

《非线性电路实验》实验报告

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:

目录

1 实验目的	1
2 实验仪器	2
3 实验原理	2
3.1 变容二极管频率调制原理	2
3.2 实验电路简要分析 (变容二极管频率调制)	3
3.3 电容耦合相位鉴频器 (频率解调器) 原理	3
3.4 静态调制特性与动态解调特性	3
3.5 实验电路简要分析 (电容耦合相位鉴频器)	3
4 实验内容与步骤	4
4.1 变容二极管调频静态调制特性测试	4
4.2 变容二极管调频动态解调特性测试	4
4.3 调频-鉴频全过程观测	4
4.4 回路参数对解调的影响	5
5 实验结果与分析	5
5.1 静态调制特性曲线	5
5.2 调制/解调全过程波形观测	6
5.3 动态解调特性曲线	7
6 思考题	8
6.1 解调电路工作点设置不合理会带来哪些影响?	8
6.2 幅度变化现象观察	8
6.3 调频现象观察	10
6.4 静态和动态解调特性曲线斜率受哪些因素影响?	10
附录 A 原始数据记录表	11
附录 B 实验预习报告	11
附录 C MATLAB Codes	16

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解调特性的概念，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)：

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

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

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。

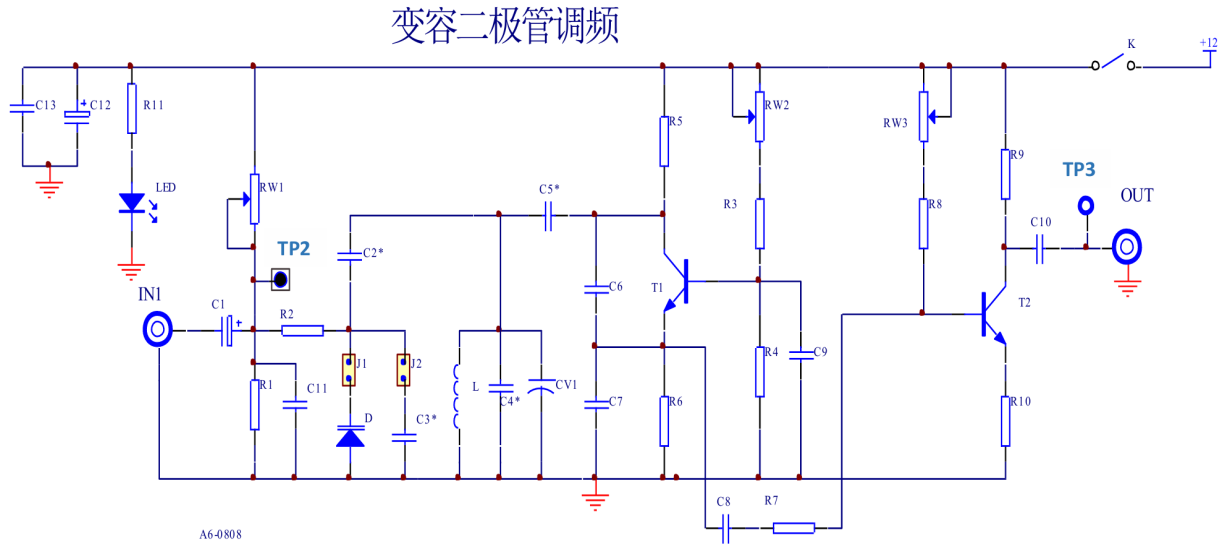


Figure 1: 变容二极管调频电路原理图

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解调特性

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 。

动态解调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。

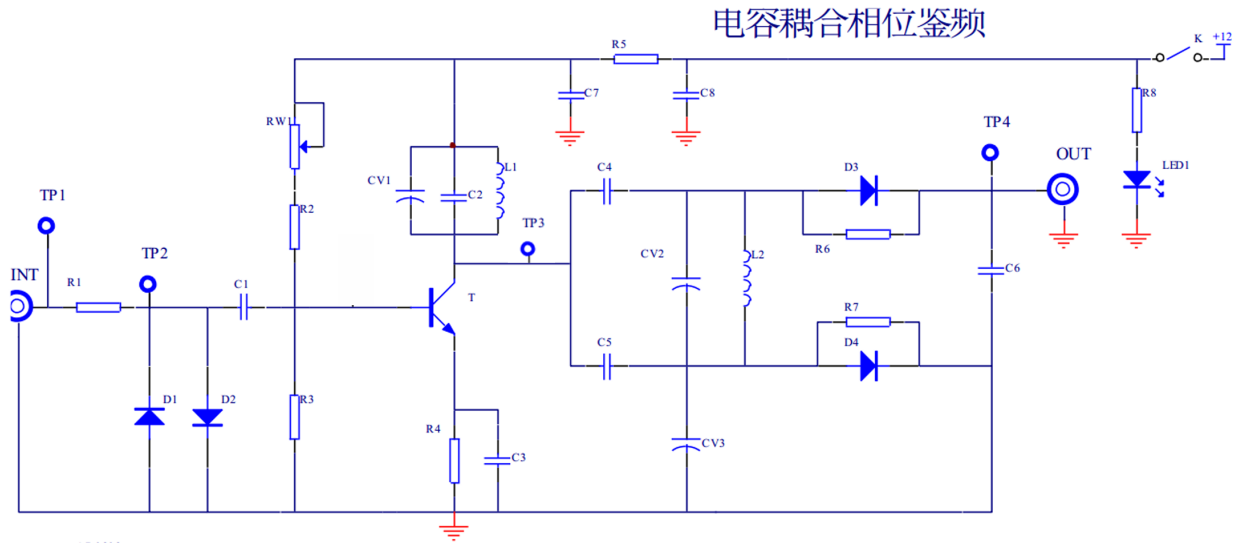


Figure 2: 电容耦合相位鉴频器原理图

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解调特性测试

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，绘制动态解调特性曲线 $V_{out}-A_s$ 。

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 实验结果与分析

5.1 静态调制特性曲线

开始实验时，要先给调制电路设置合适工作点以减小输出失真。调节变容二极管的反向偏压、后级电路基极偏置和 LC 谐振回路中的可变电容器，得到失真度较小的输出波形，如 Figure 3 所示，此时二极管反向偏压为 -4.519 V 。注意此时输出波形并不是完美的正弦波，仍带有一定失真，但已无法通过简单调节进一步减小失真。

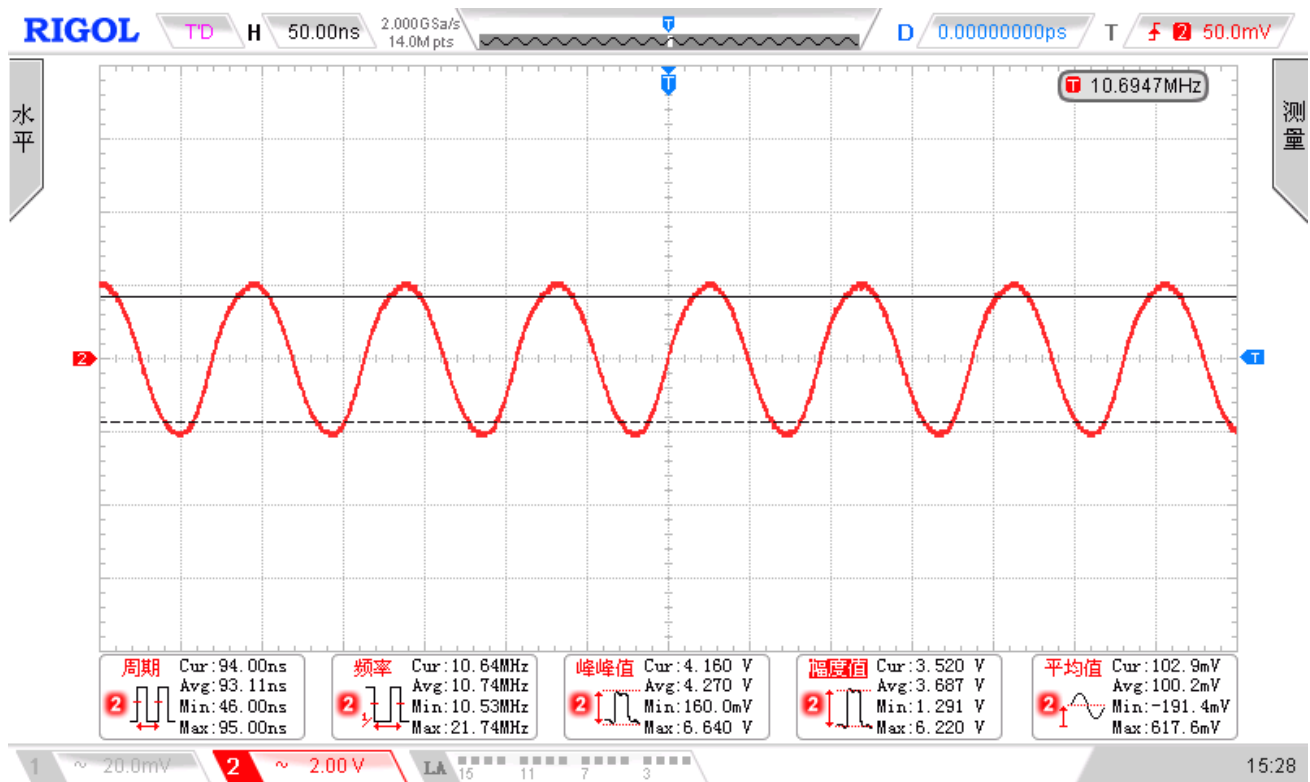


Figure 3: The output waveform of the varactor FM circuit at $V_D = -4.519\text{ V}$ ($f_{out} = 10.6947\text{ MHz}$)

在合适工作点的基础上，改变变容二极管的反向偏压 V_D ，测量对应的输出频率 f_{out} ，得到静态调制特性曲线，如 Table 1 和 Figure 4 所示：

Table 1: The Static Modulation Characteristic of the varactor diode FM circuit

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_D (V)	-1.161	-2.126	-3.423	-4.519	-5.184	-6.215	-7.298	-8.412	-9.512	-11.858
f_{out} (MHz)	10.0283	10.3168	10.5723	10.6947	10.7547	10.8153	10.8699	10.9173	10.9602	11.0290

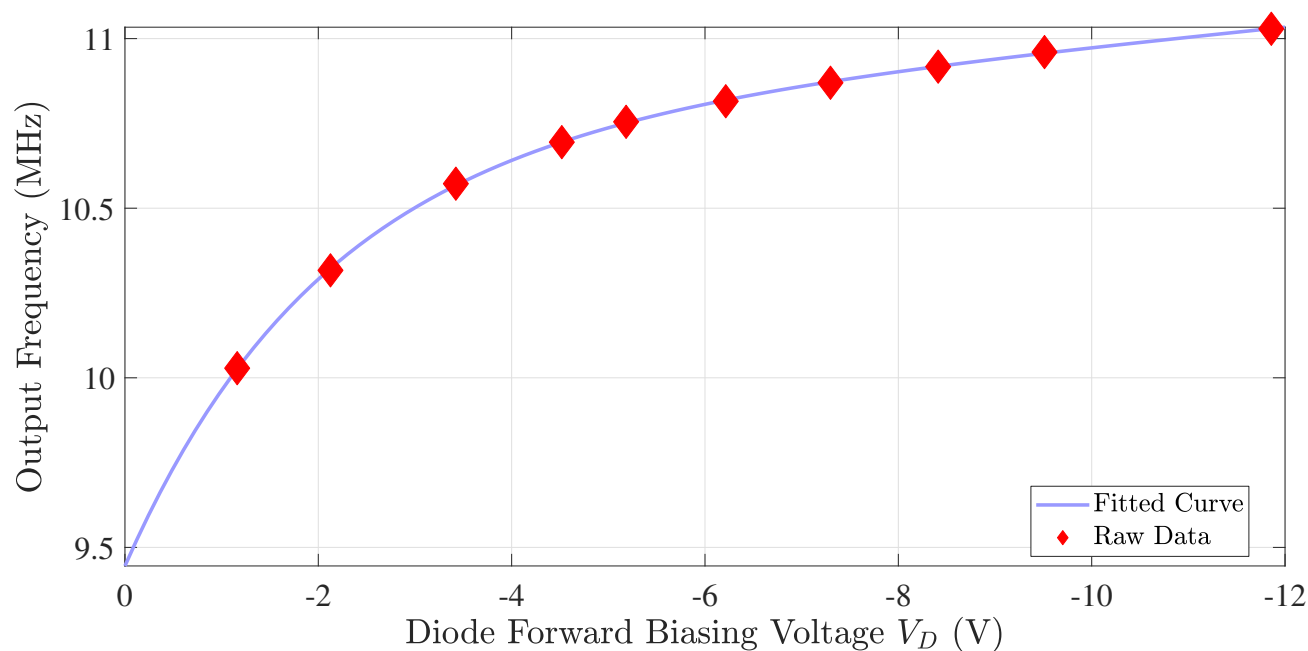


Figure 4: The Static Modulation Characteristic of The Varactor Diode FM Circuit

由所获得数据可以看出：变容二极管上反向偏压越高，结电容越小，则由变容二极管构成的谐振回路的振荡频率越高。而由于结电容随偏压的变化、输出频率与结电容的变化都不是线性的，故偏压与输出频率的关系也是非线性的，得到的调制特性曲线并不能近似成直线。但总的来讲，随着反向偏压的增大，输出频率呈现上升趋势。

较低和较高反向偏压下的输出波形如图 Figure 5 所示：

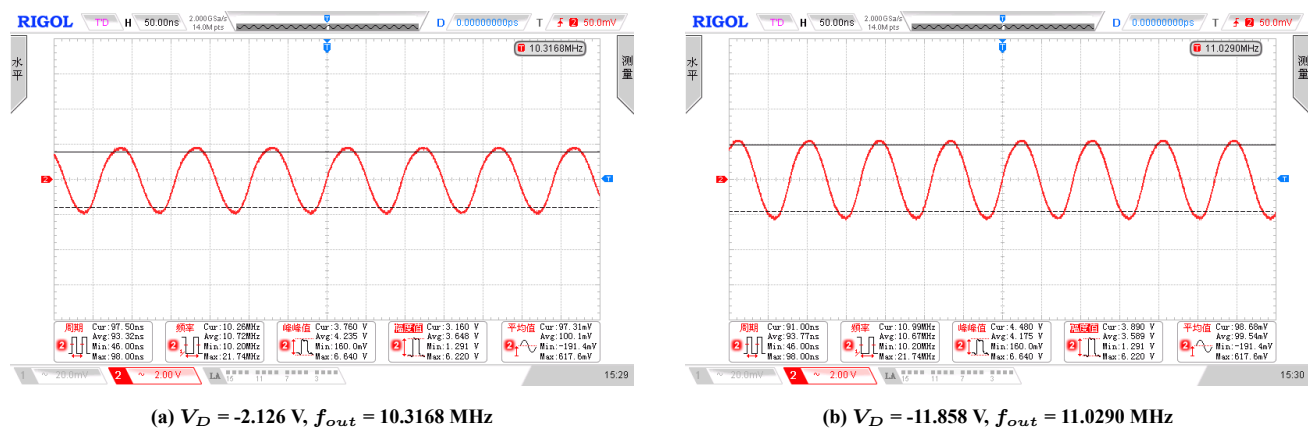
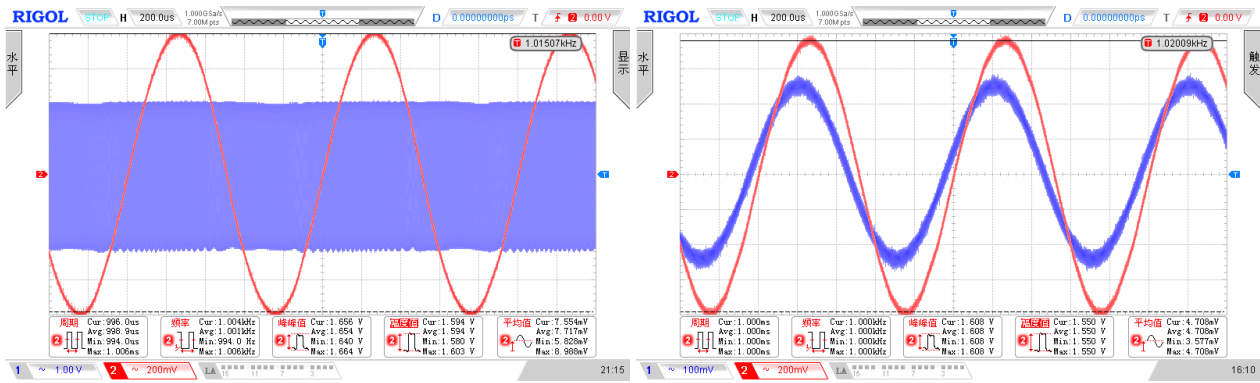


Figure 5: The output waveforms of the varactor FM circuit at different reverse bias voltages.

5.2 调制/解调全过程波形观测

在合适电路工作点的基础上,设置合适的基带信号幅度与调制系数,观测调制/解调全过程波形,如图 Figure 6 所示。图中 (a) 为基带信号与调频输出信号的对比, (b) 为基带信号与解调后输出信号的对比。可以看出,经过调频与解调过程后,解调输出信号基本恢复了基带信号的形状,说明成功实现了频率调制与解调操作。



(a) The baseband signal (CH1, blue) and the FM output signal before de- (b) The baseband signal (CH1, blue) and the demodulated output signal modulation (CH2, red).

Figure 6: The waveforms of the varactor FM circuit at $V_D = -5.370$ V with 0.5 Vpp baseband signal.

5.3 动态解调特性曲线

保持其它参数不变, 改变基带信号的幅度, 测量对应的解调输出电压幅度, 得到动态解调特性曲线, 结果如 Table 2 和 Figure 7 所示:

Table 2: The dynamic demodulation characteristic of the varactor diode FM circuit

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A_s (Vpp)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	5.0	7.5
A_{out} (Vpp)	0.322	0.643	0.965	1.285	1.585	3.202	4.381	5.293	7.802	8.923

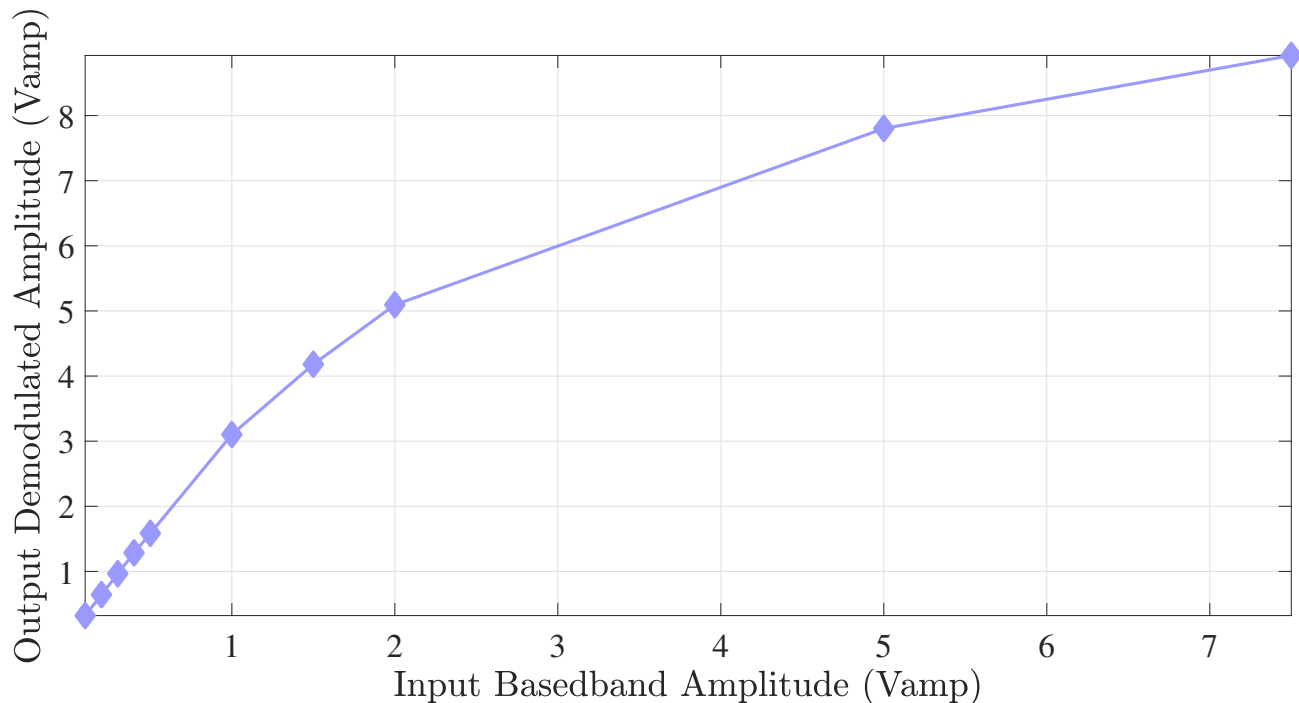
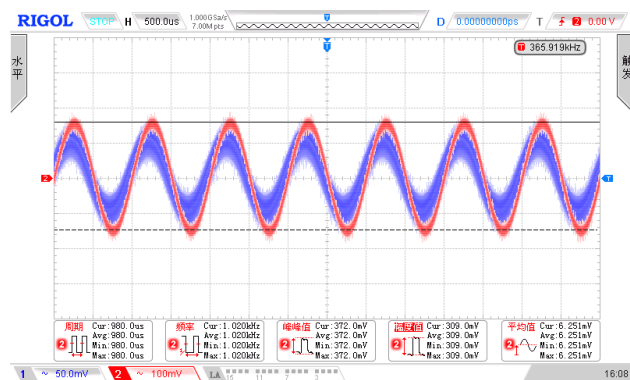


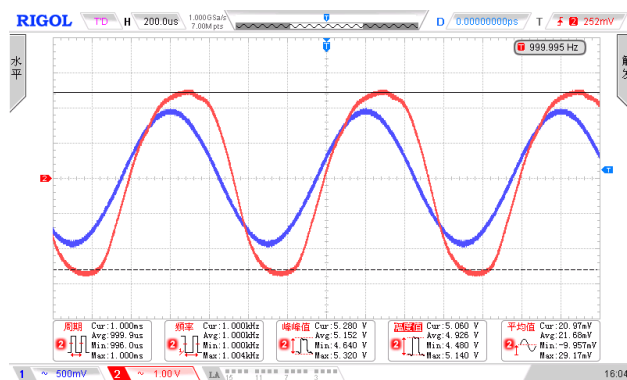
Figure 7: The dynamic demodulation characteristic of the varactor diode FM circuit

可以发现, 在输入输出幅度不大时, 变容二极管的动态解调特性具有较高的线性度。但是, 随着输入幅度的增大, 输出幅度的增长逐渐变缓, 曲线出现明显的非线性特征, 输出波形也出现明显失真现象。

输入幅度较小和较大时的输出波形如 Figure 8 所示:



(a) Baseband amplitude = 0.1 Vpp, CH1 (blue): baseband signal; CH2 (red): demodulated output signal



(b) Baseband amplitude = 2.0 Vpp, CH1 (blue): baseband signal; CH2 (red): demodulated output signal

Figure 8: The waveforms of the varactor FM circuit at $V_D = -5.370$ V with different baseband signal amplitudes. (a) 0.1 Vpp baseband signal; (b) 2.0 Vpp baseband signal.

6 思考题

6.1 解调电路工作点设置不合理会带来哪些影响？

解调电路工作点设置不合理会导致解调输出信号出现明显失真，甚至无法正确恢复基带信号，下图是一个例子：

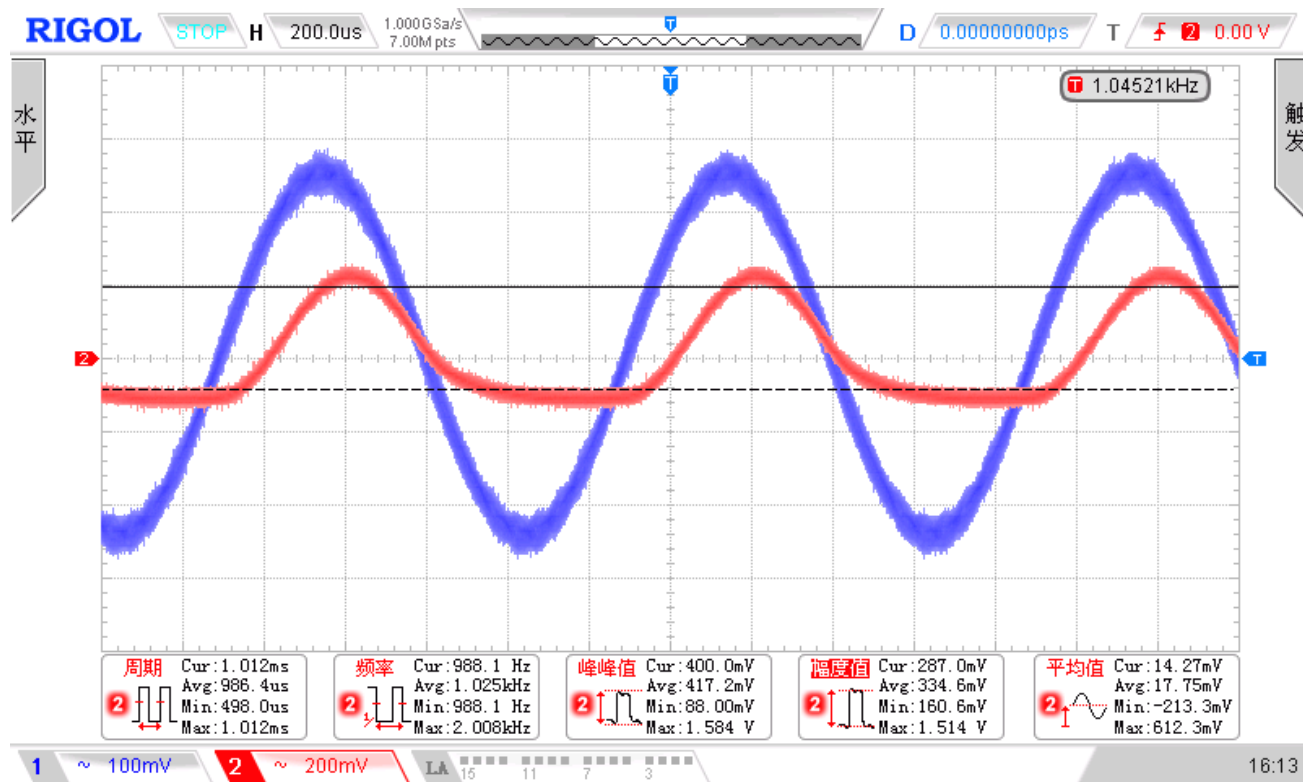


Figure 9: The output waveform of the varactor FM circuit with improper demodulator operating point setting.

6.2 幅度变化现象观察

改变基带信号幅度，观察调频输出波形，可以发现随着基带信号幅度的增大，频率调制后的输出波形出现了明显的幅度波动现象。具体表现为输出波形的包络线出现了明显的起伏，幅度受到基带信号的影响。这是因为变容二极管具有非线性特性，当基带信号幅度较大时，变容二极管的电容变化不仅调制了频率，还

引入了幅度调制成分，导致输出信号的幅度也随基带信号变化。这种现象在调频系统中是不希望出现的，因为理想的调频信号应仅包含频率变化，而不应包含幅度变化。

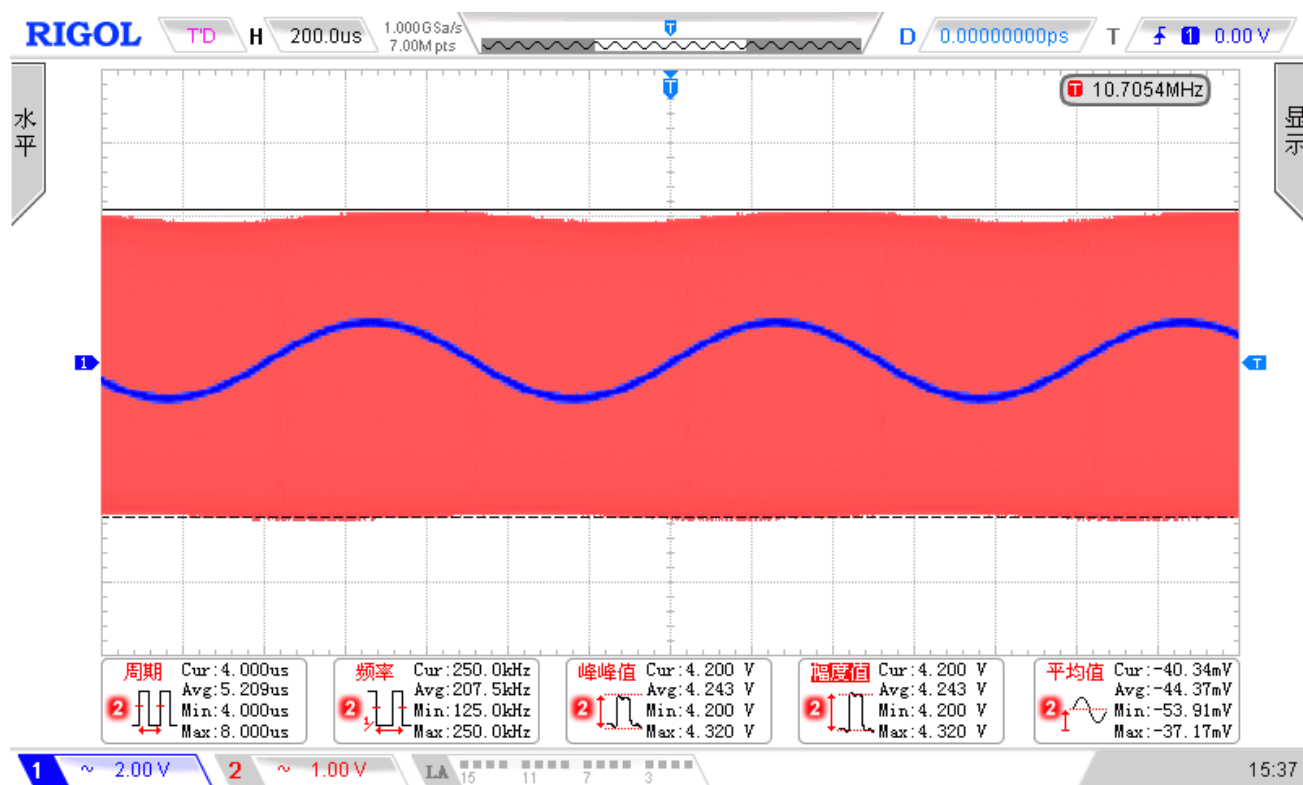


Figure 10: The output waveform of the varactor FM circuit with 2 Vpp baseband signal

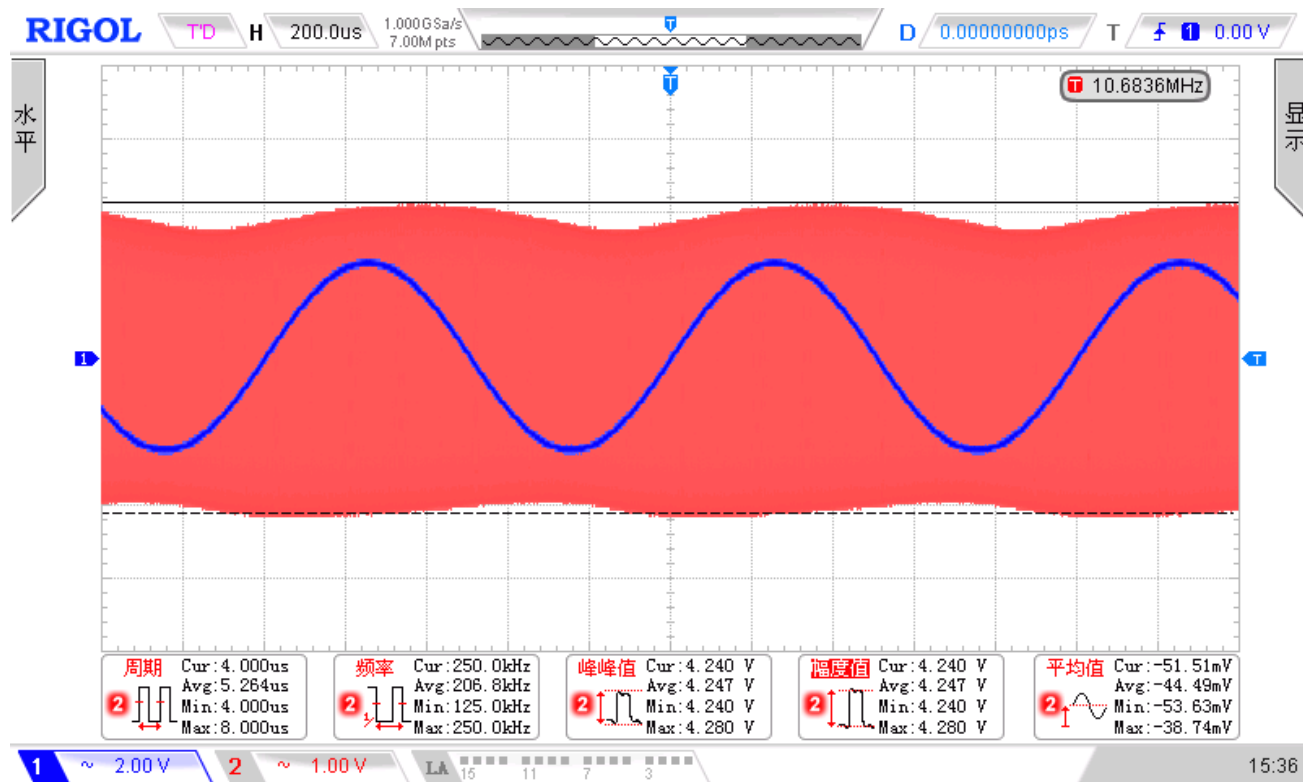


Figure 11: The output waveform of the varactor FM circuit with 5 Vpp baseband signal

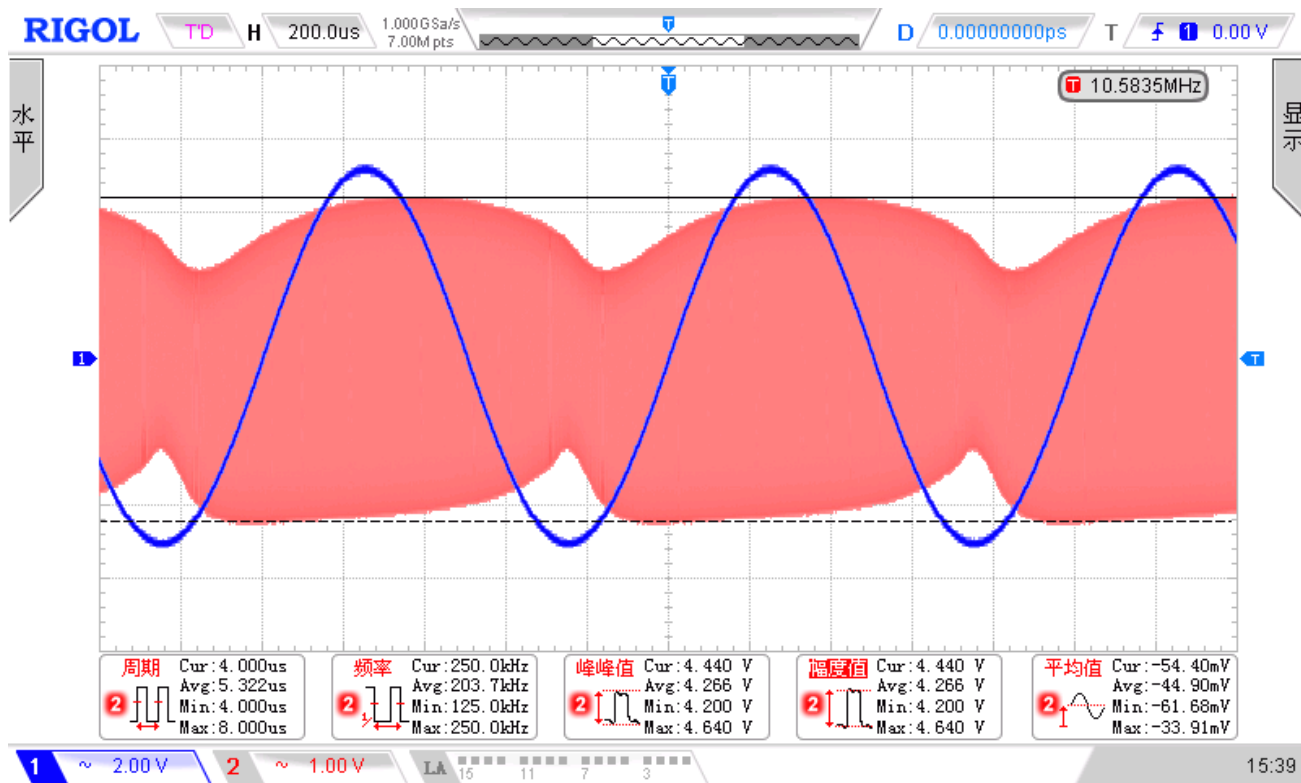


Figure 12: The output waveform of the varactor FM circuit with 10 Vpp baseband signal

6.3 调频现象观察

合理设置示波器时间轴和余辉时间可以帮助我们更清晰地观察调频现象，图 Figure 13 是一个例子，输出波形从中轴两端向两端扩展时发生“错位”，且越远离中心区域波形错位越明显，这正是调频现象的体现。

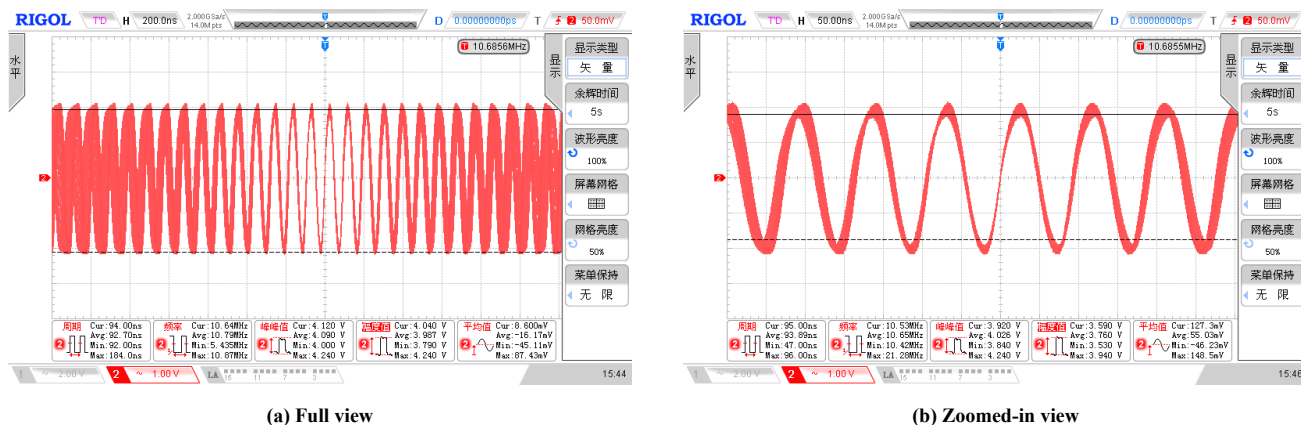


Figure 13: The output waveform of the varactor FM circuit with 5 Vpp baseband signal.

6.4 静态和动态解调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。

动态解调特性曲线的斜率，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。

附录 A 原始数据记录表

注：本次实验所有数据均以.txt 格式保存在电脑中，已由赵嘉明助教核验过。由于数据基本都为波形采样数据，整体数据量较多，故此处不再单独附上原始数据。

附录 B 实验预习报告

《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。

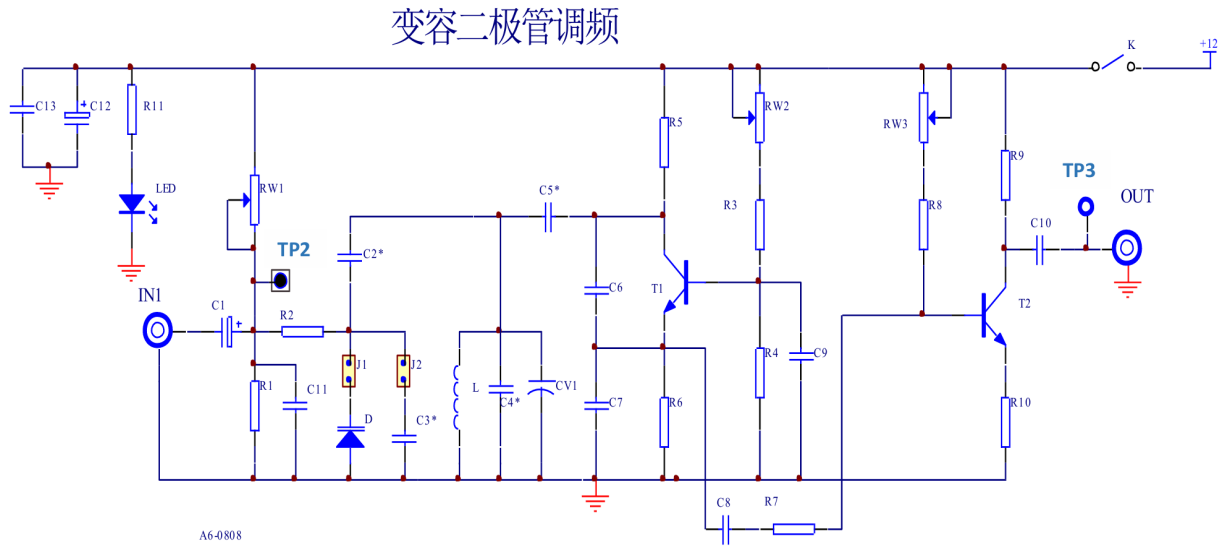


Figure 1: 变容二极管调频电路原理图

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。

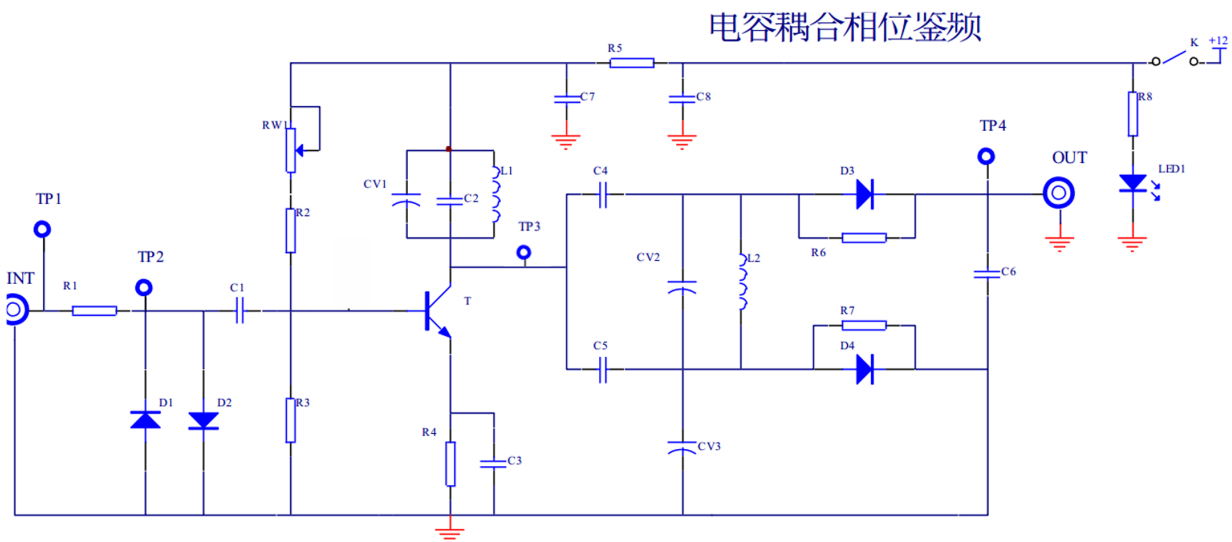


Figure 2: 电容耦合相位鉴频器原理图

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。

附录 C MATLAB Codes

```

1  % 静态调制曲线绘制
2  data = [
3      -1.161  -2.126  -3.423  -4.519  -5.184  -6.215  -7.298  -8.412  -9.512  -11.858
4      10.0283 10.3168 10.5723 10.6947 10.7547 10.8153 10.8699 10.9173 10.9602 11.0290
5  ];
6
7  V_D = data(1, :);
8  freq = data(2, :);
9  stc = MyPlot(V_D, freq);
10 stc.axes.XDir = 'reverse';
11
12 % 进行拟合
13 ft = fittype( 'exp2' );
14 opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
15 opts.Display = 'Off';
16 opts.StartPoint = [-1.15061214739788 0.337928929764432 10.8181736605471 -0.00193154504777525];
17 [xData, yData] = prepareCurveData( V_D, freq );
18 [freq_fit, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
19
20
21 V_D_array = - linspace(0, 12, 100);
22 stc = MyPlot(V_D_array, freq_fit(V_D_array));
23 stc.axes.XDir = 'reverse';
24
25 stc = MyScatter_ax(stc.axes, V_D, freq);
26 stc.scatter.scatter_1.Marker = 'diamond';
27 stc.scatter.scatter_1.MarkerFaceColor = 'r';
28 stc.scatter.scatter_1.MarkerEdgeColor = 'r';
29 stc.label.x.String = 'Diode Forward Biasing Voltage $V_D$ (V)';
30 stc.label.y.String = 'Output Frequency (MHz)';
31 stc.legend.String = [
32     "Fitted Curve";
33     "Raw Data"
34 ];
35 MyFigure_ChangeSize([2.2, 1]*512)
36
37 %MyExport_pdf
38
39 %% 动态调制特性曲线
40
41 data = [
42     0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 1.0 1.5 2.0 5.0 7.5
43     0.322 0.643 0.965 1.285 1.585 3.202 4.381 5.293 7.802 8.923
44 ];
45
46 A_in = data(1, :);
47 A_out = data(2, :);
48
49
50 stc = MyPlot(A_in, A_out);
51 %stc.axes.XScale = 'log';
52 %stc.axes.YScale = 'log';
53 stc.label.x.String = 'Input Basedband Amplitude (Vamp)';
54 stc.label.y.String = 'Output Demodulated Amplitude (Vamp)';
55 stc.legend.String = [
56     "Fitted Curve";
57     "Raw Data"
58 ];
59 stc.plot.plot_1.Marker = 'diamond';

```

```
60 stc.plot.plot_1.MarkerSize = 10;  
61 MyFigure_ChangeSize([2.2, 1]*512)  
62 %MyExport_pdf
```