用于北斗三号卫星导航系统的星载铷原子钟特性

梅刚华^{1,2*}, 赵峰^{1,2}, 祁峰^{1,2}, 钟达^{1,2}, 安绍锋^{1,2}, 王鹏飞^{1,2}, 明刚^{1,2}, 王芳^{1,2}, 邱紫敬^{1,2}, 康松柏^{1,2}, 王勤^{1,2}, 吴汉华^{1,2}, 阎世栋^{1,2}, 侯林山^{1,2}, 王晨^{1,2}, 王莉^{1,2}

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430071;

2. 中国科学院原子频标重点实验室, 武汉 430071

*联系人, E-mail: mei@apm.ac.cn

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

摘要 本文介绍用于北斗三号卫星导航系统的星载铷原子钟主要设计特点和性能指标. 铷原子钟频率稳定度主要取决于原子跃迁信号信噪比、电路噪声和原子体系的物理环境效应. 为提高原子信号信噪比, 物理系统采用了微波场方向因子高于0.9的开槽管微波腔和Xe气启辉的铷光谱灯, 并采用了光学滤光 and 同位素滤光双重滤光方案. 电路系统采用了低相噪微波链路, 交互调制噪声对铷原子钟稳定度的影响被控制在 $4.9 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ 水平. 通过工作参数优化, 将物理环境效应对天频率稳定度的影响降低到 3×10^{-15} 以下. 研制了高精度和甚高精度两型号星载铷原子钟. 高精度铷原子钟典型指标为短稳 $1.5 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$, 万秒稳 1.3×10^{-14} , 天稳 9.4×10^{-15} ; 甚高精度铷原子钟典型指标为短稳 $6.1 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$, 万秒稳 7.1×10^{-15} , 天稳 3.9×10^{-15} . 本文还分析了铷原子钟最新研究进展, 预期铷原子钟的性能还可以进一步提升.

关键词 北斗卫星导航系统, 星载铷原子钟, 抽运光源, 开槽管微波腔, 微波链, 频率稳定度

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

1 引言

铷原子钟是卫星导航系统应用最多的星载原子钟, GPS系统、Galileo系统和我国北斗系统均大量采用, 其原因: 一是相对星载氢原子钟和铯原子钟而言, 铷原子钟具有体积小、功耗低、可靠性高、卫星环境适应性强的优点, 制造和使用成本相对较低; 二是频率漂移率可以通过与星-地原子钟之间的同步操作加以扣除, 对定位精度影响较小; 三是作为影响卫星导航系

统定位授时精度的关键因素, 铷原子钟的频率稳定度近年来有了极大提升, 能够满足高精度定位和授时应用需求.

铷原子钟的频率稳定度与测量取样时间相关. 卫星导航系统星-地原子钟同步周期一般在万秒到1 d范围, 所以万秒稳定度和天稳定度是星载原子钟的核心指标. 卫星导航需求的牵引促进了铷原子钟技术的发展. 20世纪80年代美国GPS IIA卫星和90年代GPS IIR卫星使用的星载铷原子钟, 天稳为 10^{-14} 量级^[1,2].

引用格式: 梅刚华, 赵峰, 祁峰, 等. 用于北斗三号卫星导航系统的星载铷原子钟特性. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019512
Mei G H, Zhao F, Qi F, et al. Characteristics of the space-borne rubidium atomic clocks for the BeiDou III navigation satellite system (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019512, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0245

2010年前后, 美国研制出增强型铷原子钟, 短稳为 $1 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$, 万秒稳为 1×10^{-14} , 天稳为 10^{-15} 量级^[3], 可满足分米级定位精度需求. 这是迄今为止国外稳定度最高的铷原子钟, 目前GPS IIM和GPS IIF卫星装备的就是这种原子钟.

中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(前武汉物理与数学研究所)的星载铷原子钟研究起步于20世纪90年代末, 经历了三代产品研制过程. 第一代产品短稳为 $3 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$, 天稳为 4×10^{-14} ^[4], 在2007–2012年期间应用于北斗二号卫星导航系统. 第二代产品高精度铷原子钟和第三代产品甚高精度铷原子钟应用于目前已经建成的北斗三号系统. 本文总结高精度和甚高精度星载铷原子钟设计特点, 给出其主要性能指标, 还将就铷原子钟技术的未来发展前景, 作一些探讨和展望.

2 铷原子钟电子学结构和频率稳定度

星载铷原子钟的电子学结构示于图1, 它是一个以物理系统为鉴频器的锁频环路. 铷原子钟工作时, 晶体振荡器输出的10 MHz信号, 经过频率调制(调制频率136 Hz)后进入倍频器, 实现×9和×76两级倍频, 再与综合器输出的5.3125 MHz信号混频, 得到与⁸⁷Rb原子的钟跃迁频率共振的6834.6875 MHz的调频微波信号, 去探测物理系统中⁸⁷Rb原子的钟跃迁. 通过光检测得到的钟跃迁信号幅度和相位包含了微波频率偏离原子的钟跃迁频率的大小和极性的信息, 经过相敏检波和积分放大后作为误差信号去控制晶振的压控电压, 实现环路锁定. 环路锁定后, 晶振频率即获得与钟跃迁相同的频率稳定度和准确度, 成为一个可用的标准频率.

铷原子钟的频率稳定度由锁频环路的增益和噪声特性决定. 设 τ 为频率测量取样时间, 频率稳定度可写为

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\sigma_1^2(\tau) + \sigma_2^2(\tau) + \sigma_3^2(\tau)}, \quad (1)$$

式中, $\sigma_1(\tau)$ 为由物理系统性能决定的散弹噪声极限稳定度^[5]:

$$\sigma_1(\tau) = \frac{\sqrt{2eI_0}}{v_0 K_D \sqrt{2\tau}}, \quad (2)$$

图1 星载铷原子钟电子学结构

Figure 1 Electronic structure of the space-borne rubidium atomic clock.

其中 $2eI_0$ 为散弹噪声功率谱密度, v_0 为钟跃迁频率, K_D 为鉴频斜率. K_D 的量值与原子跃迁信号强度成正比, 与谱线宽成反比, 是决定环路增益的关键因素. 由式(2)可知 $\sigma_1(\tau)$ 决定于原子信号的信噪比. $\sigma_2(\tau)$ 为探测微波信号交互调制噪声对稳定度的贡献^[6]:

$$\sigma_2(\tau) = \left[\sum_{n=1}^{\infty} C_{2n}^2 S_{\phi}(2nf_M) \right]^{1/2} / \tau^{1/2}, \quad (3)$$

其中 C_{2n} 与调制频率 f_M 和载波信号频率有关, $S_{\phi}(2nf_M)$ 为与载波信号频率相距 $2nf_M$ 处的单边带相位噪声功率谱密度, 可见 $\sigma_2(\tau)$ 决定于微波信号的相位噪声. $\sigma_3(\tau)$ 为环路无规噪声的贡献, 它起源于原子体系的物理环境效应, 即原子所处磁场、光场、温度等物理环境参量无规起伏导致的频移, 可写为

$$\sigma_3(\tau) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{1}{v_0} \frac{\Delta v_i}{\Delta P_i} \right)^2 \sigma_i^2(\tau)}, \quad (4)$$

其中 $\frac{\Delta v_i}{\Delta P_i}$ 和 $\sigma_i(\tau)$ 分别为各物理参量的频移系数和稳定度.

(1)–(4)式表明, 铷原子钟频率稳定度主要由物理系统散弹噪声极限稳定度、电路系统交调噪声极限稳定度和物理环境参量的稳定度决定. 散弹噪声和交调噪声具有白频特性, 故其对频率稳定度的贡献与取样时间方根值成反比, 主要决定短期稳定度和长期稳定度的极限. 环境参量变化则与取样时间之间没有确定关系, 一般影响长期稳定度.

3 星载铷原子钟设计特点

北斗三号系统星载原子钟设计以北斗二号系统星载原子钟为技术基线, 设计目标是提高原子信号信噪比, 降低微波相位噪声, 减小物理环境效应, 使铷原子钟的短期和长期稳定度指标得到全面改善.

3.1 物理系统结构

铷原子钟所用的钟跃迁为 ^{87}Rb 原子基态两个Zeeman子能级 $F=2, m_F=0$ 和 $F=1, m_F=0$ 之间的跃迁, 跃迁频率为6834.68 MHz. 钟跃迁信号由物理系统产生和检测. 北斗三号星载铷原子钟物理系统结构示于图2. 铷光谱灯发出的光经过透镜转换为平行光并经孔阑限束后, 由带通式干涉滤光片和含有 ^{85}Rb 蒸气的滤光泡分别进行光学滤光和同位素滤光, 然后进入吸收泡, 对其中的 ^{87}Rb 蒸气原子进行光抽运选态, 实现布居数反转, 即多数原子集居在 $F=2, m_F=0$ 能级. 频率为6834.68 MHz的探寻微波通过耦合环馈入到微波腔, 形成特定分布的驻波场. 微波场与吸收泡中的 ^{87}Rb 原子作用, 使原子从 $F=2, m_F=0$ 能级回到 $F=1, m_F=0$ 能级, 发生钟跃迁. 绕制在腔筒外壁的C场线圈产生弱的沿腔轴方向的均匀磁场, 定义钟跃迁的量子化轴. 钟跃迁发生时, 放置在吸收泡后光电检测到的光电流信号会变化. 光检信号变化的幅度表征钟跃迁信号的强度, 背景光电流则表征钟跃迁信号的散弹噪声水平.

3.2 抽运光源

抽运光源由铷光谱灯和光路中的光学元件组成. 抽运光源特性直接决定钟跃迁能级布居数反转的大小和原子信号的散弹噪声, 设计原则是保证足够的光抽运效率, 并尽可能减小无用光输出.

在北斗三号星载铷原子钟设计中, 我们将灯泡中的启辉气体由原来的Ar气改为Xe气. 这种设计利用了Xe气电离电位更低的特性, 可以有效克服由铷原子自吸收效应引起的铷发光谱线的中心凹陷和展宽^[7], 从而提高抽运光的功率谱密度, 改善光抽运效率. 图3给出两种光谱灯铷发光谱线轮廓的比较.

另外一个改进是增加了光学滤光技术. Xe气启辉的铷光谱灯光谱示于图4(a). 可看出, 发光光谱中既有 ^{87}Rb 原子发光成分, 也有Xe发光成分. 前者为对光抽运起作用的有用光, 后者是对光抽运不起作用的无

图2 星载铷原子钟物理系统结构

Figure 2 Structure of the physics package of the space-borne rubidium atomic clock.

图3 充Xe和充Ar的铷光谱灯 $^{87}\text{Rb}-D_1$ 线光谱轮廓. 灯泡工作温度为110°C

Figure 3 $^{87}\text{Rb}-D_1$ line spectral profiles of Xe and Ar gas rubidium lamps. Lamp bulb temperatures are set at 110°C.

用光, 仅贡献为散弹噪声. 为了抑制散弹噪声, 图2的设计中采用中心波长为786 nm、带宽为22 nm的带通式干涉滤光片滤除Xe发光, 仅让波长为780和794 nm的铷发光成分通过. 滤光效果示于图4(b). 研究表明, 采用此技术后铷原子钟稳定度可以改善20%^[8].

图3所示铷发光光谱中, 真正对光抽运起作用的是b成分, a成分也需要滤除, 这是铷滤光泡的同位素滤光起到的作用^[9].

3.3 微波腔

钟跃迁信号强度正比于钟跃迁能级反转布居数差和跃迁几率, 前者由光抽运效率决定, 后者则由微波腔

中微波场振荡模式决定. 根据量子力学原理, 铷原子的钟跃迁是微波场激发的磁偶极 σ 跃迁, 只有平行于量子化轴方向的微波场磁分量才能激发这种跃迁, 这要求在原子共振区微波场磁力线尽可能沿平行于腔轴方向分布. 微波场振荡模式的优劣用方向因子评价, 它定义为在原子共振区与量子化轴平行的微波场能量与微波场总能量之比^[10]. 微波场模式由腔结构决定, GPS系统星载铷原子钟采用的是标准TE₁₁₁腔^[11], Galileo系统的星载铷原子钟采用非标准磁控管腔^[12].

我们一直采用本实验室首创的开槽管式微波腔^[13]. 北斗二号系统星载铷原子钟采用了开槽管内径为14 mm的微波腔, 但限于当时的设计水平, 场方向因子不高^[14], 这是限制铷原子钟稳定度指标的重要原因之一. 北斗三号星载铷原子钟设计做了两项改进. 一是通过优化开槽管结构, 提高了场方向因子; 二是适当增大开槽管直径, 使其能够容纳更大的铷吸收泡, 以进一步增强原子信号. 图5给出三种不同尺寸开槽管微波腔场分布仿真结果. 可见, 在由吸收泡上下端面和光阑直径所定义的原子共振区, 磁力线主要沿腔轴方向分布. 经计算, 三种微波腔场方向因子均超过0.9, 远高于传统的TE₁₁₁腔.

图5(a)和(b)中, 14和20 mm内径微波腔已分别用于高精度和甚高精度铷原子钟设计, 图5(c)中, 30 mm内径微波腔也实现了初步应用^[8,15].

3.4 微波相位噪声

在图1所示环路中, 被调制的微波探寻信号, 会通过物理系统的非线性响应产生调制频率 f_M 的各次谐波. 其中的偶次谐波处的噪声, 则通过交互调制效应转化为 f_M 处的白频噪声, 叠加在频率为 f_M 的交流光检信号上. 后级的前放、鉴相和积分电路不能滤除这种噪声, 使得该噪声直接传递到压控晶振, 从而破坏铷原子钟整机的频率稳定度.

由式(3)可知, 要克服交调噪声影响, 就必须降低微波的相位噪声. 微波探寻信号由10 MHz晶振、调制器和倍频器构成的微波链产生. 倍频器采用了9次和76次两级倍频方案. 76次倍频器利用无源器件倍频, 附加噪声低, 故微波相噪主要由晶振、调制器和9次倍频器贡献. 我们通过选用低相噪晶振、优化9次倍频器和调制器工作参数等措施, 降低了9次倍频器输出的90 MHz信号的相噪, 测试结果示于图6. 利用式(3)评估微波相

图4 光学滤光效果. (a) 未滤光的充Xe铷谱灯光谱. (b) 滤光后的充Xe铷谱灯光谱

Figure 4 Spectra of the Xe gas rubidium lamp with light (a) unfiltered, and (b) optically filtered.

图5 开槽管内径分别为14 mm (a)、20 mm (b)和30 mm (c)的微波腔中磁力线分布. 虚线框表示原子共振区

Figure 5 Distributions of magnetic field lines in microwave cavities with slotted tube inner diameters of (a) 14 mm, (b) 20 mm and (c) 30 mm. The dotted boxes define the atomic resonance regions.

噪对频率稳定度的影响时, 通常只考虑 $2f_M$ 处的相噪的贡献. 图6所示结果在 $2f_M$ (272 Hz)处的相位噪声为 -130 dBc/Hz, 由此计算出交互调制噪声对铷原子钟频率稳定度的贡献约为 $4.9 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$. 此结果比北斗二号星载铷原子钟的相应结果改善了约1倍.

3.5 物理环境效应

铷原子钟的物理环境效应主要包括磁场频移、微波功率频移、光频移和温度频移. 克服这些频移对频率稳定度的影响, 一是减小频移系数, 二是改善各物理参量的稳定性.

为了降低地磁场等外部磁场敏感性, 铷原子钟设计了三层磁屏蔽, 其中两层在物理系统内部(图2), 第

三层在物理系统外部. 为了减小光频移和温度频移的影响, 采取了优化光强、腔和谱灯工作温度等措施, 并采用了两级温控, 第一级是腔和灯泡的温控, 第二级是铷原子钟整机的温控.

基于一台甚高精度铷原子钟, 测量了光频移、腔温度频移、灯温度频移和磁场频移系数, 并根据长期测量结果得到光强、腔温、灯温和C场强度的稳定度. 将测量结果代入式(4), 评估了物理环境效应对铷原子钟频率稳定度的影响, 结果示于图7. 图7还给出物理系统散弹噪声、电路交调噪声对稳定度的限制. 由图7可知, 对于甚高精度铷原子钟, 散弹噪声和交调噪声对稳定度的限制不超过 $5 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$, 物理环境效应对天稳定度的限制不超过 3×10^{-15} , 其中影响最大的因素是光频移.

图 6 90 MHz信号单边带相位噪声功率谱密度测试结果
Figure 6 Single-sideband phase noise power spectral density of the 90 MHz signal.

图 7 散弹噪声、交调噪声和物理环境效应对甚高精度铷原子钟频率稳定度的影响
Figure 7 Influences of shot noise, intermodulation noise and physical environmental effects on the frequency stability of the version 2 rubidium atomic clock.

4 星载铷原子钟性能

在真空环境中, 通过连续17 d的测量, 获得了星载铷原子钟与主动型氢原子钟之间的频差数据, 据此计算了星载铷原子钟的频率稳定度. 图8给出各5台高精度和甚高精度铷原子钟频率稳定度结果. 高精度铷原子钟稳定度均值为短稳 $1.5 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$, 万秒稳 1.3×10^{-13} , 天稳 9.4×10^{-15} . 甚高精度铷原子钟稳定度均值为短稳 $6.1 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$, 万秒稳 7.1×10^{-15} , 天稳 3.9×10^{-15} , 测试结果与图7的预期基本一致. 甚高精度铷原子钟是我们得到的首款频率稳定度为 $10^{-13}/\tau^{1/2}$ 量级的铷原子钟. 两种星载铷原子钟已经批量装备北斗三号卫星.

5 总结和展望

通过改进开槽管微波腔微波场分布并增大微波腔尺寸, 采用Xe气启辉的铷光谱灯和双重滤光方案, 降低微波链路相位噪声, 优化物理系统工作参数等技术措施, 显著提高了原子信号信噪比, 减小了交互调制效应和物理环境效应对铷原子钟频率稳定度的影响. 研制出高精度和甚高精度两型号星载铷原子钟, 批量用于北斗三号卫星. 高精度铷原子钟短稳 $1.5 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$, 万秒稳 1.3×10^{-14} , 天稳 9.4×10^{-15} ; 甚高精度铷原子钟短稳 $6.1 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$, 万秒稳 7.1×10^{-15} , 天稳 3.9×10^{-15} , 可以满足分米级卫星导航应用需求.

近40年来, 铷原子钟的频率稳定度改善了近两个

图 8 高精度(虚线)和甚高精度(实线)星载铷原子钟频率稳定度测试曲线
Figure 8 Frequency stability test results of the version 1 (dotted lines) and the version 2 (solid lines) space-borne rubidium atomic clocks.

数量级. 这种发展速度超过了最初的预期, 也引发了人们探索铷原子钟稳定度极限的兴趣. 铷原子钟稳定度是否还有提升空间, 仍将取决于在提高物理系统原子信号信噪比、降低微波链的相位噪声和控制原子系统的物理环境效应方面能否取得新的进展. 本实验室最近基于开槽管内径为 30 mm 的微波腔(图 5(c))设计的

铷原子钟系统, 短稳达到优于 $2.5 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ 水平^[8,15]. 利用数字电路设计微波链, 可将相位噪声对铷原子钟稳定度的影响降至 $10^{-14}/\tau^{1/2}$ 量级^[16,17]. Huang 等人^[18]提出了一种谱灯光强控制方案, 这有助于进一步改善铷原子钟的长稳. 根据这些进展, 我们预期铷原子钟频率稳定度还可以继续得到提升.

参考文献

- McCaskill T B, Oaks O J, Largay M M. Performance of global positioning system Block II/IIA/IIR on-orbit navstar clocks. In: Proceedings of the 31st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Dana Point, 1999. 75–89
- Oaks J, Buisson J A, Largay M M. A summary of the GPS constellation clock performance. In: Proceedings of the 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Long Beach, 2007. 119–130
- Dupuis R T, Lynch T J, Vaccaro J R. Rubidium frequency standard for the GPS IIF program and modifications for the RAFSMOD program. In: Proceedings of the 2008 IEEE International Frequency Control Symposium. Honolulu, 2008. 655–660
- Mei G H, Zhong D, An S F, et al. Main features of space rubidium atomic frequency standard for BeiDou satellites. In: Proceedings of the 2016 European Frequency and Time Forum. New York, 2016. 1–4
- Vanier J. On the signal-to-noise ratio and short-term stability of passive rubidium frequency standards. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1981, 30: 277–282
- Qiu Z J, Qi F, Ming G, et al. Design a low noise $\times 9$ frequency multiplication chain for rubidium atomic frequency standard (in Chinese). *Acta Electron*, 2017, 45: 3046–3050 [邱紫敬, 祁峰, 明刚, 等. 铷原子频标低噪声 9 次倍频链设计. *电子学报*, 2017, 45: 3046–3050]
- Hao Q, He S G, Xu F et al. Influence of the lamp spectral profile on short-term stability and light shift of a rubidium atomic clock. In: Proceedings of the China Satellite Navigation Conference (CSNC). Volume III. Berlin: Springer, 2015. 387–397
- Hao Q, Li W B, He S G, et al. A physics package for rubidium atomic frequency stability of $2.4 \times 10^{-13}\tau^{-1/2}$. *Rev Sci Instrum*, 2016, 87: 123111
- Vanier J, Kunsli R, Paulin P, et al. On the light shift in optical pumping of rubidium 87: The techniques of “separated” and “integrated” hyperfine filtering. *Can J Phys*, 1982, 60: 1396–1403
- Stefanucci C, Bandi T, Merli F, et al. Compact microwave cavity for high performance rubidium frequency standards. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83: 104706
- Riley W J. A rubidium clock for GPS. In: Proceedings of the 13rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Application Meeting. Washington, 1981. 609–630
- Giovanni B, Pascal R, Hartmut S S. Atomic frequency standard. European Patent, EP 0561261A1, 1993-09-22
- Mei G H, Zhong D, An S F, et al. Miniaturized microwave cavity for atomic frequency standard. US Patent, 6225870B1, 2001-05-01
- Kang S B, Li W B, Zhong D, et al. A preliminary study on field distribution in a slotted tube cavity (in Chinese). *Chin J Magn Res*, 2012, 29: 86–91 [康松柏, 李文兵, 钟达, 等. 开槽管微波腔中微波场分布初步研究. *波谱学杂志*, 2012, 29: 86–91]
- Nie S, Wang P F, Qiu Z J, et al. A lamp-pumped rubidium atomic frequency standard with a short-term stability at the Level of $2 \times 10^{-13}\tau^{-1/2}$. In: Proceedings of the China Satellite Navigation Conference (CSNC). Berlin: Springer, 2019. 556–563
- Li W B, Hao Q, Du Y B, et al. Demonstration of a sub-sampling phase lock loop based microwave source for reducing dick effect in atomic clocks. *Chin Phys Lett*, 2019, 36: 23–26
- François B, Calosso C E, Danet J M, et al. A low phase noise microwave frequency synthesis for a high-performance cesium vapor cell atomic clock. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 094709
- Huang M, Stapleton A, Camparo J. Lamplight stabilization for GPS Rb atomic clocks via RF-power control. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 2018, 65: 1804–1809

Characteristics of the space-borne rubidium atomic clocks for the BeiDou III navigation satellite system

MEI GangHua^{1,2*}, ZHAO Feng^{1,2}, QI Feng^{1,2}, ZHONG Da^{1,2}, AN ShaoFeng^{1,2},
WANG PengFei^{1,2}, MING Gang^{1,2}, WANG Fang^{1,2}, QIU ZiJing^{1,2}, KANG SongBai^{1,2},
WANG Qin^{1,2}, WU HanHua^{1,2}, YAN ShiDong^{1,2}, HOU LinShan^{1,2},
WANG Chen^{1,2} & WANG Li^{1,2}

¹ Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, WuHan 430071, China;

² Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, Chinese Academy of Sciences, WuHan 430071, China

In this paper, we describe the characteristics and performance of space-borne rubidium atomic clocks for the BeiDou III navigation satellite system. The frequency stability of a rubidium atomic clock depends mainly on the signal-to-noise ratio (SNR) of the rubidium atomic transition signal, the noise of the interrogating microwave, and the physics environmental effects of the atomic system. To enhance the SNR, in the design of the physics package, we use a slotted-tube microwave cavity with a field-orientation factor higher than 0.9 and a rubidium spectral lamp with Xe as the starter gas. The light emitted from the lamp is filtered through both optical and isotope filters. We employ a low-phase-noise microwave chain, and the influence of the noise of the interrogating microwave is controlled to within $4.9 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$. By optimizing the operating parameters, the influence of the physics environmental effects on the long-term frequency stability is reduced to a level below 3×10^{-15} . Two versions of the space-borne rubidium clock were produced. Version 1 has a typical performance of $1.5 \times 10^{-12}/\tau^{1/2}$ for short-term stability, and 1.3×10^{-14} and 9.4×10^{-15} for 10^4 s and one day stabilities. For version 2, the typical frequency stabilities are $6.1 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ for short-term, 7.1×10^{-15} for 10^4 s and 3.9×10^{-15} for one day. Based on the current progress, we anticipate that the performance of the rubidium clocks can be further improved.

BeiDou navigation satellite system, space-borne rubidium atomic clock, optical pumping light source, slotted tube microwave cavity, microwave chain, frequency stability

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

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0245](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0245)