

一、设计目的

通过课程设计，加强对通信电子电路的理解，学会查寻资料、方案比较，以及设计、计算等环节；进一步提高分析、解决实际问题的能力，加深对通信电子电路理论知识的掌握，能把所学的知识系统地、深入地贯穿到实践中去；通过典型电路的设计与制作，加深对基本原理的了解，增强实践能力。

二、设计内容与技术指标

主要内容：

正弦波高频振荡器的设计与实现，通过课程设计深入了解振荡器工作状态，反馈系数、品质因素等对振荡器的影响，掌握振荡器的设计、制作。

主要技术指标要求：

- (1) 采用晶体三极管或集成电路、场效应管构成西勒正弦波振荡器；
- (2) 额定电源电压 5.0V，电流 1~3mA，输出中心频率 10MHz；
- (3) 频率具一定的变化范围；
- (4) 有缓冲级，在 100 欧姆负载下，振荡器输出电压 ≥ 1 V。

三、实验原理

正弦波振荡器主要由放大电路和反馈电路两大部分所构成，其**组成要素**如下：

- 包含两个（或两个以上）储能元件的振荡回路：一个释放能量，一个接收能量；
- 补充由振荡回路电阻产生损耗的能量来源：直流电源；
- 使能量在正确的时间内补充到电路中的控制设备。

西勒振荡器与其它类型的振荡器相比，其振荡频率与反馈系数无关，波段覆盖范围宽，在工作波段内，输出波形不随频率变化。

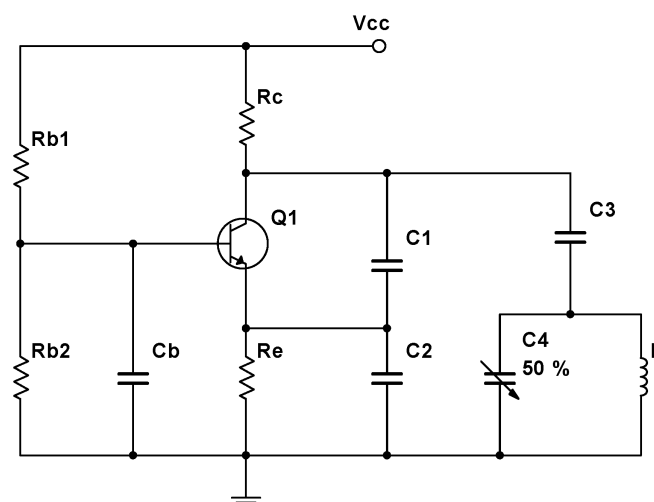


图 1 西勒振荡器原理图

选用 $\beta = 100$ ， $V_{cc} = 5V$ ，晶体管 Q_1 的集电极静态工作电流 $I_{CQ} = 2mA$ ，集电极发射机反向击穿电压 $V_{CEQ} = 3V$ ，计算得

$$R_e + R_c = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{I_{CQ}} = \frac{5V - 3V}{2 \times 10^{-3}A} = 1k\Omega$$

为提高电路的稳定性，取： $R_e = 300\Omega$, $R_c = 700\Omega$, 发射极直流静态工作点电压 $U_{EQ} = I_{CQ} \cdot R_e = 0.8V$, 基极静态工作电流 $I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = 0.02mA$ 。

一般取流过 R_{b2} 的电流为 $(5 \sim 10) I_{BQ}$, 基极直流静态工作电压 $V_{BQ} = 1.5V$ 。可以得出：

$$R_{b2} = \frac{V_{BQ}}{10 \cdot I_{BQ}} = 7.5k\Omega, R_{b1} = \frac{V_{CC} - V_{BQ}}{V_{BQ}} R_{b2} = 17.5k\Omega。$$

振荡频率

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_3 + C_4)}}$$

回路等效电容 $C = (C_1 \text{ 串 } C_2 \text{ 串 } C_3) \text{ 并 } C_4$

$$C = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3} + C_4 \approx C_3 + C_4$$

其中 C_3 远小于 C_1 和 C_2 。

L 的选取有大致标准，通常振荡频率为 $1MHz$ 时， L 在 $10 \mu H$ 以上； $10MHz$ 时 L 大于 $1 \mu H$ ，这里振荡频率为 $10MHz$ ，选取 $10 \mu H$ 。

通过计算可得： $C_3 + C_4 = 25pF$ 左右，所以选择 C_3 采用 $15pF$, C_4 选择 $10pF$ 的可变电容，反馈系数

$$F = \frac{C_1}{C_2}$$

F 应取 $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{2}$ 。故经多次试验后选取 C_1 为 $1.2nF$, 取 C_2 为 $6nF$, 取 F 为 $\frac{1}{5}$ 。

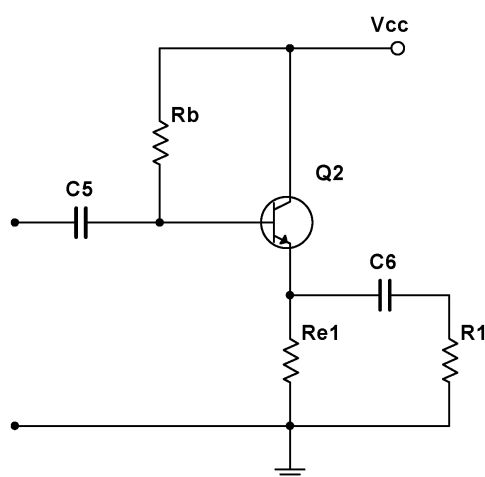


图 2 射极跟随器原理图

射极跟随器是将三极管按共集方式连接，具有电流放大作用。此外射极跟随器具有很强

的带负载能力,因此在多级放大电路中常常作为输入端和输出端。它也可用于连接两个电路,减少直接连接电路的影响,起到缓冲作用。

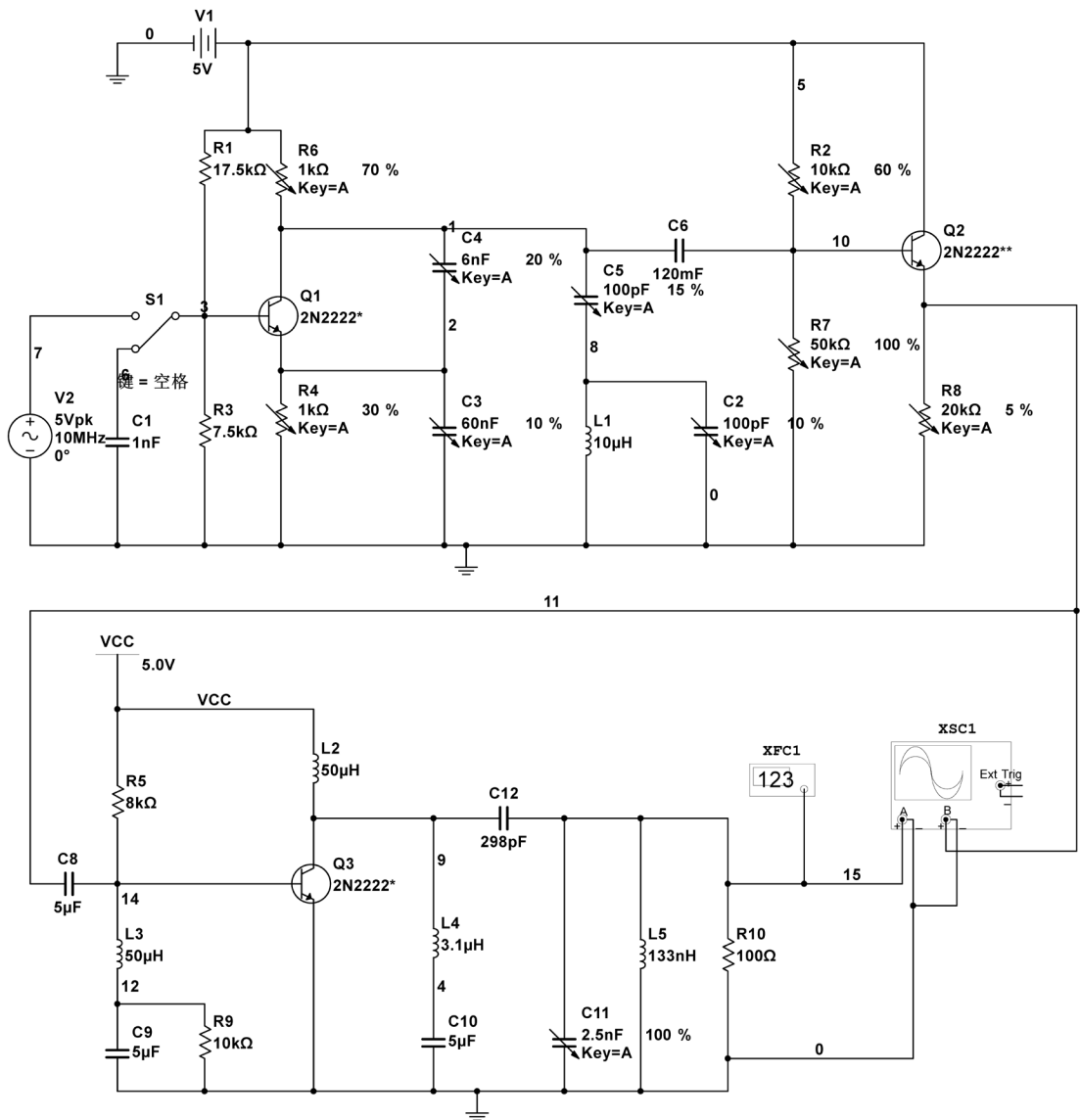


图 3 西勒振荡器电路图

整个电路由西勒振荡器、射极跟随器和高频功率放大器组成,由 5V、10MHz 的交流电源做激励,5V 的直流电源做能量补充,由西勒振荡器产生的正弦波振荡信号经射极跟随器的缓冲作用、以及高频功率放大器的放大作用,到达电阻值为 100 欧姆的负载电阻,负载处的波形与频率可分别由示波器与频率计数器显示和读取。

元器件明细表如下:

元器件名称	个数
三极管 BJT_NPN 2N2222	3
直流电压源 DC_POWER/VCC 5V	2
地 GROUND	3

交流信号源 AC_VOLTAGE 5Vpk 10MHz	1
单刀双掷开关 SPDT	1
电阻（可变）RESISTOR	10
电容（可变）CAPACITOR	11
电感 INDUCTOR	5
示波器 XSC	1
频率计数器 XFC	1
电流探针 current probe	2

表 1 元器件明细表

四、实验结果与分析

（1）为了便于时域的分析，以及满足负载电压的要求，下面是加了功率放大器的振荡器的分析结果。

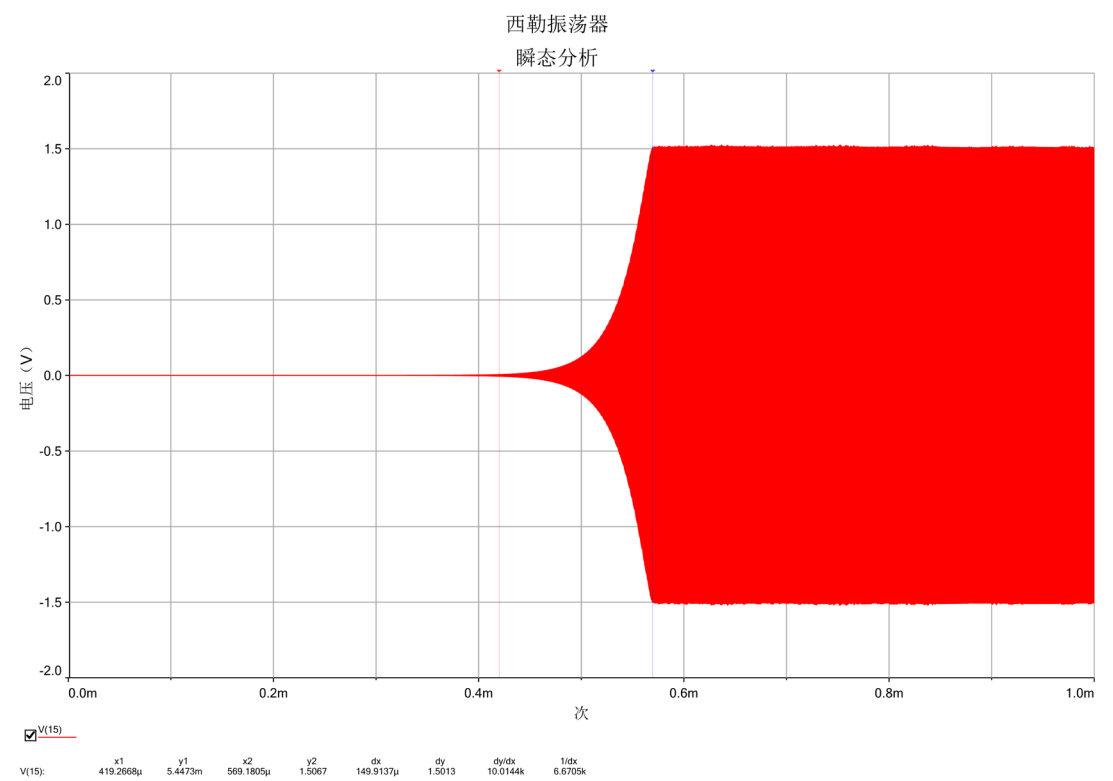


图 4 起振瞬态分析

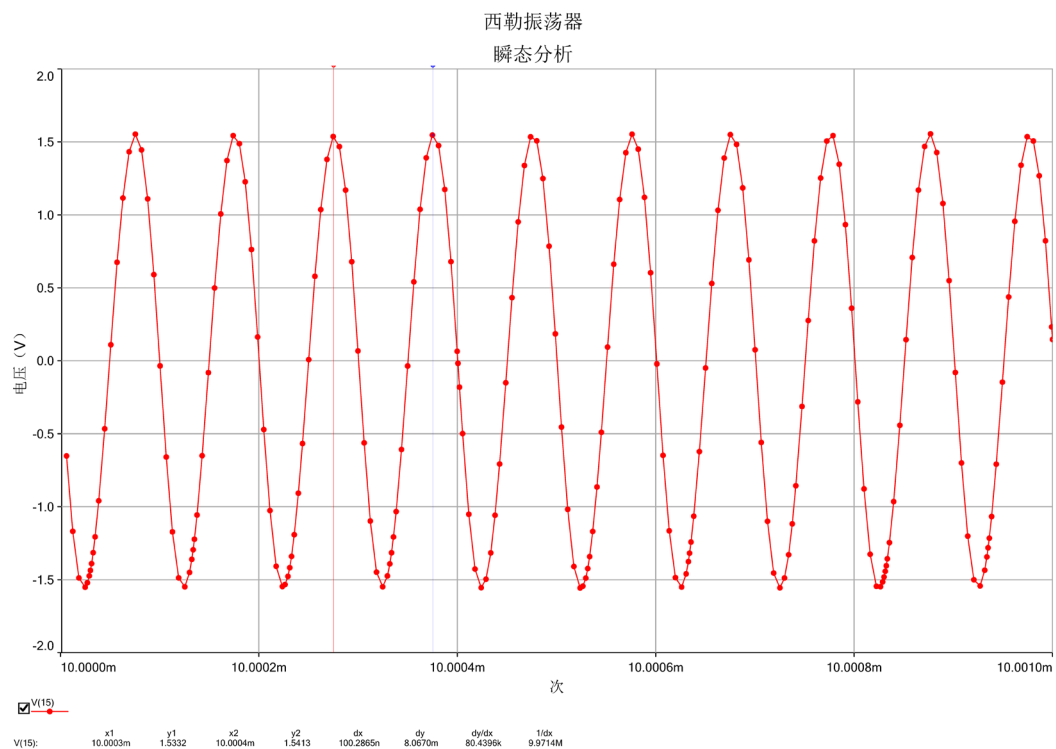


图 5 稳幅瞬态分析

由瞬态分析图图 4 和图 5 可知，电路在 0.419ms 时有明显的起振，在 0.569ms 时达到了稳幅，此时的 100 欧姆负载的电压值约为 1.5V，满足技术指标 $\geq 1V$ 。

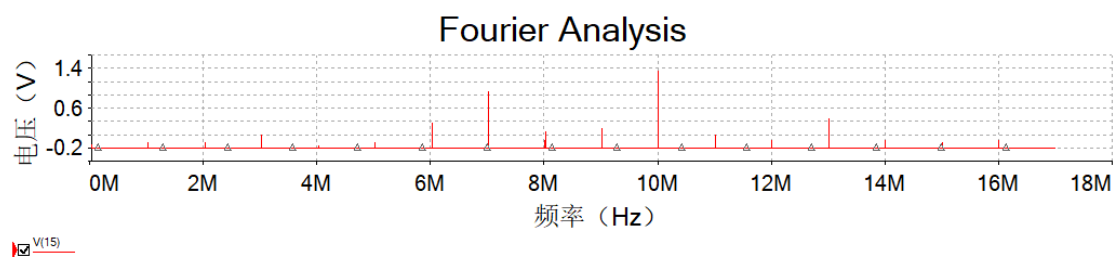


图 6 傅里叶分析

由傅里叶分析图可以很清楚的看到频域的频谱成分以及幅值变化，因此西勒振荡器的频率可调节范围较宽，此振荡器频率理论上可在 6MHz 到 13MHz 的范围进行调节，有利于实际应用中不同场景对不同频率的需求。

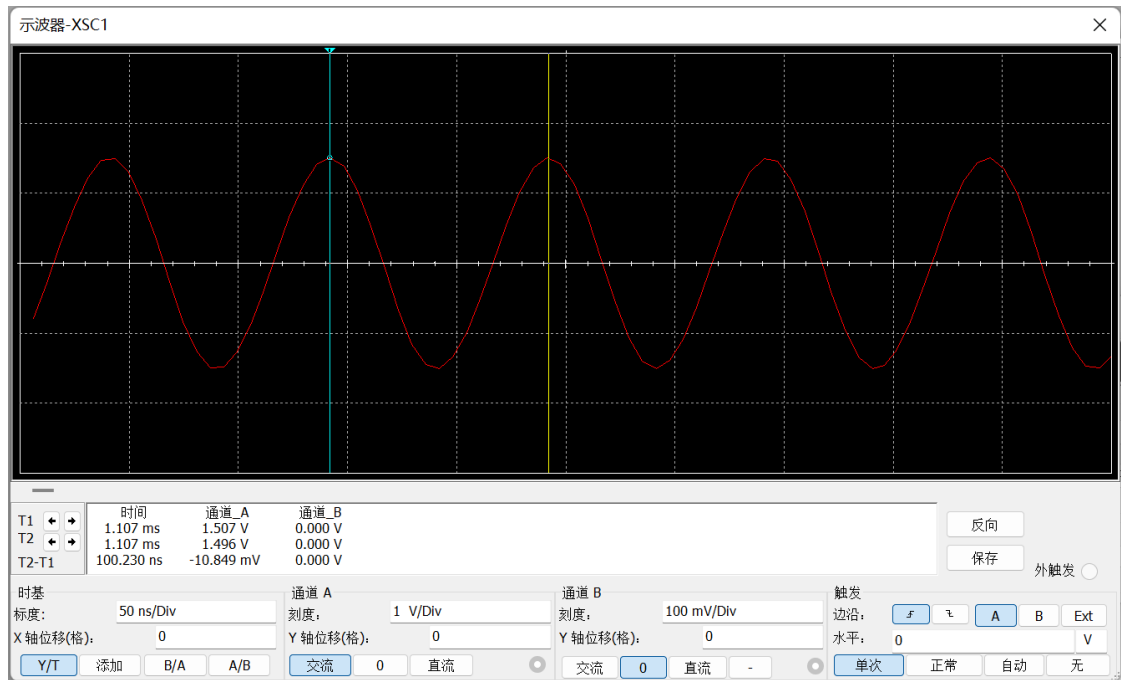


图 7 100 欧姆负载时的波形



图 8 100 欧姆负载时的频率

由示波器的波形(图 7)可知,100 欧姆负载的电压约为 1.5V, 正弦波的周期约为 100ns, 换算频率为 10MHz, 且频率计数器(图 8)显示为 10.016MHz, 满足设计指标输出中心频率 10MHz。

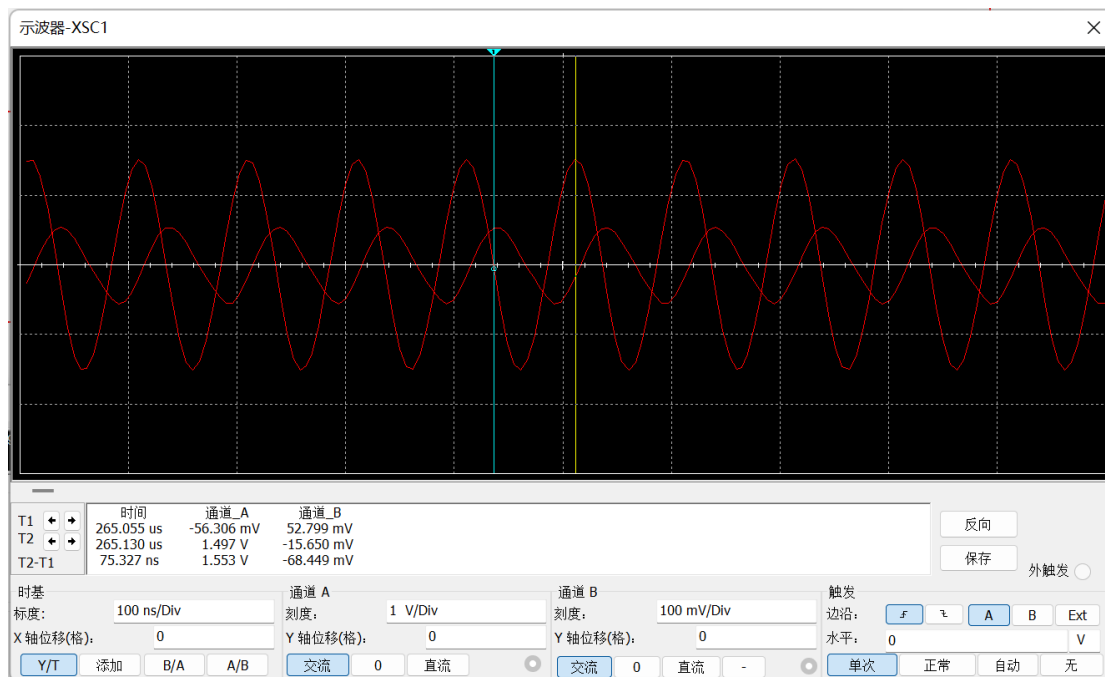


图 9 100 欧姆负载时的波形

由图 9 可知, 100 欧姆负载时放大器放大前的信号的幅度约为 52.799mV, 放大后的信号的幅度约为 1.497V, 电压放大倍数约为 28 倍。

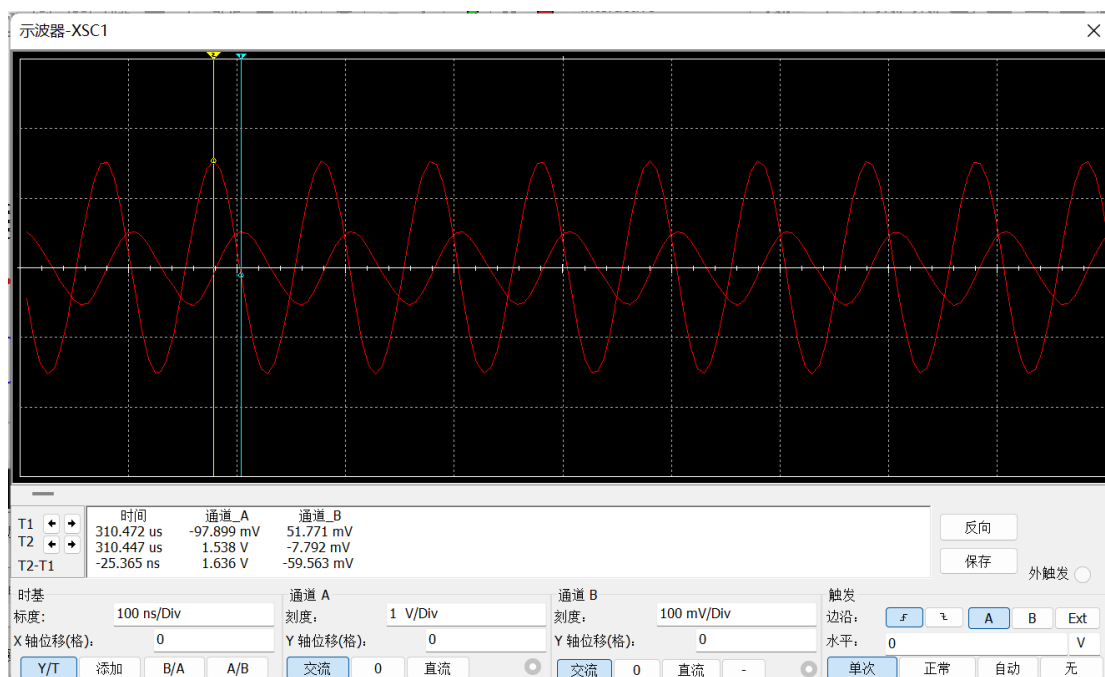


图 10 200 欧姆负载时的波形

由图 10 可知, 200 欧姆负载时放大器放大前的信号的幅度约为 51.771mV, 放大后的信号的幅度约为 1.538V。

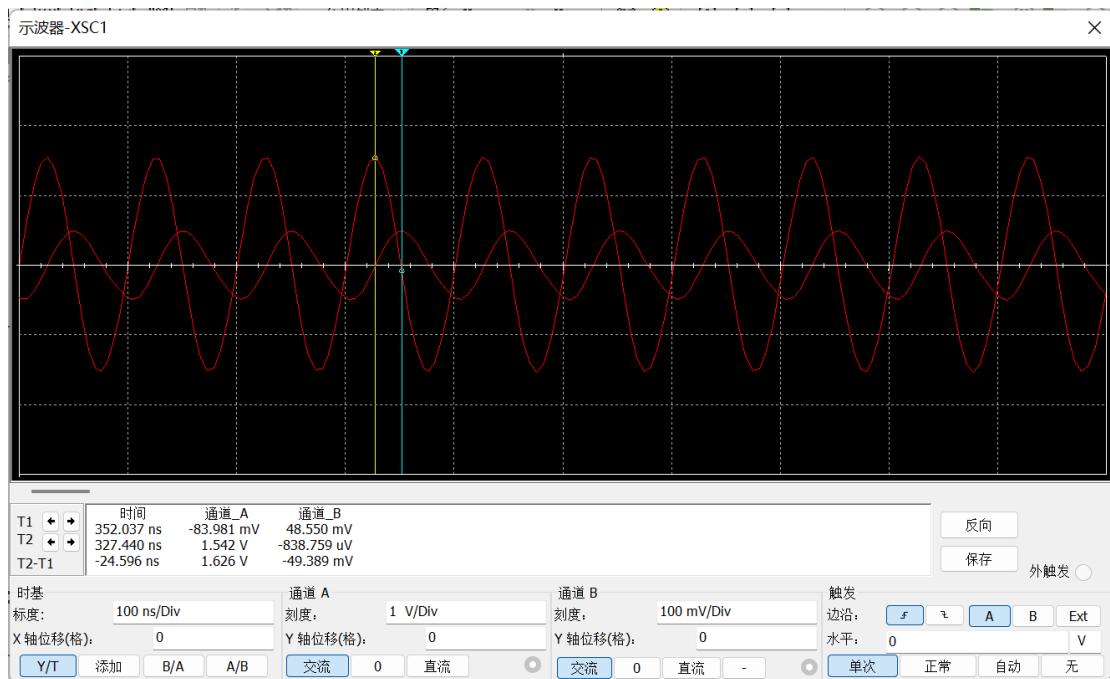


图 11 1000 欧姆负载时的波形

由图 11 可知, 1000 欧姆负载时放大器放大前的信号的幅度约为 48.550mV, 放大后的信号的幅度约为 1.542V。在负载电阻增大的过程中, 负载上的电压也随之增大, 但幅度不大, 而放大器放大之前的信号电压则在慢慢减小。

(2) 由于功率放大器的频率调节起来不太方便, 为了便于频率的分析, 实验在不加功率放大器的情况下进行。负载调整为 1000 欧姆不变, 通过改变电容 C4 的值来改变负载的频率。

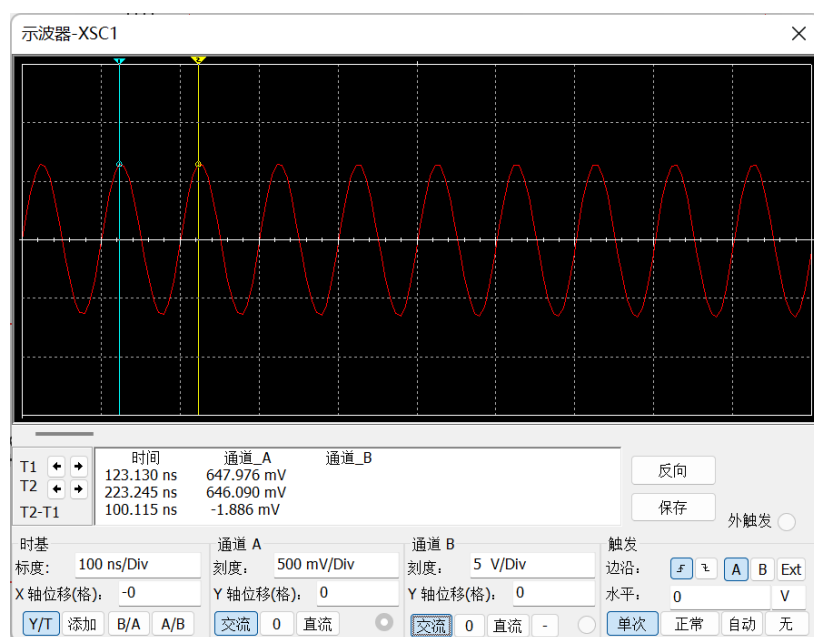


图 12 9.968MHz 时的波形

此时电压最大值约为 647mV，周期约为 100ns。

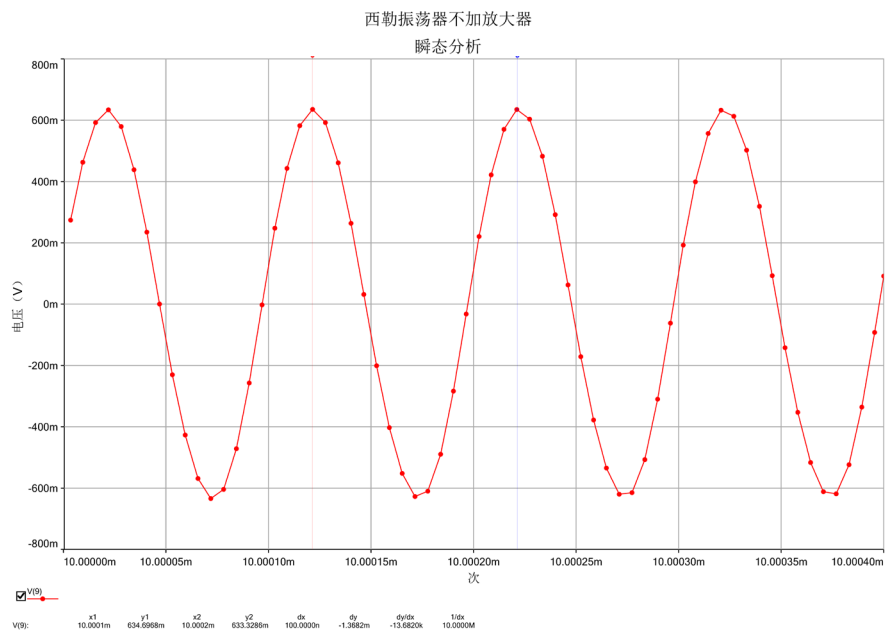


图 13 瞬态分析

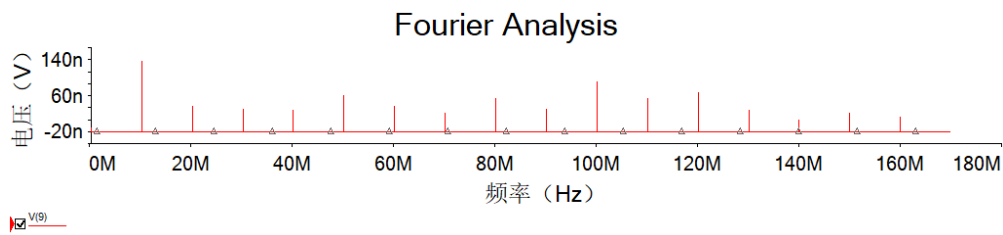


图 14 傅里叶分析

上面分别是瞬态分析图和傅里叶分析图，可以很清楚的看到时域的波形变化和频域的频率成分。可以看出频率的分布很广，除了本次课设用到的 10MHz 以外，其它频率成分也具有较大的功率。

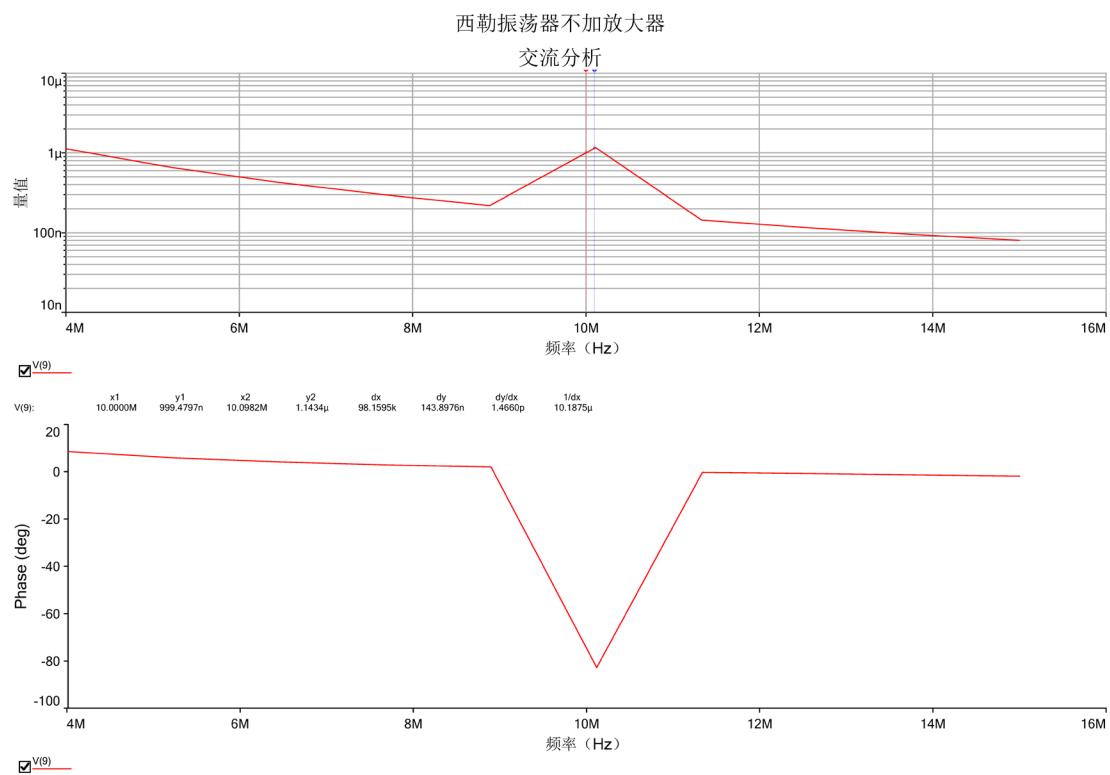


图 15 交流分析

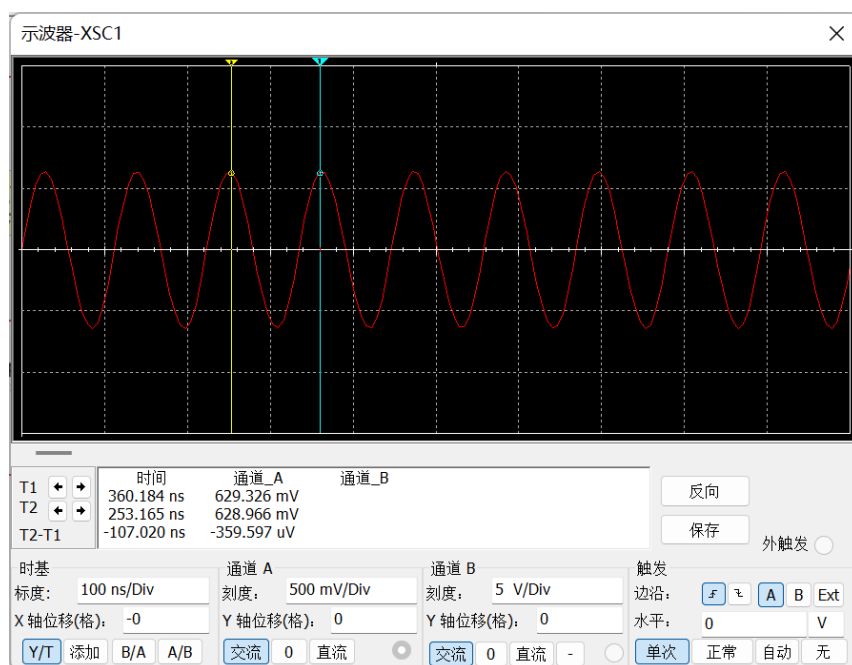


图 16 8.967MHz 时的波形

此时电压最大值约为 629mV, 周期约为 107ns。

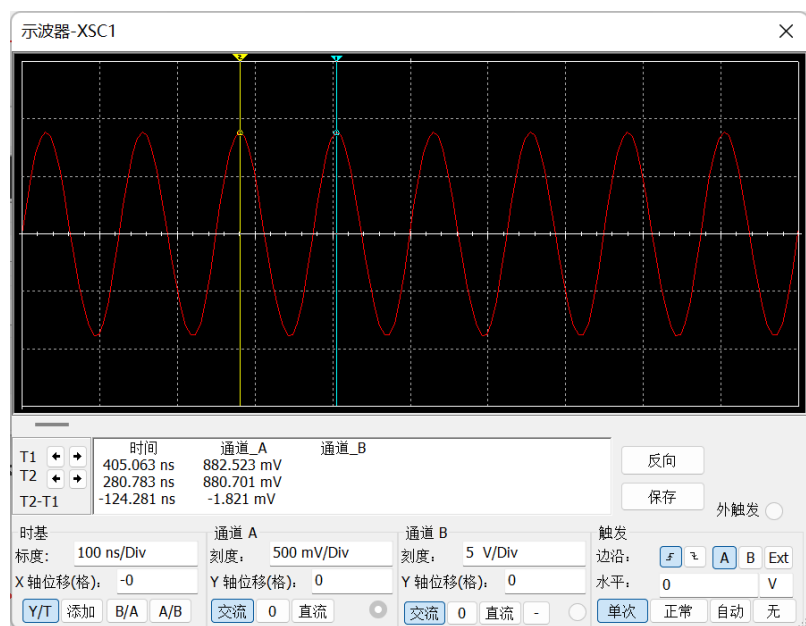


图 17 8.009MHz 时的波形

此时电压最大值约为 882mV, 周期约为 124ns。

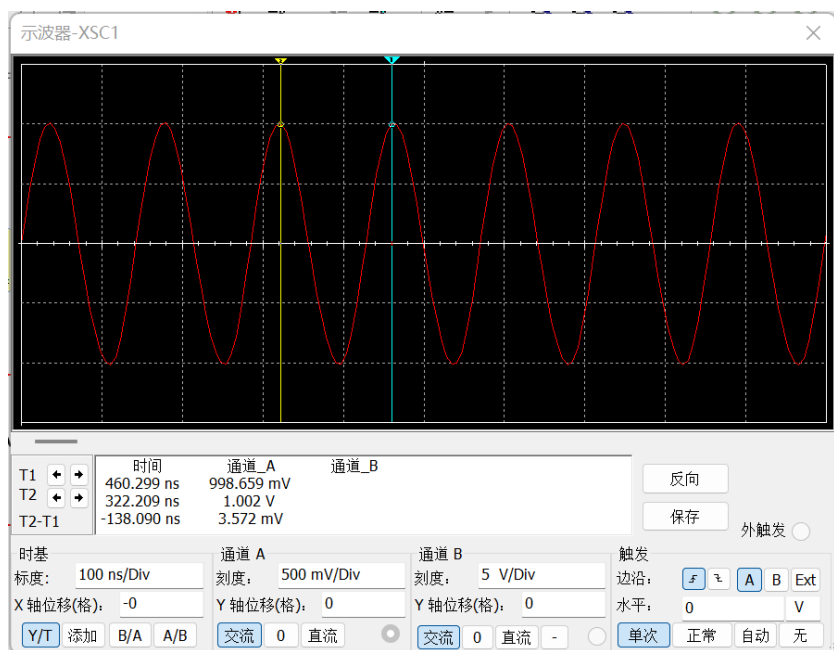


图 18 7.014MHz 时的波形

此时电压最大值约为 1V, 周期约为 138ns。

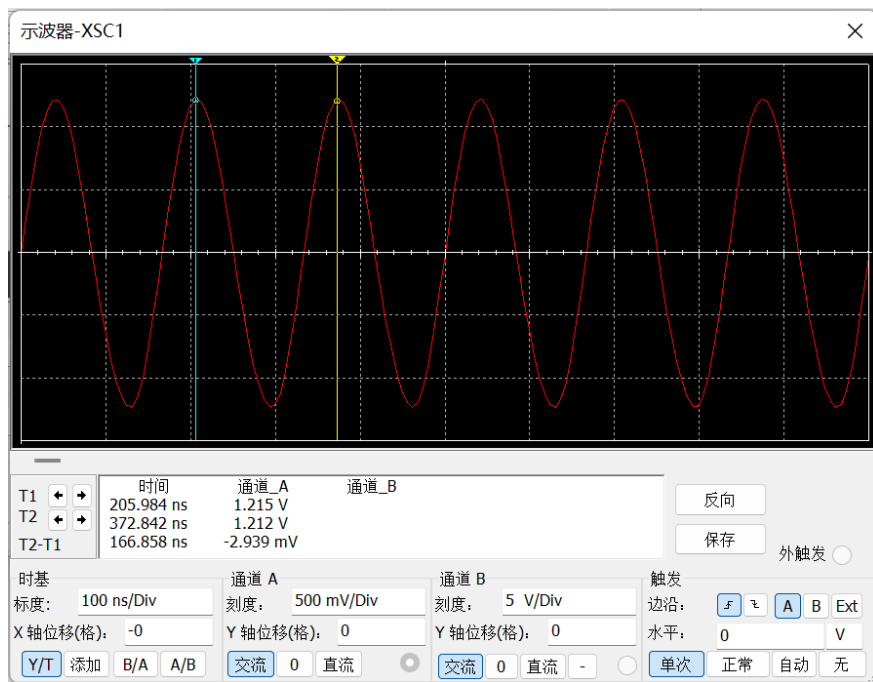


图 19 5.995MHz 时的波形

此时电压最大值约为 1.215V, 周期约为 167ns。

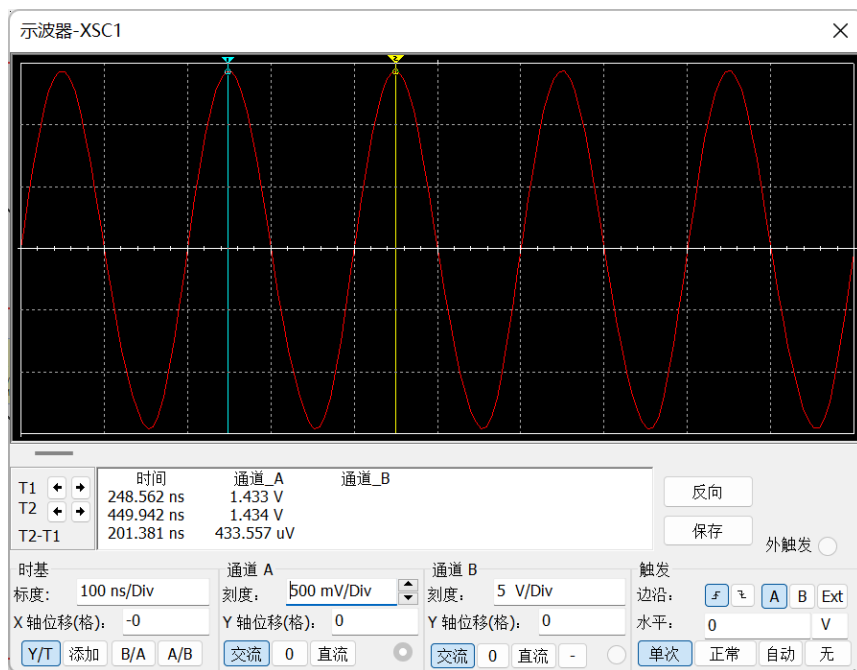


图 20 4.997MHz 时的波形

此时电压最大值约为 1.434V, 周期约为 201ns。

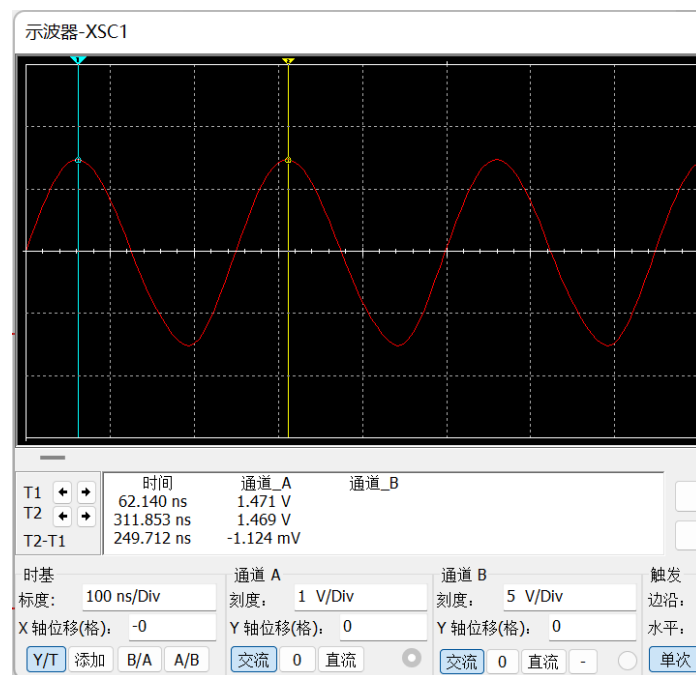


图 21 4.01MHz 时的波形

此时电压最大值约为 1.471V, 周期约为 250ns。

可以看出, 随着频率的减小, 电压的幅值在逐渐的增大, 周期越来越大, 波形也越来越稀疏。负载电压幅值随频率的减小而增大, 是因为在振荡器产生的波形原本是多种频率成分的, 基频的成分较多, 幅值较大, 而倍频的成分随着倍数增大越来越少, 幅度较小, 因此在频率减小的过程中, 逐渐趋近于基频, 负载电压的幅度越来越大。

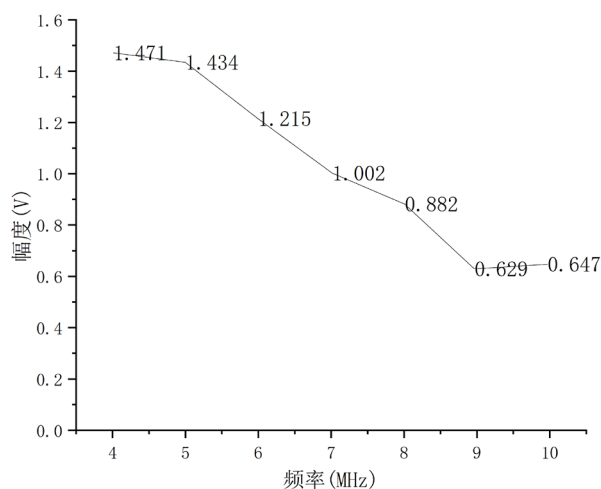


图 22 负载电压幅度随频率变化折线图

五、问题与分析

1、刚开始在调节电路元器件参数的时候, 波形会严重失真, 甚至不会起振, 但是在电路参数调整合适之后, 在不加放大器的情况下, 改变电容 C4 的值, 波形一直是稳定的正弦

波，不会出现波形失真的情况。当 C4 的值越调越大时，改变的频率范围也就越小，因此我取了 10 到 4MHz 的频率范围作为测量，而 11MHz 及以上因为电容值的改变不好控制，所以未具体列出，但是波形是不会失真的。

2、但是不加放大器的情况下，在负载值小于等于 150 欧姆时，会出现波形失真，如下图所示：

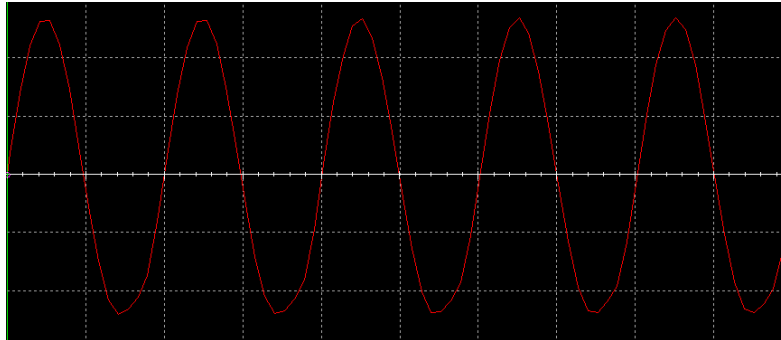


图 23 负载 150 欧姆失真

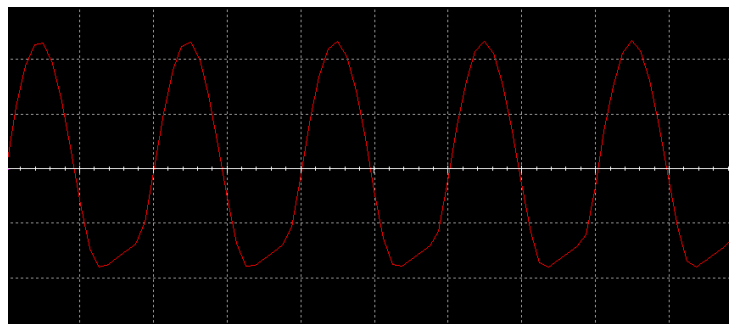


图 24 负载 100 欧姆失真

3、由于刚开始选题时选的是正弦波振荡器，因此参数一直是按照中心频率 10MHz 来设计的，后来由于改变题目时忘记看参数，因此与老师要求的 6MHz 不同。不过不加放大器是可以将频率调到 6MHz 且不失真的（如图 19 所示，不过此时在 1000 欧姆的负载下，如果调到 100 欧姆会出现失真）。

4、如果没有交流电源的激励作用，电路也能够起振，波形也不错，不过就是幅值太小，而在加了该激励之后振荡器输出的幅值可以达到 500mV 左右。

5、高频功率放大器我刚开始选用的是丙类放大器，但是因为丙类放大器放大的倍数达不到要求，不知道是否为我参数设置问题，放大后的电压不仅没增大，反而变小了，因此我通过查找资料设计了这样的一个放大器，可以将电压放大到 1.5V 左右。

6、本次设计虽然满足了设计指标，但是除了西勒振荡器部分的元器件参数是依据理论计算得来的，其它大部分都是靠试验调试、观测并选择最佳波形得来的参数，因此整个电路具有很大的可调性，每个部分的元器件参数值改变都有可能造成波形发生一点点变化。因此目前的波形可能不是该电路最优的波形。

六、参考文献

- [1]. 崔顺等, 基于西勒振荡器的高频功率放大电路设计. 电工电气, 2016(09): 第29-32页.
- [2]. 严国萍. 通信电子线路（第三版）[M].北京:科学出版社, 2021.