

引用格式: 胡旺旺, 王瑞, 帅涛, 等. 主动型氢原子钟数字电路控制系统研究[J]. 时间频率学报, 2023, 46(3): 227-236.

主动型氢原子钟数字电路控制系统研究

胡旺旺^{1,2}, 王瑞¹, 帅涛², 陈鹏飞², 裴雨贤²,

赵阳², 潘晓燕², 徐昊天², 杨士涛³

(1. 上海大学, 上海 200444;

2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030;

3. 中国科学院 微小卫星创新研究院, 上海 200120)

摘要: 主动型氢钟在频率稳定性和漂移率等方面优于目前在轨的星载被动型氢钟, 但是存在体积重量较大的缺点。为进一步降低电路部分重量, 本文提出一种基于数字电路的系统控制方法。该方法通过分析影响主动型氢原子钟频率稳定度的因素, 使用数字检波、数字下变频、数字锁相环等数字化方式进行腔自动调谐和晶振锁相, 提高了电路系统集成度和灵活度, 降低了电路体积和重量。实验结果显示, 设计的数字电路控制系统实现了恒温晶振频率的锁定和谐振腔谐振频率的锁定, 其秒频率稳定度为 2.6×10^{-13} , 较模拟电路控制系统提升了 30%, 万秒频率稳定度指标接近, 具有一定的工程实用价值。该方案可用于下一代北斗导航卫星星载氢钟设计, 也可用于深空探测和脉冲星计时等应用场景。

关键词: 主动型氢原子钟; 数字电路; 腔自动调谐; 频率稳定度

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-03-0227-10

Research on digital circuit control system of active hydrogen maser

HU Wang-wang^{1,2}, WANG Rui¹, SHUAI Tao², CHEN Peng-fei², PEI Yu-xian²,

ZHAO Yang², PAN Xiao-yan², XU Hao-tian², YANG Shi-tao³

(1. Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

3. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200120, China)

Abstract: The active hydrogen maser is better than the current in orbit space passive hydrogen maser in terms of frequency stability and drift rate, but it has the disadvantage of big volume and large weight. In order to further reduce the weight of the circuit part, we propose a systematic control method based on digital circuits. By analyzing the factors that affect the frequency stability of the active hydrogen maser, this method uses digital methods such as digital demodulation, digital down-conversion, digital phase-lock loop to perform cavity auto-tuning and crystal oscillator phase-locking. It improves the integration and flexibility of the circuit system. It reduces circuit volume and weight. The experimental results show that the designed digital circuit control

system has achieved the frequency locking of the constant temperature crystal oscillator and the resonant frequency locking of the cavity. Its frequency stability is 2.59×10^{-13} at 1 second, which is 30% lower than that of the analog circuit control system. The frequency stability at 10 000 seconds is close to that of the analog circuit control system. It has certain practical engineering value. This scheme can be used in the design of hydrogen maser for next-generation Beidou navigation space satellites and can also be used in application scenarios such as deep space exploration and pulsar timing.

Key words: active hydrogen maser; digital circuit; cavity auto tuning; frequency stability

0 引言

星载原子钟是现代导航卫星的核心单机,决定了导航卫星信号播发性能和导航系统的定位精度^[1]。在卫星上常用的原子钟有铷钟、铯钟和氢钟,其中氢钟的漂移较小,稳定度最好。超过一半以上的北斗三号导航卫星采用被动型氢钟作为主钟,从地面和在轨测试数据上看,氢原子钟的高稳定特性有效支撑了高精度星历预报和数天量级守时功能^[2]。

氢原子钟短期稳定度优异,但由于频率漂移的影响,长期稳定度不如毫秒脉冲星信号。因此,通过脉冲星信号对氢原子钟的检测、校准和驾驭,能将两者优势互补,建立一种既能保持原子钟短期稳定度优势,又具有脉冲星长期稳定度优势的时间尺度^[3],为卫星长时间自主运行提供技术支撑,提高卫星的空间守时性能,可用于下一代导航卫星及 PNT (positioning, navigation, and timing) 技术相关的卫星。脉冲星信号驾驭原子钟的一种可实现的流程如下:利用高灵敏度的接收机接收脉冲星信号,信号接收处理设备以原子钟为参考记录观测时间,将一段时间内的数据通过消色散与周期折叠等处理,得到积分脉冲轮廓;将平滑降噪后的积分脉冲轮廓与标准脉冲轮廓互相关,得到脉冲到达接收机处的时间 (time of arrival, TOA);将到达接收机处的 TOA 转换至脉冲到达太阳系质心 (solar system barycenter, SSB) 处的 TOA;将 SSB 处测量的 TOA 与脉冲星模型预报的 TOA 比较,得到计时残差^[4-5];信号接收处理设备根据计时残差输出频率/相位调整信息至原子钟,原子钟根据反馈量进行相应调整,并对外输出高稳定度、高精度的频率信号。

由于被动型氢钟相对于地面守时型氢钟在稳定度和漂移率等方面存在一定差距,目前难以支撑卫星数十天量级的高精度守时性能,因此开展性能指标更高的主动型星载氢原子钟研究工作很有必要。地面主动型氢钟由于其体积、重量较大,目前难以适应以导航卫星为代表的大部分卫星平台,需要进行轻量化改进^[6]。氢钟电路是氢原子钟的重要部分,实现了微波谐振腔和晶振的锁定以及高稳定度频率信号的输出。电路系统数字化、集成化是航天产品设计的发展趋势。上海天文台前期研制的地面型主动型氢钟谐振腔和晶振控制电路为模拟电路形式,模拟电路体积大,调试较为繁琐,不易在轨监测和重构,使用数字电路控制能避免上述问题。

1 频率稳定度

频率稳定度是衡量氢原子钟性能的一个重要指标,主动型氢原子钟 10 s 内的稳定度受电路噪声影响,其中电路热噪声功率可用式 (1) 表示:

$$N_0 = kT_e B \quad (1)$$

式 (1) 中: k 为波尔兹曼常数, T_e 为电路的等效噪声温度, B 为电路系统的环路带宽,当 $T_e = 290$ K 时,热噪声的功率谱密度约为 -174 dBm/Hz,电路系统带宽越窄,信号信噪比越高,稳定度越好^[7]。

氢钟 10 s 以上的频率稳定度在时域上的表征可简单表示为式 (2):

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{Q_a \sqrt{\tau}} \sqrt{\frac{kT}{2P_a}} \quad (2)$$

式 (2) 中: Q_a 为氢原子谱线品质因数, T 为氢钟的绝对温度, P_a 为脉泽的功率^[8]。由式 (2) 可知, 氢钟短期稳定度按照 $\frac{1}{\sqrt{\tau}}$ 趋势下降, 其中 τ 为积分时间, 提高氢脉泽的输出功率可以改善其频率稳定度。

但由于二阶多普勒效应、静磁场和腔牵引效应等因素的影响, 使得氢原子钟的长期稳定度变差, 导致这一公式并非始终成立^[9], 文献[10]定量介绍了这些物理扰动对频率的影响。

为了改善氢钟的频率稳定度, 氢钟物理部分通过采用多层高性能磁屏蔽系统保证静态磁场的稳定^[11]; 氢钟电路部分通过腔自动调谐系统将微波腔的谐振频率锁定至氢原子跃迁频率上抑制腔牵引效应, 通过恒温控制系统维持谐振腔温度稳定从而降低二阶多普勒效应的影响, 通过锁相系统将晶振频率锁定保证了短期频率稳定度。

2 腔自动调谐技术

微波谐振腔是氢原子钟的核心, 为了标准 10 MHz 信号的输出不发生频偏, 晶振和谐振腔谐振的频率都必须锁定准确^[12]。目前主动型氢原子钟常使用外部探测信号注入和腔频切换这两种方式进行腔自动调谐, 采用锁相系统对晶振进行锁相。

2.1 外部探测信号调谐

上海天文台的 SOHM-4 型主动型氢原子钟使用外部探测信号注入的方式进行腔自动调谐, 混频后的探测信号可用式 (3) 表示:

$$f_i = f_0 + f_m g(t) \quad (3)$$

式 (3) 中: f_i 为探测信号的频率, f_0 为氢原子跃迁的频率, f_m 为频率调制深度, $g(t)$ 为周期性的方波。

外部探测信号调谐原理如图 1 所示, 探测信号周期性地被注入到谐振腔中, 通过比较谐振腔对这两个频率信号的响应幅值便能判断出腔频是否发生偏移, 将幅度差 ΔA_c 作为误差信号经过积分器后反馈给谐振腔内的变容二极管来调整腔频, 从而以这种方式来保证谐振腔频率的长期稳定^[13-15]。

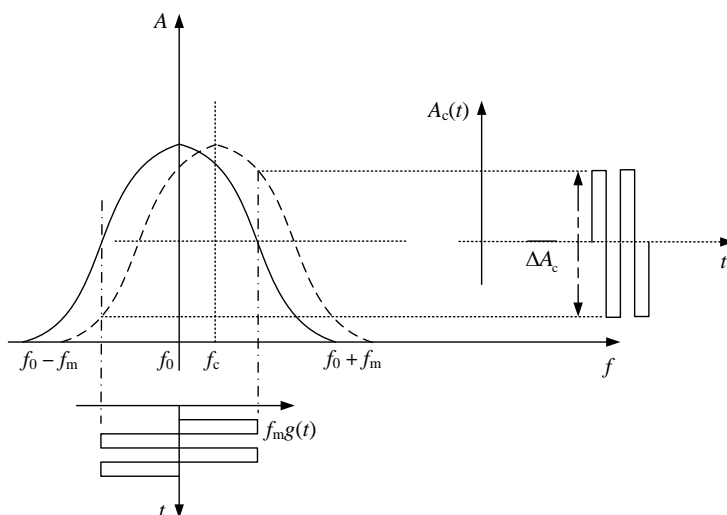


图 1 外部探测信号调谐原理图

2.2 腔频切换调谐

俄罗斯的 VCH-2020 型主动型氢原子钟和美国的 MHM-2020 型主动型氢原子钟都使用腔频切换的方式进行腔自动调谐, 谐振腔的谐振频率可用式 (4) 表示:

$$f_c(t) = \bar{f}_c + f_m g(t). \quad (4)$$

式 (4) 中: $f_c(t)$ 为谐振腔的谐振频率, \bar{f}_c 为谐振腔谐振频率的平均值。

腔频切换调谐原理如图 2 所示, 谐振腔的腔频随变容二极管两端电压周期性的改变而发生切换, 当谐振腔谐振频率的平均值 \bar{f}_c 与氢原子跃迁频率 f_0 不等时, 将脉泽信号由于腔频切换产生的幅度差 ΔA 作为误差信号经过处理后反馈给谐振腔内的另一个变容二极管来调节腔频^[7, 16-17], 从而以这种方式来维持谐振腔频率的长期稳定。

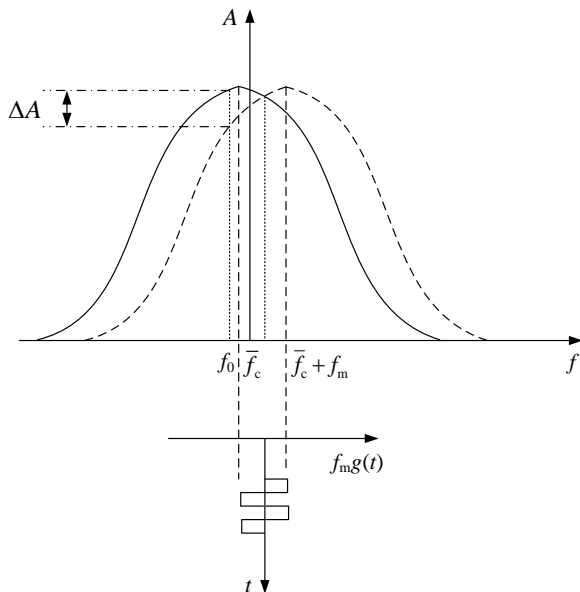


图 2 腔频切换调谐原理图

使用外部信号注入方式进行腔自动调谐的优点是左右探测信号的功率比脉泽信号功率高 10 dB 以上, 调幅信号进行解调时信噪比高, 其缺点是左右探测信号周期性变化会对脉泽信号产生扰动, 影响晶振的锁定, 对输出频率的短期频率稳定度不利; 腔频切换方式调谐对输出频率的短期稳定度几乎没有影响, 由于只使用变容二极管控制和切换腔频, 不需要探测信号模块和上变频模块, 简化了电路设计, 电子学噪声相对更小, 其缺点是变容二极管存在非线性, 会对输出频率的长期稳定度产生影响^[18-19]。

3 电路控制系统设计

氢原子钟电路控制系统的主要功能是实现微波腔和压控晶振的锁定以及高稳定度的 10 MHz 频率信号输出。通过对功能相近的模块整合, 使用高性能数字芯片, 电路进行集成化设计, 主动型氢钟的数字电路原理样机如图 3 所示, 其尺寸为 50 cm × 23 cm × 6 cm, SOHM-4 腔调谐模块和接收机模块的尺寸分别为 40 cm × 13 cm × 12 cm, 33 cm × 21 cm × 10 cm。由此可见, 主动钟电路经过模块化数字化系统设计后, 体积得到了明显降低。

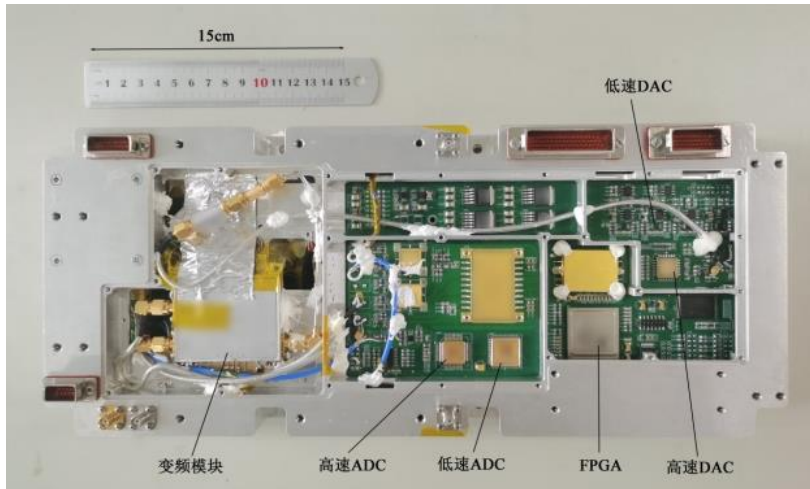


图3 数字电路原理样机

3.1 数字电路调谐系统

使用外部探测信号方式进行腔自动调谐的系统方框图如图4所示，信号流程如下：数字电路通过直接数字频率合成器（direct digital synthesizer, DDS）产生 $20.405 \text{ MHz} \pm 25 \text{ kHz}$ 的中频信号，中频信号经过上变频模块后输出 $1420.405 \text{ MHz} \pm 25 \text{ kHz}$ 的探测信号。氢钟输出的脉泽信号频率为 1420.405751 MHz ，为避免产生同频干扰，探测信号和脉泽信号经过下变频模块后输出 $19.595 \text{ MHz} \pm 25 \text{ kHz}$ 的中频信号， $19.595 \text{ MHz} \pm 25 \text{ kHz}$ 的中频信号经 AD（analog to digital）采样后进入 FPGA 处理平台；在 FPGA（field programmable gate array）内进行数字下变频、数字滤波及同步检波后分为两路，腔体环路通过检测微波谐振腔探测后输出的幅度误差，经过谐振腔伺服模块输出 DA（digital to analog）控制信号至氢钟物理部分的变容二极管实现对微波谐振腔频率的锁定。

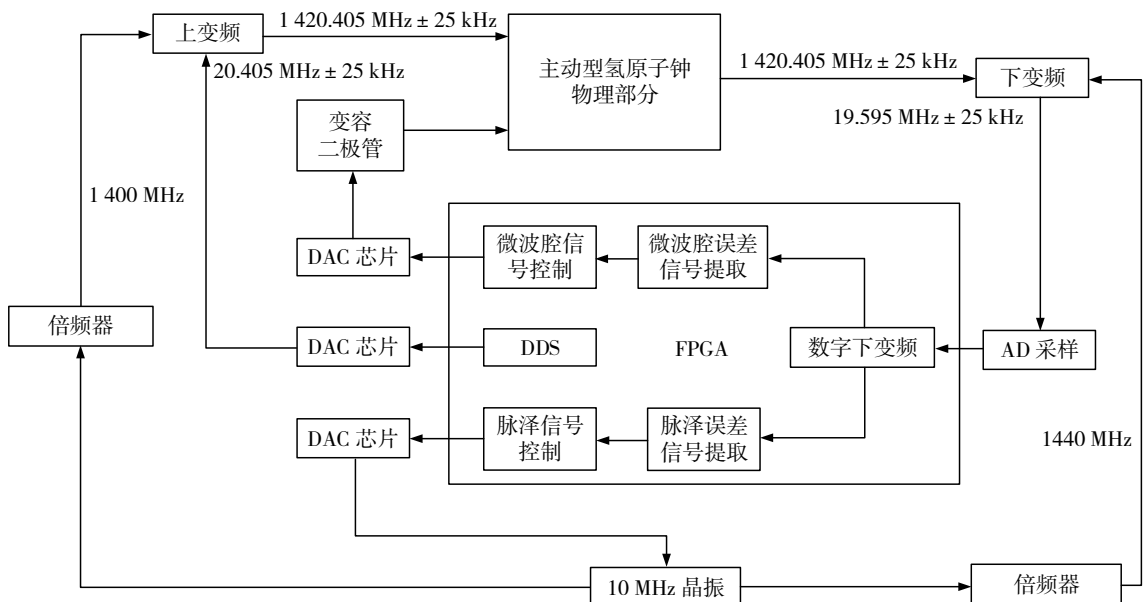


图4 外部探测信号调谐系统框图

使用腔频切换方式进行腔自动调谐的系统方框图如图5所示，信号流程与上述类似。腔频切换的时间需大于谐振腔响应时间（ $T_c \approx 10 \mu\text{s}$ ），小于氢原子的横向弛豫时间（ $T_2 \approx 0.3 \text{ s}$ ），这样才能保证腔频切换过程中原子磁矩的幅度没有明显变化，不会显著干扰氢脉泽信号的中短期频率稳定性^[17]。

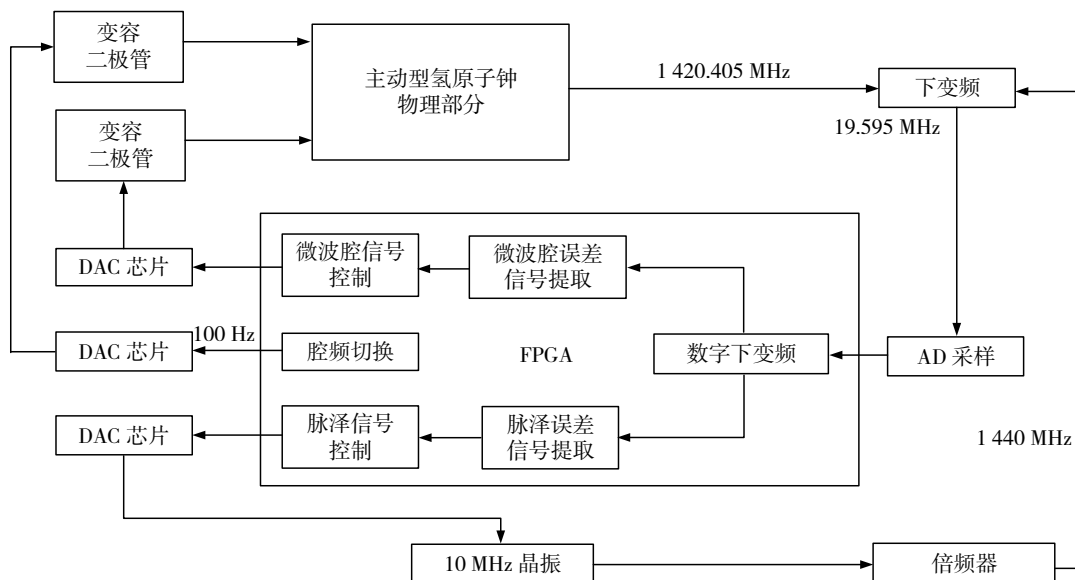


图 5 腔频切换调谐系统框图

3.2 数字锁相系统

锁相环是一种闭环相位跟踪系统，其具有良好的窄带跟踪特性，能够在低信噪比的环境中提取出信号^[20]。在晶振锁定环路中，使用数字锁相环将晶振输出信号的频率和相位与氢原子钟输入信号的频率和相位保持同步。

数字锁相环系统由鉴相器，低通滤波器和压控振荡器三部分组成。通过本地产生信号与输入信号相乘完成锁相环的鉴相功能。在 FPGA 中实现 FIR (finite impulse response) 数字低通滤波时由于大量使用乘法消耗资源多，而移动平均滤波器只使用加法运算简单，更有利于信号的处理^[21]。 N 点移动平均滤波器的传递函数可用式 (5) 表示：

$$H(z) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} z^{-n} = \frac{1}{N} \frac{1-z^{-N}}{1-z^{-1}} \quad (5)$$

频率响应如式 (6) 所示：

$$H(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} \frac{1-e^{-j\omega N}}{1-e^{-j\omega}} = \frac{1}{N} e^{-j\omega(N-1)/2} \frac{\sin(\omega N/2)}{\sin(\omega/2)} \quad (6)$$

式 (6) 中： ω 为数字角频率，当采样时钟为 90 MHz 时， $N = 90\,000$ ，数据在 1 ms 内进行积分平均，此时低通滤波器带宽约为 1 kHz，有效滤除了数字锁相环鉴相后的高频分量，保留了低频误差分量。压控振荡器中环路参数的选取可用式 (7)、(8) 进行计算：

$$c_1 = \frac{2\xi\omega_n T}{K_d K_o} \quad (7)$$

$$c_2 = \frac{\omega_n^2 T^2}{K_d K_o} \quad (8)$$

式 (7) 至 (8) 中： ξ 为阻尼系数， ω_n 为系统的谐振频率， T 为采样时间， K_d 为鉴相器增益， K_o 为压控振荡器增益^[20]。模拟锁相接收机系统参数调整繁琐，数字锁相环不但参数方便调整而且可以通过调节参数 c_1 和 c_2 来改善系统的性能。在初始的锁定阶段增大环路参数 c_1 和 c_2 来增加系统的谐振频率 ω_n ，系统快速进入锁定状态；在系统锁定之后减小环路参数 c_1 和 c_2 ，降低了系统的噪声带宽，增加了系统抑制

噪声的能力。在 FPGA 中根据以上方式设计的数字锁相环系统如图 6 所示。

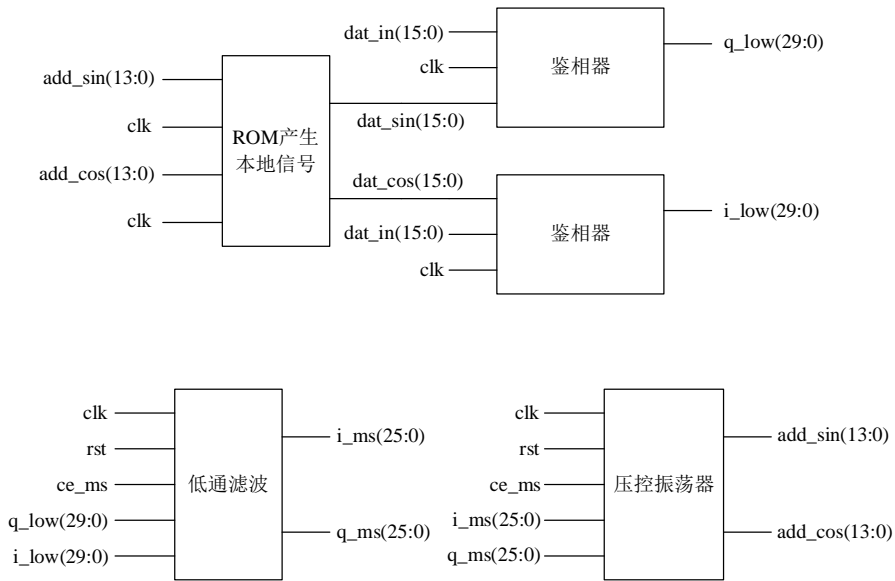


图 6 数字锁相环系统

通过对物理部分谐振腔等系统进行改进，电路部分进行模块化数字化系统设计，新型主动型氢钟的体积和重量得到了明显降低，上海天文台的地面主动型氢钟和新型轻量化主动型氢钟对比如图 7 所示。



图 7 主动型氢原子钟对比

4 实验分析

新型轻量化主动型氢钟使用外部信号探测和腔频开关切换两种方式进行腔自动调谐，通过数字锁相环进行锁相。将主动型氢钟锁定后输出的 10 MHz 标准信号引出作为被测信号，VCH-1003M 型氢钟输出

的信号作为参考信号,使用频率比较器 VCH-314 测量其频率稳定度。

主动型氢钟电路通过 DAC (digital to analog convertor) 芯片产生晶振和谐振腔的控制电压,使用线性稳压电源芯片降低电源纹波,选择低温漂、低噪声电子元器件,有效降低了数字噪声对氢钟频率稳定度的影响。在 FPGA 中固定 DAC 数字控制量,通过高精度数据采集仪采集输出的电压波动如图 8 所示。电路叠加噪声电压峰峰值为 $30 \mu\text{V}$,此电压波动引起晶振频率稳定度变化 2.35×10^{-13} ,引起谐振腔频率变化 0.02 Hz ,满足谐振腔变化小于 0.05 Hz/d 的要求。

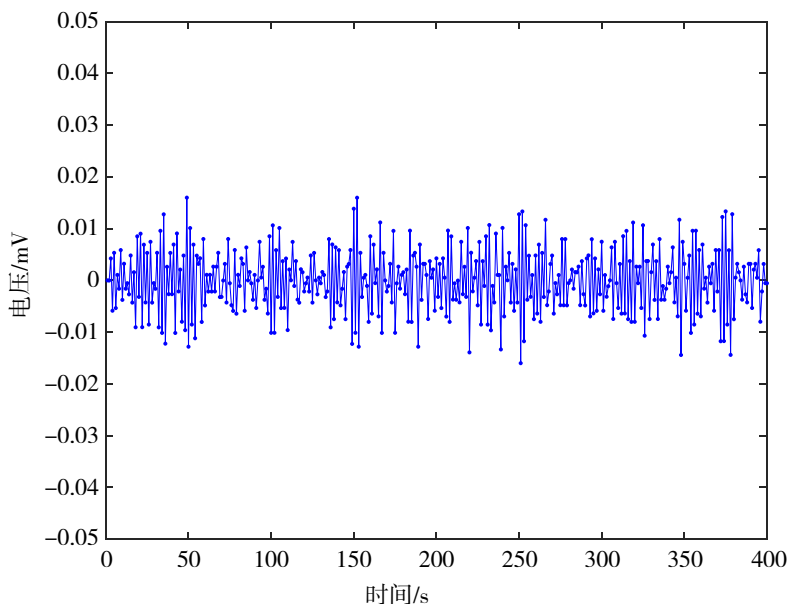


图 8 DAC 噪声电压

使用 Xilinx 内部的逻辑分析仪 ChipScope Pro 对晶振和谐振腔锁定环路进行数据采集和软件调试。晶振环路的误差曲线如图 9 所示,氢原子钟的秒稳由晶振决定,因此需要晶振在秒量级内快速锁定。随着晶振环路和腔体环路的误差量逐渐减小到 0,氢钟处于锁定状态,此时电路产生高稳定性和高准确度的 10 MHz 频率信号。

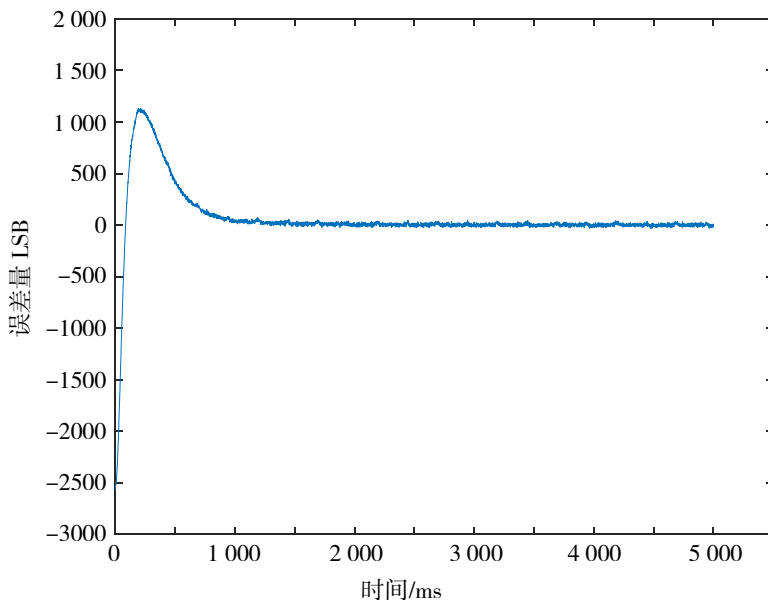


图 9 晶振环路的误差曲线

使用不同的腔调谐方式和不同的频率调制深度进行腔自动调谐, 采样间隔为 1 s, 将采集到的数据在 Stable32 软件中进行处理, 比较各模式下的频率稳定度。通过表 1 对比可知, 使用 25 kHz 调制深度的外部探测信号调谐时, 主动型氢原子钟输出的 1 000 s 频率稳定度较好。

表 1 主动型氢原子钟中短期频率稳定度指标

取样时间	外部探测信号调谐			腔频切换调谐
	35 kHz 调制深度	25 kHz 调制深度	15 kHz 调制深度	
1 s	2.56×10^{-13}	2.59×10^{-13}	2.55×10^{-13}	4.88×10^{-13}
10 s	5.77×10^{-14}	5.68×10^{-14}	5.73×10^{-14}	1.87×10^{-13}
1 00 s	1.99×10^{-14}	1.97×10^{-14}	1.91×10^{-14}	6.82×10^{-14}
1 000 s	6.24×10^{-15}	4.74×10^{-15}	6.42×10^{-15}	2.02×10^{-14}

SOHM-4 地面主动型氢钟尺寸为 110 cm × 54 cm × 73 cm, 重量约为 220 kg, 功耗约为 200 W^[13]。与之相比, 星载被动型氢钟最大外形尺寸仅为 52 cm × 24 cm × 26 cm, 重量为 23 kg, 稳态功耗约为 60 W。新型轻量化主动型氢钟的体积功耗与 23 kg 被动型氢钟相差不大。在同样的实验环境下, 利用 VCH-314 测量 25 kHz 调制深度的新型轻量化主动型氢钟 (AHM) 与 23 kg 被动型氢钟 (PHM) 的频率稳定度, 两者的 Allan 方差曲线对比如图 10 所示。其中, 被动型氢钟秒稳定度为 9.4×10^{-13} , 万秒稳定度为 1.0×10^{-14} , 主动型氢钟秒稳定度为 2.6×10^{-13} , 万秒稳定度为 2.6×10^{-15} , 新型轻量化主动型氢钟的频率稳定度指标均优于 23 kg 被动型氢钟。

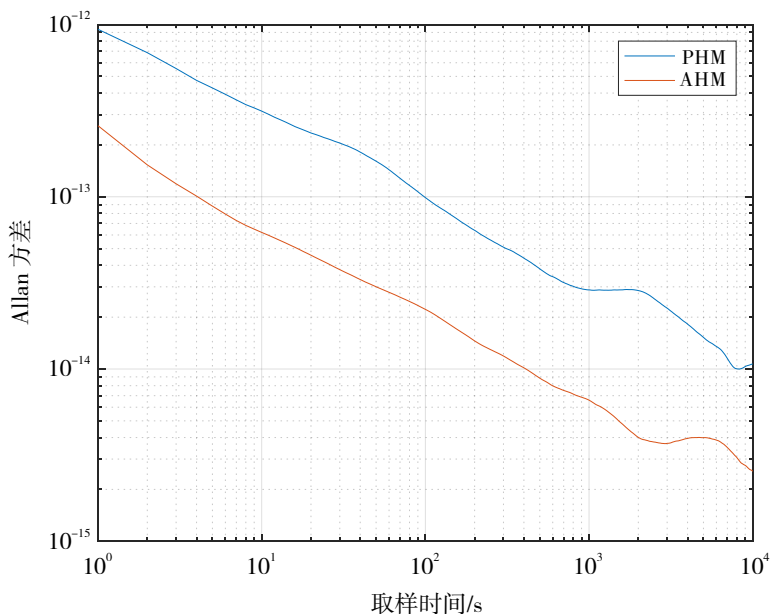


图 10 氢原子钟的 Allan 方差曲线

5 结论

本文使用数字电路形式对主动型氢原子钟电路系统进行了小型化和轻量化的改进, 实现了两种方式的腔自动调谐和晶振锁相, 完成了整机闭环。测试结果表明, 使用数字电路进行腔自动调谐方式的氢钟

秒稳定度为 2.6×10^{-13} , 优于使用模拟电路的 SOHM-4 型氢原子钟的 4.8×10^{-13} ; 万秒稳定度为 2.6×10^{-15} , 使用模拟电路的 SOHM-4 型氢原子钟的万秒稳定度为 3.2×10^{-15} , 两者相差不大, 初步验证了数字电路控制系统的可行性。此后将继续对外部信号探测方式的腔自动调谐程序进行参数调整优化, 对微波腔频率开关调谐方式的腔自动调谐进行分析与改进, 对数字电路进行长期稳定性测试, 以更好适用于主动型氢原子钟。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 帅涛, 林宝军, 张军, 等. 北斗导航卫星氢原子钟性能分析评估[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2021, 51(1): 125-134.
- [3] 李变, 屈俐俐, 高玉平. J0613-0200 驾驭铯钟的方法[J]. 航空学报, 2023, 44(3): 217-224.
- [4] 赵成仕, 高玉平, 童明雷, 等. 导航脉冲星星历表时空参考系统统一性问题[J]. 航空学报, 2023, 44(3): 165-176.
- [5] 周庆勇, 魏子卿, 闫林丽, 等. 面向综合定位导航授时系统的天地基脉冲星时间研究[J]. 物理学报, 2021, 70(13): 471-483.
- [6] 贺玉玲, 何克亮, 王国永, 等. 导航卫星时频系统发展综述[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(5): 61-70.
- [7] PETERS H E. Design and construction of new hydrogen masers using cavity frequency switching servos[C]// 38th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia: IEEE, 1984.
- [8] 王义适, 王庆吉, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [9] 王国瑞, 杜燕, 李锡瑞. 氢脉泽调制技术和研究[J]. 天文研究与技术, 2018, 15(4): 473-478.
- [10] 尼古拉·德米朵夫. 氢钟开发技术和展望[J]. 宇航计测技术, 2007(S1): 6-14+26.
- [11] 潘志兵, 谢勇辉, 帅涛, 等. 小型化星载被动型氢原子钟研制[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 105-112.
- [12] 郑贺斐, 李晶, 冯克明, 等. 被动型氢原子钟单频调制的鉴频特性研究[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 322-329.
- [13] 张为群, 王文明, 蔡勇, 等. 上海天文台主动型氢原子钟研制的最新进展[C] // 2009 年全国压电和声波理论及器件技术研讨会暨 2009 年全国频率控制技术年会论文集, 2009.
- [14] AUDOIN C. Fast cavity auto-tuning systems for hydrogen masers[J]. Revue de Physique Appliquée, 1981, 16(3): 125-130.
- [15] CAI Y, WU Y D, ZHANG Y J. Improvement of the atomic hydrogen maser for Chinese Compass System[J]. IEEE European Frequency and Time Forum, 2009: 553-558.
- [16] DEMIDOV N, VORONTSOV V, BELYAEV A, et al. Studies of a short and long-term stability of an active hydrogen maser with stand alone cavity auto-tuning[C] // European Frequency and Time Forum (EFTF), Gothenburg: IEEE, 2012.
- [17] AUDOIN C, DIENER W A. Frequency, phase and amplitude changes of the hydrogen maser oscillation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1992, 41(4): 461-466.
- [18] 何克亮, 张为群, 林传富. 主动型氢原子钟的研究进展[J]. 天文学进展, 2017, 35(3): 345-366.
- [19] PETERS H E. Hydrogen masers using cavity frequency-switching servos: present system design (2006) and possible improvements[J]. Metrologia, 2006(43): 353-360.
- [20] 冯磊, 帅涛, 李国通, 等. 时频生成与保持系统数字方案研究[C] // 第五届中国卫星导航学术年会, 南京: 出版社不详, 2014: 51-57.
- [21] 徐文, 李玉莹, 刘铁新. 应用于被动氢钟的简单滤波器实现[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2011: 90-95.