

# 浙江大学

## 本科实验报告

课程名称：通信原理实验

姓 名：黄嘉欣

学 院：信息与工程学院

系：信息与工程学系

专 业：信息工程

学 号：3190102060

指导教师：龚淑君 金向东

2022 年 3 月 23 日

# 浙江大学实验报告

专业： 信息工程  
姓名： 黄嘉欣  
学号： 3190102060  
日期： 2022 年 3 月 23 日  
地点： 东四-319

课程名称： 通信原理实验      指导老师： 龚淑君 金向东      成绩： \_\_\_\_\_  
实验名称： PLL 与 FM 解调      实验类型： 设计性实验      同组学生： 张维豆

## 一、实验目的

- ① 掌握锁相环基本工作原理；
- ② 掌握由锁相环实现 FM\_FSK 解调工作原理；
- ③ 对锁相环主要性能指标进行测量；
- ④ 对 FM\_FSK 解调相关参数进行测量分析。

## 二、实验原理

锁相环是一种相位负反馈系统，当系统锁定时，锁相环电路中鉴相器的两个输入信号，一个来自外部输入，另一个来自压控振荡器，它们的频率相等，相位存在一定的稳态误差。因此锁相环电路具有良好的窄带载波跟踪性能和宽带调制跟踪性能，广泛应用于锁相解调、载波提取与位同步恢复以及频率合成技术中。

- ① 模拟锁相环的主要性能指标：
  - (1) 鉴相器的鉴频鉴相特性
  - (2) 压控振荡器的压控特性
  - (3) 环路滤波器的滤波特性
  - (4) 环路的跟踪和捕捉特性
- ② 基本的模拟锁相环电路原理：

基本的锁相环电路主要由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器三部分组成，如图 2.1 所示。

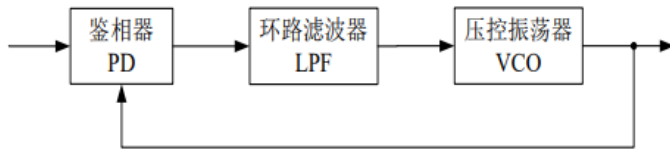


图 2.1 振荡器原理框图

鉴相器对它的两个输入信号相位作相减操作, 并将相位差值转换成电压输出。此电压正比与两输入信号的相位差, 关系如下式所示:

$$v_d(t) = A_d \varphi_e(t)$$

$A_d$  是鉴相灵敏度, 线性关系只有在  $\varphi_e(t)$  的一定范围内满足, 此范围称为线性鉴相范围。

环路滤波器滤除鉴相器输出电压中的高频成分和噪声, 输出平均分量, 作为压控振荡器的控制电压。因此, 环路滤波器为低通滤波器, 在锁相环路中主要关注的性能指标包括滤波带宽和增益。

压控振荡器是一个频率受控器件, 频率与控制电压之间的关系如下式所示:

$$\omega_c(t) = \omega_o + A_o v_c(t)$$

其中,  $\omega_o$  是当控制电压为零时, 压控振荡器的自由振荡频率,  $A_o$  是压控灵敏度。

如图 2.1 所示, 当构成闭环系统后, 随着环路的反馈控制, 鉴相器两输入信号之间的频率差越来越小, 当频率差为零时, 环路锁定, 进入稳定状态。此时系统具有一个稳态相位误差, 产生的控制电压控制压控振荡器的频率, 使它与输入信号的频率相等。这个相位误差与环路增益有关, 增益越大, 相位差越小。

锁相环还具有两个特性: 跟踪和捕捉。处于锁定状态的电路, 当输入信号的频率或相位发生变化, 鉴相器输出也随之发生变化, 环路滤波器的输出控制压控振荡器, 使它的频率能跟随输入信号的频率变化, 则环路仍处于锁相状态, 这一过程称为跟踪。环路通过跟踪过程能够保持环路锁定的最大输入频差, 称为同步带。

捕捉是指环路在失锁的状态下, 通过自身电路的调节进入锁定状态的过程。捕捉包括频率牵引和快捕两个过程。当鉴相器两输入信号的频率差太大时, 鉴相器输出的相位差信号频率很高, 几乎都被低通环路滤波器滤除, 也就没有信号去控制压控振荡器, 不可能捕捉。而当输入频差没有那么大, 处于能捕捉的频率范围, 则环路滤波器就有一定的输出电压, 控制振荡器频率发生变化, 使频率差进一步减小。此过程就是频率牵引的过程。当频率差小到一定程度, 使得压控振荡器的控制电压在正弦变化的一个周期内就能将频率捕捉, 使环路锁定, 这就称为快捕。因此, 环路通过频率牵引和快捕, 最终能锁定的最大输入信号频率差就是捕捉带。

### ③ FM\_FSK 解调:

锁相环电路的一个重要应用就是鉴频, 可以用来进行 FM\_FSK 解调。若锁相环的输入信号是 FM 或 FSK 调频信号, 频率受控于调制信号。当锁相环路锁定时, 压控振荡器的输出信号频率将跟随输入信号频率, 因此可以从环路滤波器的输出信号中得到调制解调信号。

### 三、实验电路分析

实验电路采用 NE654 集成锁相环芯片, 其最高工作频率可达  $50\text{MHz}$ , 芯片内部功能框图如图 3.1 所示, 主要由限幅器、相位比较器 (鉴相器)、压控振荡器、放大器、直流恢复电路和施密特触发器组成。环路滤波器由芯片内置电阻和外接在 4 脚、5 脚的电容构成。相位比较器采用双平衡乘法器结构, 前置的限幅放大器, 改善对寄生调幅的抑制作用。在 2 脚外接滑动变阻器, 改变 2 脚的偏置电流, 可以调节相位比较器的增益, 从而改变整个锁相环路的增益。压控振荡器由射极耦合谐振器构成, 它的自由振荡频率为  $f_o = \frac{1}{22R_C(C_1+C_S)}$ 。其中,  $R_C$  的值为  $100\Omega$ ,  $C_1$  是外接在 12、13 脚之间的电容,  $C_S$  是寄生电容。通过调整电容  $C_1$  数值, 可以改变振荡器的自由振荡频率。

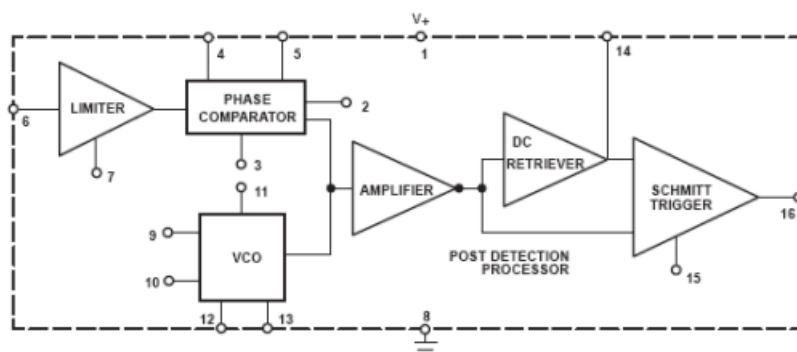


图 3.1 NE564 内部功能框图

实验电路如图 3.2 所示, 其主要由输入端的可调衰减器, 锁相环电路 (U1), 二分频电路 (U2) 和音频功放 (U3) 组成。进行 FM\_FSK 解调时, 调制信号从 6 脚输入, 经过限幅器, 消除寄生调幅, 送到相位比较器的一个输入端。压控振荡器产生的信号由 3 脚反馈回相位比较器。通过调节 12、13 脚的可变电容器, 使环路锁定。若是 FM 解调, 则相位比较器输出的信号经过恒流源差分放大器放大, 再经过直流恢复电路, 在 14 脚得到 FM 解调输出, 再由 LM4880 音频放大器放大, 得到 FM 解调音频信号。若是 FSK 解调, 信号经过放大器放大后, 一路送到施密特触发器的输入端, 另外一路送到直流恢复电路, 由 14 脚外接的电容构成的低通滤波器滤波, 产生一直流电压, 送到施密特触发器的另外一个输入端作为基准电压, 进行比较判断, 将 FSK 解调信号的高低电平解调出来。因此, 实验电路中,  $TP_{13}$ 、 $TP_{15}$  分别是音频放大前后的 FM 解调输出信号。 $TP_{14}$  是 FSK 解调输出信号。

另外, 由开关控制选择, 锁相环里的压控振荡器输出可以经过 D 触发器二分频电路后再输入鉴相器, 这样就构成了一个倍频电路, 倍频信号由压控振荡器输出端  $TP_{12}$  得到。

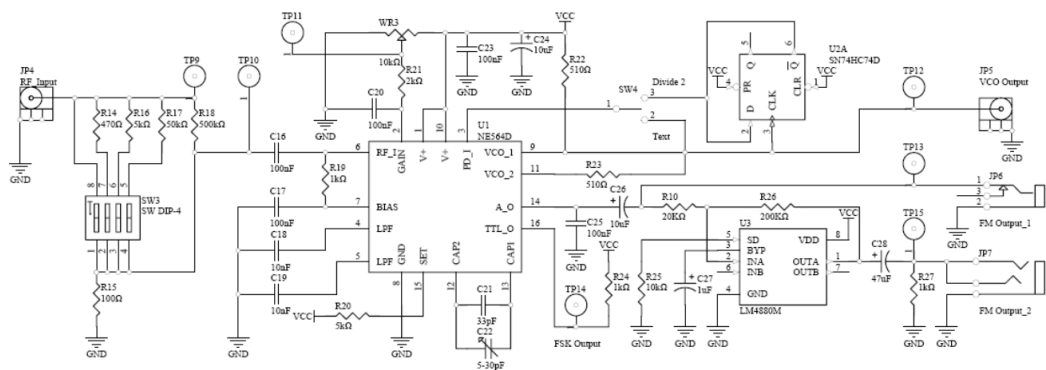


图 3.2 锁相环 FM\_FSK 解调电路

四、实验设备

- ① 实验板 No02 1 块;
- ② 信号源 2 台;
- ③ 双踪示波器 1 台;
- ④ 频谱分析仪 (含 TG) 1 台;
- ⑤ 万用表 1 台。

五、实验内容与步骤

① 测试电路搭建:

测试电路按照图 5.1 所示方式连接。电路板由+5V电源供电,  $JP_4$ 端是信号输入端, 由开关 $SW_3$ 控制, 可以对信号做不同程度的衰减。 $TP_9$ 或 $TP_{10}$ 端可以接到示波器上对输入信号波形进行观测。 $JP_5/TP_{12}$ 为压控振荡器输出信号端口, 可以将 $TP_{12}$ 端口的信号接到示波器上进行观测。 $TP_{14}$ 是 FSK 解调输出信号端,  $TP_{15}$ 是经过音频放大器放大后的 FM 解调输出信号端。

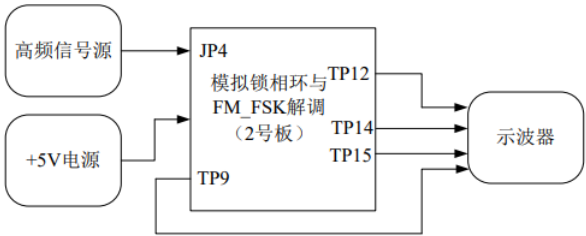


图 5.1 模拟锁相环与 FM\_FSK 解调测试连接框图

② 压控振荡器自由振荡频率的测量与调整:

断开高频信号源与电路板的连接, 在锁相环输入端不加信号的情况下, 用示波器测试  $TP_{12}$ 端压控振荡器输出信号的频率, 即自由振荡频率。调节可变电容 $C_{22}$ 可以改变振荡器的

频率, 将频率调为 $10.7\text{MHz}$ 附近。

### ③ 锁相环同步带、捕捉带的测量:

高频信号源与电路板连接, 从 $JP_4$ 端输入频率为 $10.7\text{MHz}$ , 幅度为 $500\text{mV}$ 的正弦波信号。将 $TP_9$ 、 $TP_{12}$ 端口信号接入双踪示波器。以输入信号作为显示波形的触发源, 若两个通道的信号都能同步稳定的显示, 则表明锁相环路锁定。若没能锁定, 则微调输入信号频率。

在环路锁定的情况下, 持续提高输入信号的频率, 直到环路刚刚失锁, 记此时的输入信号频率为 $f_{H1}$ ; 再慢慢降低输入信号频率, 直到环路刚刚重新锁定, 记此时的输入信号频率为 $f_{H2}$ ; 继续降低输入信号频率, 直到环路刚刚再次失锁, 记此时的输入信号频率为 $f_{L1}$ ; 再次慢慢提高输入信号频率, 直到环路又一次刚刚锁定, 记此时的输入信号频率为 $f_{L2}$ 。

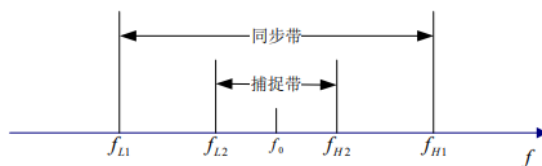


图 5.2 同步带与捕捉带

如图 5.2 所示, 由以上测量结果可通过以下公式计算锁相环的同步带和捕捉带:

$$\text{同步带} = f_{H1} - f_{L1}$$

$$\text{捕捉带} = f_{H2} - f_{L2}$$

### ④ FM\_FSK 解调:

#### (1) FM 解调

用高频信号源输入一载波频率 $10.7\text{MHz}$ , 信号幅度 $0\text{dBm}$ , 调制信号为 $1\text{kHz}$ 的正弦信号, 调制频偏为 $75\text{kHz}$ 的 FM 信号, 用示波器观察解调输出信号 ( $TP_{13}$ )。改变输入信号的频偏值在 $10\text{kHz} - 80\text{kHz}$ 之间以 $10\text{kHz}$ 步进变化, 用示波器观察解调输出信号的幅度变化。列表记录, 并画出鉴频曲线。

#### (2) FSK 解调

用高频信号源输入一载波频率 $10.7\text{MHz}$ , 信号幅度 $0\text{dBm}$ , 调制信号为频率 $1\text{kHz}$ 的方波信号, 调制频偏为 $75\text{kHz}$ 的 FSK 信号, 示波器观测解调输出信号 ( $TP_{14}$ )。逐渐减小输入信号的幅度, 观察解调输出信号, 直到出现没有解调信号输出的情况, 此时的输入信号幅度记为解调灵敏度, 请作记录。

#### (3) FM 调制、解调联合试验

FM 调制、解调联合试验时, 将音频信号 (可以来 MP3 之类的音乐播放器) 通过音频连接线连接至实验板的 $JP_2$ , 利用实验板的 VCO 作为调制器; 将调制器的输出与解调输入相连

(将 $JP_3$ 与 $JP_4$ 连接); 将耳机或喇叭接入 $JP_7$ , 你应该能欣赏到美妙的音乐了, 调整输入信号的音量或更换曲目, 体会声音的变化情况。

## 六、实验结果记录与分析

### ① 压控振荡器自由振荡频率的测量与调整:

使用示波器测得振荡器的自由振荡频率约为 $10.360MHz$ 。调节可变电容 $C_{22}$ , 使得振荡器的自由振荡频率为 $f_0 = 10.702MHz$ , 如图 6.1 所示:

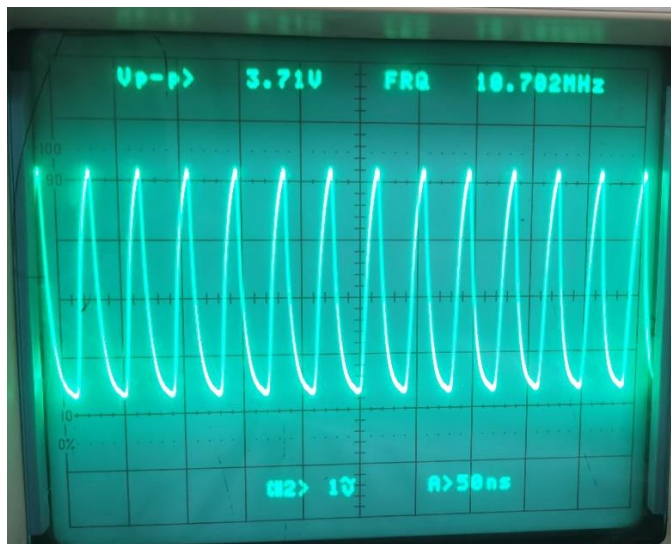


图 6.1 自由振荡频率调整

### ② 锁相环同步带、捕捉带的测量:

在环路锁定的情况下, 测得 $f_{H1} = 12.810MHz$ ,  $f_{L1} = 7.940MHz$ ; 在环路失锁的条件下, 测得 $f_{H2} = 10.940MHz$ ,  $f_{L2} = 10.230MHz$ 。故锁相环的同步带为:  $f_{H1} - f_{L1} = 4.870MHz$ , 捕捉带为:  $f_{H2} - f_{L2} = 0.710MHz$ 。环路锁定时示波器的显示如图 6.2 所示:

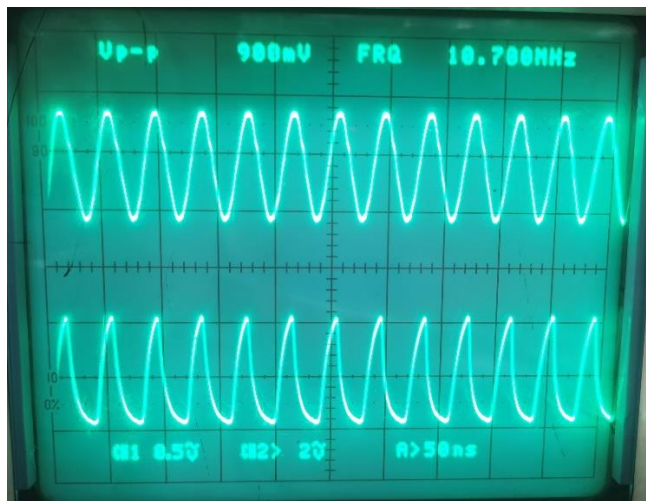


图 6.2 锁相环锁定时输出信号

## ③ FM\_FSK 解调:

## (1) FM 解调:

当调制信号为正弦信号时, 示波器显示的解调输出信号波形为正弦波。以 $10\text{kHz}$ 为步进, 使输入信号的频偏值从 $10\text{kHz}$ 变化到 $80\text{kHz}$ , 得到输出信号的幅度变化如表 6.1 所示:

表 6.1 输出信号幅度变化测试表

频偏值/ $\text{kHz}$	10	20	30	40	50	60	70	80
输出信号峰峰值/ $\text{mV}$	93.9	97.9	101	105	108	112	115	119
输出信号幅值/ $\text{mV}$	46.95	48.95	50.5	52.5	54	56	57.5	59.5

除此之外, 当频偏值为 $75\text{kHz}$ 时, 输出信号的峰峰值为 $117\text{mV}$ , 其幅值为 $58.5\text{mV}$ 。可以发现, 随着频偏值不断增大, 输出信号的幅度也基本在线性增加。根据实验数据, 可以画出鉴频曲线为:

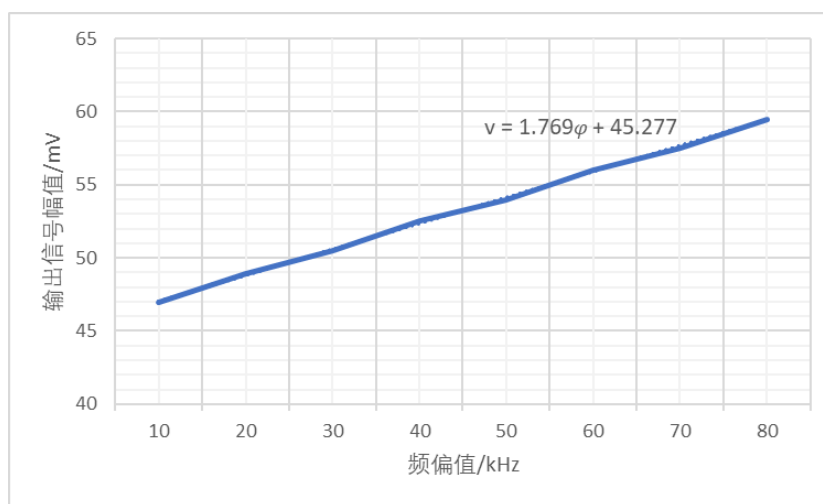


图 6.3 鉴频曲线

根据拟合结果, 输出信号幅值与输入信号频偏值之间满足有线性关系:  $v = 1.769\varphi + 45.277$ , 这表明实验中鉴相器两输入信号的相位差始终保持在线性鉴相范围之内。

## (2) FSK 解调:

当调制信号为方波信号时, 示波器显示的解调输出信号波形为方波, 如图 6.4 所示:



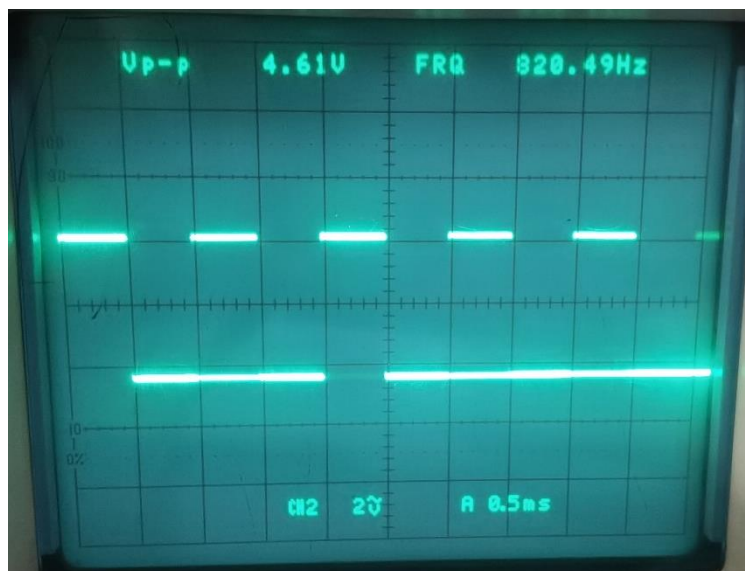


图 6.4 FSK 解调方波信号

逐渐减小输入信号的幅度, 当其缩小为 $-19.8\text{dBm}$ 时, 示波器上没有解调信号输出。故解调灵敏度为 $-19.8\text{dBm}$ 。

## 七、思考题

### ① 阐述模拟锁相环工作的基本原理

答: 模拟锁相环工作时, 鉴相器会检测输入信号和输出信号的相位差, 并将检测出的相位差信号转换成电压信号输出, 环路滤波器会滤除该电压中的高频成分和噪声, 输出平均分量, 形成压控振荡器的控制电压。压控振荡器是一个频率受控器件, 通过控制电压, 我们可以控制振荡器输出信号的频率, 再通过反馈通路把振荡器输出信号的频率、相位反馈到鉴相器。当构成闭环系统后, 随着环路的反馈控制, 鉴相器两输入信号之间的频率差越来越小, 当频率差为零时, 环路锁定, 进入稳定状态。此时系统具有一个稳态相位误差, 其与环路增益有关, 增益越大, 相位差越小; 产生的控制电压控制压控振荡器的频率, 使它与输入信号的频率相等。

### ② 环路同步带和捕捉带的概念是什么?

答: 同步带是环路通过跟踪过程能够保持环路锁定的最大输入频率差, 其是环路可以维持静态相位跟踪的频偏范围, 锁相环路在此范围里可以保持静态的条件稳定。它代表了锁相环的静态稳定极限。捕捉带是锁相环由失锁到锁定过程中, 环路通过频率牵引和快捕, 最终能够捕捉的最大输入信号频率差。

③ FM\_FSK 调制信号频偏对解调的影响是什么?

答: 调制频偏与调频波的频谱宽度有关。由实验结果可知, 当频偏值逐渐增大时, 解调输出信号的幅度也会逐渐变大。

④ 锁相环鉴频有何优缺点?

答: 锁相环鉴频的主要优点是信号噪声低、结构简单、频率稳定。由于鉴相频率低, 锁定频率变化小, 因此其具有良好的窄带跟踪滤波特性和抑制干扰能力, 可代替部分滤波器。锁相环鉴频的缺点主要为其存在直流零点漂移、器件饱和及易受电源和环境温度变化影响等问题; 与此同时, 由于鉴相频率低, 扩大输出频率范围必须增大鉴相频率, 使得频率间隔增大, 即频率步进大, 分辨率较低。