，还需进一步积累运行数据，加强分析评估，为后续产品性能改进和可靠性提升提供数据支撑。

致谢 感谢北京卫星导航中心提供氢钟双向比对数据，感谢中国科学院微小卫星创新研究院董日昌博士提供氢钟在轨遥测数据。

参考文献

- Guo H R. Research on Theory and Method of Time Frequency Characteristic Analysis of Navigation Satellite Atomic Clock (in Chinese). 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. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006]
- Yang Y X, Xu Y Y, Li J L, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Data analysis based on BDS-

- 3 demonstration system (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2018, 48: 584–594 杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 584–594]
- 3 Allan D W. Statistics of atomic frequency standards. *Proc IEEE*, 1966, 54: 221–230
- 4 Allan D W, Weiss M A, Jespersen J L. A frequency-domain view of time-domain characterization of clocks and time and frequency distribution systems. In: *Proceedings of the 45th Annual Symposium on Frequency Control 1991—Automated X-ray Sorting Machine for Round Quartz Blanks*. New York: IEEE, 1991. 667–678
- 5 Lin Y T, Han C H, Du Y, et al. Analysis method of atomic clock frequency stability and influence of frequency drift (in Chinese). *J Equipm Command Technol College*, 2009, 20: 74–77 [蔺玉亭, 韩春好, 杜燕, 等. 原子钟频率稳定度分析方法及频率漂移影响分析. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20: 74–77]
- 6 Zhu L F, Li C, Han C H, et al. Application of polynomial model in satellite clock error prediction (in Chinese). *Radio Eng*, 2017, 47: 51–54 [朱陵凤, 李超, 韩春好, 等. 多项式模型在导航卫星钟差预报中的应用研究. 无线电工程, 2017, 47: 51–54]
- 7 Chen Q, Chen J P, Yu C, et al. Comparison of BDS station clock error short-term prediction models and the application in fast orbit determination (in Chinese). *Acta Astron Sin*, 2020, 61: 53–63 [陈倩, 陈俊平, 于超, 等. 北斗系统测站钟差短期预报模型比较及其在单星定轨中的应用. 天文学报, 2020, 61: 53–63]
- 8 Chen J P, Hu X G, Tang C P, et al. Orbit determination and time synchronization for new-generation Beidou satellites: Preliminary results (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 85–95]
- 9 Gong X Q, Chen J P, Zhou S S, et al. The two way satellite-ground time transfer of BDS and accuracy analysis of broadcast clock (in Chinese). *Prog Astron*, 2019, 37: 178–186 [巩秀强, 陈俊平, 周善石, 等. 北斗星地双向时频传递与广播钟差精度分析. 天文学进展, 2019, 37: 178–186]
- 10 Wu Z, Zhou S, Hu X, et al. Performance of the BDS3 experimental satellite passive hydrogen maser. *GPS Solut*, 2018, 22: 43
- 11 Tang C, Hu X, Zhou S, et al. Improvement of orbit determination accuracy for Beidou navigation satellite system with two-way satellite time frequency transfer. *Adv Space Res*, 2016, 58: 1390–1400

Performances and telemetres analysis of BD satellite passive hydrogen maser

SHUAI Tao^{1*}, LIN BaoJun², ZHANG Jun², LIU Li³, LIN ChuanFu¹, XIE YongHui¹,
CHEN PengFei¹, TANG ChengPan¹ & ZHOU ShanShi¹

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

² Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China;

³ Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

An atomic clock is one of the most important payloads in navigation satellites. It is in charge of generating and maintaining the satellite time. The performance and on-orbit adaptability of a 23-kg passive hydrogen maser (PHM) have been verified using the experimental satellite of the third-generation Beidou satellite navigation system (BDS-3). The clock offset of the PHM is less than 1 ns per day. In BDS-3, PHMs operate as the master clocks in the GEO, IGSO, and MEO satellites; therefore, they are important in the system operation. Herein, we present the design and performance evaluation of the PHM and compare the hydrogen maser, rubidium atomic clock, and cesium atomic clock. Using the satellite-ground time-difference data, we analyze the frequency stability and time prediction accuracy. Furthermore, we perform a preliminary analysis of the operating status and aging trend based on the satellite telemetry data.

BDS-3, satellite passive hydrogen maser, on-orbit test, life analysis

PACS: 07.57.-c, 07.57.Hm, 07.87.+v

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0226](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0226)