

Q 增强型氢钟锁相接收机的研制

万 斌^{1,2} 林传富¹

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

提 要

该文简单介绍了 Q 增强型氢钟正反馈电路的工作原理, 为了削弱探测信号对锁相接收电路中的 10MHz 晶振输出频率的干扰, 引入了分时方法和保持电路。给出了锁相接收机各部件的实现方案, 并由此得到了令人满意的频率稳定度。最后, 提出了关于 10MHz 晶振的电路改进方案和保持电路初步采用 LF198 芯片的方案。

关键词: 原子频标 — 锁相接收机 — 保持电路

分类号: TH714.1⁺4, TN911.8

1 引 言

根据工作机理的不同, 将小型化的氢钟分为被动型和主动型(蓝宝石型和 Q 增强型)两种。Q 增强型氢钟使激光器工作在正反馈振荡状态来维持激光器振荡, 这样可以大大降低对氢原子频标微波腔初始 Q 值的要求(只要求其 Q 值为 5000 左右), 从而可以设计出体积小(0.4 升)、重量轻的微波腔, 极大地减轻物理系统的体积和重量; 而且其稳定度指标在中、短期稳定度方面有比较突出的表现。Q 增强型氢钟作为空间原子钟以及对重量要求很高的地面原子钟都是一个很好的选择。但是采用正反馈技术的 Q 增强型氢钟还存在很大的问题, 就是其微波腔的品质因数 Q 值和环路相位不够稳定, 严重影响了 Q 增强型氢钟的长期稳定度指标和可靠性, 对于这个问题, 基于现代控制理论与先进的电子技术, 设计了一种腔 Q 值及反馈环路相位稳定的 Q 增强型氢钟的正反馈电路^[1]。本文中的锁相接收机就是在完成正反馈电路(Q 值在 60000 左右)的基础上, 采用了小型的、高性能的、工作稳定的 1.4GHz 锁相倍频器, 并利用分时方式及保持电路, 使 10MHz 晶振输出受探测信号的干扰最小, 最终实现一个完整的、实用的、高性能的接收单元, 使得 Q 增强型氢钟能够长期稳定地工作并进一步向实用化方向发展, 成为高性能、体积小、重量轻的工程化原子频标。

2 正反馈电路原理与分时方法及保持电路简介

正反馈电路与锁相接收电路的连接图如图 1 所示。锁相接收电路中的 DDS(直接数字式

频率合成器)产生 4 个用于稳定腔 Q 值和相位的探测信号。这里采用分时探测的方式,即经过数字系统设计得到周期为 100ms 的控制信号,在 20ms 内使开关 K 接通。

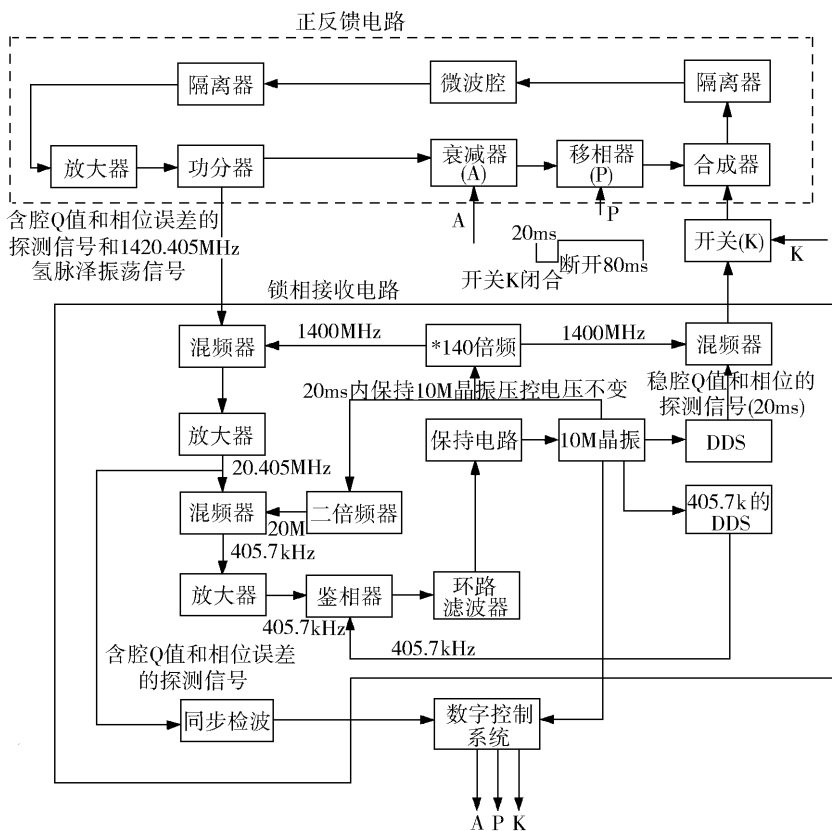


图 1 正反馈电路及锁相接收电路图

Fig. 1 Positive feedback circuit and Phase - locked receiver circuit diagram

4 个用于稳定腔 Q 值和相位的探测信号与 1400MHz 本振信号经过混频器上变频后通过合成器,注入到微波腔里对其探测(方波调制)得到微波腔幅度响应。(1)式为微波腔幅度的表达式:

$$b_i(t) = \frac{b_0}{[1 + T_c^2(\omega(t) - \omega_c)^2]^{1/2}} \quad (1)$$

式中 $i = 1 \sim 4$; Q 即为腔 Q 值, ω 是扫描频率, $T_c = \frac{2Q}{\omega_c}$, $\omega = 2\pi f$ 。根据(1)式可得到对应的方波调制时微波腔幅度响应曲线,如图 2 所示。

根据实验, Q 增强型氢钟中反馈环路相位的变化将极大地影响 Q 值,所以在稳定 Q 值之前首先要稳定环路相位。稳定环路相位是通过稳定腔频来实现的,探测信号 f_1, f_2 ($f_1 = f_0 - 12\text{kHz}$, $f_2 = f_0 + 12\text{kHz}$, f_0 为氢脉泽振荡信号)是用来稳定腔频的。

先进入微波腔的探测信号 f_1, f_2 的探测点处于曲线的 -3dB 点,得到检测信号幅度值为 b_1, b_2 ,经过放大、混频、检波、解调后的误差信号为两者之差,如图2中的腔频误差。误差信

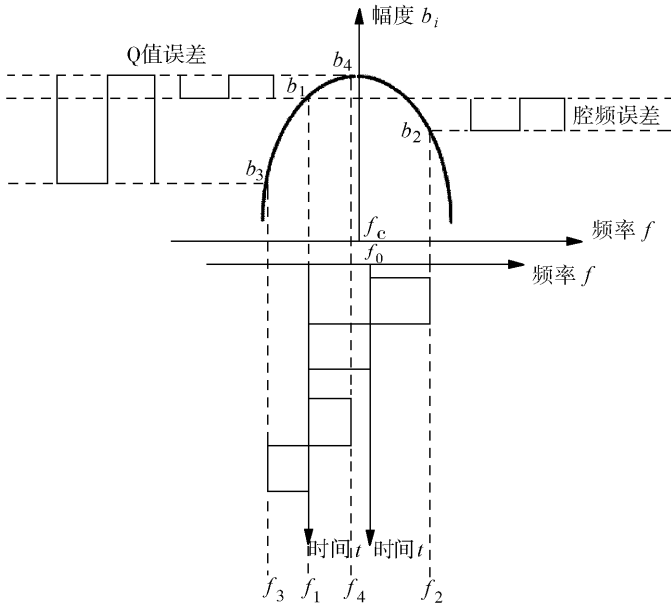


图 2 方波调制时微波腔幅度响应曲线

Fig. 2 Microwave cavity frequency curve

号通过检波电路进入数字控制系统,经过误差控制算法即 PID 控制算法得到对应的控制电压,再经过 DAC 转换输出控制可调移相器使得误差信号为 0 (即 $b_1 = b_2$),此时微波腔频率与原子跃迁频率一致,相位偏差为 0,完成了稳定腔频即稳定相位的目的。

然后探测信号 f_3, f_4 ($f_3 = f_1 - 12\text{kHz}, f_4 = f_1 + 12\text{kHz}$) 进入微波腔,得到检测信号幅度为 b_3, b_4 ,经过放大、混频、检波、解调后的误差信号为 $b_4 - b_3$ 和 $b_4 - b_1$,如图 2 中的 Q 值误差所示。由(1)式计算可以看出 Q 值与 $(b_4 - b_3)/(b_4 - b_1)$ 值为——对应的单调关系,所以通过数字控制系统调节衰减器的控制电压来控制 $(b_4 - b_3)/(b_4 - b_1)$ 值,实现了稳定腔 Q 值的目的。

在 80ms 内,开关 K 断开,无探测信号注入到微波腔,正反馈电路只输出氢脉泽振荡信号到锁相接收电路,以锁定 10MHz 晶振。采用保持电路可以让 10MHz 晶振的压控电压在 20ms 内(这时探测信号注入微波腔,以稳定腔 Q 值和环路相位)一直保持在上 80ms 末的电压值,从而保证了 10MHz 晶振一直被锁定在氢脉泽信号上,从而减小了探测信号的干扰。

3 锁相接收电路分析与实验研究

锁相接收机实物图如图 3 所示。锁相接收机电路板长 200mm 左右,宽 100mm 左右,和以往主动型氢钟的接收机相比,它有着体积小、电路集成化的优点。

锁相接收机由低噪声放大器,1420.405MHz 带通滤波器,第一级混频器,第一中频放大电路,20.405MHz 晶体滤波器,第二级混频器,第二中频放大电路,1.4GHz 倍频器,鉴相器,环路滤波器,10MHz 晶振等部件组成。其电路框图如图 4 所示。

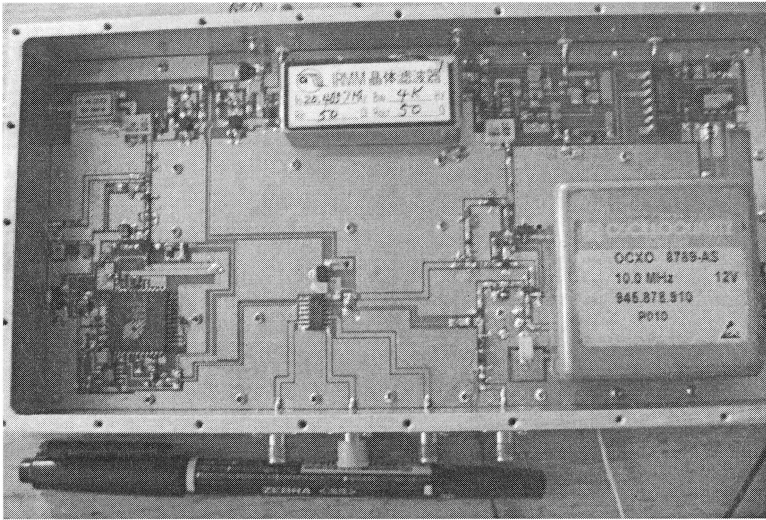


图3 锁相接收机

Fig. 3 Phase-locked receiver

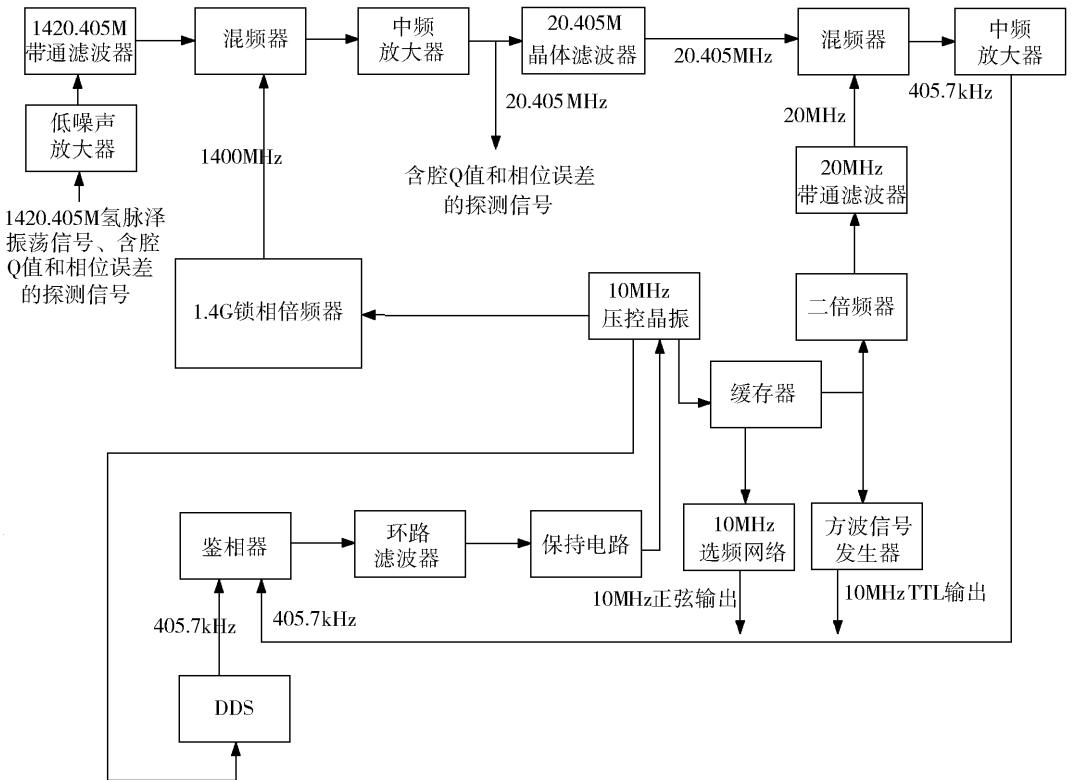


图4 锁相接收机方框图

Fig. 4 Phase-locked receiver block diagram

3.1 锁相接收机各部件介绍

图4中1420.405MHz带通滤波器的作用是用来滤除由LNA(低噪声放大器)产生的在1379.695MHz处的噪声,以提高混频器产生的20.405MHz中频信号的信噪比。混频器采用的是mini公司生产的ADE-30,它的本振功率为7dBm;而第一中频放大电路采用的是C3358双极性三极管构成的放大电路,它的作用是放大接收过来微弱的高频脉泽信号;20.405MHz晶体带通滤波器的带宽是4kHz,它的作用也是滤除噪声以提高后来中频信号的信噪比,也决定了锁相接收机的带宽是4kHz;10MHz晶振采用的是OSCILLOQUARTZ公司的8789;二倍频器是利用Hittite公司的HMC476放大器饱和和非线性来实现的,再用20MHz带通滤波器将要求的20MHz信号选出。

鉴相器采用的是MC4344,其本质上是鉴相鉴频器PFD。与传统的模拟鉴相器相比,它能使锁相环路快速入锁,但本底噪声比较高。环路滤波器采用的是AD820构成的有源比例运算放大电路。第二级混频出来的405.7kHz信号经过第二中频放大电路与DDS输出的405.7kHz信号通过鉴相器MC4344,再通过AD820构成的环路滤波器,去锁定10MHz晶振的输出频率。保持电路是用于稳定腔Q值和环路相位的,它可使10MHz晶振的压控电压保持不变。因为本

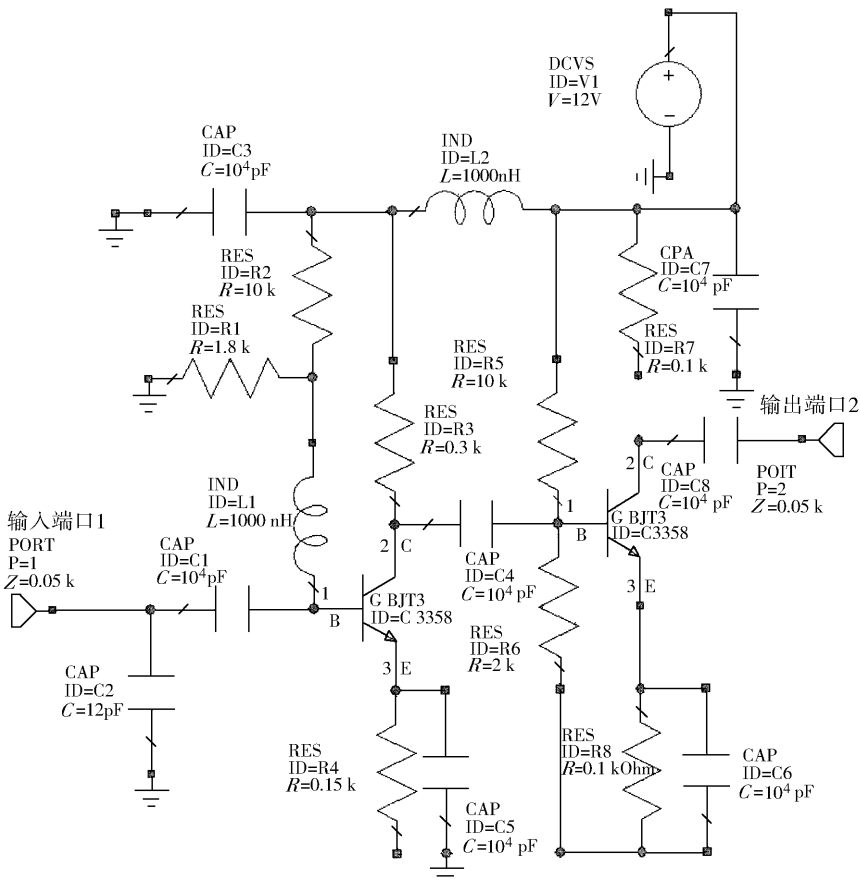


图5 中频放大电路

Fig. 5 Intermediate frequency (IF) amplifier circuit

锁相接收电路中多处利用了 10MHz 晶振,所以 10MHz 晶振的输出频率先输入到缓存器 MAX2470,它是高反向传输隔离缓冲放大器,使得 10MHz 的输出频率能分别提供给二倍频器和正弦信号输出端而互不干扰。

1.4GHz 锁相倍频器主要由 Peregrine 公司的 PE3236、Analog 公司的 AD820(作为环路滤波器)、Z-Communications 公司的 CLV1410E(作为压控振荡器,工作频率在 1390MHz 到 1410MHz)组成,最后锁定输出 1.4GHz 频率到锁相接收电路中的第一级混频器的本振端。

3.2 中频放大电路的仿真

第一中频放大电路的作用是放大微弱的 20.405MHz 信号,其电路图如上页中的图 5 所示。它采用了微波放大电路里常见的低噪声双极三极管 C3358。在实验中用频谱仪测量了端口 1 和端口 2 的功率,以 dB 为单位进行计算,由端口 2 的功率减去端口 1 的功率,得出此放大电路的增益为 50dB 左右。而经过射频仿真软件 microwave office 仿真计算得到此中频放大电路的增益(S 参数的 S_{21})为 56.17dB,如图 6 所示。由此可见,用 microwave office 仿真中频放大电路得到的增益与实验结果相比还是比较吻合的。

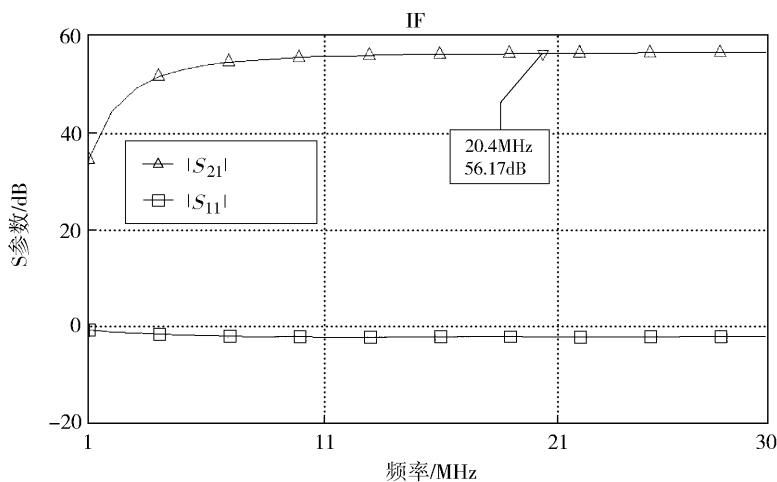


图 6 中频放大电路增益
Fig. 6 The gain of IF amplifier

3.3 频率稳定度测试

频率稳定度描述频率信号内部噪声调制产生的谱噪声大小随频率取样值的随机波动大小,是衡量频率标准优劣的主要指标^[2]。

上海天文台研制的主动型氢钟(已商品化生产)提供 1420.405MHz 氢脉泽信号给此锁相接收机,将此与参考氢钟(VCH1003 型氢钟)比对,如图 7 所示。最后得到此锁相接收机的稳定度,在 VCH-314 软件中可以看到比对结果。

表 1 为锁定在氢脉泽谱线上的锁相接收机的频率稳定度数据。取样时间为 1s 和 10s 的时候,此锁相接收机的频率短期稳定度可以反映其自身的本底噪声,它与上海天文台主动型氢钟接收机的短期稳定度指标十分接近。此锁相接收机有体积小和电路集成化的优点,测试表明其运用是相当成功的。

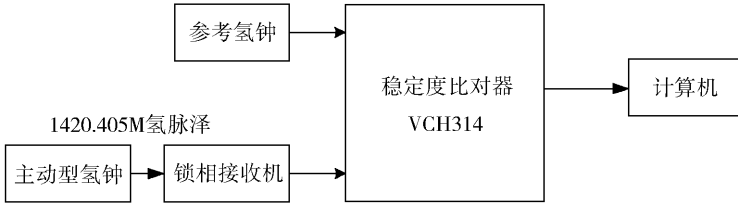


图 7 频率比对器测试图

Fig. 7 Frequency comparator diagram

表 1 取样时间与稳定度的关系

Table 1 Relationship between frequency stability and sampling interval

取样时间/s	稳定度
1	3.69×10^{-13}
10	7.28×10^{-14}

4 电路改进和探索

4.1 10MHz 晶振电路改进方案

在测试此锁相接收电路稳定度的时候,由于没有把 10MHz 晶振及其周边电路分开,通电时间过长后,10MHz 晶振发热量很大,影响到周边电路的可靠性,所以在将来改进电路的时候,应该把 10MHz 晶振及其有关电路和周边电路分开,各自单独设计成一块电路板。

4.2 保持电路探索方案

对于保持电路的设计,这里初步打算采用美国国家半导体公司生产的 LF198 芯片作为保持器。它的 6 脚常接 $1\mu\text{F}$ 的保持电容,其应用电路图见图 8^[3],其工作原理为:当 8 脚逻辑电平为高的时候,开关接通,电路导通并且通过 300Ω 电阻对 6 脚外接的电容充电;当 8 脚逻辑电平为低的时候,开关断开,输入端电阻很大,电容放电过程十分缓慢,使得最终的 5 脚输出保持在上次闭合时的输出电压,这样就实现了电压保持不变的目的。

由于采用了保持电路,可能会引起以下问题:(1)在 20ms 内,10MHz 晶振处于自由运转状态;(2)保持电路在 20ms 和 80ms 的转换的瞬间可能会引起 10MHz 晶振压控电压的跳变,可能会影响 10MHz 晶振输出的稳定度;(3)如果采用 LF198 做保持器, 300Ω 电阻和保持电容构成了充电电路,充电的时间常数由 300Ω 电阻和保持电容决定,这对锁相环路的锁定时间可能会有影响。这些问题还有待实验的检验。

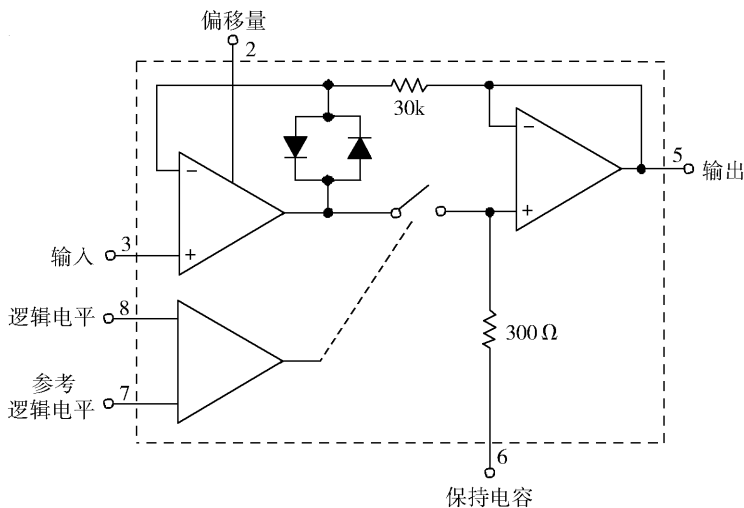


图 8 LF198 应用电路图

Fig. 8 LF198 Functional diagram

致谢 感谢东南大学孙敏松教授的悉心指导。

参 考 文 献

- [1] 刘嘉阳, 林传富. 中国科学院上海天文台年刊, 2008, 29: 154
- [2] 翟造成, 张为群, 蔡勇等. 原子钟基本原理与时频测量技术, 2009, 08: 112
- [3] National Semiconductors Corporation. <http://www.national.com/ds/LF/LF198.pdf>

A PHASE-LOCKED RECEIVER RESEARCH FOR Q -ENHANCED HYDROGEN MASER

WAN Bin^{1,2} LIN Chuan-fu¹

- (1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;
- 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

The positive feedback circuit used in Q -enhanced hydrogen maser is briefly introduced. To prevent interference to the 10MHz output from the detected signal, time-sharing format and holding circuit are considered and involved in the phase-locked receiver. The design scheme of each part in the phase-locked receiver circuit is given. After testing, a frequency stability data of the phase-locked receiver is shown. Finally, an improvement scheme for the circuit of 10MHz crystal oscillator is given, and LF198 is to be adopted in the holding circuit.

Key words atomic frequency standard — phase-locked receiver — holding circuit