

《非线性电路实验》预习报告

实验名称: Small-Signal Resonant Amplifier 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: 2025.11.27 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) 掌握小信号谐振放大器的工作原理;
- (2) 掌握小信号谐振放大器的调试方法;
- (3) 掌握小信号谐振放大器各项技术参数测试(电压增益、通频带、矩形系数)。

2 实验仪器

- (1) 小信号谐振放大器实验板 (序列号……)
- (2) 示波器 RIGOL MSO2202A (序列号……)
- (3) 信号发生器 GW INSTEK AFG-2225 (序列号……)
- (4) 万用表 LINIT- UT61A (序列号……)

3 实验原理

3.1 小信号调谐放大器基本原理

小信号调谐放大器 (Small-Signal Resonant Amplifier) 的作用是有选择地对某一频率范围的高频小信号进行放大，这里的“小信号”通常指电压幅度 (amplitude) 在 uV ~ mV 数量级的输入信号。本次实验所讨论的“小信号谐振放大器”，其实类似射频系统中的 LNA (Low Noise Amplifier, 低噪声放大器)，只是工作频率 (约 10 MHz) 远低于常见无线通信频段 (例如 2.4 GHz)。LNA 一般用于无线接收系统的前端，主要任务是对天线接收到的微弱射频信号进行放大，在保持可介绍信噪比 (SNR) 的情况下，将信号放大至足够大的功率给后续的混频器或解调器。

A9 参差调谐两级小信号放大器

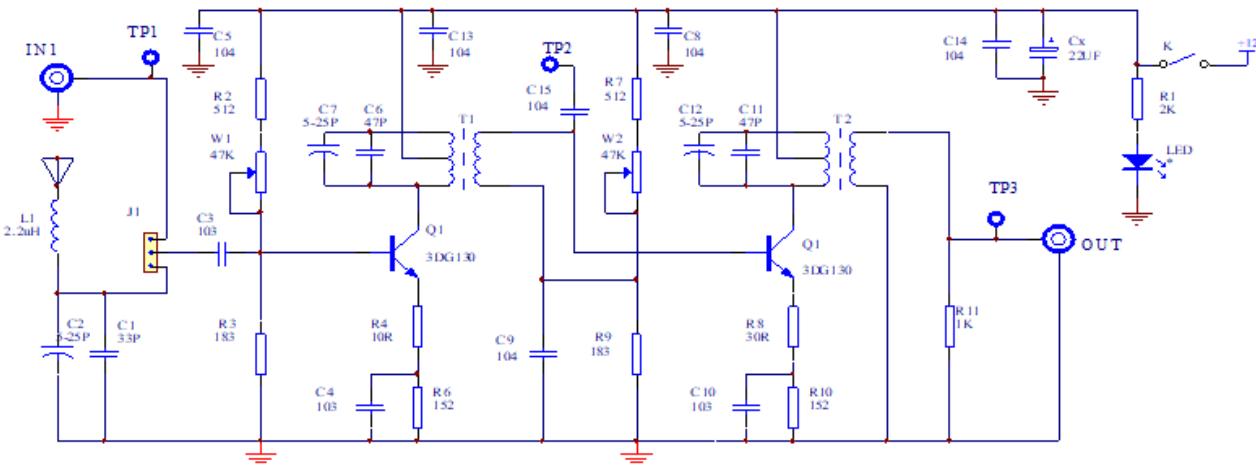


Figure 1: Small-Signal Resonant Amplifier Schematic

因此，我们完全可以将本实验中的小信号调谐放大器视为一种低频版的 LNA，其工作原理和技术参数与 LNA 十分相似，但对线性度和噪声系数的要求没有 LNA 那么高。

小信号调谐放大器(后文简称为“Resonant Amplifier”)的工作原理是：使用 RLC 谐振网络作为 BJT/MOS 放大电路的负载部分，谐振频率既为主要工作频率，使电路对带内信号 (in-band signal) 进行放大，同时有效抑制带外信号 (out-of-band signal)，这与 LNA 的工作原理类似。

本次实验的 Resonant Amplifier 由两级构成，根据噪声系数的理论公式，如果想尽可能降低噪声系数，就必须保持前级的噪声系数不太高。因此，在设计前级放大器时，常要求采用低噪声器件，合理地设置工作电流等，使放大器在尽可能高的功率增益下噪声系数最小。

对实验所用电路进行简单分析：

- (1) 这是一个二级放大器，从 IN1 (TP1) 端口输入小信号，由 C3 交流耦合到第一级放大器 Q1 的 Base；
- (2) 第一级：由 R2/W1/R3/R4/R6 提供直流偏置 (C4 为旁路电容)，C7/C6/T1 构成谐振负载网络 (C7 可调)，输出通过 T1 耦合到第二级放大器 Q2 的 Base，可通过 TP2 测量第一级输出信号；
- (3) 第二级：由 R7/W2/R9/R8/R10 提供直流偏置 (C10 为旁路电容)，C12/C11/T2 构成谐振负载网络 (C12 可调)，输出通过 T2 耦合到输出端口 OUT (TP3)。

3.2 小信号调谐放大器技术参数

Resonant Amplifier 的主要技术参数包括电压增益 (Voltage Gain)、通频带 (Bandwidth) 和矩形系数 (Shape Factor) 等：

$$\text{Voltage gain : } A_v := \frac{v_{out}}{v_{in}} \quad (1)$$

$$\text{Bandwidth : } \text{BW}_{-3\text{dB}} = f_{H,-3\text{dB}} - f_{L,-3\text{dB}} \quad (2)$$

$$\text{Shape Factor : } \text{SF}_{-20\text{dB}} := \frac{\text{BW}_{-20\text{dB}}}{\text{BW}_{-3\text{dB}}} \quad (3)$$

上式中 v_{in} 和 v_{out} 分别为放大器的输入和输出电压 (电压带有幅度和相位，因此增益是复数)， $\text{BW}_{-3\text{dB}}$ 和 $\text{BW}_{-20\text{dB}}$ 分别为放大器 voltage gain 下降 3 dB (最大值的 $\frac{\sqrt{2}}{2}$) 和 20 dB (最大值的 $\frac{1}{10}$) 时对应的频率范围宽度。注意 $\text{BW} = \frac{f_0}{Q}$ ，因此放大器的带宽和矩形系数与谐振电路的品质因数 Q 密切相关。

4 实验内容与步骤

本次实验的注意内容为“放大器的频率特性及通频带的测量”。需注意：

- (1) 调整两级放大器的可调电容，使两级放大器的谐振频率分别略低于和略高于 10 MHz，但不能完全相等或相差过大；完全相等会导致频率响应曲线过于尖锐，难以测量通频带，差距过大则会导致增益明显下降，甚至出现中间窄两边高的“双峰现象”；
- (2) 为电路注入小信号时，输入信号幅度 (amplitude) 应控制在 30 mV 以内，过大会导致放大器进入非线性工作区，输出波形严重失真；

4.1 调整电路直流工作点

- (1) 连接好电路，为电路提供直流电源后，从 IN1 端输入 $f_0 = 10$ MHz 小信号，幅度在 10 mV 左右；
- (2) 在 OUT 端用示波器观测到放大后的输入信号，调整两个电位器 W1/W2 来改变两个晶体管的静态工作点。微调电容 C7/C12，使输出信号幅度最大且失真最小。

4.2 放大器的放大倍数及通频带的测试

- (1) 调整输入跳线 J1，使电路输入端为 IN (TP1) 而不是天线；
- (2) 测量电压增益：分别在 TP1 (IN) 和 TP3 (OUT) 处用示波器测量输入输出信号的幅度，计算电压增益；

- (3) 测量带宽: 在中心频率 f_0 附近改变输入频率, 例如 8 MHz ~ 12 MHz @ 0.1 MHz step, 重复步骤(1), 对结果进行拟合后计算 -3dB 带宽;
- (4) 测量矩形系数: 根据步骤(2)得到的结果, 计算 -20dB 带宽, 进而计算矩形系数。

数据记录表格如下:

Table 1: Resonant Amplifier Frequency Response Data

(信号发生器) f_{in} (MHz)	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9
(AC of TP1) $V_{in,pp}$ (V)										
(AC of TP3) $V_{out,pp}$ (V)										
(信号发生器) f_{in} (MHz)	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9
(AC of TP1) $V_{in,pp}$ (V)										
(AC of TP3) $V_{out,pp}$ (V)										10.0

5 思考题

5.1 小信号调谐放大器产生自激振荡的原因是什么? 如何避免产生自激振荡?

本实验所用的小信号谐振放大器由两级构成, 整体增益较高且 phase shift 较大。虽然电路中没有直接的反馈路径, 但由于电路布局和元器件的寄生参数 (例如晶体管的集电极-基极结电容) 等原因, 仍然可能产生寄生反馈, 一旦满足了自激振荡的起振条件 $|A_v(f_{osc})| = 1 @ \angle A_v(f_{osc}) = -180^\circ$, 就会导致放大器产生自激振荡, 输出端口出现持续的正弦波信号。此外, 如果放大器的谐振频率设置不当 (例如两级谐振频率完全相等), 也可能导致频率响应曲线过于尖锐, 增加了自激振荡的风险。

可通过在输入或输出端添加补偿网络 (例如 RC 网络) 来降低避免自激振荡的产生。此外, 合理调整谐振频率, 使两级谐振频率略有差异, 也有助于降低自激振荡风险。