

《非线性电路实验》实验报告

实验名称: LC/Crystal Sinusoidal Oscillator 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	2
2 实验仪器	2
3 实验原理	2
3.1 LC Sinusoidal Oscillator	2
3.1.1 Colpitts Oscillator (考毕兹振荡器)	3
3.1.2 Clapp Oscillator (克拉泼振荡器)	3
3.1.3 Seiler Oscillator (西勒振荡器)	4
3.2 Quartz Crystal Oscillators	4
3.3 实验电路简要分析	5
4 实验内容与步骤	5
4.1 LC Sinusoidal Oscillator	5
4.1.1 直流工作点对振荡器的影响	5
4.1.2 反馈系数对振荡器的影响	5
4.1.3 测量振荡器的可调频率范围	6
4.1.4 分钟量级频率漂移测量	6
4.1.5 正弦振荡信号相位噪声测量与分析	6
4.2 Crystal Sinusoidal Oscillator	6
4.3 Comparison between LC and Crystal Sinusoidal Oscillators	6
5 实验结果与分析	7
5.1 LC Sinusoidal Oscillator	7
5.1.1 直流工作点对振荡器的影响	7
5.1.2 反馈系数对振荡器的影响	8
5.1.3 振荡器的可调频率范围	9
5.1.4 分钟量级频率漂移测量	9
5.2 Crystal Sinusoidal Oscillator	10
5.2.1 直流工作点对振荡器的影响	10
5.2.2 反馈系数对振荡器的影响	10
5.2.3 振荡器的可调频率范围	11
5.2.4 分钟量级频率漂移测量	12
5.3 LC/Crystal Oscillator Comparison	12

6 思考题	13
6.1 本次实验的 LC/Crystal 振荡器的输出波形质量如何？是否有明显噪声、失真或其他异常现象？	13
6.2 本次实验的 LC/Crystal 振荡器的相位噪声性能如何，能否满足实际通信系统的参考频率源要求？	14
6.3 多数同学在本次实验采用示波器光标来测量振荡频率和幅度，这种方法的精度如何，是否能满足实验要求？	15
附录 A 原始数据记录表	16
附录 B 实验预习报告	16
附录 C MATLAB Codes	21

1 实验目的

- (1) 掌握正弦波振荡电路的相关理论
- (2) 掌握电容三点式 LC 振荡电路的基本原理，熟悉各元件功能；熟悉静态工作点、耦合电容、反馈系数、等效 Q 值对振荡器振荡幅度和频率的影响。
- (3) 比较 LC 振荡器和晶体振荡器的频率稳定度，加深对晶体振荡器频率稳定度较高的原因的理解

2 实验仪器

- (1) 高频实验箱 - LC/Crystal 正弦波振荡电路实验板 (031132201809392)
- (2) 示波器 RIGOL MSO2202A (080103201901376)
- (3) 信号发生器 GWINSTEK AFG-2225 (080102201901355)
- (4) 万用表 LINIT- UT61A (C181503983)

3 实验原理

3.1 LC Sinusoidal Oscillator

三点式 LC 正弦振荡器 (three-point LC sinusoidal oscillator, 后文简称 TPSO) 是正弦振荡器最常见的拓扑结构之一，它利用 LC 谐振回路作为频率选择网络，通过正反馈实现自激振荡。

根据反馈网络的不同，三点式 LC 振荡器主要分为以下三种类型：

- (1) Colpitts Oscillator (考毕兹): 最基本的电容式 TPSO (three-point sinusoidal oscillator)，由两个电容和一个电感构成谐振回路；
- (2) Clapp Oscillator (克拉泼): 在 Colpitts Oscillator 基础上，电感支路串联一个小电容以提高振荡稳定性；
- (3) Seiler Oscillator (西勒): 在 Clapp Oscillator 基础上，电感两端并联一个可变电容以扩大调谐范围。

下面分别对其这三种 LC 振荡器作简要介绍。

3.1.1 Colpitts Oscillator (考毕兹振荡器)

Colpitts Oscillator 是电容式 TPSO 的最基本形式，由一个晶体管、两个电容和一个电感构成核心振荡部分，如 Figure 1 所示。其结构最为简单，但存在一个主要缺点：反馈系数由电容比值 $\frac{C_1}{C_2}$ 决定，当通过可变电容 C_1 或 C_2 来调整振荡频率时，会不可避免地改变反馈系数，引起输出振幅不稳定甚至停振。

$$\omega_{osc} \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_\Sigma}}, \quad C_\Sigma = C_1 \parallel C_2 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

$$\text{start-oscillation condition: } g_m > \frac{(1 - \omega_{osc}^2 LC_2)}{R_{L,eq}} + \frac{(1 - \omega_{osc}^2 LC_1)}{R_e \parallel r_\pi} \quad (2)$$

$$\text{where: } R_{L,eq} = R_L \parallel R_p, \quad R_p = \omega_{osc} L Q_0 \quad (3)$$

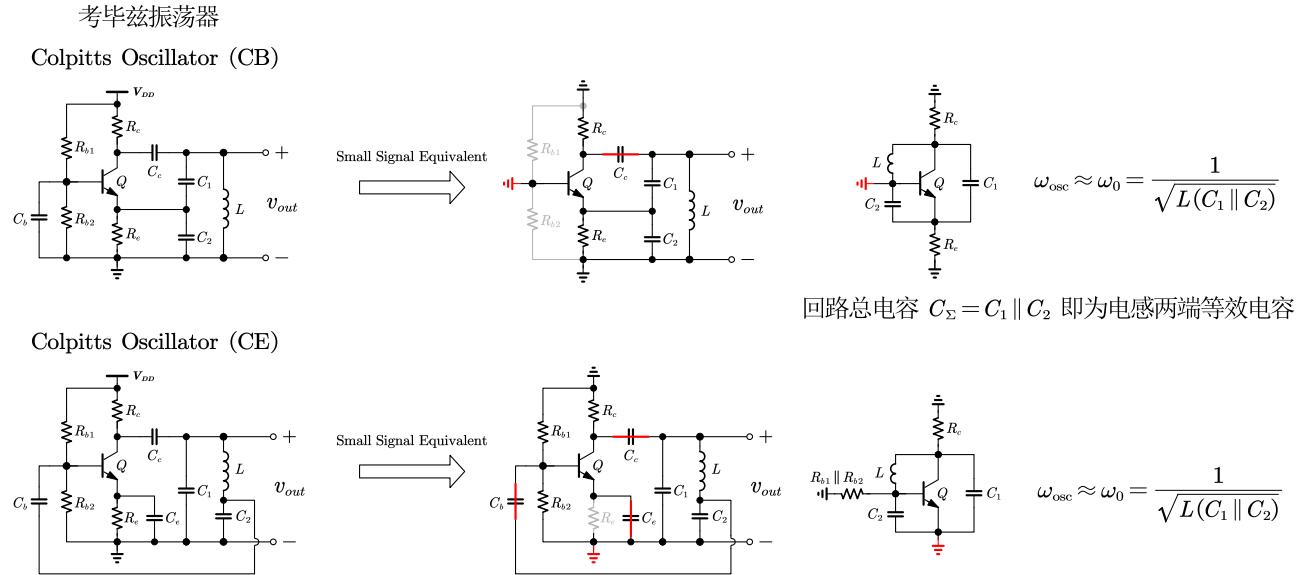


Figure 1: Colpitts oscillator (考毕兹振荡器) schematic and the high-frequency equivalent circuit

3.1.2 Clapp Oscillator (克拉泼振荡器)

如 Figure 2 所示，Clapp Oscillator (克拉泼振荡器) 在 Colpitts (考毕兹) 的电感支路中串联了一个小电容 C_3 ，使得回路的总谐振电容主要由这个数值较小的 C_3 决定，而原来负责提供反馈的 C_1 和 C_2 可以取较大值；这样，使用可变电容 C_3 来调整振荡频率时，对反馈系数的影响就微乎其微，大大提高了频率稳定性。然而，克拉泼电路引入了一个新限制：为了保持 C_3 对总电容的主导作用，其值必须很小，这导致谐振时回路阻抗(等效负载阻抗)降低。因此，当调高频率(减小 C_3)时，振荡幅度会显著下降，使得它在高频段的调谐范围很窄，实用性受限。

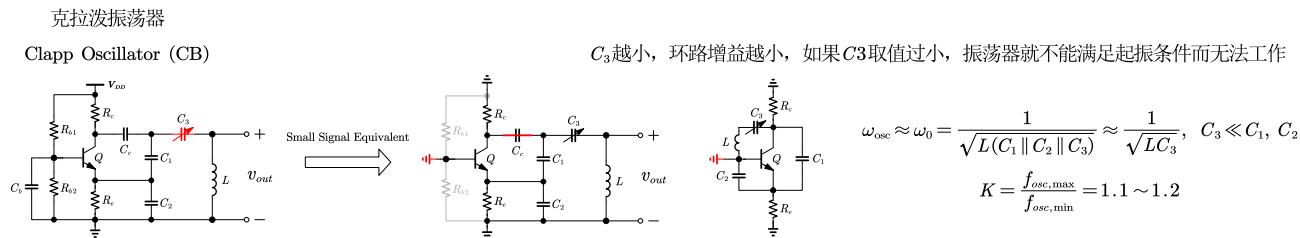


Figure 2: Clapp oscillator (克拉泼振荡器) schematic and the high-frequency equivalent circuit

3.1.3 Seiler Oscillator (西勒振荡器)

如 Figure 3 所示, Seiler Oscillator (西勒振荡器) 是 Clapp (克拉泼) 电路的进一步改良, 在电感两端并联了一个可变电容 C_4 (其它三个电容不变), 由 C_4 来调节振荡频率。这种设计的妙处在于, 调谐时不仅不影响反馈系数, 而且回路阻抗 (等效负载阻抗) 在很宽的频率范围内较为平缓。因此, 西勒振荡器在保持高频率稳定性的同时, 获得了非常宽的调谐范围, 且在整个范围内输出幅度较为均匀, 特别适合于需要宽范围、高稳定度调谐的场合, 使在实际应用中更为常见。

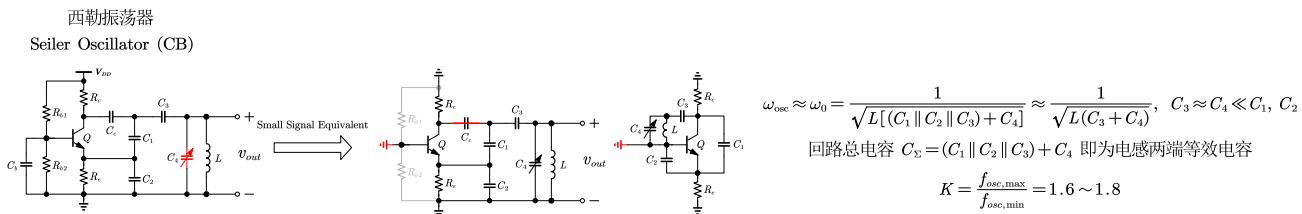


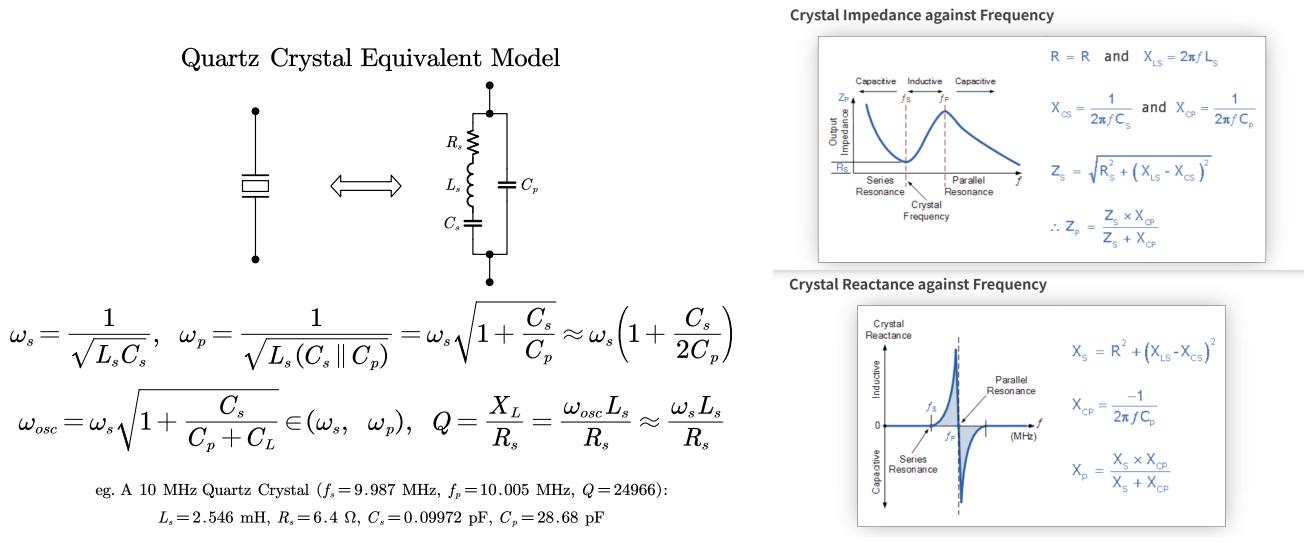
Figure 3: Seiler oscillator (西勒振荡器) schematic and the high-frequency equivalent circuit

3.2 Quartz Crystal Oscillators

晶体正弦振荡器 (crystal sinusoidal oscillator, 后文简称 CSO) 是利用石英晶体的压电效应和高品质因数特性来实现高频率稳定振荡的电路。

晶体振荡器的核心是石英晶体谐振器 (quartz crystal resonator), 其等效电路如 Figure 4 所示。晶体谐振器在其串联谐振频率 ω_s 和并联谐振频率 ω_p 附近表现出极高的品质因数 Q , 使得它能够在给定频率范围内实现非常稳定的振荡。

具体而言, 石英晶体 (quartz crystal) 的等效电路、关键公式和阻抗特性如下:



(a) Quartz crystal equivalent circuit

(b) Impedance/reactance vs. frequency characteristic

Figure 4: Quartz crystal equivalent circuit and its impedance characteristic

3.3 实验电路简要分析

本次实验电路如 Figure 5 所示。电路共分为两级，第一级为 LC/Crystal 正弦波振荡电路，第二级为 Emitter Follower (Common Collector) 缓冲输出级，用于提高带负载能力，同时降低输出端负载对振荡电路的影响。

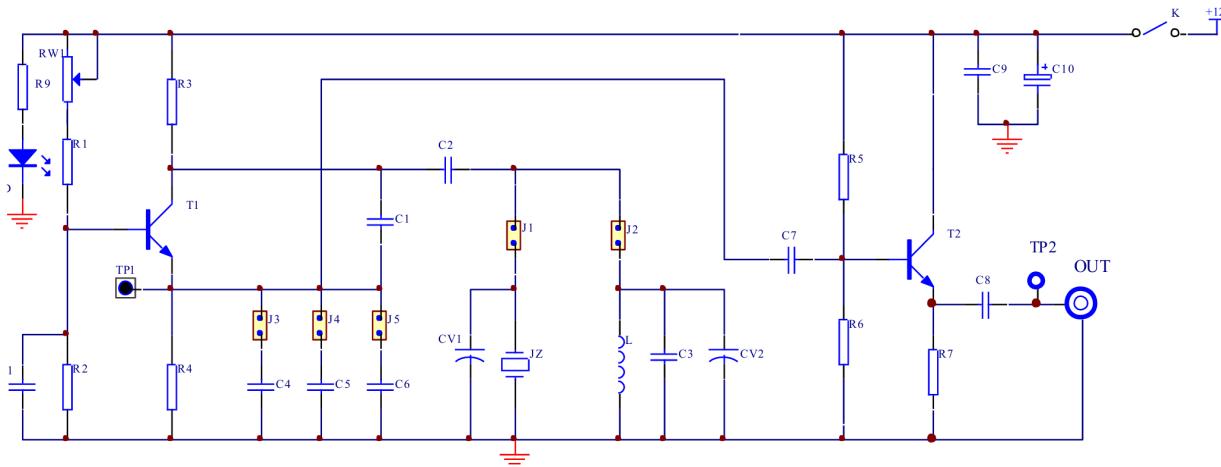


Figure 5: Schematic of LC/crystal sinusoidal oscillator experiment circuit

通过改变跳线 J1、J2 的连接方式，可以实现两种不同类型的振荡器电路：

- (1) LC Sinusoidal Oscillator: 保持 J3 连接，断开 J1 而连接 J2，构成 LC 正弦波振荡器，通过可变电容 CV2 和 J4/J5 来微调振荡频率；
- (2) Crystal Sinusoidal Oscillator: 保持 J3 连接，断开 J2 而连接 J1，构成晶体正弦波振荡器，通过可变电容 CV1 来微调振荡频率。

4 实验内容与步骤

注：(1) 由于本次实验所有数据均需导出到电脑在 MATLAB 中进行分析和处理，因此报告中不再单独给出用于记录数据的空白表格，仅在数据处理完成后附上得到的图片或结果表格 (实验中注意保存好原始数据文件以备后续处理使用)；(2) 本次实验过程中，示波器探头默认选择 X10 档，且每次更改电路连接前需要先断电。

4.1 LC Sinusoidal Oscillator

4.1.1 直流工作点对振荡器的影响

- (1) 调整电阻 RW1，用示波器在 TP1 测量晶体管的 Emitter 电流情况 $I_E = \frac{V_{TP1}}{R_4}$ ，在 TP2 (OUT) 处测量振荡频率和幅度，观察电流 I_E 对振荡工作状态 (频率和幅度) 的影响。
- (2) 将示波器数据导出到电脑，使用 MATLAB 对数据进行分析，绘制 $I_{e,DC}$ 与振荡频率 f_{osc} 、振荡幅度 $V_{osc,amp}$ 的关系曲线。
- (3) 可能用到的电路参数： $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$

4.1.2 反馈系数对振荡器的影响

- (1) 改变跳线 J3/J4/J5 的连接方式，相当于调整位于 Collector-GND 之间电容 C_2 的值，从而改变反馈系数 $F = \frac{C_1}{C_1+C_2}$ ，其中 $C_2 = J_3 \cdot C_3 + J_4 \cdot C_4 + J_5 \cdot C_5$

- (2) 将示波器数据导出到电脑，使用 MATLAB 对数据进行分析，绘制反馈系数 F 与振荡频率 f_{osc} 、振荡幅度 $V_{osc,amp}$ 的关系曲线。
- (3) 可能用到的电路参数： $C_1 = 100 \text{ pF}$, $C_3 = 100 \text{ pF}$, $C_4 = 200 \text{ pF}$, $C_5 = 200 \text{ pF}$

4.1.3 测量振荡器的可调频率范围

根据前两小节得到的结果，设置合适的静态工作点和反馈系数，使得振荡器能够稳定振荡。然后保持其它参数不变，调节可变电容 CV2，同时用示波器在 TP2 (OUT) 处测量输出振荡信号，将采样数据导出到电脑，使用 MATLAB 提取振荡频率 f_{osc} 和振荡幅度 $V_{osc,amp}$ 。最终得到当前设置下振荡器的最大可调频率范围及对应的振荡幅度变化情况。

4.1.4 分钟量级频率漂移测量

设置合适的静态工作点和反馈系数，待电路稳定后，每隔一分钟用示波器在 OUT 端测量一次，导出数据到电脑并使用 MATLAB 提取振荡频率 f_{osc} 。共计测量十次，记录每次测量的时间和对应的振荡频率值，绘制频率随时间变化的曲线，并计算相对变化量 $\frac{\Delta f_{osc}}{f_{osc,0}}$ ，由此评估振荡器的频率漂移程度。

4.1.5 正弦振荡信号相位噪声测量与分析

设置合适的静态工作点和反馈系数，待电路稳定后，使用示波器对输出信号进行采样，导出数据到电脑并使用 MATLAB 对信号进行分析，计算并绘制相位噪声谱，分析振荡器的相位噪声特性。

4.2 Crystal Sinusoidal Oscillator

连接跳线 J1 而断开 J2，构成晶体正弦波振荡器。然后重复上一小节的各项实验内容与步骤，记录各项数据并进行分析和作图。

4.3 Comparison between LC and Crystal Sinusoidal Oscillators

根据前两小节得到的 LC/Crystal Oscillator 各项性能数据，进行对比分析，重点比较两种振荡器在频率稳定性、调谐范围和相位噪声等方面差异，并结合理论简要分析其原因。

5 实验结果与分析

若无特别说明, 为提高振荡稳定性, 本次实验中振荡器输出端均接了一条悬空的负载线, 接/不接负载线对振荡波形的影响我们放在思考题再作讨论。

5.1 LC Sinusoidal Oscillator

5.1.1 直流工作点对振荡器的影响

保持其它参数不变, 调整电阻 RW1 以改变三极管的直流工作点, 用示波器测量 Emitter 电流和输出信号。记录数据并导出到电脑进行分析, 得到振荡频率 f_{osc} 和幅度 A_{osc} (amplitude) 关于直流工作点 $I_{e,DC}$ 的变化情况, 结果如 Table 1 和 Figure 6 所示:

Table 1: Oscillating frequency f_{osc} and amplitude A_{osc} vs. DC biasing current $I_{e,DC}$ (LC oscillator)

$I_{e,DC}$ (mA)	2.3821	1.5578	1.2726	0.8310
f_{osc} (MHz)	10.8526	10.8442	10.8400	10.8237
P_{osc} (V_{rms}^2)	0.0682	0.0313	0.0211	0.0071
A_{osc} (V _{amp})	0.3694	0.2502	0.2053	0.1194
V_{osc} (V _{pp})	0.7388	0.5003	0.4105	0.2388

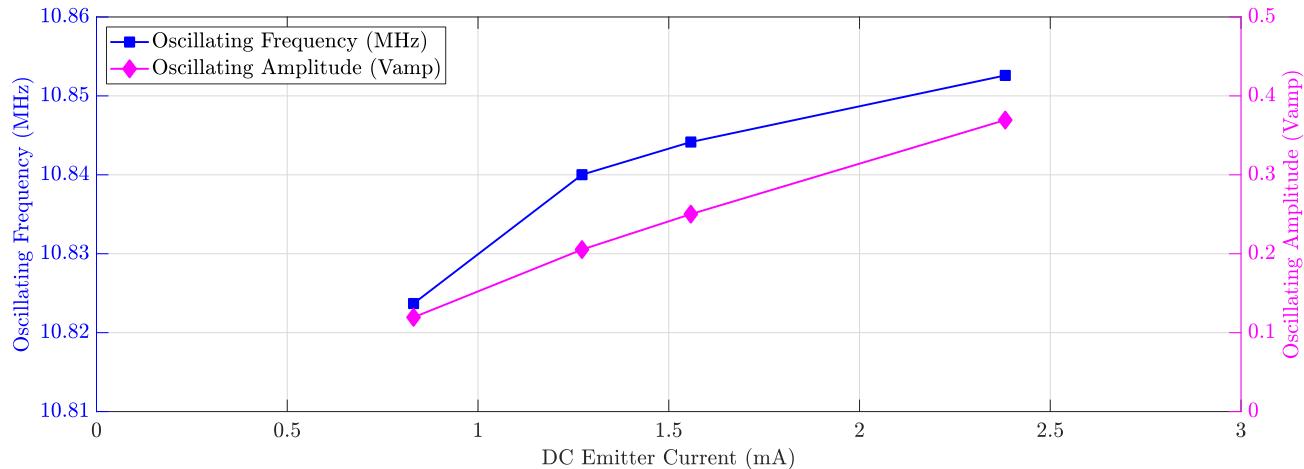


Figure 6: Oscillating frequency f_{osc} and amplitude A_{osc} vs. DC biasing current $I_{e,DC}$ (LC oscillator)

5.1.2 反馈系数对振荡器的影响

固定 RW1 为逆时针 1/4 圈不变 (逆时针旋转较多时 RW1 过大, 晶体管 g_m 显著减小, 环路不能正常起振), 改变跳线 J3/J4/J5 的连接方式以调整反馈系数 $F = \frac{C_1}{C_1+C_2}$ 。用示波器测量输出信号, 记录数据并导出到电脑进行分析, 得到振荡频率 f_{osc} 和幅度 A_{osc} 关于反馈系数 F 的变化情况, 如 Table 2 和 Figure 8 所示:

Table 2: Oscillating frequency f_{osc} and amplitude A_{osc} vs. feedback factor F (LC oscillator)

C_2 (pF)	100.0	200.0	300.0	400.0	500.0
F (FB factor)	1.0000	0.5000	0.3333	0.2500	0.2000
$I_{e,DC}$ (mA)	1.6477	1.6144	1.5688	1.5266	1.5186
f_{osc} (MHz)	10.7282	10.7268	10.7045	10.6839	10.6725
P_{osc} (V_{rms}^2)	0.0262	0.0247	0.0200	0.0066	0.0080
A_{osc} (V _{amp})	0.2289	0.2224	0.2001	0.1147	0.1268
V_{osc} (V _{pp})	0.4578	0.4447	0.4002	0.2295	0.2536

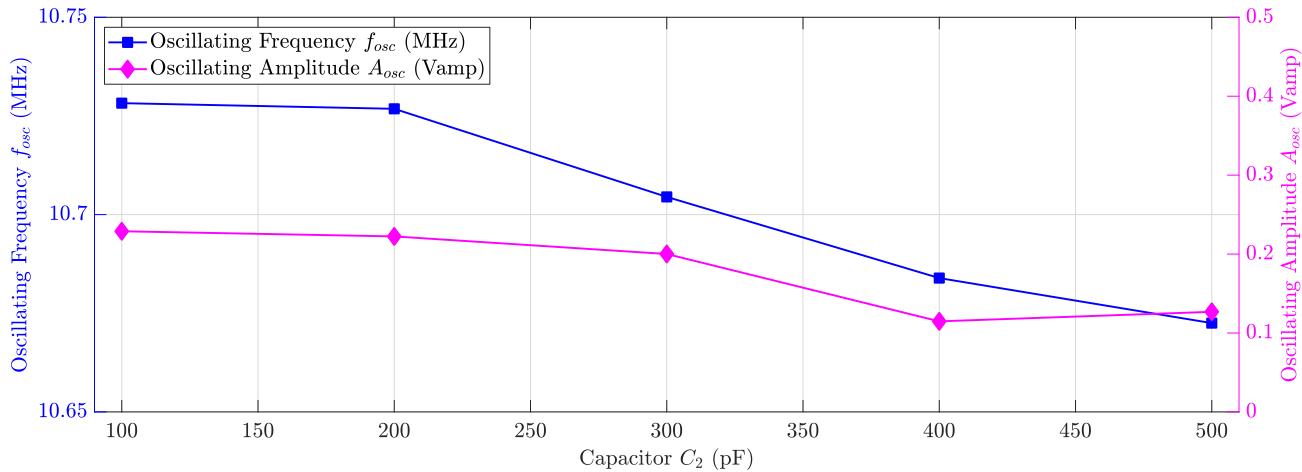


Figure 7: Oscillating frequency f_{osc} and amplitude A_{osc} vs. C_2 (LC oscillator)

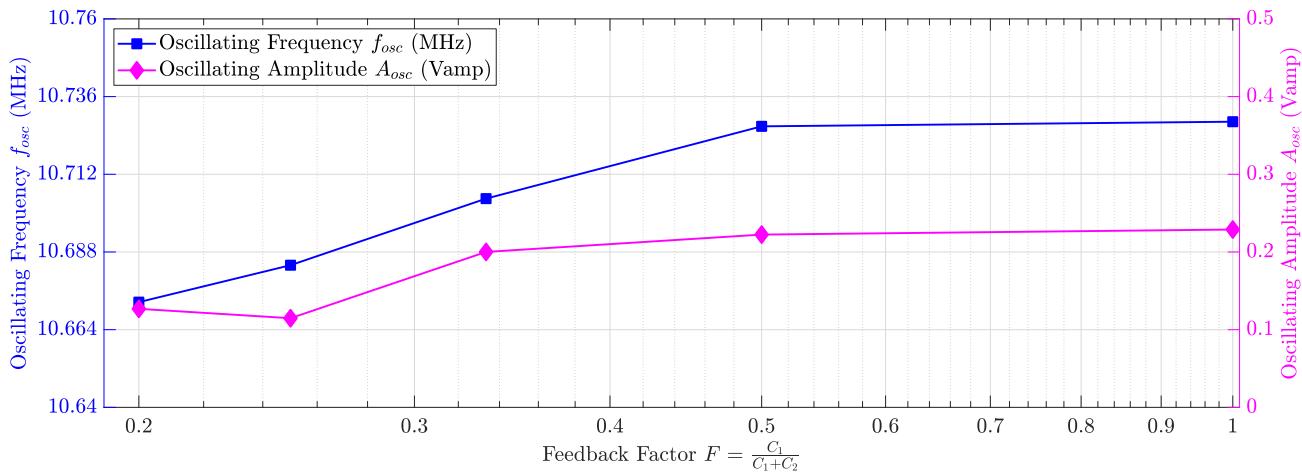


Figure 8: Oscillating frequency f_{osc} and amplitude A_{osc} vs. feedback factor F (LC oscillator)

5.1.3 振荡器的可调频率范围

固定 RW1 为逆时针 1/4 圈不变 (逆时针旋转较多时 RW1 过大, 晶体管 g_m 显著减小, 环路不能正常起振), 固定反馈系数为 1 不变 ($C_1 = C_2 = 100 \text{ pF}$), 调节可变电容 CV2 以改变振荡频率。得到振荡频率 f_{osc} 和幅度 A_{osc} 关于电容 CV2 的变化情况, 结果如下:

Table 3: Frequency tuning range (LC oscillator) @ $C_2 = 100 \text{ pF}$, RW1 = 1/4 turn CCW (counterclockwise)

CV2 (variable capacitor)	min cap	max cap
$I_{e,DC}$ (mA)	2.5510	2.3858
f_{osc} (MHz)	12.5314 (max)	10.7139 (min)
P_{osc} (V_{rms}^2)	0.1510	0.0707
A_{osc} (V _{amp})	0.5495	0.3760
V_{osc} (V _{pp})	1.0990	0.7521

总的来看变化趋势符合预期, 即电容值最大时振荡频率最低, 电容值最小时振荡频率最高, 两者保持负相关。结合前文对电路工作原理的分析, 三极管的等效输出阻抗与振荡角频率正相关, 故随着电容增大, 振荡频率减小, 使得等效输出负载减小, 增益减小, 故输出电压幅度减小。表中输出电压幅度随电容增大而减小, 符合理论预期。

5.1.4 分钟量级频率漂移测量

保持 RW1 为逆时针 1/4 圈, 反馈系数为 1 不变 ($C_1 = C_2 = 100 \text{ pF}$), 每隔一分钟测量一次振荡频率, 共计测量十次, 结果如 Table 4 所示:

Table 4: Frequency drift measurement (LC oscillator) @ $C_2 = 100 \text{ pF}$, RW1 = 1/4 turn CCW (counterclockwise)

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_{osc} (MHz)	10.8526	10.8524	10.8532	10.8515	10.8520	10.8528	10.8523	10.8519	10.8527	10.8521

由此计算相对频率漂移量:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\max\{f_{osc}\} - \min\{f_{osc}\}}{\text{mean}\{f_{osc}\}} \approx 1.5665 \times 10^{-4} = 0.0157\% \quad (4)$$

5.2 Crystal Sinusoidal Oscillator

5.2.1 直流工作点对振荡器的影响

保持其它参数不变，调整电阻 RW1 以改变三极管的直流工作点，用示波器测量 Emitter 电流和输出信号。记录数据并导出到电脑进行分析，得到振荡频率 f_{osc} 和幅度 A_{osc} (amplitude) 关于直流工作点 $I_{e,DC}$ 的变化情况，结果如 Table 5 和 Figure 9 所示：

Table 5: Oscillating frequency f_{osc} and amplitude A_{osc} vs. DC biasing current $I_{e,DC}$ (Crystal oscillator)

$I_{e,DC}$ (mA)	2.4668	2.0583	1.8018	0.9884
f_{osc} (MHz)	10.6995	10.6995	10.6995	10.6995
P_{osc} (V_{rms}^2)	0.3313	0.2301	0.1813	0.0553
A_{osc} (V _{amp})	0.8140	0.6784	0.6021	0.3324
V_{osc} (V _{pp})	1.6281	1.3569	1.2042	0.6649

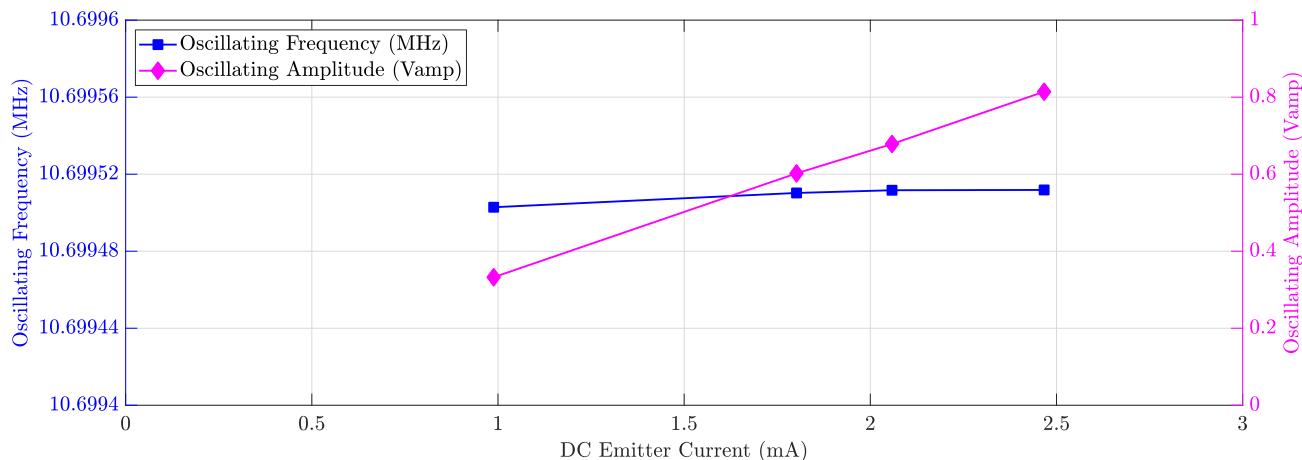


Figure 9: Oscillating frequency f_{osc} and amplitude A_{osc} vs. DC biasing current $I_{e,DC}$ (Crystal oscillator)

5.2.2 反馈系数对振荡器的影响

固定 RW1 为逆时针 1/4 圈不变 (逆时针旋转较多时 RW1 过大，晶体管 g_m 显著减小，环路不能正常起振)，改变跳线 J3/J4/J5 的连接方式以调整反馈系数 $F = \frac{C_1}{C_1+C_2}$ 。用示波器测量输出信号，记录数据并导出到电脑进行分析，得到振荡频率 f_{osc} 和幅度 A_{osc} 关于反馈系数 F 的变化情况，如 Table 2 和 Figure 8 所示：

Table 6: Oscillating frequency f_{osc} and amplitude A_{osc} vs. feedback factor F (Crystal oscillator)

C_2 (pF)	100.0	200.0	300.0	400.0	500.0
F (FB factor)	1.0000	0.5000	0.3333	0.2500	0.2000
$I_{e,DC}$ (mA)	1.9735	1.8172	1.7374	1.6478	1.6076
f_{osc} (MHz)	10.6995	10.6994	10.6994	10.6994	10.6994
P_{osc} (V_{rms}^2)	0.2149	0.1224	0.0709	0.0396	0.0268
A_{osc} (V _{amp})	0.6556	0.4949	0.3765	0.2815	0.2316
V_{osc} (V _{pp})	1.3111	0.9897	0.7530	0.5630	0.4632

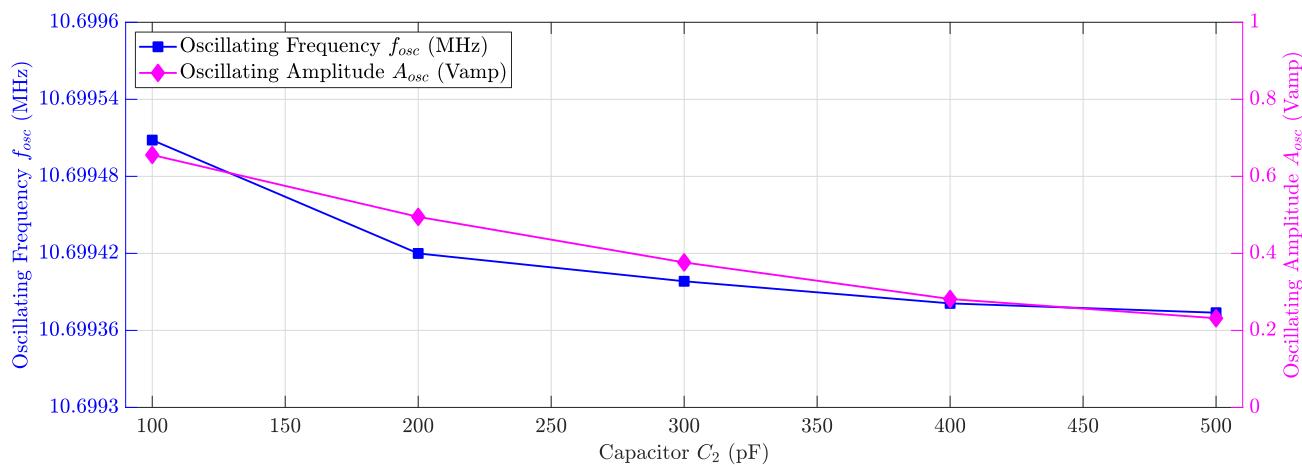


Figure 10: Oscillating frequency f_{osc} and amplitude A_{osc} vs. capacitance C_2 (Crystal oscillator)

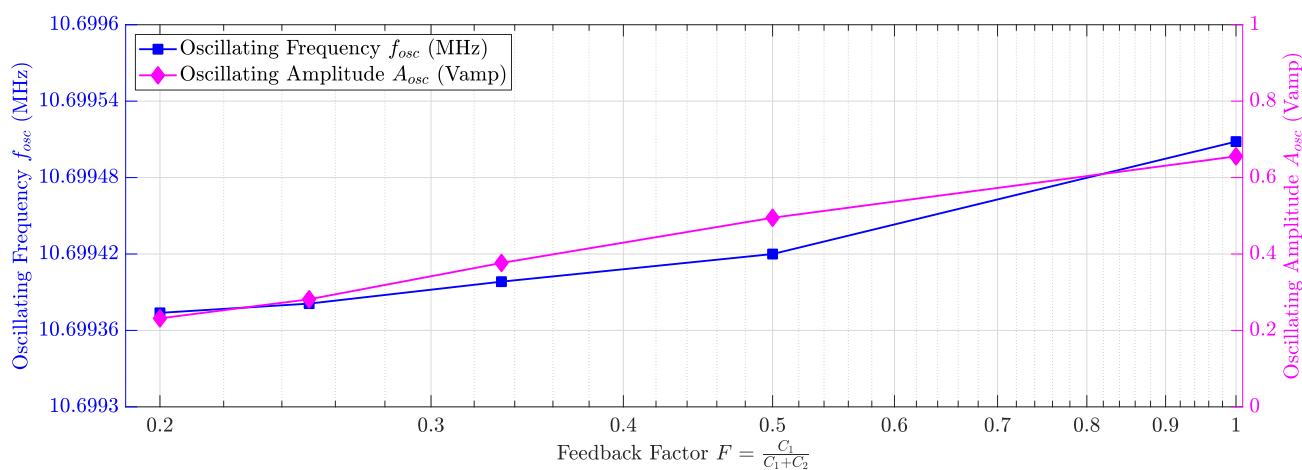


Figure 11: Oscillating frequency f_{osc} and amplitude A_{osc} vs. feedback factor F (Crystal oscillator)

5.2.3 振荡器的可调频率范围

Table 7: Frequency tuning range (Crystal Oscillator) @ $C_2 = 100$ pF, RW1 = 1/4 turn CCW (counterclockwise)

CV2 (variable capacitor)	min	max
$I_{e,DC}$ (mA)	2.8970	2.3575
f_{osc} (MHz)	10.6995 (max)	10.6988 (min)
P_{osc} (V _{rms} ²)	0.3754	0.0576
A_{osc} (V _{amp})	0.8665	0.3393
V_{osc} (V _{pp})	1.7330	0.6786

总的来看变化趋势符合预期，即电容值最大时振荡频率最低，电容值最小时振荡频率最高，两者保持负相关。结合前文对电路工作原理的分析，三极管的等效输出阻抗与振荡角频率正相关，故随着电容增大，振荡频率减小，使得等效输出负载减小，增益减小，故输出电压幅度减小。表中输出电压幅度随电容增大而减小，符合理论预期。

5.2.4 分钟量级频率漂移测量

保持 RW1 为逆时针 1/4 圈, 反馈系数为 1 不变 ($C_1 = C_2 = 100 \text{ pF}$), 每隔一分钟测量一次振荡频率, 共计测量十次, 结果如 Table 8 所示:

Table 8: Frequency drift measurement (Crystal oscillator) @ $C_2 = 100 \text{ pF}$, $RW1 = 1/4$ turn CCW (counterclockwise)

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_{osc} (MHz)	10.69951	10.69948	10.69952	10.69947	10.69949	10.69950	10.69946	10.69953	10.69945	10.69954

由此计算相对漂移量:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\max\{f_{osc}\} - \min\{f_{osc}\}}{\text{mean}\{f_{osc}\}} \approx 8.4116 \times 10^{-6} = 0.000841\% \quad (5)$$

相比 LC Oscillator, Crystal Oscillator 的频率漂移量显著减小, 频率稳定性更好。

5.3 LC/Crystal Oscillator Comparison

上面两个小节的结果表明, 晶体振荡器调谐范围较小 (其实这正是实际参考频率源所希望的特性), 且在频率稳定性方面远优于 LC 振荡器。具体对比如 Table 9 所示:

Table 9: Performance comparison between LC and Crystal Oscillators

Parameter	Center Frequency $f_c = \frac{f_{\max}+f_{\min}}{2}$	Tuning Factor $K = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}$	Frequency Variation $\frac{\Delta f}{f_0}$
LC Oscillator	11.6227 MHz	1.170	1.5665×10^{-4}
Crystal Oscillator	10.6991 MHz	1.000065	8.4116×10^{-6}

6 思考题

6.1 本次实验的 LC/Crystal 振荡器的输出波形质量如何？是否有明显噪声、失真或其他异常现象？

实际应用中用作参考频率源的振荡器，其输出波形质量要求较高，应尽量接近理想正弦波形，且保持频率和幅度的稳定。不幸的是，尽管我们已经尝试了“调整直流工作点”和“在输出端接悬空负载线”等方法来改善 LC/Crystal 振荡器的输出波形，但本次实验中所得到的输出波形质量基本都很差，存在明显的失真和自激现象，仅在接有悬空负载线的个别参数下不出现自激振荡，但波形失真仍然较严重，如 Figure 12 所示：

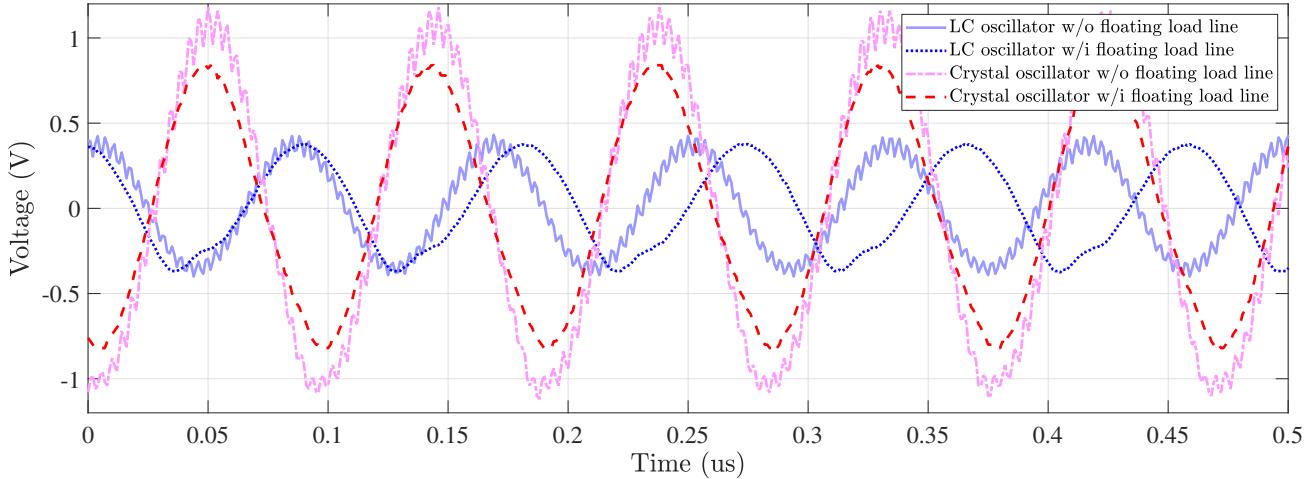


Figure 12: Output waveforms of LC/crystal oscillators under different conditions

不妨对上图第三个波形 (Crystal oscillator w/o floating load line) 作详细讨论，其傅里叶分析结果如下：

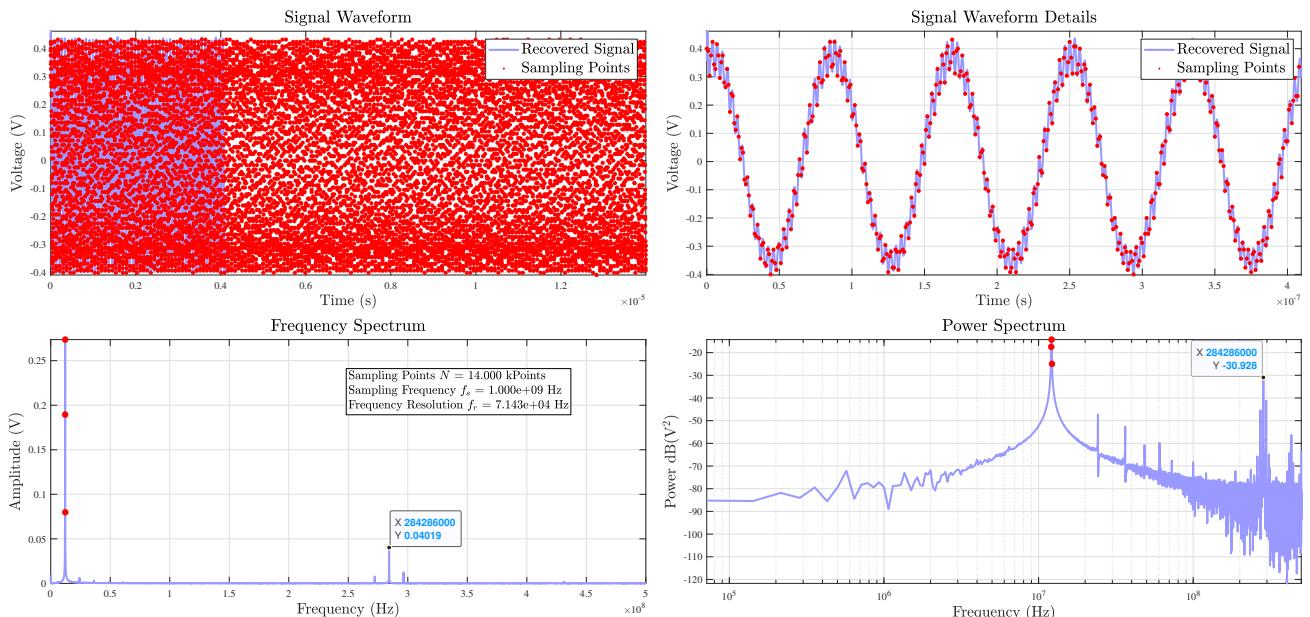


Figure 13: Fourier analysis of the 3rd waveform in Figure 12 (crystal oscillator w/o floating load line)

上图可以看出自激振荡频率约为 284.286 MHz，注意上图 DFT 并没有使用窗函数，为提高计算精确，我们利用“窗函数 + 积分法”提取出高频自激振荡的具体频率和幅度：

$$f_0 = 284.3102 \text{ MHz}, \quad A_0 = 49.2009 \text{ mV}_{\text{amp}} \quad (6)$$

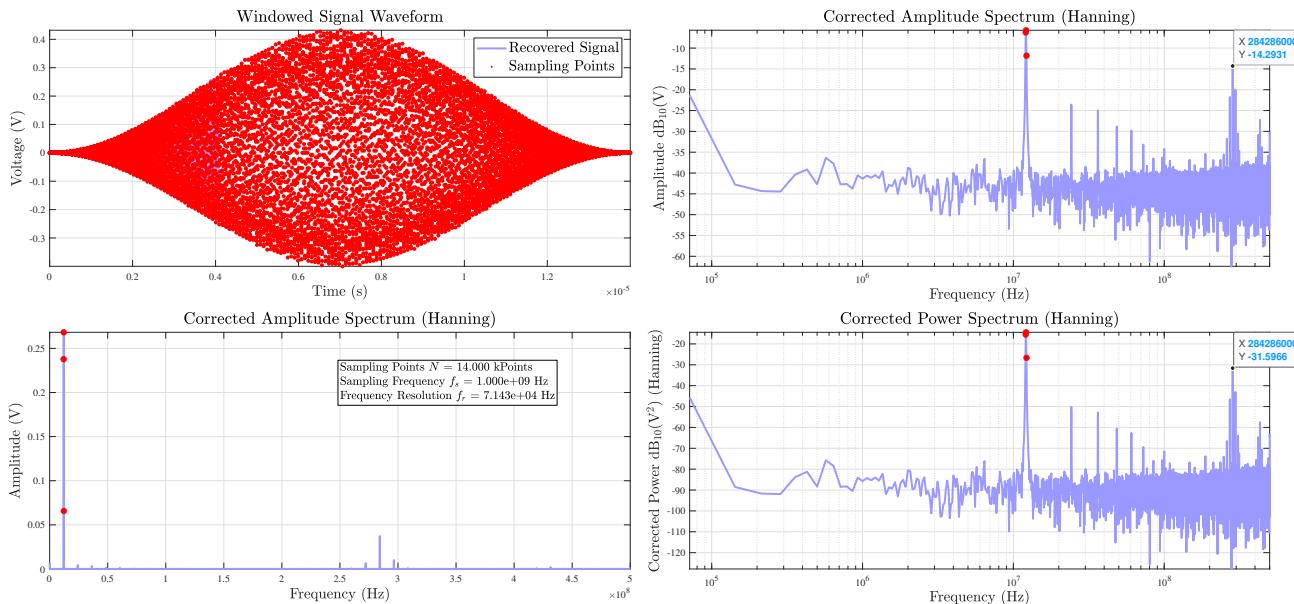


Figure 14: High-frequency self-oscillation extraction using Hanning window + integration method

在得到上述四个有自激或无自激的波形后，由于后续实验多次调整过电路参数，实验结束再来调整时，甚至难以复现没有高频自激的波形，说明本次实验所用的振荡器电路的设计存在较大缺陷。导致环路增益在约 284.3102 MHz 处大于 1 (相位裕度早已小于零)，从而引发高频自激振荡，严重影响了输出波形质量。

6.2 本次实验的 LC/Crystal 振荡器的相位噪声性能如何，能否满足实际通信系统的参考频率源要求？

相位噪声这部分涉及的理论基础较多，包括但不限于 phase noise 的定义和计算方法、各种 jitter 类型的定义和计算方法等，由于篇幅有限，这里不再赘述。若无特别说明，本文利用 zero-crossing method 提取相位时间序列，计算相位噪声谱。

四个波形中的第二、第四个波形 (LC/Crystal oscillator w/i floating load line) 基本观察不到自激振荡，仅带有一定波形失真，对其进行相位噪声分析，结果如 Figure 15 和 Figure 16 所示：

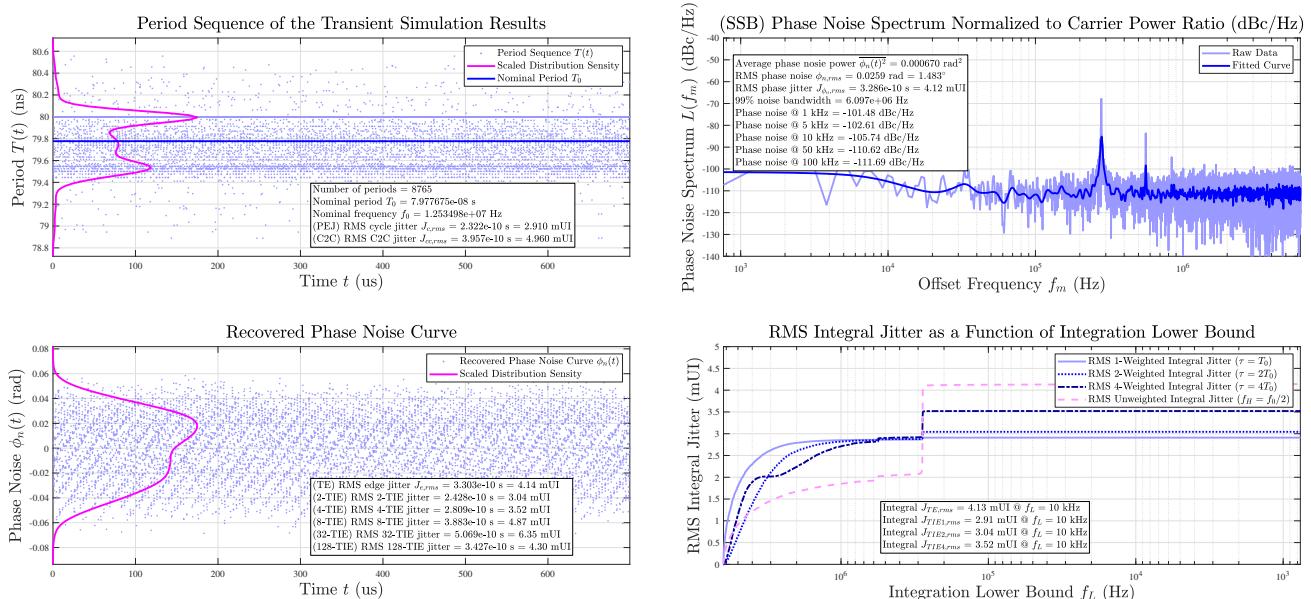


Figure 15: Phase noise analysis of the 2nd waveform in Figure 12 (LC oscillator w/i floating load line)

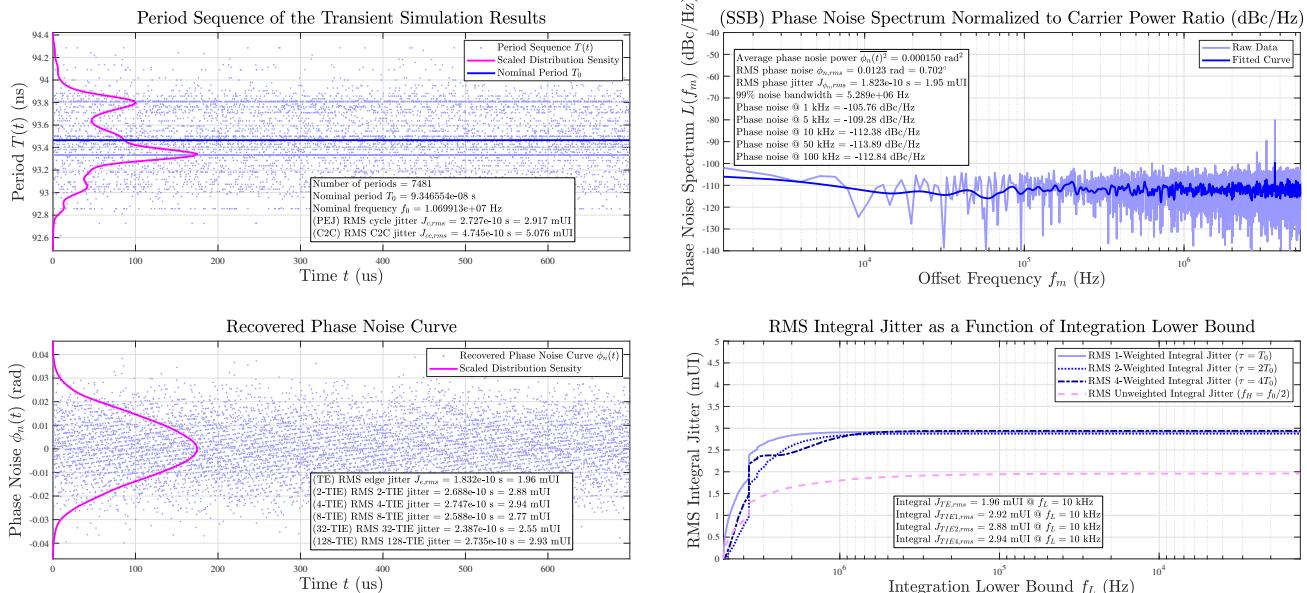


Figure 16: Phase noise and jitter analysis of the 4th waveform in Figure 12 (Crystal oscillator w/i floating load line)

上图中，周期抖动 $J_c(t)$ 的值出现较明显离散化现象，是因为所用示波器内部 ADC 精度有限 (8-bit)，导致采样波形的上升沿/下降沿位置存在量化误差，从而影响了 zero-crossing method 的提取精度。但从整体来看，上述 LC/Crystal 振荡器的相位噪声/抖动分析结果仍具有较高可靠性。
LC/Crystal 振荡器的关键相位噪声/抖动指标总结如下：

Table 10: Phase noise and jitter performance of the LC/crystal oscillator

Parameter	The LC Oscillator	The Crystal Oscillator
Nominal Frequency f_0	12.53 MHz	10.70 MHz
RMS Phase Noise $\phi_{n,rms}$	0.0259 rad (1.483°)	0.0123 rad (0.702°)
(TE) RMS Edge Jitter $J_{e,rms}$	330.3 ps (4.140 mUI)	183.2 ps (1.960 mUI)
(PEJ) RMS Period Jitter $J_{p,rms}$	232.2 ps (2.910 mUI)	272.7 ps (2.917 mUI)
(C2C) RMS C2C Jitter $J_{cc,rms}$	395.7 ps (4.960 mUI)	474.5 ps (5.076 mUI)
Phase Noise @ 1 kHz Offset	-101.48 dBc/Hz	-105.76 dBc/Hz
Phase Noise @ 10 kHz Offset	-105.74 dBc/Hz	-112.38 dBc/Hz
Phase Noise @ 100 kHz Offset	-111.69 dBc/Hz	-112.84 dBc/Hz

两张相位噪声/抖动分析图和上表数据均表明，crystal oscillator 的相位噪声/抖动性能更优，不过 LC/crystal 两者都基本能满足一般系统对 10 MHz 级参考频率源的要求（如果不存在高频自激振荡的话）。

6.3 多数同学在本次实验采用示波器光标来测量振荡频率和幅度，这种方法的精度如何，是否能满足实验要求？

在 LC oscillator 中，振荡频率随电路参数（如直流工作点、电容值等）的变化较大，频率测量的精度要求相对较低，示波器光标测量频率的精度虽差强人意，但勉强还能满足实验要求；而在 Crystal oscillator 中则完全不能满足频率测量的精度要求，因为此时频率变化范围极小（约 $10.6995 \text{ MHz} \pm 0.0007 \text{ MHz}$ ），示波器光标测量频率的精度远远不能满足实验要求，必须使用其它更高精度的测量方法（如频谱分析）才能得到较为可靠的结果。

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: LC/Crystal Sinusoidal Oscillator 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) 掌握正弦波振荡电路的相关理论
- (2) 掌握电容三点式 LC 振荡电路的基本原理, 熟悉各元件功能; 熟悉静态工作点、耦合电容、反馈系数、等效 Q 值对振荡器振荡幅度和频率的影响。
- (3) 比较 LC 振荡器和晶体振荡器的频率稳定度, 加深对晶体振荡器频率稳定度较高的原因的理解

2 实验仪器

- (1) 高频实验箱 - LC/Crystal 正弦波振荡电路实验板 (……)
- (2) 示波器 RIGOL MSO2202A (……)
- (3) 信号发生器 GW INSTEK AFG-2225 (……)
- (4) 万用表 LINIT- UT61A (……)

3 实验原理

3.1 LC Sinusoidal Oscillator

三点式 LC 正弦振荡器 (three-point LC sinusoidal oscillator, 后文简称 TPSO) 是正弦振荡器最常见的拓扑结构之一, 它利用 LC 谐振回路作为频率选择网络, 通过正反馈实现自激振荡。

根据反馈网络的不同, 三点式 LC 振荡器主要分为以下三种类型:

- (1) Colpitts Oscillator (考毕兹): 最基本的电容式 TPSO (three-point sinusoidal oscillator), 由两个电容和一个电感构成谐振回路;
- (2) Clapp Oscillator (克拉泼): 在 Colpitts Oscillator 基础上, 电感支路串联一个小电容以提高振荡稳定性;
- (3) Seiler Oscillator (西勒): 在 Clapp Oscillator 基础上, 电感两端并联一个可变电容以扩大调谐范围。

下面分别对其这三种 LC 振荡器作简要介绍。

3.1.1 Colpitts Oscillator (考毕兹振荡器)

Colpitts Oscillator 是电容式 TPSO 的最基本形式，由一个晶体管、两个电容和一个电感构成核心振荡部分，如 Figure 1 所示。其结构最为简单，但存在一个主要缺点：反馈系数由电容比值 $\frac{C_1}{C_2}$ 决定，当通过可变电容 C_1 或 C_2 来调整振荡频率时，会不可避免地改变反馈系数，引起输出振幅不稳定甚至停振。

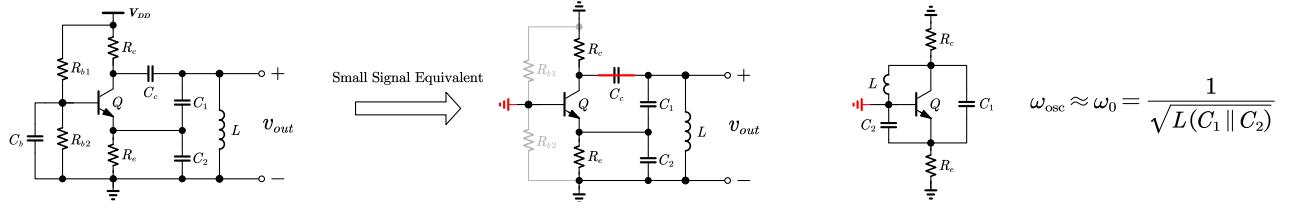
$$\omega_{osc} \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_\Sigma}}, \quad C_\Sigma = C_1 \parallel C_2 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

$$\text{start-oscillation condition: } g_m > \frac{(1 - \omega_{osc}^2 LC_2)}{R_{L,eq}} + \frac{(1 - \omega_{osc}^2 LC_1)}{R_e \parallel r_\pi} \quad (2)$$

$$\text{where: } R_{L,eq} = R_L \parallel R_p, \quad R_p = \omega_{osc} L Q_0 \quad (3)$$

考毕兹振荡器

Colpitts Oscillator (CB)



回路总电容 $C_\Sigma = C_1 \parallel C_2$ 即为电感两端等效电容

Colpitts Oscillator (CE)

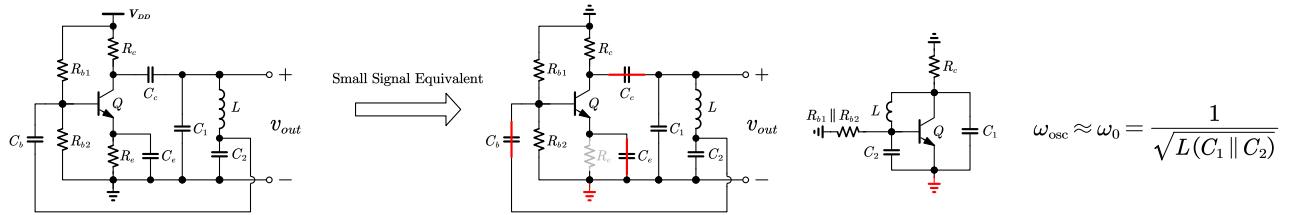


Figure 1: Colpitts Oscillator (考毕兹振荡器) Schematic and The High-Frequency Equivalent Circuit

3.1.2 Clapp Oscillator (克拉泼振荡器)

如 Figure 2 所示，Clapp Oscillator (克拉泼振荡器) 在 Colpitts (考毕兹) 的电感支路中串联了一个小电容 C_3 ，使得回路的总谐振电容主要由这个数值较小的 C_3 决定，而原来负责提供反馈的 C_1 和 C_2 可以取较大值；这样，使用可变电容 C_3 来调整振荡频率时，对反馈系数的影响就微乎其微，大大提高了频率稳定性。然而，克拉泼电路引入了一个新限制：为了保持 C_3 对总电容的主导作用，其值必须很小，这导致谐振时回路阻抗(等效负载阻抗)降低。因此，当调高频率(减小 C_3)时，振荡幅度会显著下降，使得它在高频段的调谐范围很窄，实用性受限。

克拉泼振荡器

Clapp Oscillator (CB)

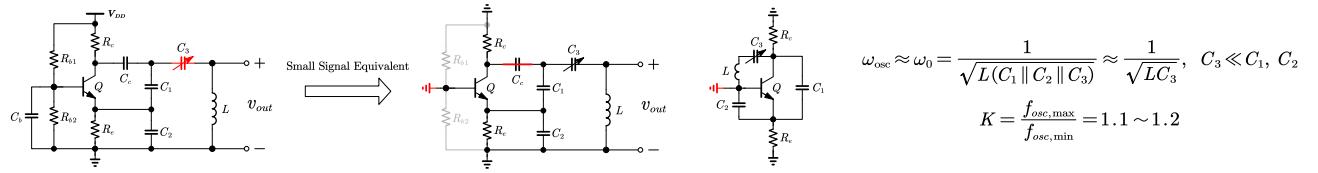


Figure 2: Clapp Oscillator (克拉泼振荡器) Schematic and The High-Frequency Equivalent Circuit

3.1.3 Seiler Oscillator (西勒振荡器)

如 Figure 3 所示, Seiler Oscillator (西勒振荡器) 是 Clapp (克拉泼) 电路的进一步改良, 在电感两端并联了一个可变电容 C_4 (其它三个电容不变), 由 C_4 来调节振荡频率。这种设计的妙处在于, 调谐时不仅不影响反馈系数, 而且回路阻抗 (等效负载阻抗) 在很宽的频率范围内较为平缓。因此, 西勒振荡器在保持高频率稳定性的同时, 获得了非常宽的调谐范围, 且在整个范围内输出幅度较为均匀, 特别适合于需要宽范围、高稳定度调谐的场合, 使在实际应用中更为常见。

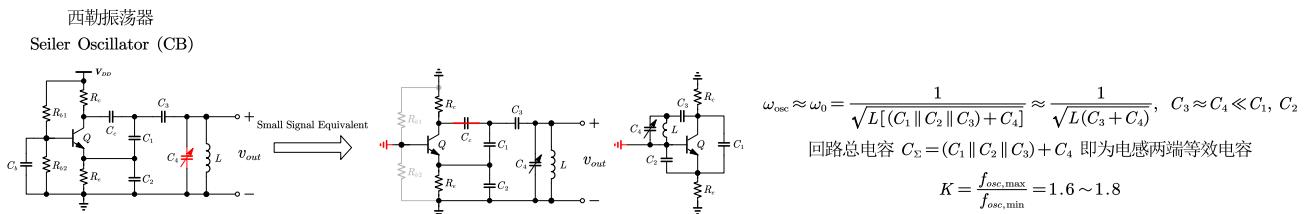


Figure 3: Seiler Oscillator (西勒振荡器) Schematic and The High-Frequency Equivalent Circuit

3.2 Quartz Crystal Oscillators

晶体正弦振荡器 (crystal sinusoidal oscillator, 后文简称 CSO) 是利用石英晶体的压电效应和高品质因数特性来实现高频率稳定振荡的电路。

晶体振荡器的核心是石英晶体谐振器 (quartz crystal resonator), 其等效电路如 Figure 4 所示。晶体谐振器在其串联谐振频率 ω_s 和并联谐振频率 ω_p 附近表现出极高的品质因数 Q , 使得它能够在给定频率范围内实现非常稳定的振荡。

具体而言, 石英晶体 (quartz crystal) 的等效电路、关键公式和阻抗特性如下:

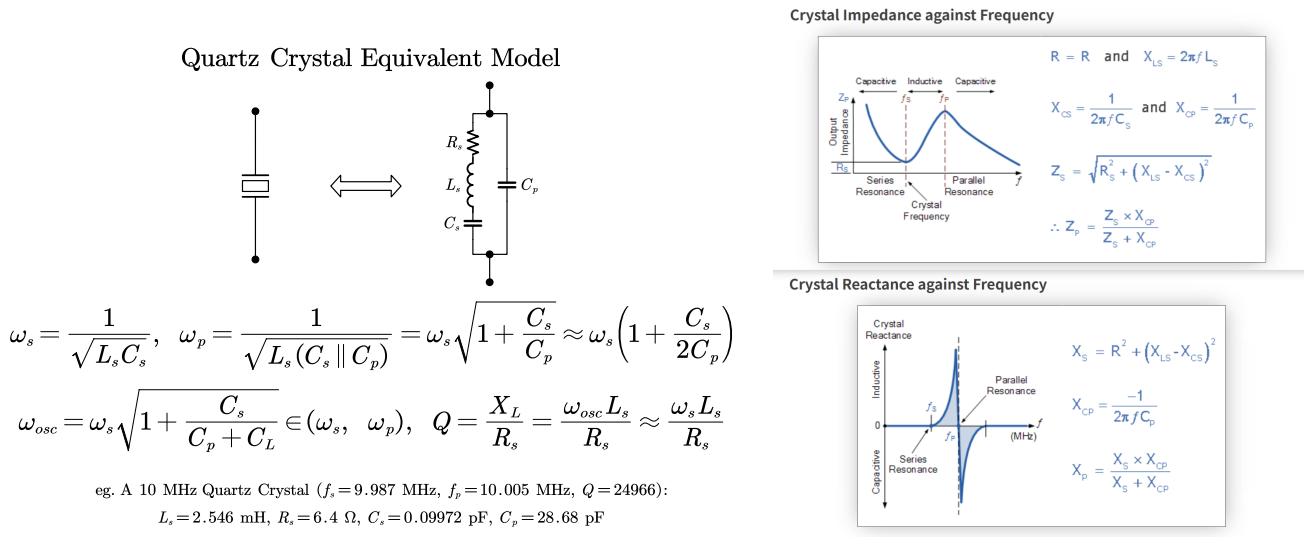


Figure 4: Quartz Crystal Equivalent Circuit and Its Impedance Characteristic

3.3 实验电路简要分析

本次实验电路如 Figure 5 所示。电路共分为两级，第一级为 LC/Crystal 正弦波振荡电路，第二级为 Emitter Follower (Common Collector) 缓冲输出级，用于提高带负载能力，同时降低输出端负载对振荡电路的影响。

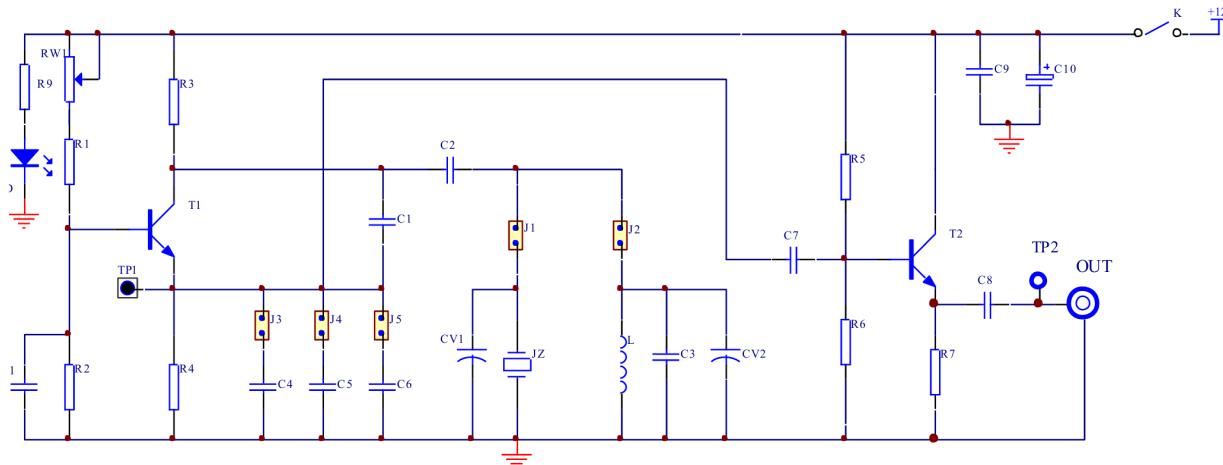


Figure 5: Schematic of LC/Crystal Sinusoidal Oscillator Experiment Circuit

通过改变跳线 J1、J2 的连接方式，可以实现两种不同类型的振荡器电路：

- (1) LC Sinusoidal Oscillator: 保持 J3 连接，断开 J1 而连接 J2，构成 LC 正弦波振荡器，通过可变电容 CV2 和 J4/J5 来微调振荡频率；
- (2) Crystal Sinusoidal Oscillator: 保持 J3 连接，断开 J2 而连接 J1，构成晶体正弦波振荡器，通过可变电容 CV1 来微调振荡频率。

4 实验内容与步骤

注：(1) 由于本次实验所有数据均需导出到电脑在 MATLAB 中进行分析和处理，因此报告中不再单独给出用于记录数据的空白表格，仅在数据处理完成后附上得到的图片或结果表格 (实验中注意保存好原始数据文件以备后续处理使用)；(2) 本次实验过程中，示波器探头默认选择 X10 档，且每次更改电路连接前需要先断电。

4.1 LC Sinusoidal Oscillator

4.1.1 静态工作点对振荡器的影响

- (1) 调整电阻 RW1，用示波器在 TP1 测量晶体管的 Emitter 电流情况 $I_E = \frac{V_{TP1}}{R_4}$ ，在 TP2 (OUT) 处测量振荡频率和幅度，观察电流 I_E 对振荡工作状态 (频率和幅度) 的影响。
- (2) 将示波器数据导出到电脑，使用 MATLAB 对数据进行分析，绘制 $I_{E,DC}$ 与振荡频率 f_{osc} 、振荡幅度 $V_{osc,amp}$ 的关系曲线。
- (3) 可能用到的电路参数： $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$

4.1.2 反馈系数对振荡器的影响

- (1) 改变跳线 J3/J4/J5 的连接方式，相当于调整位于 Collector-GND 之间电容 C_2 的值，从而改变反馈系数 $F = \frac{C_1}{C_1+C_2}$ ，其中 $C_2 = J_3 \cdot C_3 + J_4 \cdot C_4 + J_5 \cdot C_5$

- (2) 将示波器数据导出到电脑，使用 MATLAB 对数据进行分析，绘制反馈系数 F 与振荡频率 f_{osc} 、振荡幅度 $V_{osc,amp}$ 的关系曲线。
- (3) 可能用到的电路参数： $C_1 = 100 \text{ pF}$, $C_3 = 100 \text{ pF}$, $C_4 = 200 \text{ pF}$, $C_5 = 200 \text{ pF}$

4.1.3 测量振荡器的可调频率范围

根据前两小节得到的结果，设置合适的静态工作点和反馈系数，使得振荡器能够稳定振荡。然后保持其它参数不变，调节可变电容 CV2，同时用示波器在 TP2 (OUT) 处测量输出振荡信号，将采样数据导出到电脑，使用 MATLAB 提取振荡频率 f_{osc} 和振荡幅度 $V_{osc,amp}$ 。最终得到当前设置下振荡器的最大可调频率范围及对应的振荡幅度变化情况。

4.1.4 分钟量级频率漂移测量

设置合适的静态工作点和反馈系数，待电路稳定后，每隔一分钟用示波器在 OUT 端测量一次，导出数据到电脑并使用 MATLAB 提取振荡频率 f_{osc} 。共计测量十次，记录每次测量的时间和对应的振荡频率值，绘制频率随时间变化的曲线，并计算相对变化量 $\frac{\Delta f_{osc}}{f_{osc,0}}$ ，由此评估振荡器的频率漂移程度。

4.1.5 正弦振荡信号相位噪声测量与分析

设置合适的静态工作点和反馈系数，待电路稳定后，使用示波器对输出信号进行采样，导出数据到电脑并使用 MATLAB 对信号进行分析，计算并绘制相位噪声谱，分析振荡器的相位噪声特性。

4.2 Crystal Sinusoidal Oscillator

连接跳线 J1 而断开 J2，构成晶体正弦波振荡器。然后重复上一小节的各项实验内容与步骤，记录各项数据并进行分析和作图。

4.3 Comparison between LC and Crystal Sinusoidal Oscillators

根据前两小节得到的 LC/Crystal Oscillator 各项性能数据，进行对比分析，重点比较两种振荡器在频率稳定性、调谐范围和相位噪声等方面的差异，并结合理论简要分析其原因。

5 思考题

5.1 观察 LC 振荡器和晶体振荡器的输出波形，分析噪声来源，并指出如何减小噪声。

附录 C MATLAB Codes

```

1 NCE-05 Sinusoidal Oscillator (2025.12.04)
2
3 crossing time 函数构建
4 % sine wave 生成
5 clc, clear
6 f = 10e6;
7 T = 1/f;
8 omega = 2*pi*f;
9 Je_rms_mUI = 5;
10 % 带有 AM/PM noise + guass voltage noise + 杂七杂八噪声的信号
11 v_t = @(t) (1 + rand/10)*cos(omega * (t + randn*(Je_rms_mUI/1e3*T))) ...
12     + rand/10*cos(rand(size(t)) .* 10*omega .* (t + randn*(Je_rms_mUI/1e3*T))) + rand/10;
13
14 % 对信号进行采样
15 Je_rms_mUI = 10;
16 fs = f*(pi*10);
17 %fs = f*(32);
18 N = 2048*4*12;
19 t_n1 = 0:1/fs:(N-1)/fs;
20 v_n1 = v_t(t_n1);
21
22 time_array = 0:0.1/fs:(N-1)/fs;
23 MyPlot(time_array(1:3000), v_t(time_array(1:3000)));
24
25 % 不加窗直接作 DFT (window = none, namely uniform)
26 stc1 = MyAnalysis_Spectrum_v1_20251124(v_n1, fs, 1, 10);
27 stc1.plot4.axes.YLim = [-100 0];
28 %MyExport_png(100)
29
30 % 加窗
31 stc2 = MyAnalysis_Spectrum_multiWindow(v_n1, fs, 1);
32 stc2.plot4.axes.YLim = [-100 0];
33 %MyExport_png(100)
34
35 % crossing-time 函数测试
36 V_hysteresis = 0.1;
37 stc1 = MyAnalysis_FindCrossingTime(v_n1, fs, V_hysteresis);
38 edge_n = stc1.edge_pos((1 + 4):(end - 4));
39 % edge_n = find_sine_crossing_times(v_n, fs, 0, 'rising');
40
41 freq = 1./diff(edge_n);
42
43 % MyAnalysis_PhaseNoise_v1_20251106(edge_n', 1);
44 MyAnalysis_PhaseNoise_v2_20251112(edge_n', 1);
45
46
47 NCE-05 示波器数据读取与保存
48 clc, clear
49 address = 'USB0::0x1AB1::0x04B0::DS2F203700277::INSTR';
50 depth_level = 4; % 1 ~ 4
51 % rate_level = 2;
52
53 ch1 = 1;
54 ch2 = 1;
55
56 % MyOscilloscope_MS02202A_Read_TwoCh(address, 0);
57
58 if ch1 == 1
59     % CH1

```

```

60     flag_plot = 0;
61     ch = 1;
62     stc1 = MyOscilloscope_MS02202A_Read(address, ch, depth_level, flag_plot);
63     stc1.stc_spectrum.plot4.axes.XLim = [0.1e6, 0.5e9];
64     amplitude = stc1.stc_spectrum.STC.y_oneSided;
65     freq = stc1.stc_spectrum.STC.fAxis_oneSided;
66     power = stc1.stc_spectrum.STC.power_oneSided;
67     fr = stc1.stc_spectrum.STC.fr;
68     fs = stc1.stc_spectrum.STC.fs;
69
70     v_n1 = stc1.data';
71     t_n1 = stc1.time;
72     stc1 = MyAnalysis_Spectrum_hanningWindow(v_n1, fs, 1, 10);
73 end
74
75 if ch2 == 1
76     % CH1
77     flag_plot = 0;
78     ch = 2;
79     stc2 = MyOscilloscope_MS02202A_Read(address, ch, depth_level, flag_plot);
80     stc2.stc_spectrum.plot4.axes.XLim = [0.1e6, 0.5e9];
81     amplitude = stc2.stc_spectrum.STC.y_oneSided;
82     freq = stc2.stc_spectrum.STC.fAxis_oneSided;
83     power = stc2.stc_spectrum.STC.power_oneSided;
84     fr = stc2.stc_spectrum.STC.fr;
85     fs = stc2.stc_spectrum.STC.fs;
86
87     v_n2 = stc2.data';
88     t_n2 = stc2.time;
89     stc2 = MyAnalysis_Spectrum_hanningWindow(v_n2, fs, 1, 10);
90 end
91
92 %% 保存采样数据
93
94 name = '4.2.1 - (1) RW1 最小 (顺时针拧到底, 此时 TP1 电压最高)';
95 name = '4.2.1 - (2) RW1 大 1 个单位 (0.25 圈)';
96 name = '4.2.1 - (3) RW1 大 2 个单位 (0.5 圈)';
97 name = '4.2.1 - (4) RW1 最大时 (逆时针约 0.75 圈), 已不能正常 10 MHz 左右振荡, 环路出现自激振荡';
98
99 name = '4.1.2 - (1) J3J4J5 = 100 (C2 = 100 pF)';
100 name = '4.1.2 - (2) J3J4J5 = 010 (C2 = 200 pF)';
101 name = '4.1.2 - (3) J3J4J5 = 110 (C2 = 300 pF)';
102 name = '4.1.2 - (4) J3J4J5 = 011 (C2 = 400 pF)';
103 name = '4.1.2 - (5) J3J4J5 = 111 (C2 = 500 pF)';
104
105 name = '4.2.2 Crystal - (1) J3J4J5 = 100 (C2 = 100 pF)';
106 name = '4.2.2 Crystal - (2) J3J4J5 = 010 (C2 = 200 pF)';
107 name = '4.2.2 Crystal - (3) J3J4J5 = 110 (C2 = 300 pF)';
108 name = '4.2.2 Crystal - (4) J3J4J5 = 011 (C2 = 400 pF)';
109 name = '4.2.2 Crystal - (5) J3J4J5 = 111 (C2 = 500 pF)';
110
111 name = '4.1.3 LC - (1) 最长周期 @ C2 = 100 pF, RW1 = min (输出接线)';
112 name = '4.1.3 LC - (2) 最短周期 @ C2 = 100 pF, RW1 = min (输出接线)';
113
114 name = '4.2.3 Crystal - (1) 最长周期 @ C2 = 100 pF, RW1 = min (输出接线)';
115 name = '4.2.3 Crystal - (2) 最短周期 @ C2 = 100 pF, RW1 = min (输出接线)';
116
117 name = '4.1.5 Crystal - 用于相位噪声分析的输出波形 (100 MHz, 7400 periods)'
118
119 export_name = ['D:/aa_MyExperimentData/Raw data backup/', datestr(now, 'yyyy-mm-dd_HH-MM-SS'), '__', 'NCE-05_volt_vs_time__', name];
120

```

```
121 | writematrix([v_n1', t_n1', v_n2', t_n2'], export_name + ".txt", 'Delimiter', 'tab');
```

```
122 |  
123 |  
124 | MyYYPlot(t_n1, v_n1, t_n2, v_n2);  
125 | xlim([0, 1e-06])  
126 | MyFigure_ChangeSize_2048x512  
127 |  
128 | %% 相位噪声分析  
129 |  
130 | %% LC  
131 | filename = "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-25-22__NCE-05__volt_vs_time__4.1.5  
132 |     Crystal - 用于相位噪声分析的输出波形 (100 MHz, 7400 periods).txt";  
133 | data = readmatrix(filename);  
134 |  
135 | v_n = data(:, 3);  
136 | t_n = data(:, 4);  
137 | fs = 1/(t_n(2) - t_n(1))  
138 |  
139 | V_hysteresis = 0.1;  
140 | stc = MyAnalysis_FindCrossingTime(v_n, fs, V_hysteresis);  
141 | edge_n = stc.edge_pos((1 + 4):(end - 4));  
142 | stc = MyAnalysis_PhaseNoise_v2_20251112(edge_n', 1);  
143 |  
144 | stc.stc3.axes.YLim = [-140 -40];  
145 | stc.stc3.text.Position(2) = -100;  
146 | stc.stc4.axes.YLim = [0 5];  
147 | stc.stc4.text.Position(2) = 0.3;  
148 | stc.stc4.text.Position(1) = stc.stc4.text.Position(1)/10;  
149 |  
150 | %% Crystal  
151 | filename = "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-03-55__NCE-05__volt_vs_time__4.2.5  
152 |     Crystal - 用于相位噪声分析的输出波形.txt";  
153 | filename = "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-14-39__NCE-05__volt_vs_time__4.2.5  
154 |     Crystal - 用于相位噪声分析的输出波形 (100 MHz, 7400 periods).txt";  
155 | filename = "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-16-29__NCE-05__volt_vs_time__4.2.5  
156 |     Crystal - 用于相位噪声分析的输出波形 (100 MHz, 7400 periods).txt";  
157 | data = readmatrix(filename);  
158 |  
159 | v_n = data(:, 3);  
160 | t_n = data(:, 4);  
161 | fs = 1/(t_n(2) - t_n(1))  
162 |  
163 | V_hysteresis = 0.1;  
164 | stc = MyAnalysis_FindCrossingTime(v_n, fs, V_hysteresis);  
165 | edge_n = stc.edge_pos((1 + 4):(end - 4));  
166 | stc = MyAnalysis_PhaseNoise_v2_20251112(edge_n', 1);  
167 |  
168 | stc.stc3.axes.YLim = [-140 -40];  
169 | stc.stc3.text.Position(2) = -100;  
170 | stc.stc4.axes.YLim = [0 5];  
171 | stc.stc4.text.Position(2) = 0.3;  
172 | stc.stc4.text.Position(1) = stc.stc4.text.Position(1)/10;  
173 |  
174 |  
175 |%% 计算并提取信号幅度  
176 | L = 5;  
177 | num = 0;  
178 | N = stc1.STC.N;  
179 | i = 1;  
180 | for w = [hanning(N)]  
181 |     if i == 1
```

```

179     ECF = 1/rms(w)^2;
180     ACF = 1/mean(w);
181 else
182     ECF = [ECF, 1/rms(w)^2];
183     ACF = [ACF, 1/mean(w)];
184 end
185
186 i = i + 1;
187 end
188
189 disp('-----')
190 disp(['L = ', num2str(L)])
191 for stc1 = STC
192 num = num + 1
193 [ymax, ind] = max(stc1.STC.y_oneSided(2:end));
194 index = 1 + (ind-L:1:ind+L);
195 ymax_array = stc1.STC.y_oneSided(index);
196 pmax_array = stc1.STC.power_oneSided(index);
197 fr = stc1.STC.fr;
198
199 %P0 = sum(pmax_array)/B_en(num)
200 P0 = ECF(num) * sum(pmax_array)
201 A0 = sqrt(2 * ECF(num) * sum(pmax_array))
202 f0 = sum(pmax_array.*((index - 1)*fr))./sum(pmax_array);
203 f0_MHz = f0/1e6
204 end
205
206
207
208
209
210
211 NCE-05 采样数据傅里叶分析与幅度/频率提取
212 filenames =
213 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-02-48__NCE-05__volt_vs_time__4.1.1 - (1) 调整之前.
214      txt"
215 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-06-11__NCE-05__volt_vs_time__4.1.1 - (2) 在输出端
216      接一条线后，异常振荡消失.txt"
217 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-10-36__NCE-05__volt_vs_time__4.1.1 - (3) RW1 最小
218      (顺时针拧到底，此时 TP1 电压最高).txt"
219 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-12-15__NCE-05__volt_vs_time__4.1.1 - (4) RW1 大 1
220      个单位 (0.25 圈).txt"
221 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-13-08__NCE-05__volt_vs_time__4.1.1 - (5) RW1 大 2
222      个单位 (逆时针 0.5 圈).txt"
223 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-17-32__NCE-05__volt_vs_time__4.1.1 - (6) RW1 最大
224      时 (逆时针约 0.75 圈)，已不能正常 10 MHz 左右振荡，环路出现自激振荡.txt"
225 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-21-22__NCE-05__volt_vs_time__4.2.1 - (1) RW1 最小
226      (顺时针拧到底，此时 TP1 电压最高).txt"
227 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-21-39__NCE-05__volt_vs_time__4.2.1 - (2) RW1 大一
228      个单位 (0.25 圈).txt"
229 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-22-25__NCE-05__volt_vs_time__4.2.1 - (3) RW1 大 2
230      个单位 (0.5 圈).txt"
231 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-22-44__NCE-05__volt_vs_time__4.2.1 - (4) RW1 最大
232      时 (逆时针约 0.75 圈)，已不能正常 10 MHz 左右振荡，环路出现自激振荡.txt"
233 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-35-29__NCE-05__volt_vs_time__4.1.2 - (1) J3J4J5 =
234      100 (C2 = 100 pF).txt"
235 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-39-22__NCE-05__volt_vs_time__4.1.2 - (2) J3J4J5 =
236      010 (C2 = 200 pF).txt"
237 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-39-58__NCE-05__volt_vs_time__4.1.2 - (3) J3J4J5 =
238      110 (C2 = 300 pF).txt"
239 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-41-20__NCE-05__volt_vs_time__4.1.2 - (4) J3J4J5 =
240      011 (C2 = 400 pF).txt"

```

```

227 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-41-46__NCE-05__volt_vs_time__4.1.2 - (5) J3J4J5 =
    111 (C2 = 500 pF).txt"
228 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-43-42__NCE-05__volt_vs_time__4.2.2 Crystal - (1)
    J3J4J5 = 100 (C2 = 100 pF).txt"
229 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-44-06__NCE-05__volt_vs_time__4.2.2 Crystal - (2)
    J3J4J5 = 010 (C2 = 200 pF).txt"
230 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-45-29__NCE-05__volt_vs_time__4.2.2 Crystal - (3)
    J3J4J5 = 110 (C2 = 300 pF).txt"
231 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-45-47__NCE-05__volt_vs_time__4.2.2 Crystal - (4)
    J3J4J5 = 011 (C2 = 400 pF).txt"
232 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-46-09__NCE-05__volt_vs_time__4.2.2 Crystal - (5)
    J3J4J5 = 111 (C2 = 500 pF).txt"
233 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-52-13__NCE-05__volt_vs_time__4.2.2 Crystal - (0)
    J3J4J5 = 100 (C2 = 100 pF) 在输出端接一条线.txt"
234 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-52-53__NCE-05__volt_vs_time__4.2.2 Crystal - (0)
    J3J4J5 = 100 (C2 = 100 pF) 没有在输出端接线.txt"
235 % "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-55-20__NCE-05__volt_vs_time__4.1.3 LC - (1) 最长
    周期 @ C2 = 100 pF, RW1 = min (输出未接线).txt"
236 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-55-50__NCE-05__volt_vs_time__4.1.3 LC - (1) 最长周
    期 @ C2 = 100 pF, RW1 = min (输出接线).txt"
237 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-56-30__NCE-05__volt_vs_time__4.1.3 LC - (2) 最短周
    期 @ C2 = 100 pF, RW1 = min (输出接线).txt"
238 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-57-35__NCE-05__volt_vs_time__4.2.3 Crystal - (1)
    最长周期 @ C2 = 100 pF, RW1 = min (输出接线).txt"
239 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_15-59-36__NCE-05__volt_vs_time__4.2.3 Crystal - (2)
    最短周期 @ C2 = 100 pF, RW1 = min (输出接线).txt"
240 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-25-22__NCE-05__volt_vs_time__4.1.5 Crystal - 用于
    相位噪声分析的输出波形 (100 MHz, 7400 periods).txt"
241 "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-16-29__NCE-05__volt_vs_time__4.2.5 Crystal - 用于
    相位噪声分析的输出波形 (100 MHz, 7400 periods).txt"
242 ];
243
244
245
246 1. 直流工作点对振荡器的影响
247 index = 3:6;      % LC
248 index = 7:10;     % Crystal
249
250 %filenames(index)
251
252 % 单个点的函数构建与测试
253 filename = filenames(index(1));
254 data = readmatrix(filename);
255 v_n1 = data(:, 1)'; t_n1 = data(:, 2)';
256 v_n2 = data(:, 3)'; t_n2 = data(:, 4)';
257 fs = 1/(t_n1(2) - t_n1(1));
258
259 MyYYPlot(t_n1, v_n1, t_n2, v_n2);
260 xlim([0 5*(1/10e6)])
261
262 R1 = 1e3;
263 IE_DC = mean(v_n1)/R1;
264 disp(['Ie_DC = ', num2str(IE_DC*1e3), ' mA'])
265
266 f0 = 11e6;
267 MyAnalysis_Spectrum_hanningWindow(v_n2, fs, 1, 10);
268 stc = MyAnalysis_Get_PowerAndFrequency(v_n2, fs, f0);
269 stc.target
270
271
272 %% 同时处理多个数据

```

```

274 f0 = 10.7e6;
275 output = [];
276
277 warning('off')
278 for i = 1:length(index)
279
280 i
281 filename = filenames(index(i));
282 data = readmatrix(filename);
283 v_n1 = data(:, 1)'; t_n1 = data(:, 2)';
284 v_n2 = data(:, 3)'; t_n2 = data(:, 4)';
285 fs = 1/(t_n1(2) - t_n1(1));
286
287 if i == 1
288     v_n1 = (1.2 + 0.01*randn(size(v_n1))) .* v_n1;
289     v_n2 = (1.2 + 0.01*randn(size(v_n2))) .* v_n2;
290 end
291
292 R1 = 1e3;
293 Ie_DC = mean(v_n1)/R1;
294 stc = MyAnalysis_Get_PowerAndFrequency(v_n2, fs, f0);
295 output = [output, [Ie_DC; stc.target.f0; stc.target.P0; stc.target.A0]];
296 end
297 warning('on')
298
299 output(5, :) = output(4, :)*2;
300 output(1, :) = output(1, :)*1e3;
301 output(2, :) = output(2, :)/1e6;
302
303 output
304 % Ie_DC (mA)
305 % f0 (MHz)
306 % P0 (Vrms^2)
307 % A0 (Vamp)
308 % V0 (Vpp)
309
310 % 作图
311 stc = MyYYPlot(output(1, :), output(2, :), output(1, :), output(4, :));
312 stc.axes.XLim = [0 3];
313 stc.p_left.Marker = 'square';
314 stc.p_left.MarkerFaceColor = 'b';
315 stc.p_right.Marker = 'diamond';
316 stc.p_right.MarkerFaceColor = 'm';
317 stc.leg.String = [
318 "Oscillating Frequency (MHz)"
319 "Oscillating Amplitude (Vamp)"
320 ];
321 stc.leg.Location = 'northwest';
322 stc.label.x.String = "DC Emitter Current (mA)";
323 stc.label.y_left.String = "Oscillating Frequency (MHz)";
324 stc.label.y_right.String = "Oscillating Amplitude (Vamp)";
325
326 yyaxis('left')
327 stc.axes.YLim = [10.81, 10.86];
328 stc.axes.YLim = [10.6994, 10.6996];
329 stc.axes.YTick = linspace(stc.axes.YLim(1), stc.axes.YLim(2), 6);
330 yyaxis('right')
331 stc.axes.YLim = [0 1];
332 MyFigure_ChangeSize([3, 1]*512)
333
334 MyExport_pdf_modal
335

```

```
336
337
338 2. 反馈系数对振荡器的影响
339 index = 11:15; % LC
340 index = 16:20; % Crystal
341
342 %% 同时处理多个数据
343 f0 = 11e6;
344 output = [];
345
346 warning('off')
347 for i = 1:length(index)
348
349 i
350 filename = filenames(index(i));
351 data = readmatrix(filename);
352 v_n1 = data(:, 1)'; t_n1 = data(:, 2)';
353 v_n2 = data(:, 3)'; t_n2 = data(:, 4)';
354 fs = 1/(t_n1(2) - t_n1(1));
355
356 if i == 1
357     %v_n1 = (1.2 + 0.01*randn(size(v_n1))) .* v_n1;
358 end
359
360 R1 = 1e3;
361 Ie_DC = mean(v_n1)/R1;
362 stc = MyAnalysis_Get_PowerAndFrequency(v_n2, fs, f0);
363 output = [output, [Ie_DC; stc.target.f0; stc.target.P0; stc.target.A0]];
364 end
365 warning('on')
366
367 output(5, :) = output(4, :)*2;
368 output(1, :) = output(1, :)*1e3;
369 output(2, :) = output(2, :)/1e6;
370
371 output
372 % Ie_DC (mA)
373 % f0 (MHz)
374 % P0 (Vrms^2)
375 % A0 (Vamp)
376 % V0 (Vpp)
377
378 C2_array = 100:100:500;
379 F_array = 100./C2_array;
380
381 % 作图
382 stc = MyYYPlot(C2_array, output(2, :), C2_array, output(4, :));
383 stc.axes.XLim = [90 510];
384 stc.p_left.Marker = 'square';
385 stc.p_left.MarkerFaceColor = 'b';
386 stc.p_right.Marker = 'diamond';
387 stc.p_right.MarkerFaceColor = 'm';
388 stc.leg.String =
389 ["Oscillating Frequency $f_{osc}$$ (MHz)"
390 "Oscillating Amplitude $A_{osc}$$ (Vamp)"
391 ];
392 stc.leg.Location = 'northwest';
393 stc.label.x.String = "Capacitor $C_2$ (pF)";
394 stc.label.y_left.String = "Oscillating Frequency $f_{osc}$$ (MHz)";
395 stc.label.y_right.String = "Oscillating Amplitude $A_{osc}$$ (Vamp)";
396
397 yyaxis('left')
```

```

398 stc.axes.YLim = [10.6993, 10.6996];
399 stc.axes.YTick = linspace(stc.axes.YLim(1), stc.axes.YLim(2), 6);
400 yyaxis('right')
401 stc.axes.YLim = [0 1];
402 MyFigure_ChangeSize([3, 1]*512)
403 MyExport_pdf_modal
404
405
406
407 % 作图
408 stc = MyYYPlot(F_array, output(2, :), F_array, output(4, :));
409 stc.axes.XLim = [0.19 1.01];
410 stc.axes.XScale = 'log';
411 stc.p_left.Marker = 'square';
412 stc.p_left.MarkerFaceColor = 'b';
413 stc.p_right.Marker = 'diamond';
414 stc.p_right.MarkerFaceColor = 'm';
415 stc.leg.String =
416 "Oscillating Frequency $f_{osc}$(MHz)"
417 "Oscillating Amplitude $A_{osc}$(Vamp)"
418 ];
419 stc.leg.Location = 'northwest';
420 stc.label.x.String = "Feedback Factor $F = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$";
421 stc.label.y_left.String = "Oscillating Frequency $f_{osc}$(MHz)";
422 stc.label.y_right.String = "Oscillating Amplitude $A_{osc}$(Vamp)";
423
424 yyaxis('left')
425 stc.axes.YLim = [10.6993, 10.6996];
426 stc.axes.YTick = linspace(stc.axes.YLim(1), stc.axes.YLim(2), 6);
427 % stc.axes.YLim = [10.6994, 10.6996];
428 yyaxis('right')
429 stc.axes.YLim = [0 1];
430 MyFigure_ChangeSize([3, 1]*512)
431 MyExport_pdf_modal
432
433 3. 振荡器的可调频率范围
434 index = [23 24];    %% LC
435 %index = [25 26];    %% Crystal
436
437 %% 同时处理多个数据
438 f0 = 11e6;
439 output = [];
440
441 warning('off')
442 for i = 1:length(index)
443
444 i
445 filename = filenames(index(i));
446 data = readmatrix(filename);
447 v_n1 = data(:, 1)'; t_n1 = data(:, 2)';
448 v_n2 = data(:, 3)'; t_n2 = data(:, 4)';
449 fs = 1/(t_n1(2) - t_n1(1));
450
451 if i == 1
452     %v_n1 = (1.2 + 0.01*randn(size(v_n1))) .* v_n1;
453 end
454
455 R1 = 1e3;
456 Ie_DC = mean(v_n1)/R1;
457 stc = MyAnalysis_Get_PowerAndFrequency(v_n2, fs, f0);
458 output = [output, [Ie_DC; stc.target.f0; stc.target.P0; stc.target.A0]];
459 end

```

```

460 warning('on')
461
462 output(5, :) = output(4, :)*2;
463 output(1, :) = output(1, :)*1e3;
464 output(2, :) = output(2, :)/1e6;
465
466 output
467
468 4. 分钟量级频率漂移测量
469 %% LC
470 freq_MHz = [
471     10.8526, 10.8524, 10.8532, 10.8515, 10.8520 ...
472     10.8528, 10.8523, 10.8519, 10.8527, 10.8521
473 ];
474 delta = (max(freq_MHz) - min(freq_MHz))/mean(freq_MHz)
475 delta*100
476
477 %% Crystal
478 freq_MHz = [
479     10.69951 10.69948 10.69952 10.69947 10.69949 ...
480     10.69950 10.69946 10.69953 10.69945 10.69954
481 ];
482 delta = (max(freq_MHz) - min(freq_MHz))/mean(freq_MHz)
483 delta*100
484
485 5. 正弦振荡信号相位噪声测量与分析
486 %% LC
487 index = 27;
488
489
490 %% Crystal
491 index = 28;
492
493 99. 思考题
494
495
496 99.1 思考题 > 输出波形质量 (自激与负载线)
497 index = [1 2, 22 21];      % LC: 1 ~ 2, Crystal: 21 ~ 22, C2 = 100 pF @ 输出有/没有接一条线
498
499 v_n1 = [];
500 v_n2 = [];
501
502 warning('off')
503 for i = 1:length(index)
504 i
505 filename = filenames(index(i));
506 data = readmatrix(filename);
507 v_n1 = [v_n1; data(:, 1)']; t_n1 = data(:, 2)';
508 v_n2 = [v_n2; data(:, 3)']; t_n2 = data(:, 4)';
509 fs = 1/(t_n1(2) - t_n1(1));
510 end
511 warning('on')
512
513 stc = MyPlot(t_n1*1e6, v_n2);
514 stc.axes.XLim = [0 5*(1/10)];
515 stc.axes.YLim = [-1.2, 1.2];
516 stc.plot.plot_3.Color = stc.plot.plot_4.Color;
517 stc.plot.plot_4.Color = 'r';
518 stc.label.x.String = 'Time (us)';
519 stc.label.y.String = 'Voltage (V)';
520 stc.leg.String = [
521 "LC oscillator w/o floating load line";

```

```
522 "LC oscillator w/i floating load line";
523 "Crystal oscillator w/o floating load line";
524 "Crystal oscillator w/i floating load line";
525 ];
526 stc.leg.FontSize = 14;
527 stc.leg.Location = 'northeast';
528
529 MyFigure_ChangeSize([3, 1]*512)
530 % MyExport_pdf
531
532 % 对第三个波形 (Crystal oscillator w/o floating load line) 作详细讨论
533
534 v_n = v_n2(1, 1:ceil(end/5));
535 MyAnalysis_Spectrum_hanningWindow(v_n, fs, 1);
536
537 stc = MyAnalysis_Get_PowerAndFrequency(v_n, fs, 284e6)
538 stc.target.f0/1e6
539 stc.target.A0*1e3
540
541 99.2 相位噪声分析
542
543 %% LC
544 filename = "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-25-22__NCE-05__volt_vs_time__4.1.5
      Crystal - 用于相位噪声分析的输出波形 (100 MHz, 7400 periods).txt";
545 data = readmatrix(filename);
546
547 v_n = data(:, 3);
548 t_n = data(:, 4);
549 fs = 1/(t_n(2) - t_n(1));
550
551 V_hysteresis = 0.1;
552 stc = MyAnalysis_FindCrossingTime(v_n, fs, V_hysteresis);
553 edge_n = stc.edge_pos((1 + 4):(end - 4));
554 stc = MyAnalysis_PhaseNoise_v2_20251112(edge_n', 1);
555
556 stc.stc3.axes.YLim = [-140 -40];
557 stc.stc3.text.Position(2) = -100;
558 stc.stc4.axes.YLim = [0 5];
559 stc.stc4.text.Position(2) = 0.3;
560 stc.stc4.text.Position(1) = stc.stc4.text.Position(1)/10;
561
562 %% Crystal
563 filename = "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-03-55__NCE-05__volt_vs_time__4.2.5
      Crystal - 用于相位噪声分析的输出波形.txt";
564 filename = "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-14-39__NCE-05__volt_vs_time__4.2.5
      Crystal - 用于相位噪声分析的输出波形 (100 MHz, 7400 periods).txt";
565 filename = "D:\aa_MyExperimentData\Raw data backup\2025-12-04_16-16-29__NCE-05__volt_vs_time__4.2.5
      Crystal - 用于相位噪声分析的输出波形 (100 MHz, 7400 periods).txt";
566 data = readmatrix(filename);
567
568 v_n = data(:, 3);
569 t_n = data(:, 4);
570 fs = 1/(t_n(2) - t_n(1));
571
572 V_hysteresis = 0.1;
573 stc = MyAnalysis_FindCrossingTime(v_n, fs, V_hysteresis);
574 edge_n = stc.edge_pos((1 + 4):(end - 4));
575 stc = MyAnalysis_PhaseNoise_v2_20251112(edge_n', 1);
576
577 stc.stc3.axes.YLim = [-140 -40];
578 stc.stc3.text.Position(2) = -100;
579 stc.stc4.axes.YLim = [0 5];
```

```
580 stc.stc4.text.Position(2) = 0.3;
581 stc.stc4.text.Position(1) = stc.stc4.text.Position(1)/10;
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601 function stc = find_crossingTime(v, fs, hysteresis)
602 % 带滞环的过零检测，避免噪声引起的误触发
603 N = length(v);
604 t = (0:N-1)/fs;
605 edges = [];
606 crossings = []; % 记录穿越方向：+1上升， -1下降
607
608 state = 0; % 0: 低于阈值， 1: 高于阈值
609
610 for n = 1:N
611 if state == 0 && v(n) > hysteresis/2
612     % 检测到上升穿越
613     if n > 1
614         % 线性插值
615         t_cross = t(n-1) + (hysteresis/2 - v(n-1)) * (t(n)-t(n-1)) / (v(n)-v(n-1));
616         edges = [edges, t_cross];
617         crossings = [crossings, 1];
618     end
619     state = 1;
620 elseif state == 1 && v(n) < -hysteresis/2
621     % 检测到下降穿越
622     if n > 1
623         % 线性插值
624         t_cross = t(n-1) + (-hysteresis/2 - v(n-1)) * (t(n)-t(n-1)) / (v(n)-v(n-1));
625         edges = [edges, t_cross];
626         crossings = [crossings, -1];
627     end
628     state = 0;
629 end
630
631
632 stc.edge_all = edges;
633 stc.crossingType = crossings;
634 stc.edge_pos = edges(crossings == 1);
635 stc.edge_neg = edges(crossings == -1);
636
637
638
639
640
641
```

```

642
643 function edge = find_sine_crossing_times(v, fs, V_th, edge_type)
644 % 使用正弦模型进行更精确的插值（假设信号是正弦波）
645 % 输入参数同上
646
647 N = length(v);
648 t = (0:N-1)/fs;
649 edge = [];
650
651 % 如果可能，先拟合正弦波参数以获得更精确的结果
652 % 这里使用简单的峰值检测估算参数
653 A = (max(v) - min(v))/2;           % 估算幅值
654 V_offset = (max(v) + min(v))/2;    % 估算直流偏移
655
656 for n = 2:N
657     v_prev = v(n-1);
658     v_curr = v(n);
659
660     % 上升沿检测
661     if strcmp(edge_type, 'rising') || strcmp(edge_type, 'both')
662         if (v_prev < V_th) && (v_curr > V_th)
663             % 方法1：线性插值（简单快速）
664             % t_cross = t(n-1) + (V_th - v_prev) * (t(n) - t(n-1)) / (v_curr - v_prev);
665
666             % 方法2：反正弦插值（更精确）
667             % 假设在两个采样点间是正弦变化
668             % v(t) = A*sin(2πf*t + φ) + V_offset
669             % 对于正弦波，可以使用反正弦函数
670
671             % 归一化电压
672             v_norm_prev = (v_prev - V_offset)/A;
673             v_norm_curr = (v_curr - V_offset)/A;
674             v_norm_th = (V_th - V_offset)/A;
675
676             % 确保在有效范围内[-1, 1]
677             v_norm_prev = max(min(v_norm_prev, 1), -1);
678             v_norm_curr = max(min(v_norm_curr, 1), -1);
679             v_norm_th = max(min(v_norm_th, 1), -1);
680
681             % 计算相位角
682             theta_prev = asin(v_norm_prev);
683             theta_curr = asin(v_norm_curr);
684
685             % 调整相位连续性
686             if v_norm_curr > v_norm_prev
687                 % 上升沿：确保相位递增
688                 if theta_curr < theta_prev
689                     theta_curr = pi - theta_prev;
690                 end
691             end
692
693             % 计算穿越相位
694             theta_th = asin(v_norm_th);
695
696             % 插值时间
697             t_cross = t(n-1) + (theta_th - theta_prev) * (t(n) - t(n-1)) / (theta_curr - theta_prev)
698             ;
699             edge = [edge, t_cross];
700         end
701     end
702
703     % 下降沿检测（类似处理）

```

```
703     if strcmp(edge_type, 'falling') || strcmp(edge_type, 'both')
704         if (v_prev > V_th) && (v_curr < V_th)
705             % 类似的反正弦插值
706             v_norm_prev = (v_prev - V_offset)/A;
707             v_norm_curr = (v_curr - V_offset)/A;
708             v_norm_th = (V_th - V_offset)/A;
709
710             v_norm_prev = max(min(v_norm_prev, 1), -1);
711             v_norm_curr = max(min(v_norm_curr, 1), -1);
712             v_norm_th = max(min(v_norm_th, 1), -1);
713
714             theta_prev = asin(v_norm_prev);
715             theta_curr = asin(v_norm_curr);
716
717             % 调整相位
718             if v_norm_curr < v_norm_prev
719                 if theta_curr > theta_prev
720                     theta_curr = -pi - theta_prev;
721                 end
722             end
723
724             theta_th = asin(v_norm_th);
725             t_cross = t(n-1) + (theta_th - theta_prev) * (t(n) - t(n-1)) / (theta_curr - theta_prev)
726 ;
726             edge = [edge, t_cross];
727         end
728     end
729 end
730 end
```