

引用格式:潘子伟,刘铁新,李政凯,等.主动型氢原子钟国产锁相环路研制与测试[J].时间频率学报,2025,48(3):174-180.

# 主动型氢原子钟国产锁相环路研制与测试

潘子伟<sup>1,2</sup>, 刘铁新<sup>1</sup>, 李政凯<sup>1</sup>, 蔡勇<sup>1</sup>, 李锡瑞<sup>1</sup>

1.中国科学院 上海天文台,上海 200030;  
2.中国科学院大学,北京 100049

**摘要:**星载氢原子钟是现代导航卫星的核心支撑,为了保障国家安全、提高自身竞争力,采用国产器件研制了模拟锁相接收机。分析了锁相接收机的总体设计结构、锁相环路的设计原理、等效噪声模型建立,同时仿真了不同环路参数对于氢原子钟短期频率稳定度的影响,并进行了实验验证,为今后调试提供了理论指导。最终实测结果表明,在采用国产器件的前提下,锁相接收机可实现  $1.35 \times 10^{-13}/1\text{ s}$ 、 $3.22 \times 10^{-14}/10\text{ s}$ ,验证了该电路方案的可行性。

**关键词:**氢原子钟;锁相环;频率稳定性

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2025-03-0174-07

## Development and test of domestic phase locked loop for active hydrogen maser

PAN Zi-wei<sup>1,2</sup>, LIU Tie-xin<sup>1</sup>, LI Zheng-kai<sup>1</sup>, CAI Yong<sup>1</sup>, LI Xi-rui<sup>1</sup>

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The spaceborne hydrogen maser atomic clock is the core support of modern navigation satellites. To ensure national security and enhance competitiveness, a simulated phase-locked receiver was developed using domestically produced components. The overall design structure of the phase-locked receiver, the design principles of the phase-locked loop, and the establishment of an equivalent noise model were analyzed. Simulations were conducted to evaluate the impact of different loop parameters on the short-term frequency stability of the hydrogen maser, followed by experimental validation, providing theoretical guidance for future debugging. The final test results demonstrate that, under the condition of using domestic components, the phase-locked receiver can achieve  $1.35 \times 10^{-13}/1\text{ s}$  and  $3.22 \times 10^{-14}/10\text{ s}$ , verifying the feasibility of this circuit design, ensuring both reliability and stability.

**Keywords:** hydrogen atomic clocks; phase-locked loops; frequency stability

星载氢原子钟为导航、定位等服务提供支持<sup>[1]</sup>,但国际形势变幻莫测,为确保在科学基础研究乃至国防事业中真正发挥作用,一个重要发展方向就是确保国产化。之前的电路中采用了国外电子器件,此次设计保留了原有的超外差接收机结构,采用国

产器件并重新设计电路,对模拟锁相环路进行仿真分析以及测试,确保可以达到原有接收机的性能。

## 1 设计分析

氢原子钟是利用氢原子基态两个超精细能级

之间的跃迁放出的电磁能量制成的一种微波激射器,由于氢原子钟的振荡频率是由氢原子的超精细跃迁频率所决定,它是一种高精度的频率标准源。其跃迁频率较高,但功率较小,通常采用锁相电路控制晶振输出 10 MHz 或者其他频率,获得高稳定度的频率信号。

接收机本质上是利用了氢脉泽的长期稳定性来修正压控晶振的固有频率和相位抖动,以此获得稳

定性的效果。因此合理设计锁相环路的宗旨是使氢原子钟的频率稳定度有效地向压控振荡器传递。

### 1.1 氢原子钟接收机与锁相环路结构

氢原子钟锁相接收系统主要包括接收、锁相两大部分,采用超外差结构完成氢脉泽信号的接收和处理<sup>[2]</sup>。图 1 是该锁相接收机系统的设计方案系统框图。

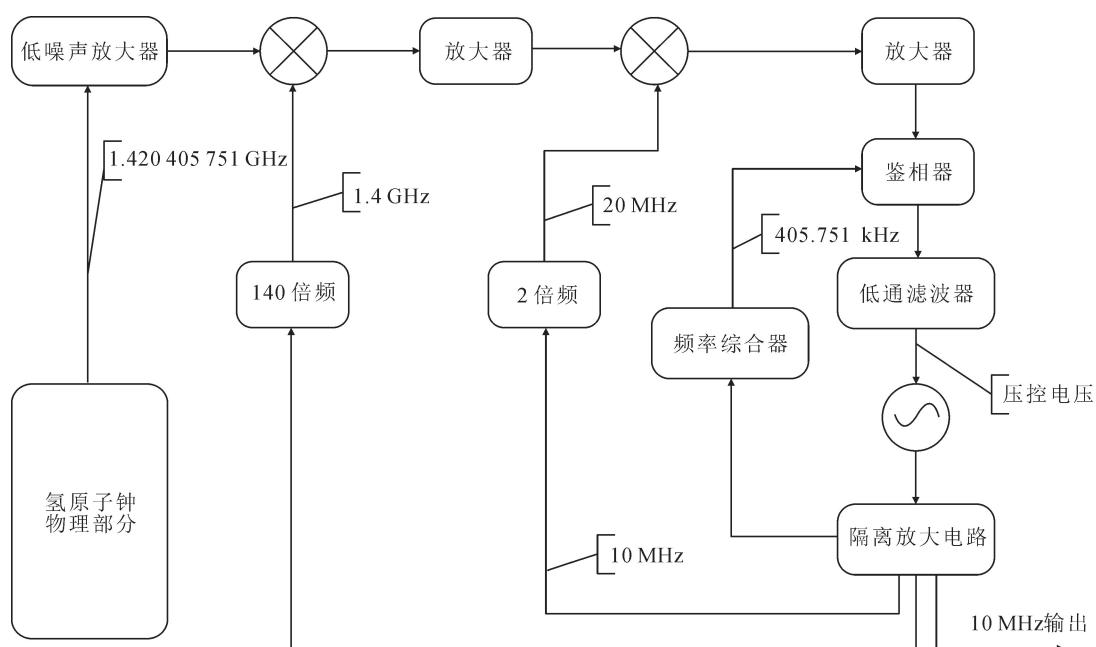


图 1 锁相接收机系统框图

### 1.2 频率稳定度的表征<sup>[3]</sup>

受控晶振的输出信号能否传递氢原子钟的长期稳定度,与所用的锁相环路的设计密切相关。因此,除了环路本身工作的稳定性外,还需要分析在环路中各部分电路引入的相位噪声和干扰。在分析锁定晶振的频率稳定度之前,先分析频率稳定度在时域、频域的表征以及转换关系,然后求其环路的传递函数。

频率稳定度在时域上用 Allan 方差  $\sigma_y^2(\tau)$  表示<sup>[4]</sup>,可写为

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \rangle. \quad (1)$$

式(1)中,  $\tau$  既是取样间隔也是每次测量的取样时间,  $\bar{y}_k$  为第  $k$  次测量的取样平均值, 即

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_{k+\tau}} y(t) dt, \quad (2)$$

$$\bar{y}_{k+1} = \frac{1}{\tau} \int_{t_{k+\tau}}^{t_{k+2\tau}} y(t) dt. \quad (3)$$

式(2)和式(3)中,  $y(t)$  为  $t$  时刻相对瞬时频偏。

在频域上,频率稳定度常用的表征形式为相对瞬时频偏  $y(t)$  在单位频带内的单边傅里叶谱密度  $S_y(f)$ 。主要是由互相独立的五种噪声线性组合,因此可写为

$$S_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^2 h_\alpha f^\alpha, \quad (4)$$

式(4)中,  $h_\alpha$  为常数,  $f^\alpha$  ( $\alpha = -2, -1, 0, 1, 2$ ) 分别为随机游走白噪声、闪变频率噪声、白频率噪声、闪变相位噪声和白相位噪声。

频域和时域表征方式之间的转换关系为

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^\infty S_y(f) \frac{\sin^4 \pi f \tau}{(\pi f \tau)^2} df. \quad (5)$$

在实际应用中,对于截止频率为  $f_h$  的单极点低通滤波器的测试仪器,则有

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^\infty S_y(f) \frac{\sin^4 \pi f \tau}{(\pi f \tau)^2} \left[ \frac{1}{\left( 1 + \frac{f^2}{f_h^2} \right)} \right] df. \quad (6)$$

不同噪声类型的频率稳定度表征如表 1 所示。

表 1 不同噪声类型的频率稳定度表征

噪声类型	$S_y(f)$	$\sigma_y^2(\tau)$
随机游走白噪声	$h_{-2} f^{-2}$	$h_{-2} \cdot \frac{(2\pi)^2}{6} \cdot \tau, 0 \leq f \leq f_h$
闪变频率噪声	$h_{-1} f^{-1}$	$h_{-1} \cdot 2 \ln 2, 0 \leq f \leq f_h$
白频率噪声	$h_0 f^0$	$h_0 \cdot \frac{1}{2\tau}, 0 \leq f \leq f_h$
闪变相位噪声	$h_1 f^1$	$h_1 \cdot \left\{ 3 \left[ \frac{3}{2} + \ln(2\pi f_h \tau) \right] - \ln 2 \right\} / [(2\pi)^2 \tau^2], 2\pi f \gg 1, 0 \leq f \leq f_h$
白相位噪声	$h_2 f^2$	$h_2 \cdot 3f_h / [(2\pi)^2 \tau^2], 0 \leq f \leq f_h, 2\pi f_h > 1$

### 1.3 等效噪声模型建立

在环路锁定状态下, 压控晶振输出的相位噪声得到改善, 各噪声分量的削弱程度不同, 与环路频率特性及噪声谱的分布有关。如果压控晶振有初

始相位扰动, 它将被鉴相器输出, 通过环路滤波器再作用于压控晶振, 使其相位朝向反方向变动, 从而减少相位抖动。

根据图 1 建立环路的等效噪声模型如图 2 所示。

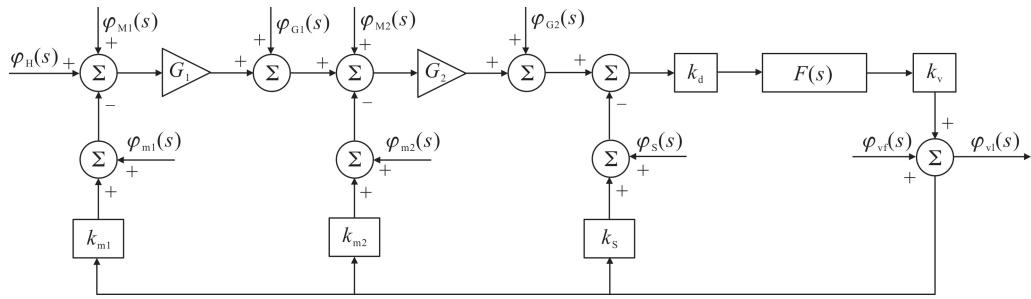


图 2 等效相位噪声模型

可以推得锁定后的晶振相位  $\varphi_{vl}(s)$ :

$$\begin{aligned} \varphi_{vl}(s) = & H_1 \cdot \varphi_{vf}(s) + H_2 \cdot [\varphi_H(s) + \\ & \varphi_{M1}(s) - \varphi_{m1}(s) + \varphi_{G1}(s) + \\ & \varphi_{M2}(s) - \varphi_{m2}(s) + \varphi_{G2}(s) - \varphi_s(s)]. \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中:

$$H_1 = \frac{s}{s + K_d \cdot K_v \cdot K_N \cdot F(s)}, \quad (8)$$

$$H_2 = \frac{K_d \cdot K_v \cdot K_N \cdot F(s)}{s + K_d \cdot K_v \cdot K_N \cdot F(s)}, \quad (9)$$

$$K_N = K_{m1} + K_{m2} + K_s = N. \quad (10)$$

锁相环路中采取有源积分滤波器, 其电路结构如图 3 所示:

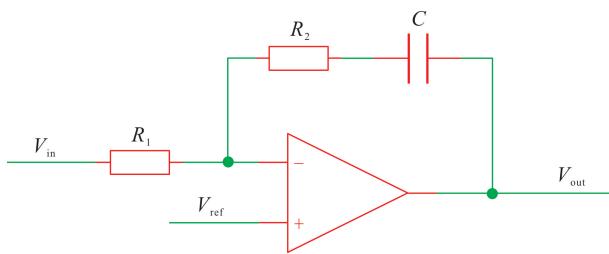


图 3 环路滤波器电路结构

有源比例积分滤波器的传递函数为<sup>[5]</sup>

$$F(s) = \frac{1 + \tau_1 s}{\tau_2 s}. \quad (11)$$

式(11)中  $\tau_1$  和  $\tau_2$  分别为积分环节和比例环节的时间常数, 通过更改  $R_1$ 、 $R_2$  和  $C$  的值来改变锁相环路的参数<sup>[6]</sup>。

将  $F(s)$  代入式(8)和式(9)中得:

$$H_1 = \frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (12)$$

$$H_2 = \frac{1}{K_N} \cdot \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}. \quad (13)$$

式(12)和(13)中  $\omega_n$  为锁相环的固有角频率,  $\xi$  为阻尼比, 存在:

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{K_d \cdot K_v \cdot K_N}{\tau_1}}, \quad (14)$$

$$\xi = \frac{\tau_2}{2} \cdot \omega_n. \quad (15)$$

因此, 当环路中  $\omega_n$  和  $\xi$  发生变化时, 传递函数

$H_1, H_2$  会随之发生变化。当电路器件确定后,通过调节  $\tau_1$  和  $\tau_2$  的值,可以使锁相环路的性能达到最优。

## 2 环路参数分析

### 2.1 环路带宽的选择

在忽略电路中各个器件对于整个环路的噪声影响,可以先将式(7)简化为

$$\varphi_{\text{vl}}(s) = H_1 \cdot \varphi_{\text{vf}}(s) + H_2 \cdot \varphi_{\text{H}}(s)。 \quad (16)$$

根据相位噪声的谱密度定义式可得:

$$S_{\varphi_{\text{vl}}}(f) = |H_1(j2\pi f)|^2 \cdot S_{\varphi_{\text{vf}}}(f) + |H_2(j2\pi f)|^2 \cdot S_{\varphi_{\text{H}}}(f)。 \quad (17)$$

同时频率噪声功率谱密度  $S_y(f)$  与相位噪声功率谱密度  $S_\varphi(f)$  关系为

$$S_y(f) = \frac{f^2}{f_0^2} S_\varphi(f)。 \quad (18)$$

可以算出对应的功率谱密度:

$$S_{y_{\text{vl}}}(f) = |H_1(j2\pi f)|^2 \cdot S_{y_{\text{vf}}}(f) + K_N^2 \cdot |H_2(j2\pi f)|^2 \cdot S_{y_{\text{H}}}(f)。 \quad (19)$$

式(19)中:

$$|H_1(j2\pi f)|^2 = \frac{f^4}{f^4 + 2f_n^2(2\xi^2 - 1)f^2 + f_n^4}, \quad (20)$$

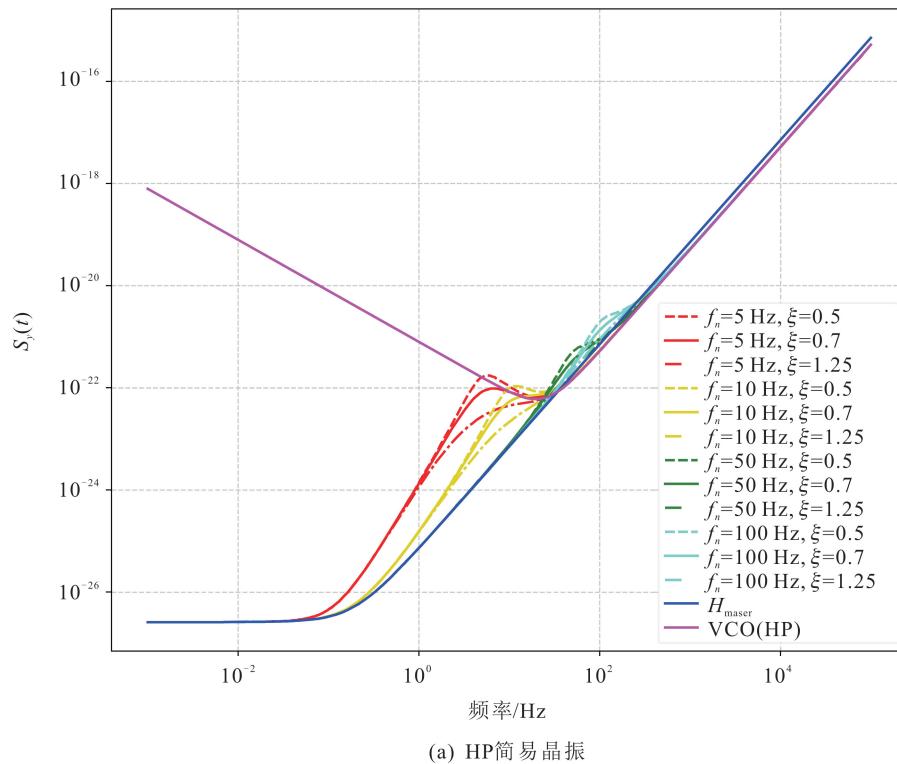
$$K_N^2 \cdot |H_2(j2\pi f)|^2 = \frac{f_n^2(4\xi^2 f^2 + f_n^2)}{f^4 + 2f_n^2(2\xi^2 - 1)f^2 + f_n^4}。 \quad (21)$$

式(19)至式(21)反映了被锁定的晶振的频率谱密度与环路带宽  $f_n$ 、阻尼系数  $\xi$  的关系。因此,通过计算不同  $f_n$  与  $\xi$  下的  $S_{y_{\text{vl}}}(f)$ , 可以推出最佳的环路带宽。

### 2.2 参数仿真

文献[3]提供了典型的氢原子钟谱密度  $S_{y_{\text{H}}}(f)$  为  $7.5 \times 10^{-36} f^{-2} + 2.6 \times 10^{-27} + 7.1 \times 10^{-26} f^2$  以及 HP 简易晶振的谱密度  $S_{y_{\text{vf}}}(f)$  为  $7.9 \times 10^{-22} f^{-1} + 5.2 \times 10^{-26} f^2$  并由此得出结论为环路带宽  $f_n \geq 10 \text{ Hz}$  可以有效地将氢原子的稳定度传递给晶振。但随着晶振的制造工艺水平提高,晶振模型的谱密度也随之改变,这就会造成锁相环路带宽的选取发生改变。如今使用的晶振模型与 Besson 在 1978 年提出一种模型更为接近,其谱密度为  $1.6 \times 10^{-25} f^{-1} + 8 \times 10^{-27} f + 8 \times 10^{-29} f^2$  [7]。

结合式(19),利用 python 编写代码进行绘制<sup>[8]</sup>,可以得到图 4。



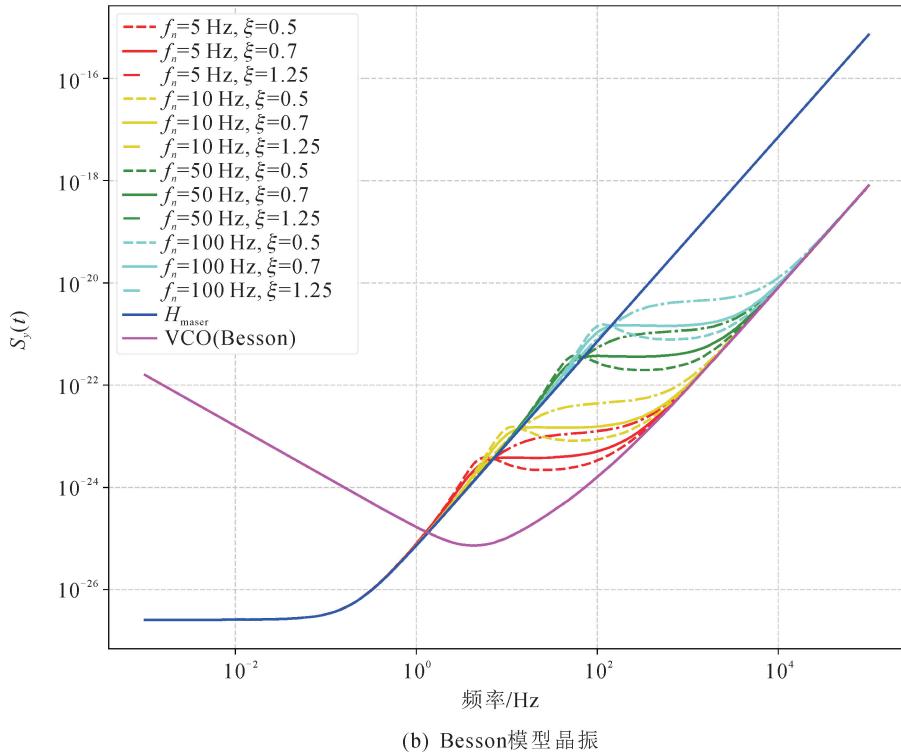


图 4 锁相环路与不同晶振, 在不同环路参数下的频率谱密度

对于 Besson 模型晶振模型, 根据表 1 的对应关系, 根据仿真计算绘制出不同环路带宽下的频率稳定性如图 5 所示。

结合图 4 和 5 发现, 对于不同的压控晶振, 最佳

的环路参数是不同的, 并且在采取 Besson 模型的晶振且忽略了电路器件噪声的情况下, 环路带宽  $f_n \geqslant 5$  Hz 对于短期稳定性( $\tau < 100$  s)影响也是较小的。

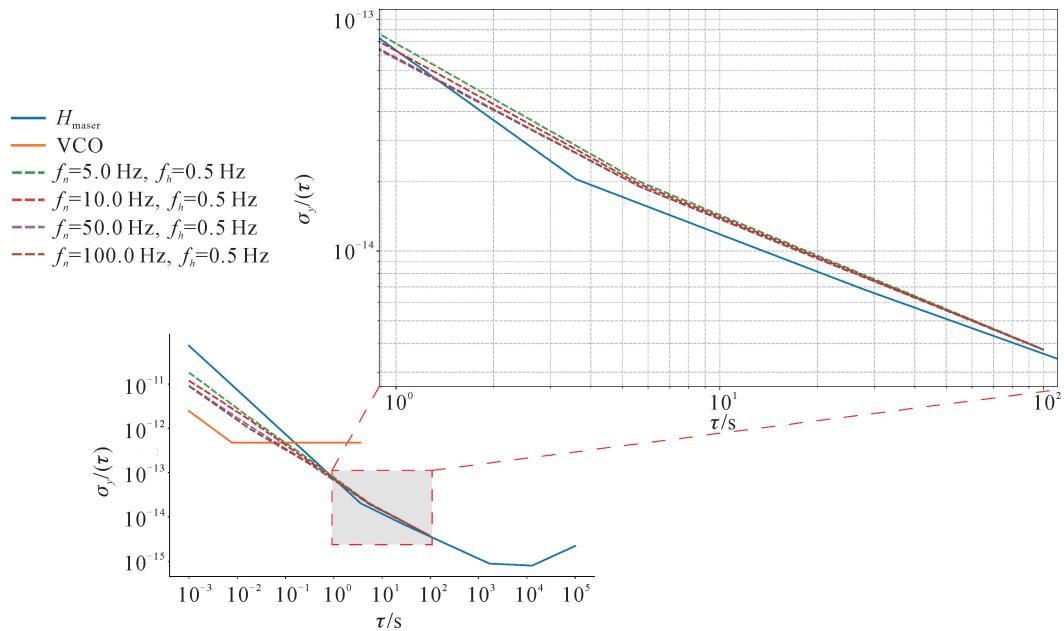


图 5 Besson 模型晶振锁定在不同带宽的 Allan 偏差(仿真)

### 3 实验验证

#### 3.1 实验条件

为了验证理论计算的准确性,我们设计了实验验证锁相环路的性能。实验中,物理部分使用上海天文台主动型氢原子钟,输出频率为 10 MHz,信号强度为  $-108 \text{ dBm}$ ,输出信号经过低噪声放大器、混频处理后,得到中频信号。鉴相器使用国产某双平衡混频器,鉴相比例因子为  $0.63 \text{ V/rad}$ ,环路滤波器使用国产 OP07 运算放大器,滤波电容  $C=0.1 \mu\text{F}$ 。

晶振选用了国产某压控晶振,频率为 10 MHz,压控系数为  $1 \text{ Hz/V}$ 。实验中,通过改变  $R_1$ 、 $R_2$  的值来改变环路带宽  $f_n$  和阻尼系数  $\xi$ ,测量了不同情况下的压控晶振的输出频率稳定度。测试参数如表 2 所示。

测试设备选用了成都同相科技的 STT-PN 系列相噪测试仪,保存输出的相位差数据,通过 Stable 32 进行处理,得到 Allan 偏差。采样时间  $\tau=1 \text{ s}$ ,测

试带宽为  $0.5 \text{ Hz}$ ,测试时间为  $1000 \text{ s}^{[9]}$ 。测试框见图 6。

表 2 不同  $R_1$ 、 $R_2$  对应的环路参数

$R_1$	$R_2$	$f_n/\text{Hz}$	$\xi$
$14 \text{ k}\Omega$	$15.8 \text{ k}\Omega$	100	0.5
$14 \text{ k}\Omega$	$22.2 \text{ k}\Omega$	100	0.7
$14 \text{ k}\Omega$	$38.5 \text{ k}\Omega$	100	1.25
$56 \text{ k}\Omega$	$32 \text{ k}\Omega$	50	0.5
$56 \text{ k}\Omega$	$45 \text{ k}\Omega$	50	0.7
$56 \text{ k}\Omega$	$79.5 \text{ k}\Omega$	50	1.25
$1.4 \text{ M}\Omega$	$158 \text{ k}\Omega$	10	0.5
$1.4 \text{ M}\Omega$	$222 \text{ k}\Omega$	10	0.7
$1.4 \text{ M}\Omega$	$385 \text{ k}\Omega$	10	1.25
$5.6 \text{ M}\Omega$	$320 \text{ k}\Omega$	5	0.5
$5.6 \text{ M}\Omega$	$450 \text{ k}\Omega$	5	0.7
$5.6 \text{ M}\Omega$	$795 \text{ k}\Omega$	5	1.25

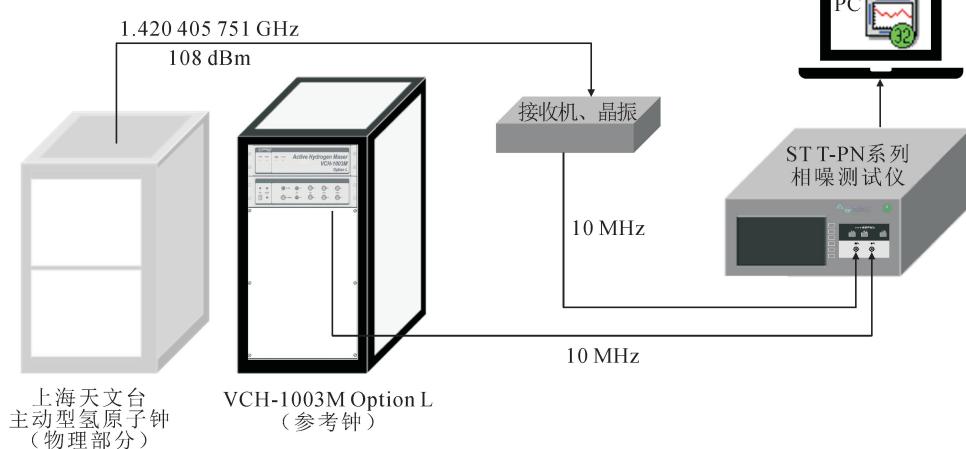


图 6 测试框图

#### 3.2 实验结果

在不同环路带宽  $f_n$  和阻尼系数  $\xi$  下,锁定后压控晶振的 Allan 偏差如图 7 所示。

由图 7 可知,锁相接收机的稳定度可以达到  $1.35 \times 10^{-13}/\sqrt{\text{s}}$ 、 $3.22 \times 10^{-14}/\sqrt{\text{s}}$ 。其中随着  $f_n$  增大,短期频率稳定与图 5 仿真计算结果一致,有所提升但变化较小。

从图 4 中可以发现,文献[3]中得到的结论“环路带宽  $f_n \geq 10 \text{ Hz}$  可以有效地将氢原子的稳定度

传递给晶振”是因为在低傅里叶频率处(氢钟和晶振曲线交点左侧) $f_n \geq 10 \text{ Hz}$  时的改善效果明显,但是对于 Besson 晶振模型则没有该问题,反而随着  $f_n$  的变小,谱密度  $S_y(f)$  会有更好的传递效果。另外在阻尼系数  $\xi$  较大或者较小的情况下都会使得相位噪声恶化<sup>[2]</sup>,恰当的阻尼系数  $\xi$  对于相位噪声也很重要。

综合考虑,选择  $R_1 = 5.6 \text{ M}\Omega$ 、 $R_2 = 450 \text{ k}\Omega$  作为环路滤波器参数,以获得输出信号的最佳相位噪声如图 8 所示。

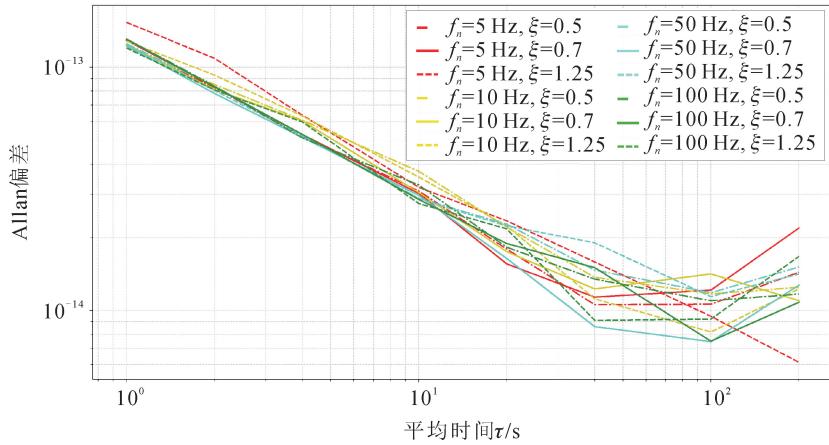


图 7 不同环路参数下压控晶振的 Allan 偏差

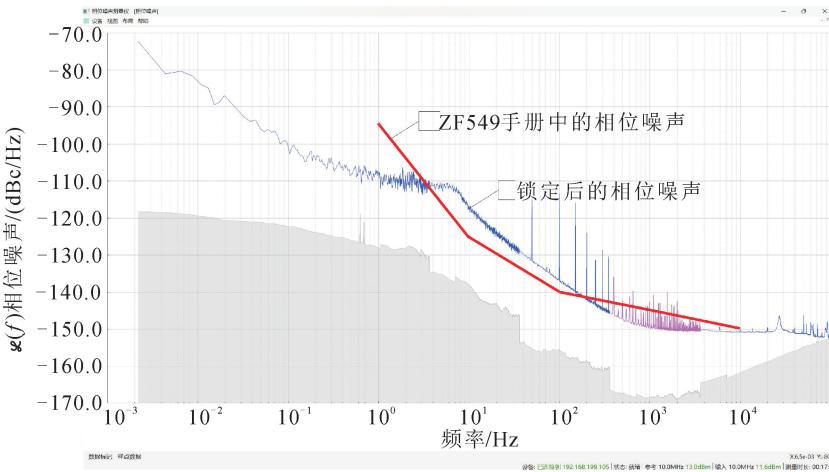


图 8 环路带宽为 5 Hz, 阻尼系数为 0.7 时的相位噪声

## 4 结语

本文对采用国产器件的星载主动型氢原子钟的模拟锁相接收机系统分析以及根据晶振模型参数和锁相环路参数进行了仿真计算。当环路带宽  $f_n \geq 5$  Hz 时, 可有效实现氢原子跃迁信号稳定度向晶振的传递。

锁相环路的环路参数由带宽和阻尼系数共同决定。在综合短期稳定度和相位噪声的考虑后选择带宽  $f_n = 5$  Hz, 阻尼系数  $\xi = 0.7$  作为环路参数, 实际测试短期稳定度为  $1.35 \times 10^{-13}/1$  s、 $3.22 \times 10^{-14}/10$  s。达到了目前 SHAO-4 型氢钟的性能水平。随着晶振和电路技术的不断进步, 未来可基于新的晶振模型参数和电路参数重新计算适宜的环路参数, 从而为主动型氢原子钟接收机锁相环路的设计提供理论依据和指导。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 谢彦, 蔡勇, 张为群. 锁相环路对氢原子钟性能影响的实验分析[J]. 计量学报, 2012, 33(3): 272-277.
- [3] 王义遒. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [4] 李孝辉, 杨旭海, 刘娅. 时间频率信号的精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] 但森. 相干通信技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.
- [6] 加德纳 F M. 锁相环技术[M]. 姚剑清, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [7] VANIER J, AUDOIN C. The quantum physics of atomic frequency standards[M]. Brigtol and Philadelphia: Adam Hilger, 1989.
- [8] 何建卫. 氢激光器锁相环的计算机辅助分析和设计[J]. 宇航计测技术, 1989(3): 41-46.
- [9] 全国时间频率计量技术委员会. JJF 1956-2021, 氢原子频率标准校准规范[S]. 2021.