

《非线性电路实验》预习报告

实验名称: FM and Demodulation 指导教师: 冯鹏 fengpeng06@semi.ac.cn
 姓名: 丁毅 学号: 2023K8009908031 班级/专业: 2308/电子信息 分组序号: 2-06
 实验日期: 2025.12.04 实验地点: 西实验楼(8号楼) 308 是否调课/补课: 否 成绩:

1 实验目的

- (1) 掌握基于变容二极管的频率调制 (Frequency Modulation, FM) 原理与电路实现。
- (2) 理解静态调制特性与动态调制特性的概念，并掌握其测量方法。
- (3) 掌握电容耦合相位鉴频器 (Capacitively-Coupled Phase Discriminator) 的工作原理与调试方法。
- (4) 观测完整的调频-鉴频过程，分析各环节波形特征。

2 实验仪器

- (1) 高频实验箱 - 变容二极管调频电路实验板 (031132201809392)
- (2) 高频实验箱 - 电容耦合相位鉴频实验板 (031132201809392)
- (3) 示波器 RIGOL MSO2202A (080103201901376)
- (4) 信号发生器 GWINSTEK AFG-2225 (080102201901355)
- (5) 万用表 LINIT- UT61A (C181503983)

3 实验原理

3.1 变容二极管频率调制原理

变容二极管是一种特殊的 PN 结二极管，其结电容 C 随反向偏压 V_R 变化而变化，关系近似为：

$$C(V_R) = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{V_R}{V_\phi}\right)^\gamma} \quad (1)$$

其中 C_0 为零偏压结电容， V_ϕ 为接触电势 (contact potential)， γ 为电容指数 (capacitance exponent)。将变容二极管接入 LC 振荡器的谐振回路中，回路总电容 C_Σ 包含变容二极管电容 C 。振荡频率为：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}, \quad C_\Sigma = C + C_{fixed} \quad (2)$$

当在变容二极管上施加直流偏压 V_{DC} 和调制信号 $V_s(t) = A_s \cos(\omega_s t)$ 时，总反向电压为 $V_R(t) = V_{DC} + V_s(t)$ ，此时结电容变为：

$$C(t) = \frac{C_0}{[1 + (V_{DC} + A_s \cos \omega_s t)/V_\phi]^\gamma} \quad (3)$$

对于小信号调制 ($A_s \ll V_{DC} + V_\phi$)，可将 $C(t)$ 在 V_{DC} 处展开，得到近似线性关系：

$$C(t) \approx C_0 - k A_s \cos \omega_s t, \quad k = \frac{\gamma C_0}{V_\phi [1 + V_{DC}/V_\phi]^{\gamma+1}} \quad (4)$$

其中 k 为变容二极管的电容调制灵敏度。相应的振荡频率变化为：

$$f(t) \approx f_0 + f_m \cos \omega_s t = f_0 \left[1 + \frac{f_m}{f_0} \cos(\omega_s t) \right] = f_0 [1 + m_f \cos(\omega_s t)] \quad (5)$$

其中 f_0 为载波中心频率, f_m 为最大频偏 (maximum frequency deviation), 而 m_f 与幅度调制中的调制系数类似, 称为调频系数 (frequency modulation index)。上述操作实现了频率调制, 输出信号为典型的调频波 (Frequency-Modulated Signal):

$$\phi(t) = \int 2\pi f(t) dt = 2\pi f_0 \left[t + m_f \frac{\sin(\omega_s t)}{\omega_s} \right] = 2\pi f_0 t + 2\pi \beta \sin(\omega_s t) \quad (6)$$

$$\Rightarrow v_{FM}(t) = A_c \cos [2\pi f_0 t + \beta \sin(\omega_s t)] \quad (7)$$

其中 $\beta = \frac{f_m}{f_s \omega_s}$ 称为频偏比 (deviation ratio)。

显然, 由于变容二极管的非线性, 调频过程中会引入一定的失真, 失真的程度不仅与变容二极管的变容特性有关, 还取决于调制电压幅度大小。电压幅度愈大, 则失真愈大, 一般取调制电压幅度不超过偏置电压的 30% 以减小失真, 也即:

$$A_s < V_{DC} \times 30\% \quad (8)$$

3.2 实验电路简要分析 (变容二极管频率调制)

如 Figure 1 所示, 本次实验的变容二极管调频电路大概可分为三级, 第一级是由变容二极管以及周边电感电容组成的调频电路, 基带信号从 IN1 端输入, 二极管的直流偏置由滑动变阻器调节。通过滤波电容后进入第二级缓冲电路, 该电路还包括了由电容分压构成的交流反馈回路。信号经 C8 和 R7 输入至第三级 Common Emitter 放大电路后输出。

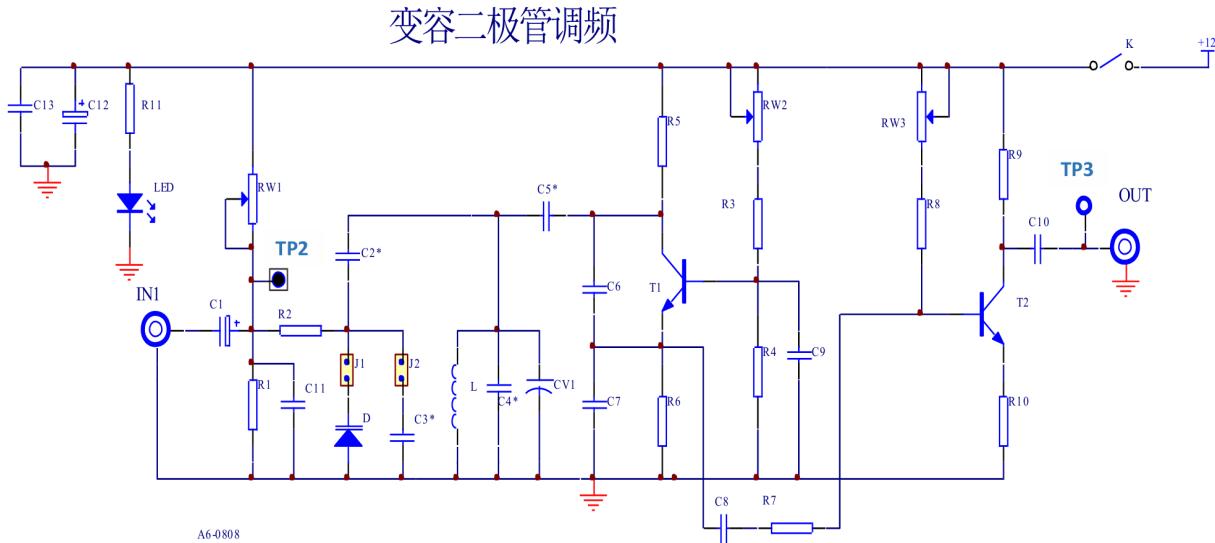


Figure 1: 变容二极管调频电路原理图

3.3 电容耦合相位鉴频器 (频率解调器) 原理

相位鉴频器是一种将频率变化转换为电压变化的解调电路。其核心是一个频相转换网络, 通常采用双调谐回路。对于电容耦合相位鉴频器, 初级回路电压 v_1 与次级回路电压 v_2 之间的相位差 ϕ 随频率变化的关系为:

$$\phi = \phi(f) \approx \frac{\pi}{2} - 2Q \frac{f - f_0}{f_0} \quad (9)$$

其中 Q 为回路品质因数, f_0 为回路谐振频率。该相位差被转换为幅度变化, 再通过包络检波恢复出调制信号。假设输入调频信号为 $v_{FM}(t)$, 经相位鉴频器解调后的输出电压 $v_{out}(t)$ 与瞬时频偏 $f_m(t)$ 成线性关系:

$$v_{out}(t) = K_d \cdot f_m(t) \quad (10)$$

其中 K_d 为鉴频灵敏度 (discrimination sensitivity), 单位为 V/Hz。

3.4 静态调制特性与动态调制特性

静态调制特性描述在无调制信号 ($A_s = 0$) 时, 变容二极管调频电路输出频率 f 随直流偏压 V_{DC} 变化的曲线, 即 $f-V_{DC}$ 关系。该曲线反映了变容二极管的压控特性, 其斜率即为调频灵敏度 K_f 。

动态调制特性描述在有调制信号时, 鉴频器输出解调电压 v_{out} 与调频器输入调制电压 A_s 之间的关系, 即 $v_{out}-A_s$ 关系。当调频与鉴频系统均工作在线性区时, 此关系应为直线, 其斜率反映了整个系统的传输系数。

3.5 实验电路简要分析 (电容耦合相位鉴频器)

如 Figure 2 所示, 本次实验的电容耦合相位鉴频器主要包括两级, 基带信号从 IN1 端输入, 经二极管限幅后输入第一级共射放大电路, 该电路在集电极负载上接有 LC 谐振回路, 从而可以实现利用频率响应将等幅的调频信号转化为调频调幅波。第二级电路利用二极管进行幅度检波, 进行包络检波以从调制信号中恢复基带信号。

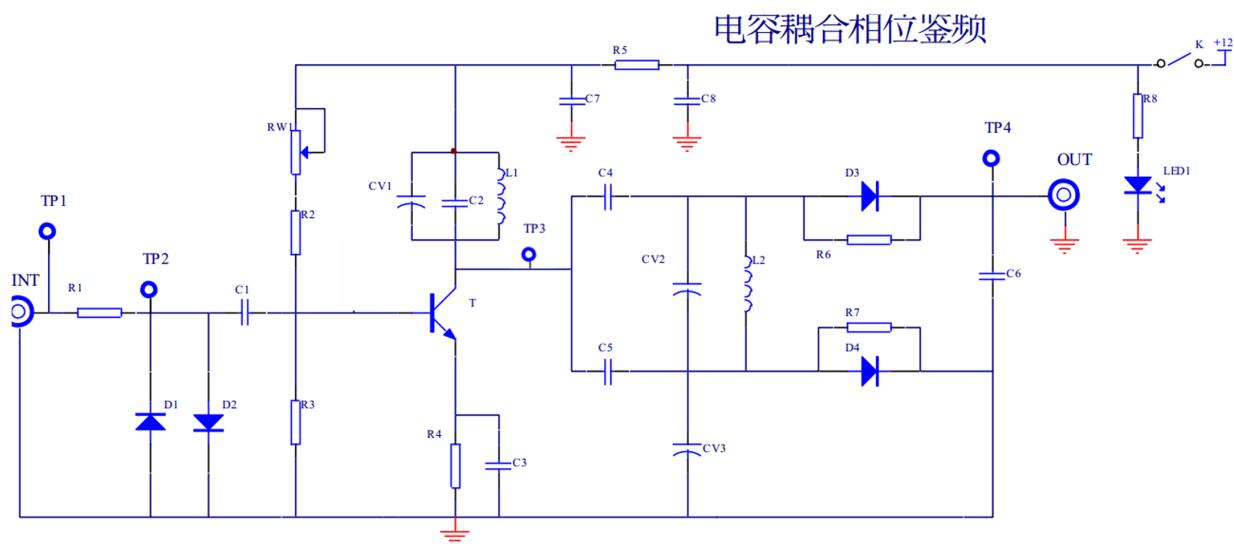


Figure 2: 电容耦合相位鉴频器原理图

4 实验内容与步骤

4.1 变容二极管调频静态调制特性测试

首先将变容二极管调频电路模块插入实验箱主板并接通电源。断开调制信号输入跳线 J2, 仅连接直流偏置跳线 J1。调节电位器 RW1, 使用万用表在测试点 TP2 测量变容二极管的反向偏压 V_D , 并调整至 +5V (实际反向偏压为 -5V)。然后连接 J2, 调节微调电容 CV1 以及电位器 RW2、RW3, 使用示波器在 OUT 端观测, 使输出信号为频率 10.7MHz 的最大不失真正弦波。

保持调制信号为零, 调节 RW1 以改变变容二极管的反向偏压 V_D , 测量对应的输出频率 f 。记录多组 V_D 与 f 数据, 绘制静态调制特性曲线 $f-V_D$ 。

4.2 变容二极管调频动态调制特性测试

完成静态特性测试后, 将电容耦合相位鉴频器模块插入实验箱主板。使用信号发生器产生频率为 1kHz、峰峰值为 2V 的正弦波作为调制信号 $V_s(t)$, 输入到调频电路模块的 IN1 端。在调频器 OUT 端用示波器观察产生的调频波 $v_{FM}(t)$ 。

将调频器输出 $v_{FM}(t)$ 连接到鉴频器的输入端, 在鉴频器 OUT 端用示波器观察解调后的信号 $v_{out}(t)$ 。改

变调制信号的幅度 A_s , 测量对应的解调输出电压幅度 V_{out} 。记录多组 A_s 与 V_{out} 数据, 绘制动态调制特性曲线 $V_{out}-A_s$ 。

在整个过程中, 需要观察并记录三组典型波形: 对应最小 A_s 、中间值 A_s 和最大 A_s (均在不失真范围内)时的调频器输入 $V_s(t)$ 、输出 $v_{FM}(t)$ 以及鉴频器输出 $v_{out}(t)$ 。

4.3 调频-鉴频全过程观测

固定调制信号幅度为某一中间值, 用双踪示波器同时观测: 通道 1 接调频器输入调制信号 $V_s(t)$, 通道 2 接鉴频器输出解调信号 $v_{out}(t)$ 。对比两个波形, 分析解调信号的保真度、相位延迟等特性。改变调制信号的频率, 观察解调效果的变化。

4.4 回路参数对解调的影响

分别微调鉴频器初级回路的谐振电容和次级回路的谐振电容, 观察输出解调信号波形的变化, 分析回路失谐对鉴频线性度和灵敏度的影响。

5 思考题

5.1 静态和动态调制特性曲线斜率受哪些因素影响?

静态调制特性曲线的斜率, 即调频灵敏度 $K_f = \partial f / \partial V_{DC}$, 主要受以下因素影响: 变容二极管的电容-电压特性 (由 C_0 、 V_ϕ 、 γ 决定); LC 谐振回路的电感值 L ; 变容二极管在回路中的接入系数 (决定了 C 变化对总电容 C_Σ 的影响程度)。回路 Q 值会影响频率稳定度, 从而间接影响测量得到的曲线平滑度。

动态调制特性曲线的斜率, 即系统传输系数, 受调频与鉴频两个环节的共同影响。除上述影响 K_f 的因素外, 还包括: 鉴频器的鉴频灵敏度 K_d (与双调谐回路的耦合系数、Q 值、检波二极管特性有关); 调制频率 f_s (当频率较高时, 回路相频特性的非线性可能引入失真); 以及系统中各级放大器的增益。当调制信号幅度过大导致调频器或鉴频器进入非线性区时, 动态特性曲线将出现弯曲, 斜率发生变化。