



山东大学

信息科学与工程学院

2021 – 2022 学年第二学期

实 验 报 告

课程名称: 高频电子线路实验

实验名称: 振幅调制及解调

实验 4.1 普通振幅调制实验

【实验目的】

- 1、通过实验, 进一步理解普通振幅调制的工作原理与实现方法
- 2、学会用示波器测试调幅波的调幅系数
- 3、熟悉丙类功率放大器实现集电极调幅时工作点的调整方法
- 4、进一步掌握低电平调幅电路的工作原理

【实验仪器与设备】

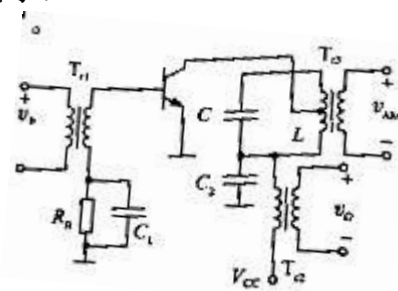
数字双踪示波器、高频毫伏表、高频信号发生器、数字双踪示波器、万用表和实验模块 11——集电极调幅电路。

【实验原理】

1) 高电平调制电路

高电平调幅电路是以高频功率放大电路为基础构成的, 实际上是一个输出电压幅度受调信号控制的高频功率放大器, 可以分为集电极调幅和基级调幅。

集电极调幅原理电路如下所示:



因为载波频率比调制信号频率高得多, 即 $\omega_c \gg \Omega$, 因此, 有:

$$V_{CC}(t) = V_{CC} + V_{\Omega m} \cos \Omega t = V_{CC} (1 + M_a \cos \Omega t)$$

其中 V_{CC} 为集电极直流电源电压; M_a 为调幅指数且

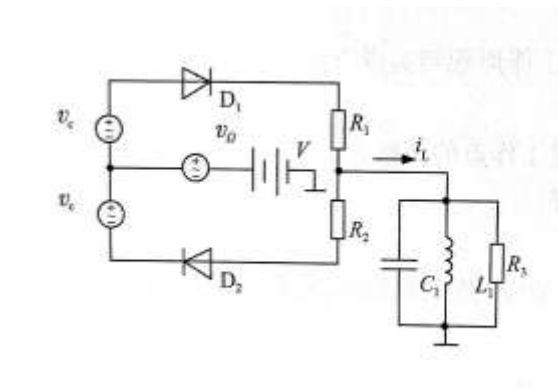
$$M_a = \frac{V_{\Omega m}}{V_{CC}}$$

在 $V_{CC}(t)$ 随调制信号变化的过程中, 放大器始终工作在过压区, 集电极电流为凹陷脉冲, 电流脉冲的基波分量随 $V_{CC}(t)$ 近似线性变化, 从而实现调幅功能。

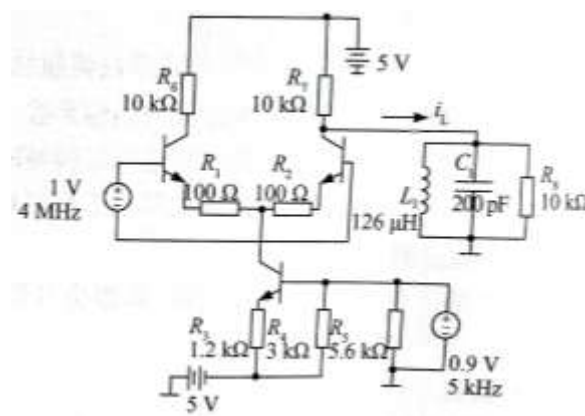
2) 低电平调制电路

从调幅波信号的数学表达式中不难看出, 把调制信号与特定的直流信号相加, 再与载波信号相乘, 就可得到振幅调制信号。因此, 可以利用乘法电路实现振幅调制。常见的乘法电路有二极管电路、差分对电路和模拟乘法电路。

二极管平衡电路如下图所示。在电路中, 为减少无用组合频率分量, 应使二极管工作在大信号状态, 即控制电压 (即载波信号电压) 的幅度应大于 0.5V。

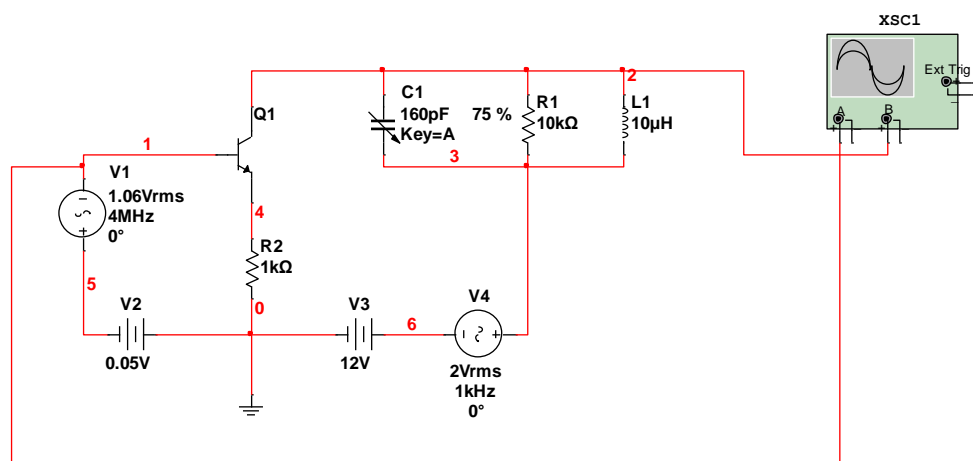


差分对电路是模拟乘法器的核心电路。利用其实现振幅调制的电路如下图所示。

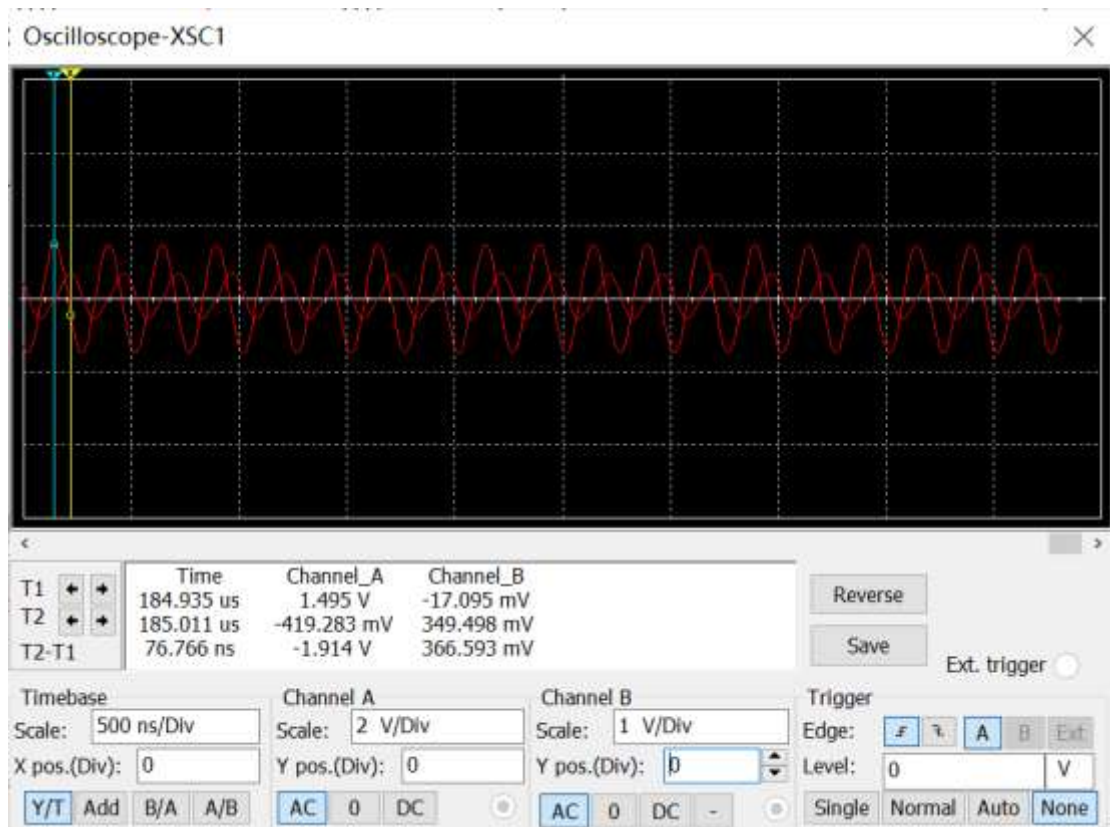


【Multisim 仿真】

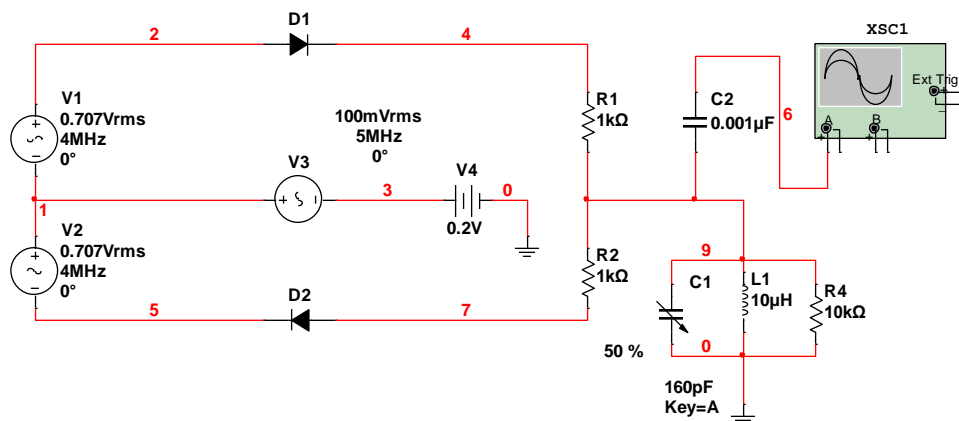
在 Multisim 电路窗口，创建如下图所示的集电极调幅电路。单击“仿真按钮”，用示波器观察并记录输出信号的波形。

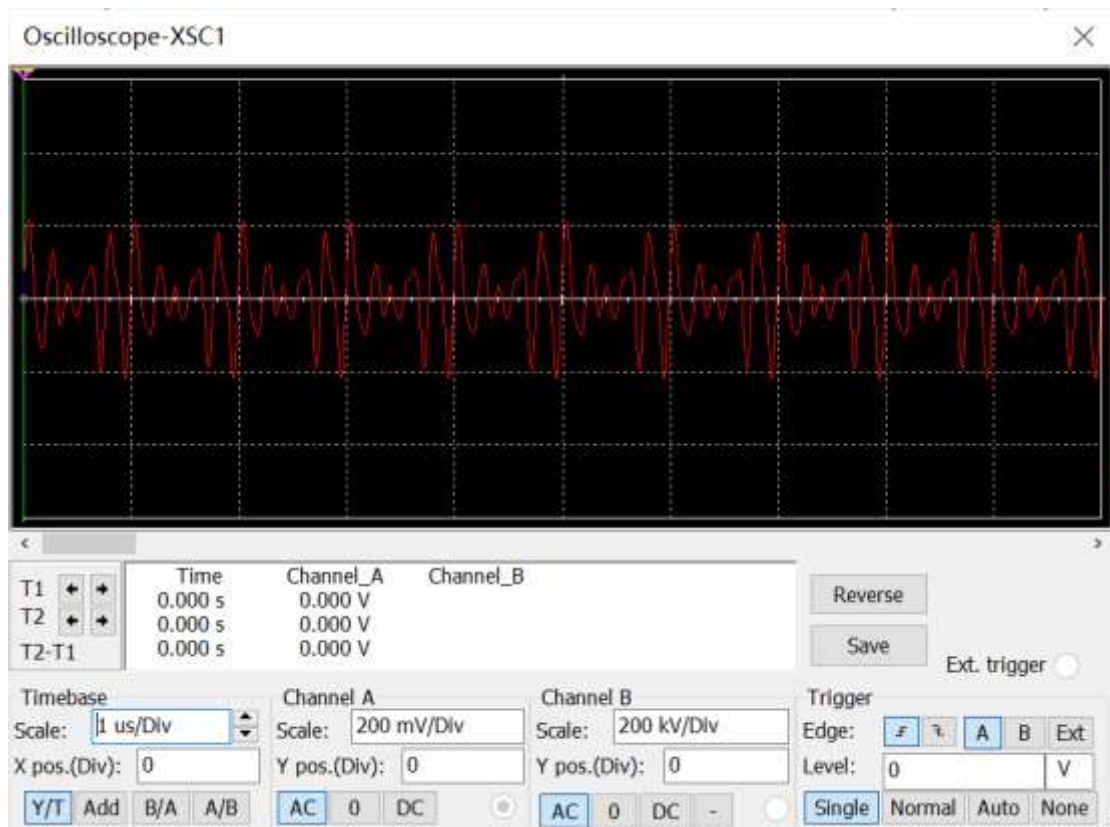


输入输出波形图如下，输入波形最大值为 1.495V，输出波形最大值为 349.498mV。

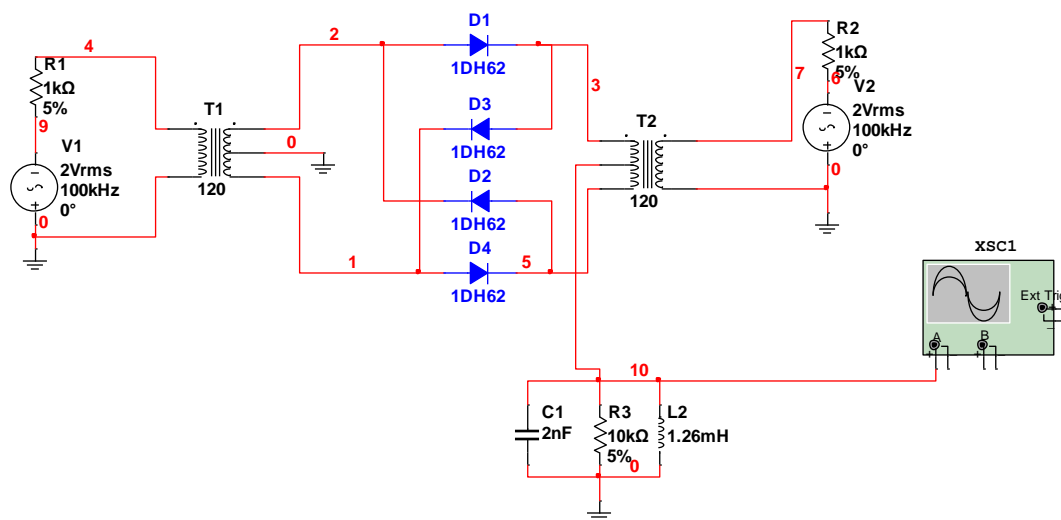


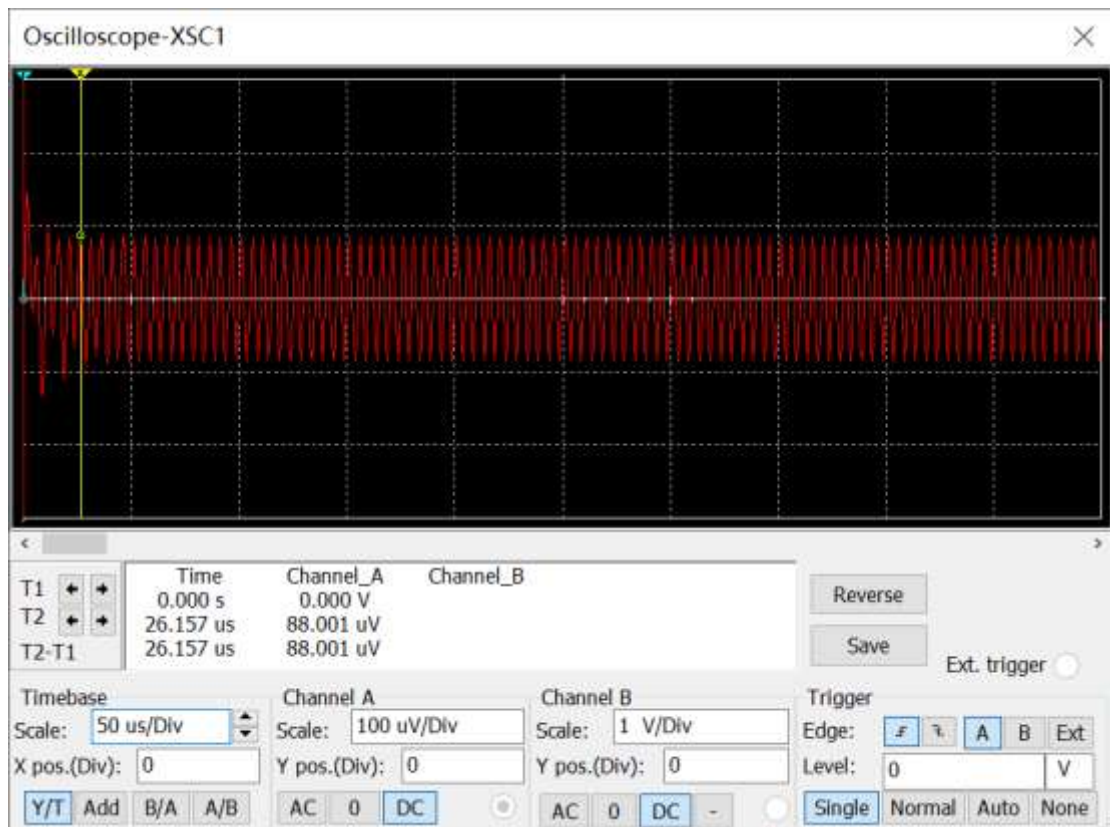
在 Multisim 电路窗口中，创建如下图所示的二极管平衡电路。单击“仿真按钮”，用示波器观察并记录输出信号的波形。





在 Multisim 电路窗口中，创建如下图所示的二极管环形条幅电路。单击“仿真按钮”，用示波器观察并记录输出信号的波形。注意包络过零点处载波相位的变化。

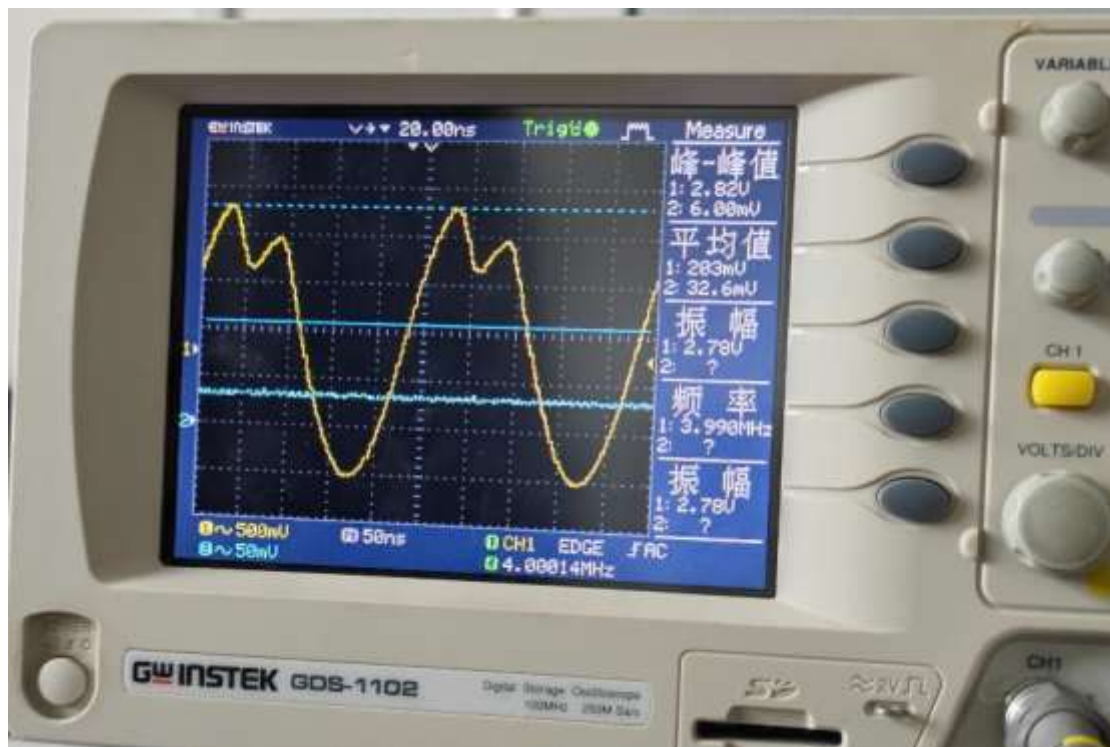




【实验具体内容】

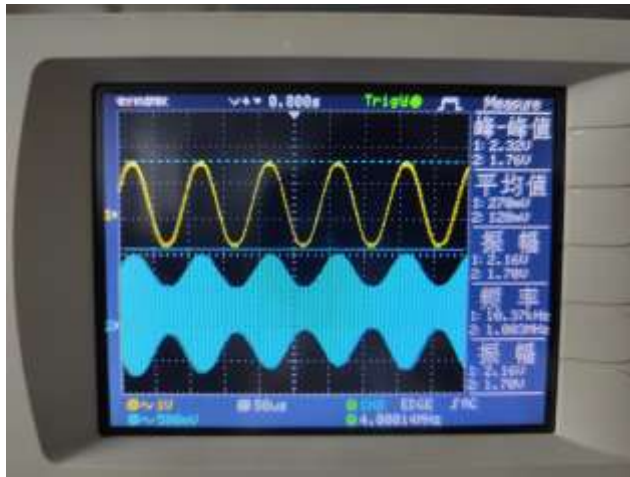
【任务一】调整电路的静态工作点，使电路工作在过压状态。

调整后如图所示



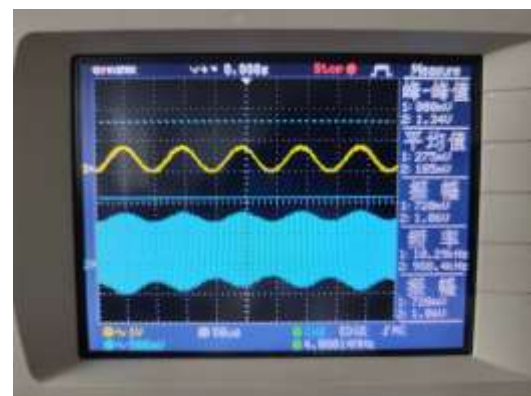
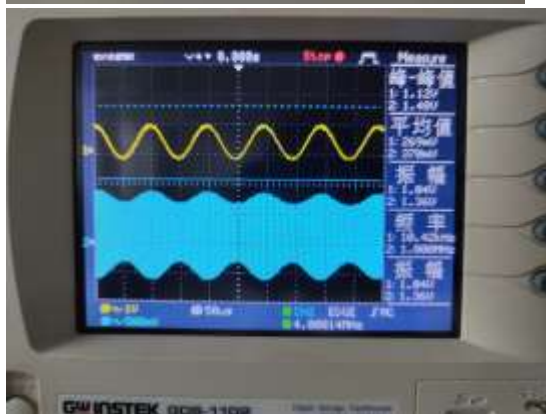
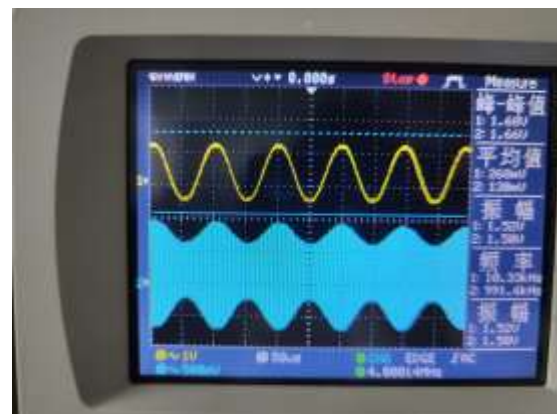
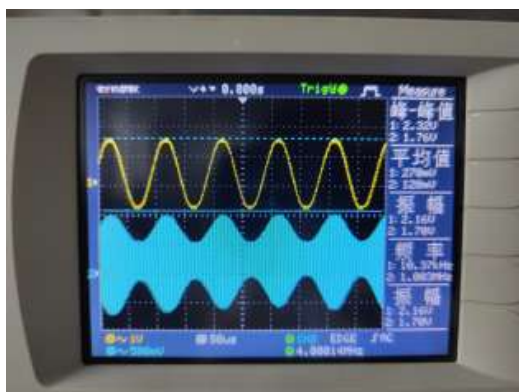
【任务二】

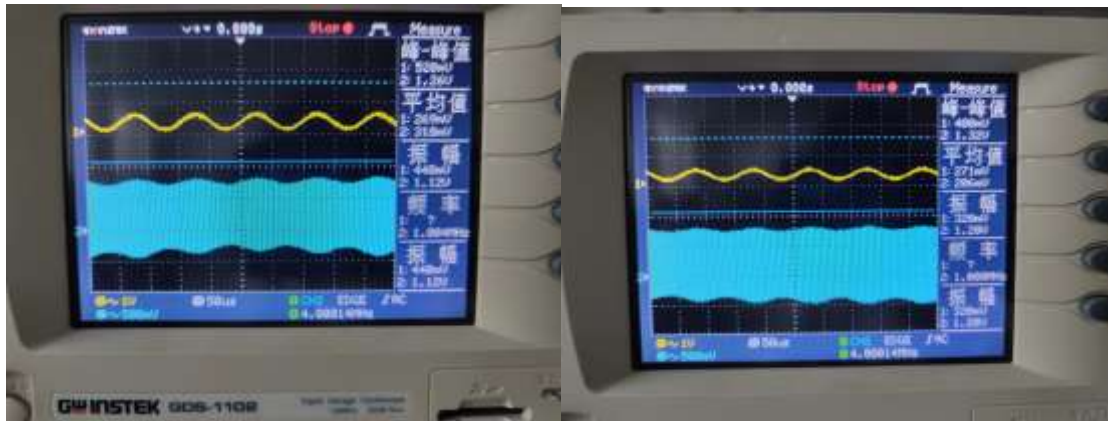
将频率调整为 10kHz 左右，幅度为 2~3V 的低频正弦波信号，由 11IN02 端口输入，并用示波器同时观察 11TP05/11TP06 处的波形。



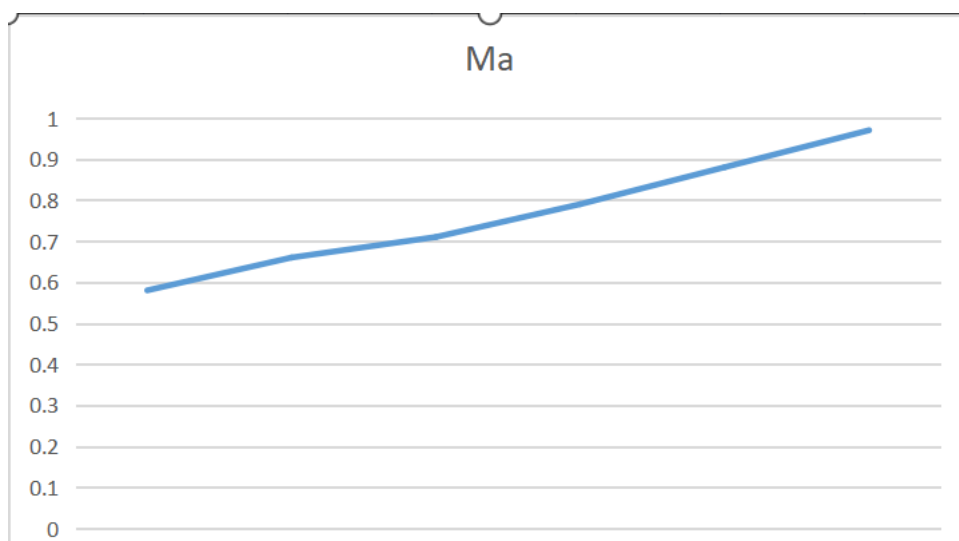
【任务三】测试电路参数变化对调幅指数 M_a 的影响。

保持音频频率 $F=10\text{kHz}$ 不变，改变信号的幅度，输出调幅波的调幅指数应发生变化。测试 M_a 随 $V_{\Omega m}$ 的变化，将结果填入自行设计的表格，并作出 $M_a-V_{\Omega m}$ 曲线。



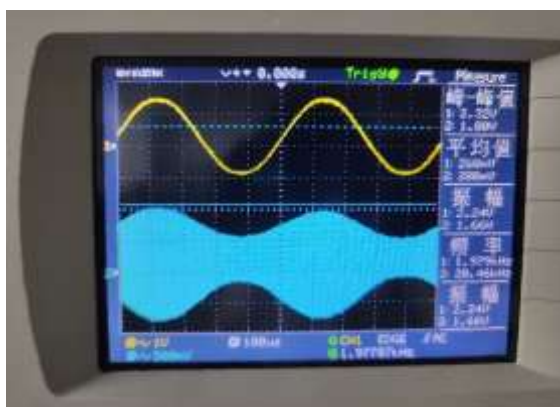
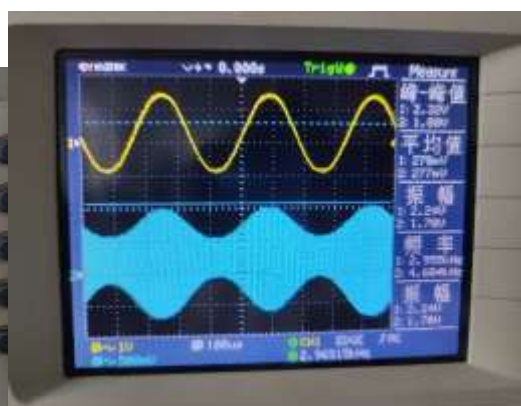
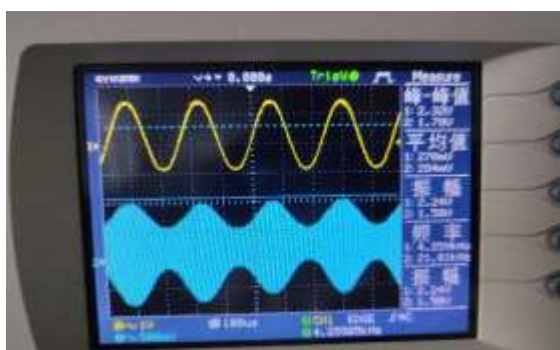
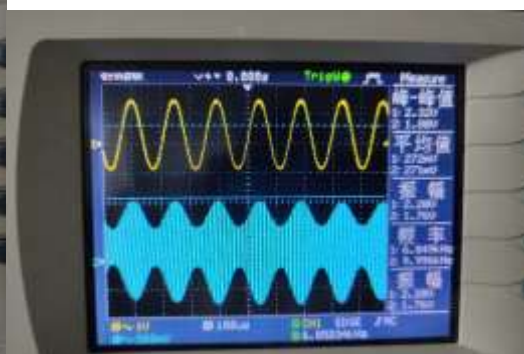


V Ω	1.02	1.10	1.05	1.06	1.12	1.28
V _{in}	2.32	1.68	1.12	0.90	0.53	0.4
V _{cc}	1.76	1.66	1.48	1.34	1.26	1.32
Ma	0.58	0.66	0.71	0.79	0.88	0.97

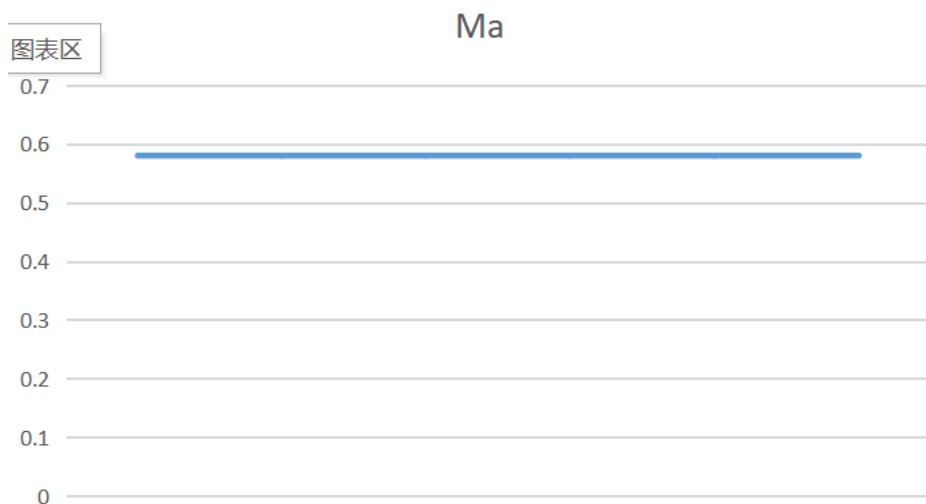


由公式 $\frac{\Delta V_{cm}}{V_{cm}} = \frac{k_a V_{\Omega m}}{V_{cm}}$ 可知，随着 $V\Omega$ 的减小，得到的 Ma 的值逐渐变小。

2 保持电压 $V_{\Omega m}=2.8V$ 不变，改变调制信号的频率，调幅波包络也随之变化。测试 Ma 随频率的变化，做出 $Ma-F$ 曲线。



F/kHz	1.526	1.979	4.604	4.259	6.849	10.34
VCC	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
V _Ω	1.02	1.00	1.02	1.00	1.00	1.02
Ma	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58



发现随着频率的增加，得到的 Ma 基本不变，因为公式中 Ma 的计算与频率无关。

【思考题】

1. 集电极调幅为何必须工作在过压状态？如何保证本实验工作在过压状态？

答：因为过压状态下集电极电流的基波分量随集电极电压成正比。集电极的回路输出高频电压振幅将随调制信号的波形而变化。

调整电路静态工作点。

2. 若要保持 $V_{\Omega m}=5V$ ，实现 $M_{\Omega}=100\%$ ，必须采取什么措施？

抬升电压，令 $V_{cc}=5V$

3. 差分不对称，将对调幅电路产生什么影响？

产生杂波分量，电路不安全。

实验 4.2 利用乘法器实现振幅调制

【实验目的】

(1) 掌握集成模拟乘法器的工作原理及特点

(2) 进一步掌握用集成模拟乘法器 MC1496/1596 实现振幅调制的电路调整与测

试方法

(3) 掌握用集成模拟乘法器 MC1496 来实现振幅调制和 DSB 信号调制的方法, 研究已调波与载波信号、载波之间的关系

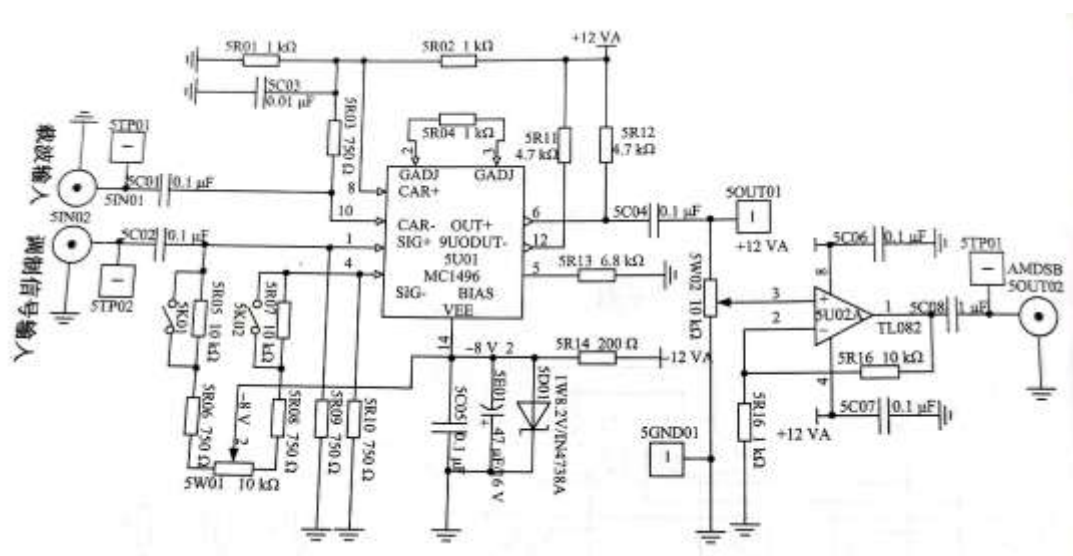
(4) 掌握用示波器测量调幅指数的方法

【实验仪器与设备】

低频信号发生器、高频信号发生器、万用表、数字示波器和实验模块 5—乘法器调幅电路。

【实验原理】

乘法器模块的内部电路如下所示:

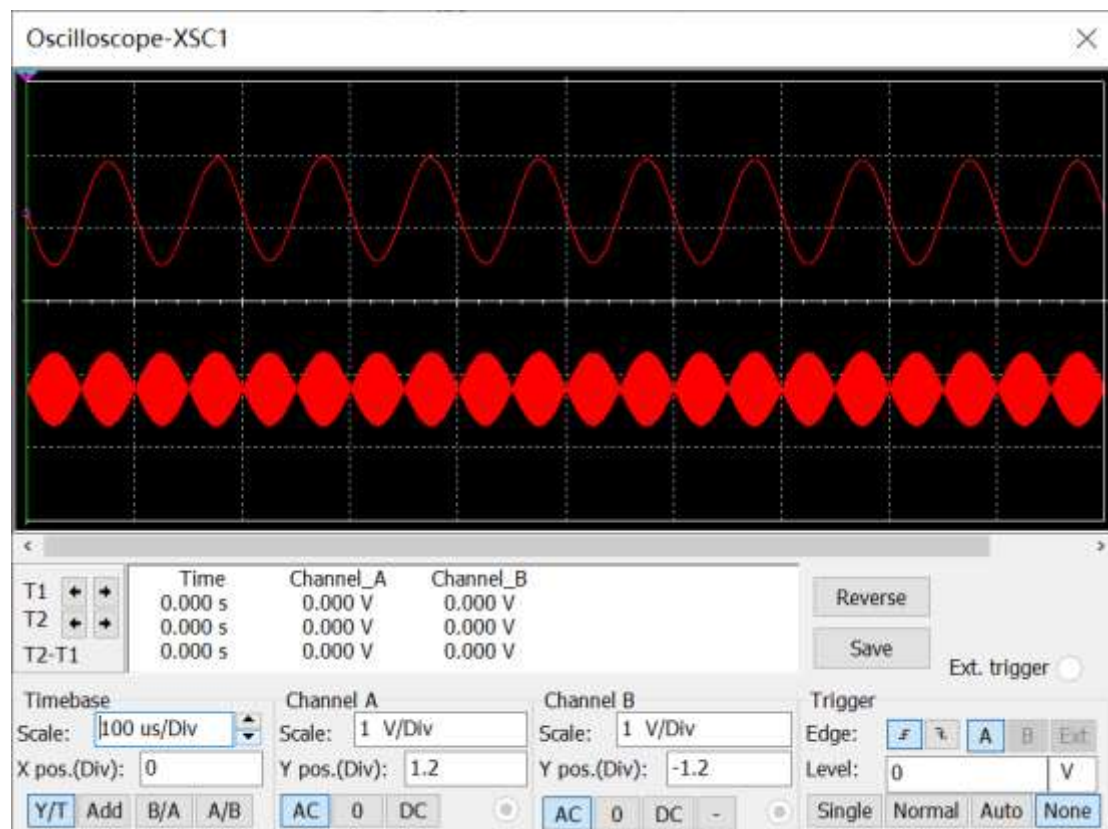


其中 X 通道两输入端引脚 8、10 的直流电位均为 6V, 可作为载波输入通道; Y 通道两输入端引脚 1、4 之间有外接调零电路, 若要实现普通调幅, 可通过调节 10k Ω 电位器 5W01 使引脚 1 的电位比引脚 4 高 V_y , 调制信号 $v_{\Omega}(t)$ 与直流电压 V_y 叠加后输入 Y 通道。调节电位器可改变 V_y 的大小, 即改变调幅指数 (Ma)。

若要实现 DSB 调幅, 可通过调节 10k Ω 电位器 5W01 使引脚 1 和引脚 4 之间直流等电位, 即 Y 通道输入信号仅为交流调制信号。为了减小流经电位器的电流, 使 6、12 外端可接调谐于载频的带通滤波器, 引脚 2、3 之间外接 Y 通道负反馈电阻 5R04。

【Multisim 仿真】

在 Multisim 电路窗口中，创建如下图所示的电路，虚拟示波器的连接如图中所示。检查无误后，单击“仿真”按钮。从示波器中观察输入、输出波形，说明运算放大器 U_1 的功能及开关 J_1 的作用，并完成如下操作：

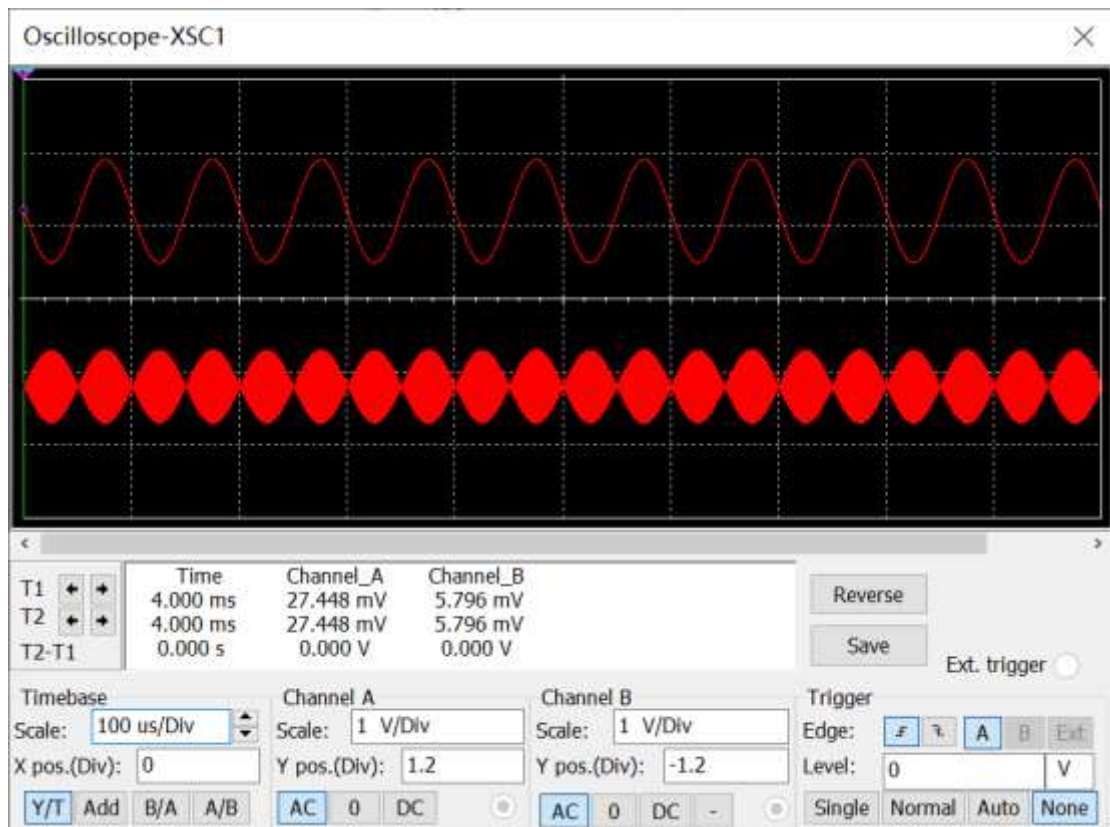


运算放大器 U_1 的功能：放大调制信号

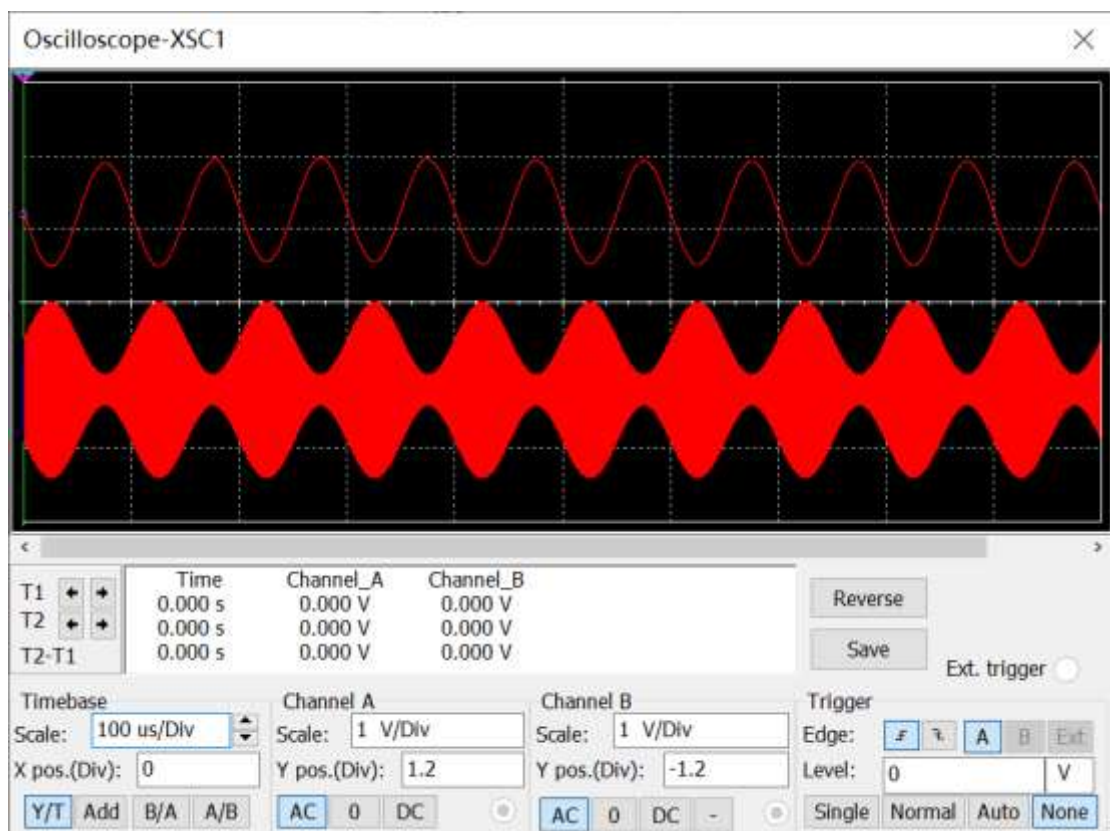
开关 J_1 的作用：控制振幅调制和平衡调制的模式转换

(1) 在开关 J_1 分别接“地”和 V_2 的情况下，观察 R_4 两端的输出波形，分析信号的性质。

接“地”：

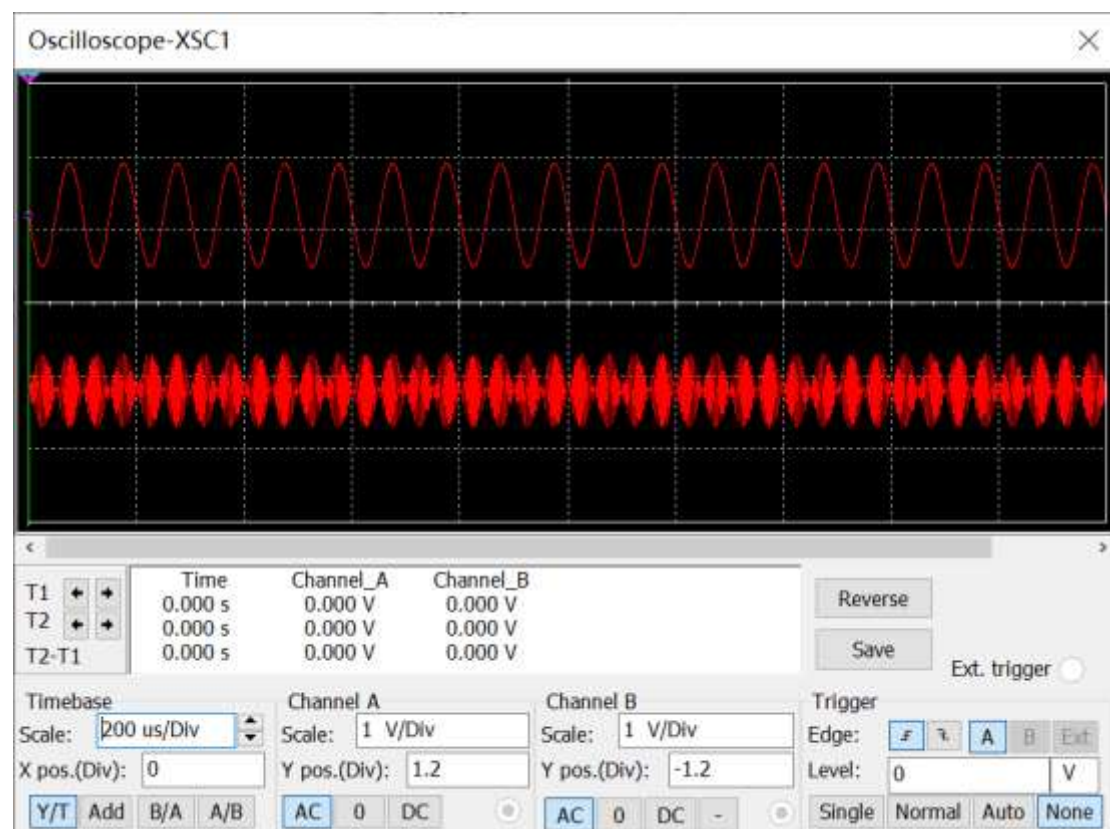


接 V_2 :

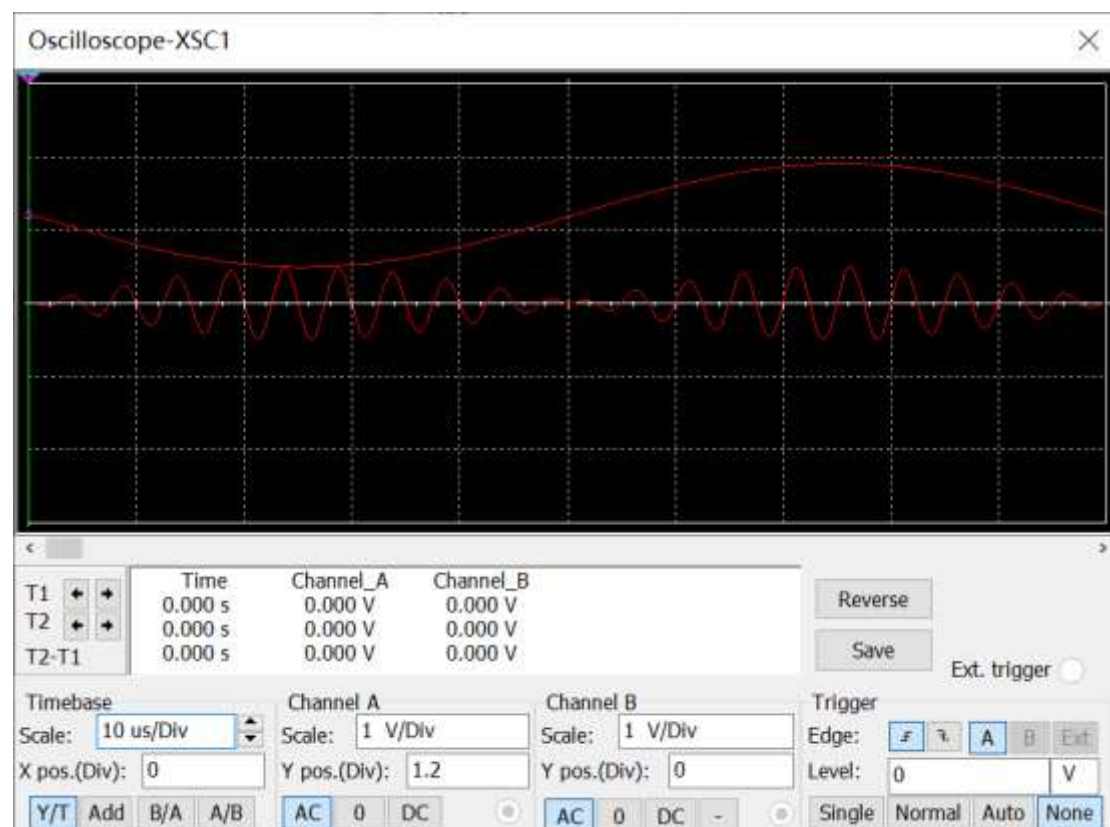


(2) 将 V_5 的频率改为 200kHz, 再观察两种情况下 R_4 两端的输出波形, 并观察双边带调制的情况下, 在包络过零点处载波 180° 的相位突变。

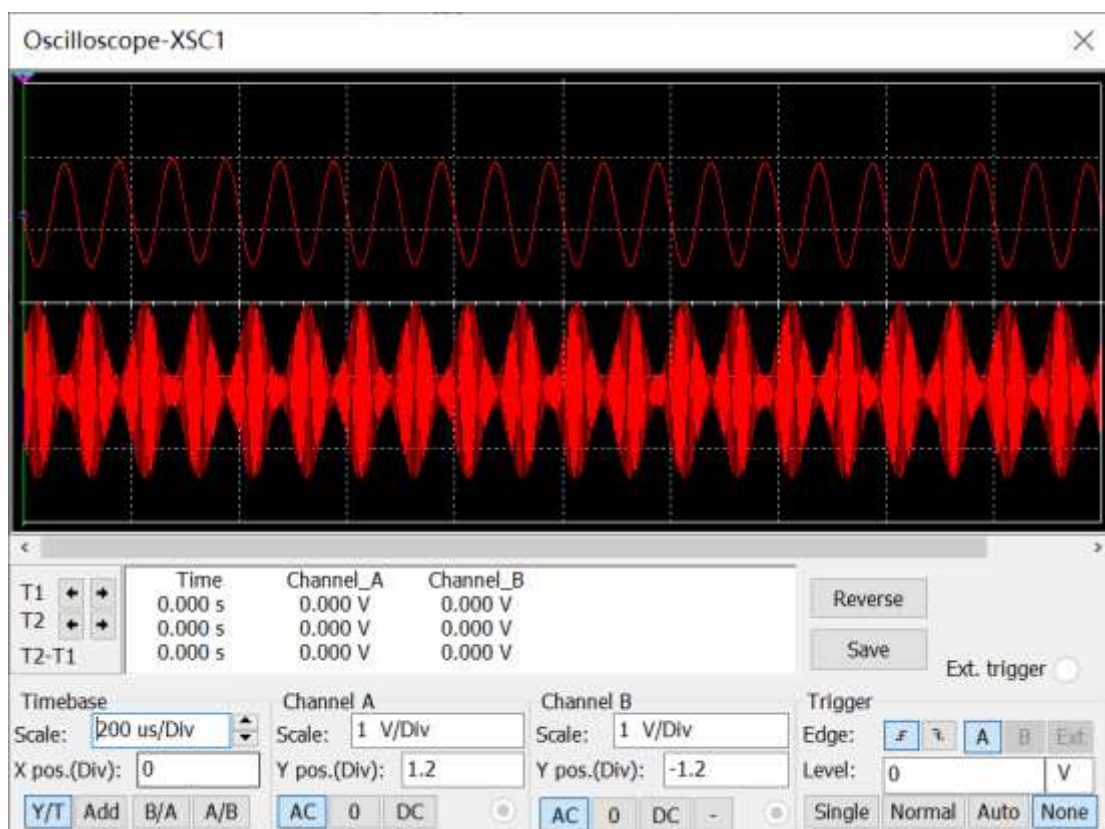
接“地”：



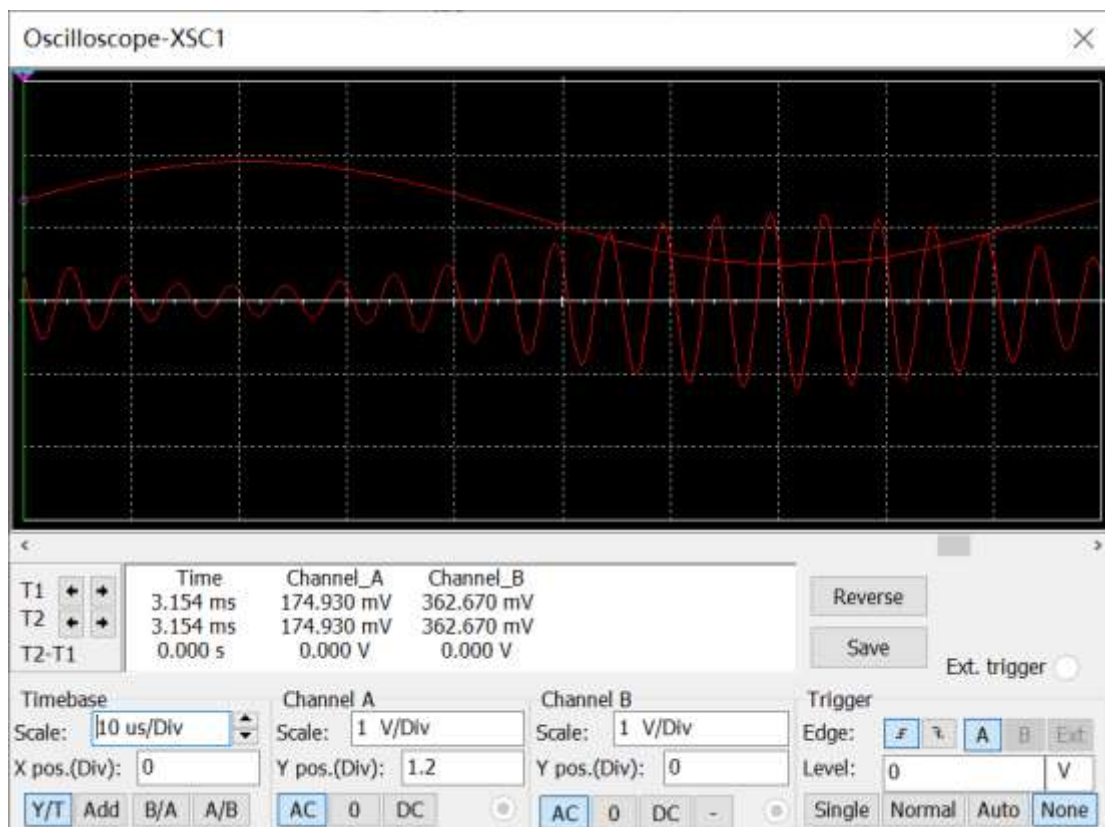
将波形图横坐标放大，如下图所示，可以看到在平衡调制模式，包络过零点处相位存在 180° 突变



接 V_2 :

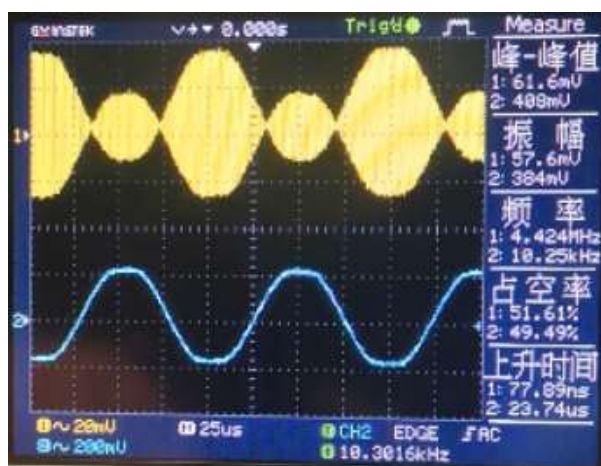


将波形图横坐标放大，如下图所示：



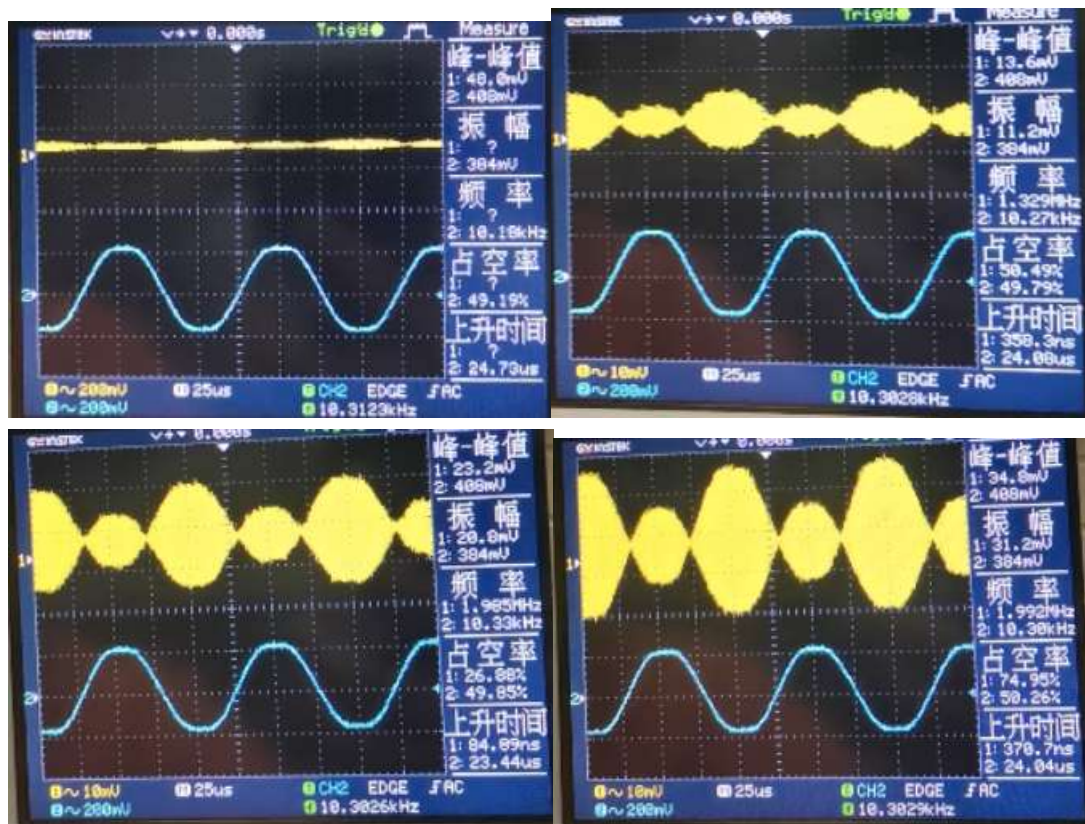
【实验任务】

【任务一】1. 调制信号频率 $F=10\text{kHz}$ ，幅度 $v_{\Omega} \leq 400\text{mV}$ ，输入的载波信号频率 $f_c = 4\text{MHz}$ ，幅度 $v_{cm} < 50\text{mV}$ 观察并记录此时输出端输出的 $v_o(t)$ 的波形。



当 $M_a > 1$ 时， $V_{\min} = V_{cm}(1 - M_a) < 0$ ，波形发生翻转，波形出现过调制失真。

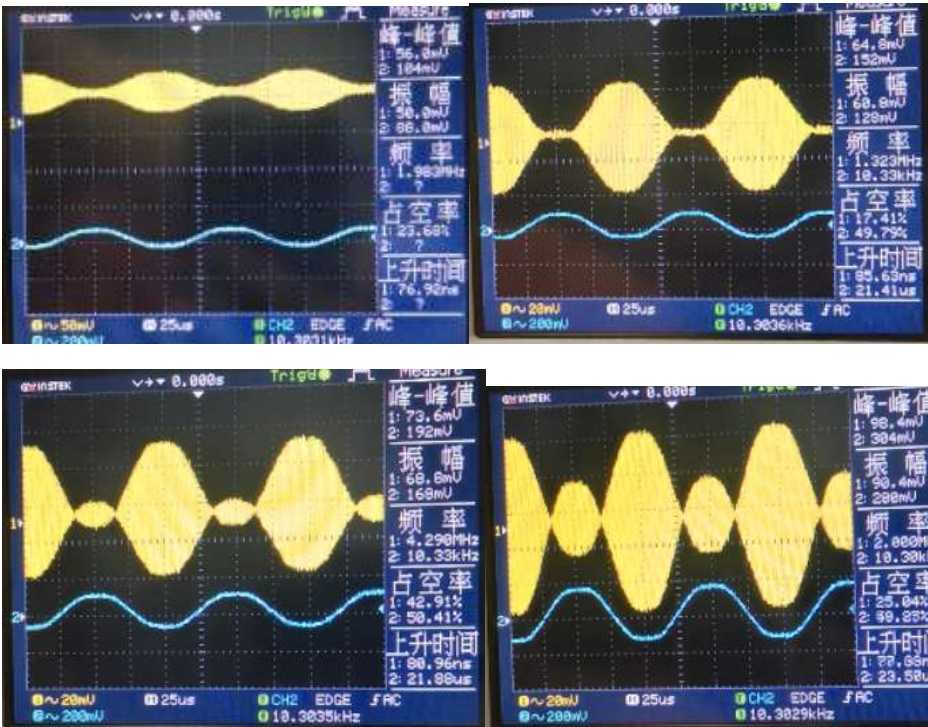
【任务一】2. 调解电位器 5W01 的大小，观察输出波形的变化，记录过调制失真时的波形



输出波形的幅值随着 5W01 的增大而增大。

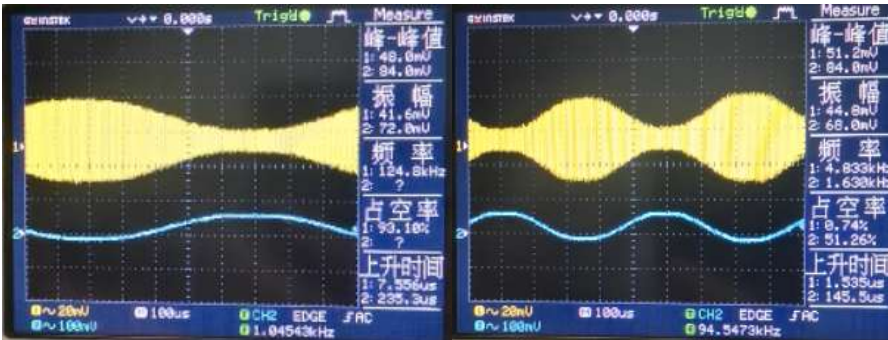
【任务一】3. 改变调制信号的幅度 $V_{\Omega m}$ ，保持其他参数不变，观察输出波形的变

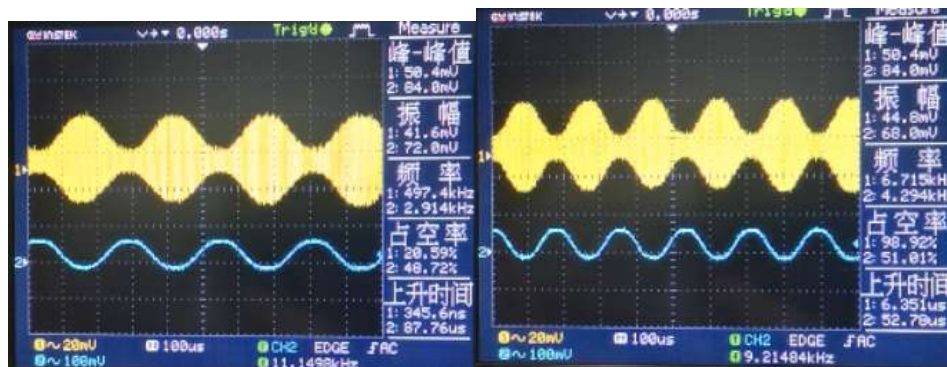
化，并计算出调幅指数。



Ma 随着 $V_{\Omega m}$ 增大而增大，直到出现失真。

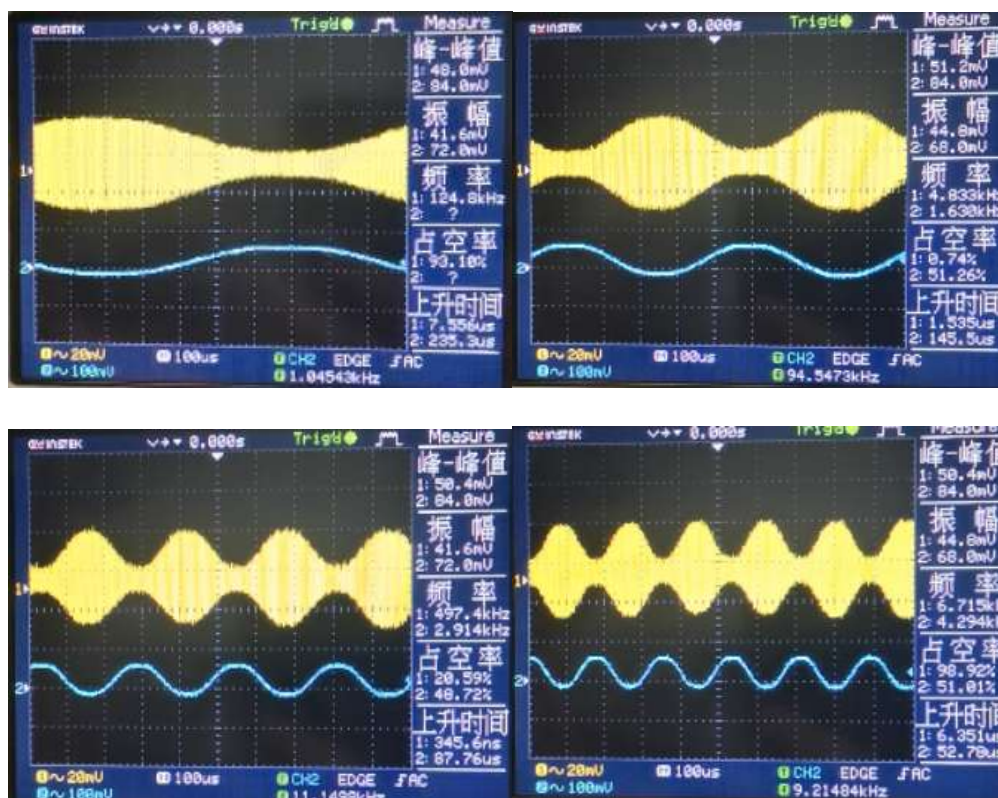
【任务一】4.增大调制信号的幅度 $V_{\Omega m}$ ，保持其他参数不变，观察并记录过调时的输出波形及此时的调制信号幅度 $V_{\Omega m}$ 值。





由公式 $v_{AM}(t) = V_{cm}(1 + M_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t$ 可知 M_a 随着 $V_{\Omega m}$ 的增大而增大，所以得到的输出波形的幅值也在不断增大。

(1) 【任务一】5、改变调制信号的频率 F ，保持其他参数不变，观察输出波形的变化。



由公式 $v_{AM}(t) = V_{cm}(1 + M_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t$ 可知，输出信号的包络的频率随着调制信号的频率增大而增大。

【思考题】

1. 振幅调制电路中 U1 的作用是什么？

放大调幅信号

2. DSB 波形和普通振幅调制波形有什么区别？

AM 调制波形的调幅波幅度是 DSB 调幅波幅度的 2 倍，频率是 DSB 的一半。

实验 4.3 包络检波实验

【实验目的】

- 1、进一步理解调幅信号的解调原理和实现方法
- 2、掌握包络检波器的基本电路及低通滤波器中的 R、C 参数对检波器输出的影响
- 3、进一步理解包络检波器中产生失真的机理及预防措施

【实验仪器与设备】

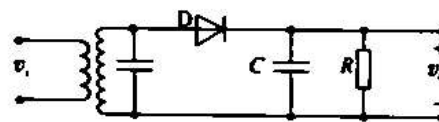
数字双踪示波器、万用表和实验模块 18—包络检波器。

【实验原理】

1. 原理简介

调幅信号的解调，通常称为“检波”，其实现方法可分为包络检波和同步检波两大类。根据调幅已调波的不同，采用的检波方法也不相同。对于幅度调制信号，由于其包络与调制信号呈线性关系，通常采用二极管峰值包络检波电路；而 DSB 或 SSB 信号的解调只能用同步检波。

二极管包络检波器分为峰值包络检波器和平均包络检波器。下图为二极管峰值包络检波器的原理电路。



图中，输入回路提供调幅信号源。

RC 电路有两个作用：一是作为检波器的负载，在两端产生解调输出的原调制信号电压；二是滤除检波电流中的高频分量。

因此 RC 电路应当满足：

$$\frac{1}{\omega_c C} \ll R, \frac{1}{\Omega C} \gg R$$

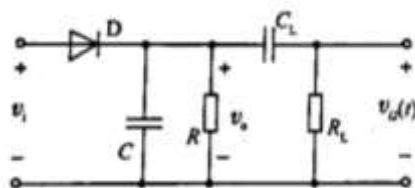
检波过程实质上就是信号源通过二极管向负载电容 C 充电和负载电容 C 对负

载电阻 R 放电的过程。充电时间常数为 $R_d C$ ，其中 R_d 为二极管正向导通电阻。放电时间常数为 RC 。通常 $R > R_d$ ，因此对 C 而言充电快，放电慢。经过若干个周期后，检波器的输出电压 v_o 在充、放电过程中逐步建立起来。该电压对二极管 D 形成一个大的负电压，从而使二极管在输入电压的峰值附近才导通，导通时间很短，电流导通角 θ 很小。当 C 充、放电达到动态平衡后， v_o 按高频周期作锯齿状波动，其平均值是稳定的，且变化规律与输入调幅的包络变化相同，从而实现了幅度调制信号的解调。

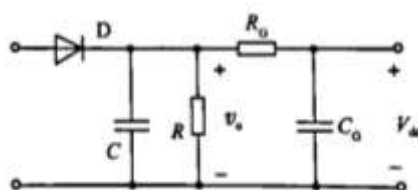
输出电压包含直流分量 V_{dc} 及低频分量 v_{Ω} ：

$$v_o(t) = V_{dc} + v_{\Omega}(t)$$

当电路元件选择得正确时， V_{dc} 接近但小于输入电压峰值。如果只需输出调制信号，则可在原电路上增加隔直电容 C_L 和负载电阻 R_L ，如下图所示

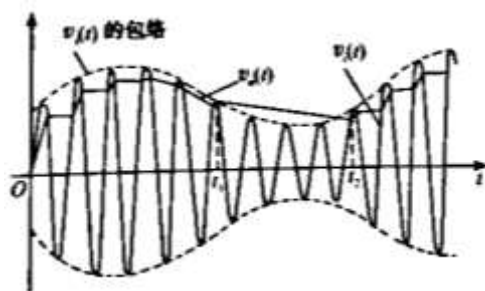


如果需要检波器提供与载波电压大小成比例的直流电压 (如用于自动增益控制)，则可用低通滤波器 $R_G C_G$ 滤除调制分量，取出直流，如下图所示



2、检波器的失真

(1) 惰性失真



惰性失真的产生是因为电容 C 通过 R 放电的速度大于包络的下降速度，于是包络产生为 RC 衰减曲线。

为避免产生惰性失真，必须保证在每一个高频周期内二极管导通一次，也就是使电容 C 通过 R 放电的速度大于或等于包络的下降速度。

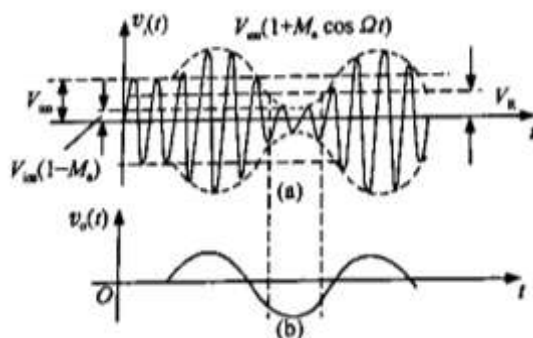
从而得到：

$$RC \leq \frac{\sqrt{1-M_a^2}}{\Omega M_a}$$

也就是

$$R_L C \leq \frac{\sqrt{1-M_a^2}}{\Omega_{\max} M_a}$$

(2) 负峰切割失真



负峰切割失真产生的原因是检波器的直流负载阻抗 $Z_L(0)$ 与交流负载阻抗 $Z_L(\Omega)$ 不相等，而且调幅指数太大。

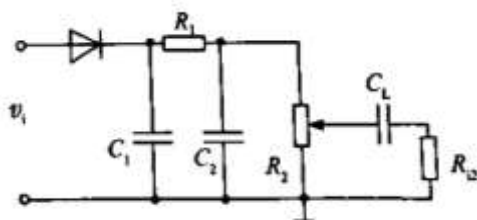
要防止负峰切割失真产生，必须限制交、直流负载的差别，即满足

$$M_a \leq \frac{R}{R_{i2} + R} = \frac{Z_L(0)}{Z_L(\Omega)}$$

式中， R_{i2} 为下一级低频放大器的输入等效电阻。实际上，现代设备一般采用

R_{i2} 很大的集成运算放大器, 不会产生负峰切割失真。

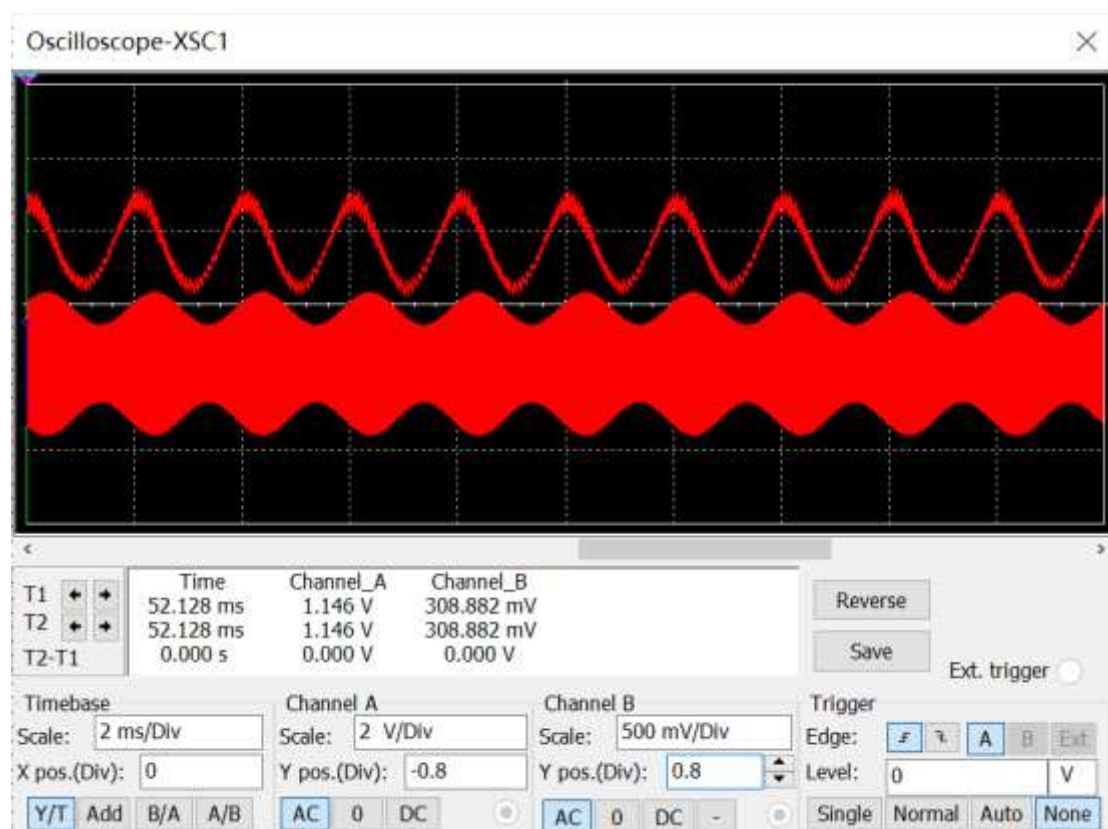
另外, 可以采用如下图所示的分负载检波电路, 以此减少 $Z_L(0)$ 与 $Z_L(\Omega)$ 的差别。



【Multisim 仿真】

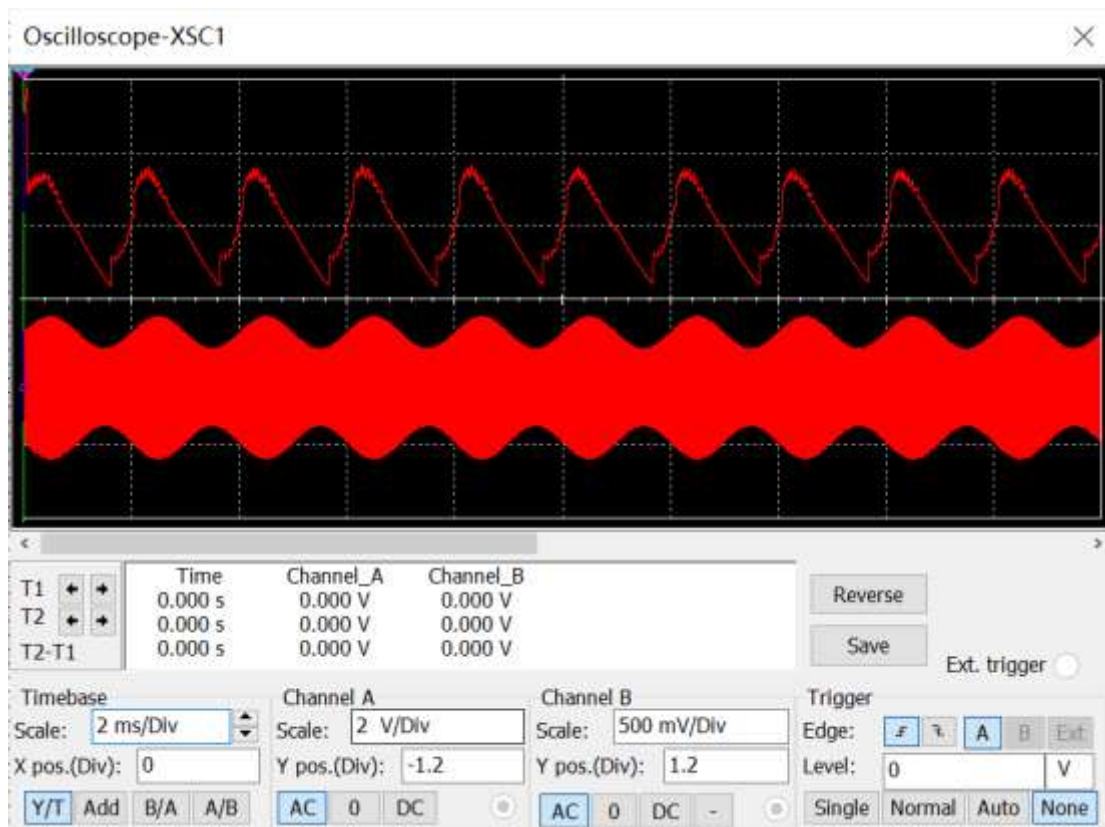
在 Multisim 电路窗口中, 创建如下图所示的二极管峰值包络检波电路, 设置调幅指数为 0.3。用虚拟示波器观察输入与输出信号的波形。

输入与输出信号如下图:



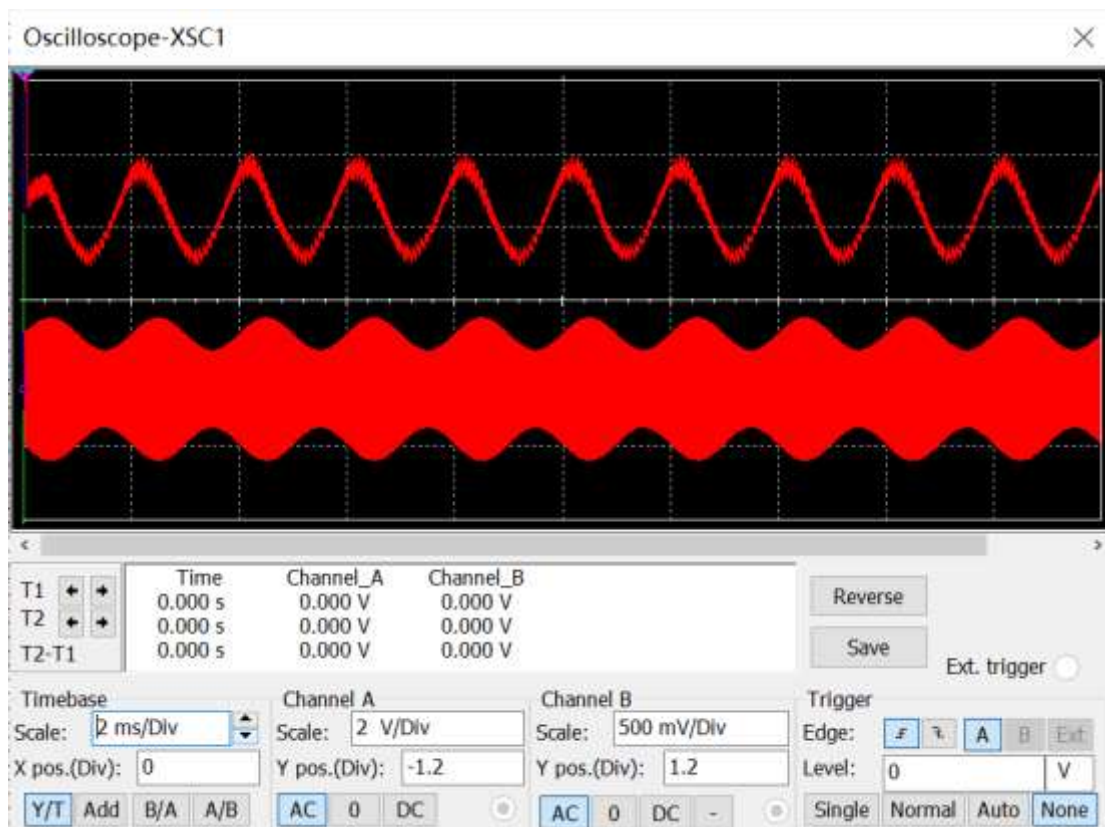
(1) 分别做以下仿真:

①将低通滤波器中的 C_L 的取值改为 $0.2\mu F$, 用虚拟示波器观察并记录输出信号的波形。



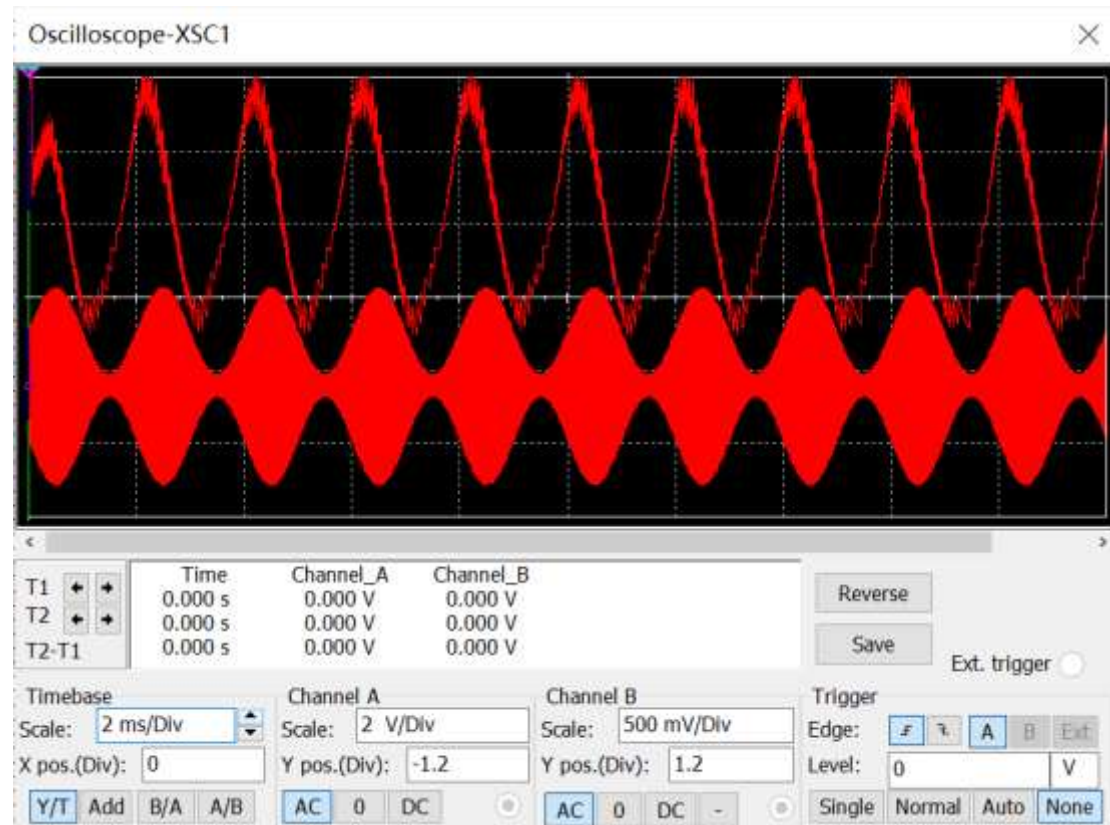
失真原因：高频失真，低通滤波器中的电容取值不够小，调制信号的高频部分被短路。

②修改检波电路参数，使 $R_L=400k\ \Omega$ ，用虚拟示波器观察并记录输出信号的波形。



失真原因：惰性失真，没有保证在每一个高频周期内二极管导通一次，即电容 C 通过 R 放电的速度小于包络的下降速度。

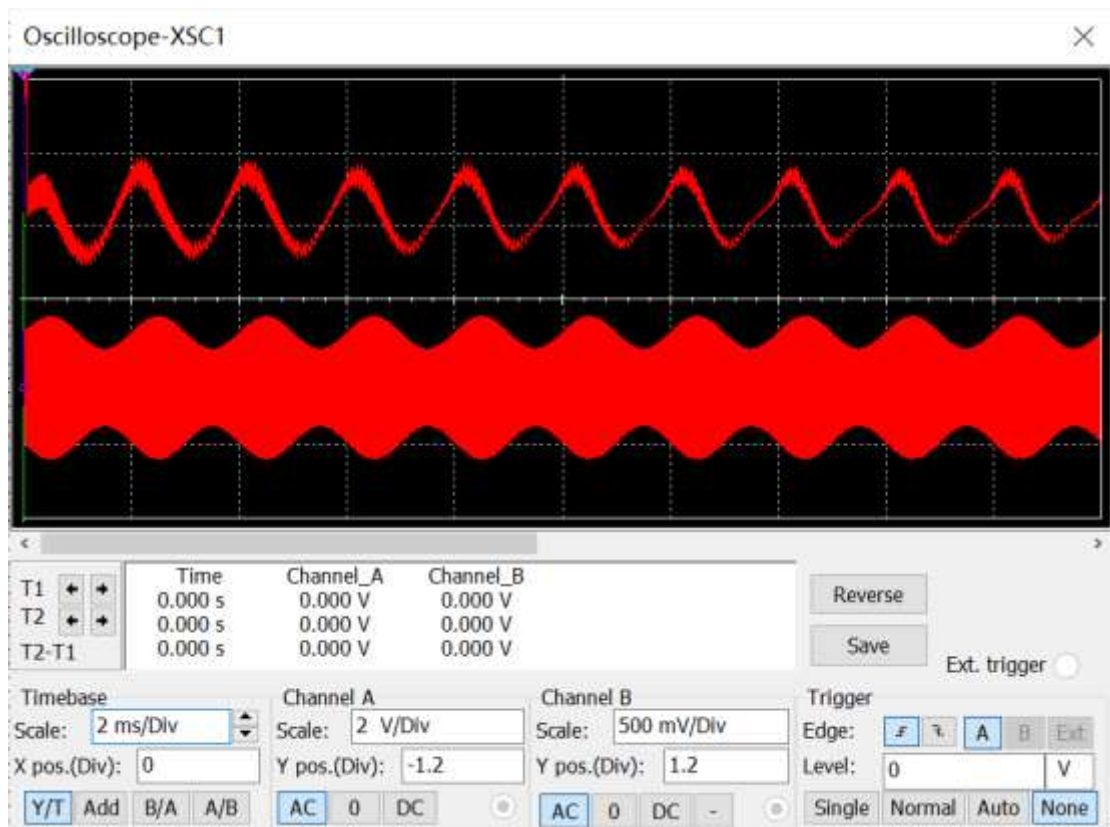
③将 AM 信号源的调幅指数 (M_a) 改为 0.8，再用虚拟示波器观察并记录输出信号的波形，并说明产生失真的原因。



失真原因：负峰切割失真，检波器的直流负载阻抗 $Z_L(0)$ 与交流（音频）负载阻抗 $Z_L(\Omega)$ 不相等，而且调幅指数太大，要防止负峰切割失真产生，必须限

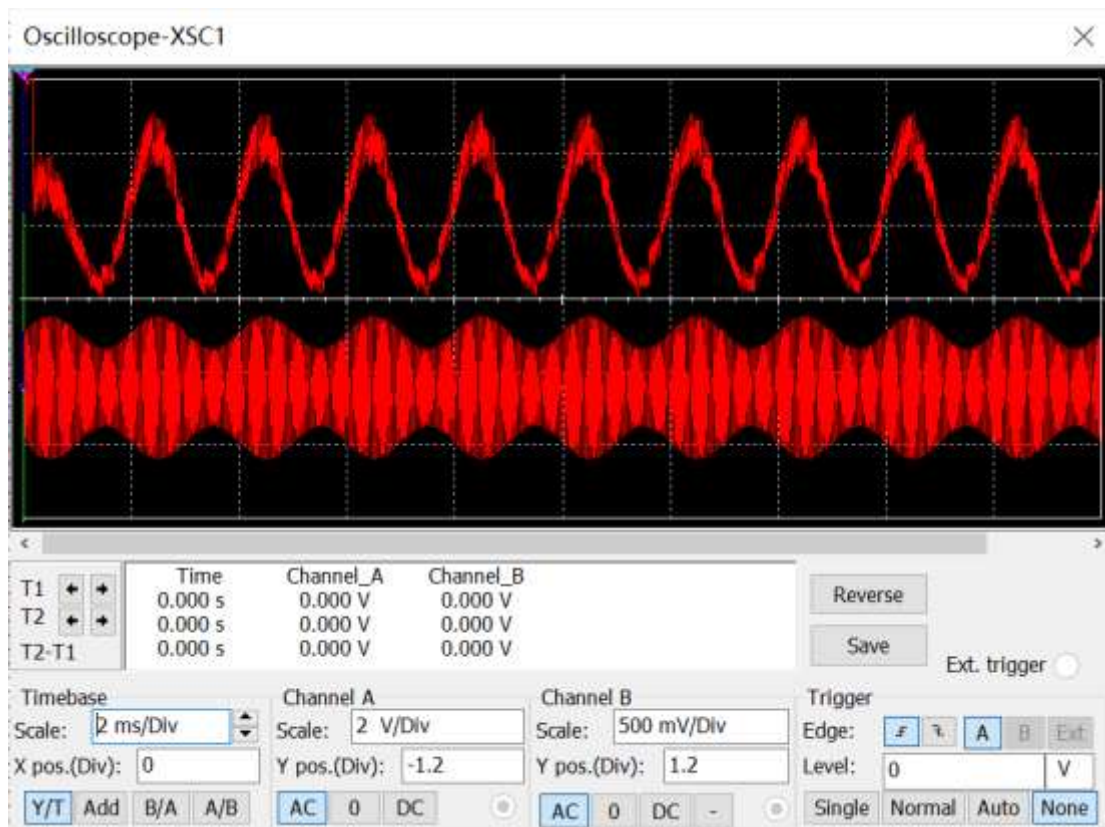
制交、直流负载的差别，即满足 $M_a \leq \frac{R}{R_{i2} + R} \frac{Z_L(\Omega)}{Z_L(0)}$ 。

④将电路中的隔直流电容 C_C 改为 $1 \mu F$ ，负载 R_1 的取值改为 $5k\Omega$ ，用虚拟示波器观察并记录输出信号的波形。



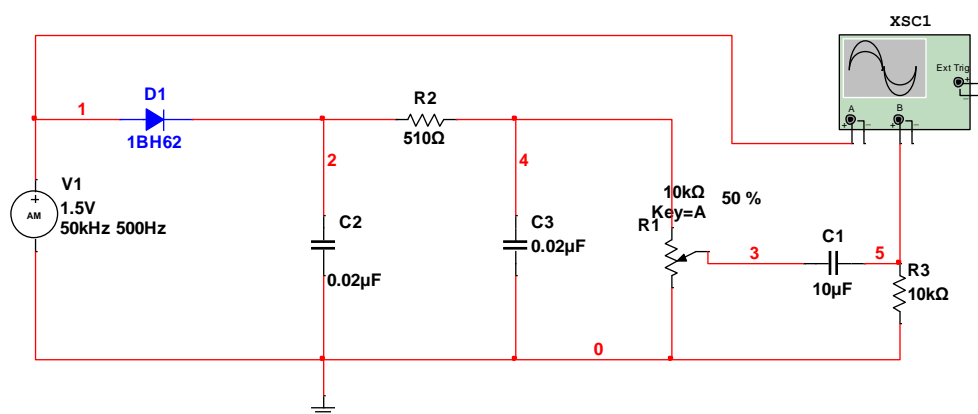
失真原因：低音频失真，电路中的隔直流电容取值不够大，调制信号的低频部分被开路。

⑤令 AM 信号源的载波频率为 20kHz, 再用虚拟示波器观察并记录输出信号的波形。

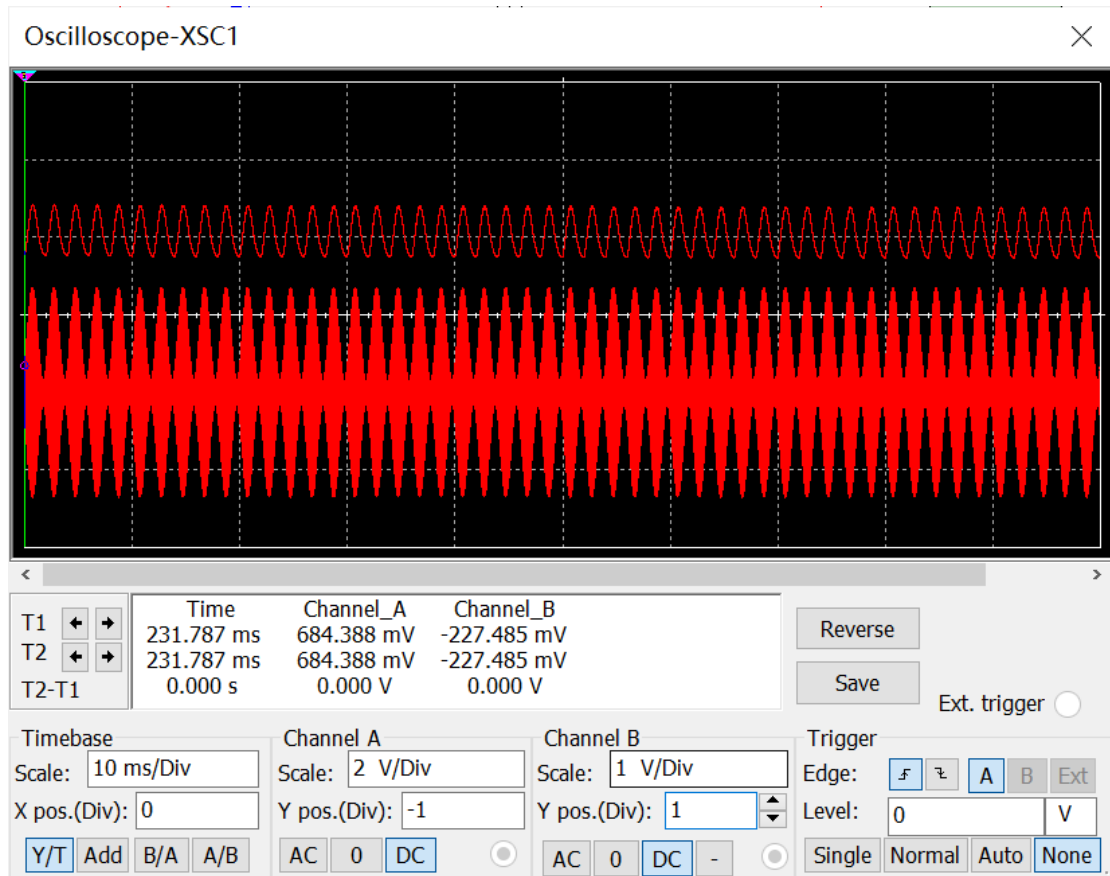


失真原因：失真原因：惰性失真，没有保证在每一个高频周期内二极管导通一次，即电容 C 通过 R 放电的速度小于包络的下降速度。

(2) 在 Multisim 电路窗口，创建如下图所示的电路，使检波器的输入信号保持 $M_a=0.8$ ，检查无误后，激活电路仿真，用虚拟示波器观察并记录输入与输出信号的波形。将所得结果与仿真 (1) 中的③所得到的结果进行比较，并写出得到的相应结论。



输入与输出波形如下：



与仿真（1）中的③所得到的结果比较可以发现分负载检波电路明显改善了负峰切割失真情况，当调制指数相同(两个实验中均为 0.8)的时候，可以通过限制交、直流负载的差别，来有效改善负峰切割失真的情况。

【任务一】

将电路置为基本二极管峰值包络检波电路

（1）断开开关 10K07/10K08（等效负载 R_{i2} 为无穷大），改变低通滤波器的滤波电容 C_L 的大小和电阻 R_L 的大小，用示波器观察输出信号的波形并记录。

1. 电阻 4.7k Ω + 电容 0.01 μF ：



调制指数过大且检波器的直流负载阻抗和交流负载阻抗的关系不再满足

$$M_a \leq \frac{R}{R_{i2} + R} = \frac{Z_L(0)}{Z_L(\Omega)}, \text{ 出现了负峰切割失真。}$$

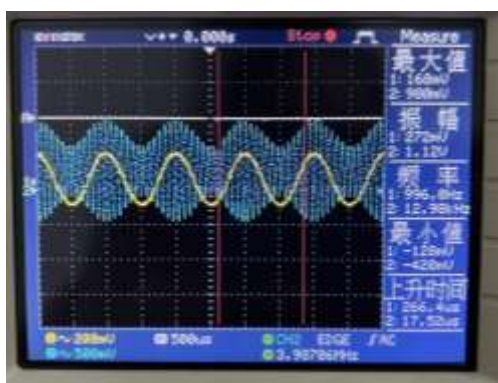
2. 电阻 $4.7\text{k}\Omega$ + 电容 $0.1\mu\text{F}$:



调制指数过大且检波器的直流负载阻抗和交流负载阻抗的关系不再满足

$$M_a \leq \frac{R}{R_{i2} + R} = \frac{Z_L(0)}{Z_L(\Omega)}, \text{ 仍是负峰切割失真。}$$

3. 电阻 $4.7\text{k}\Omega$ + 电容 $1\mu\text{F}$:



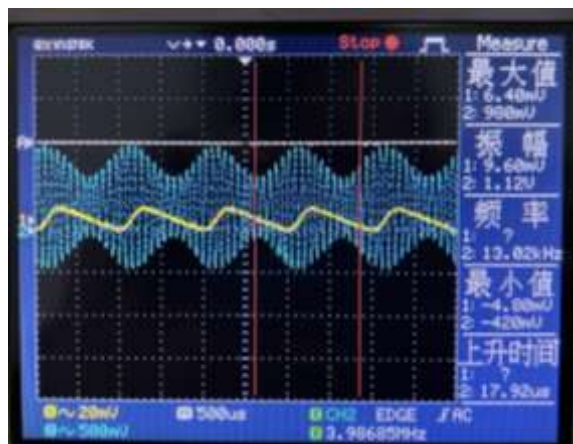
时间常数 RC 已经大于包络的下降速度,不再满足 $RC \leq \frac{\sqrt{1-M_a^2}}{\Omega M_a}$, 产生惰性失真。

4. 电阻 $30k\Omega$ + 电容 $0.01\mu F$:



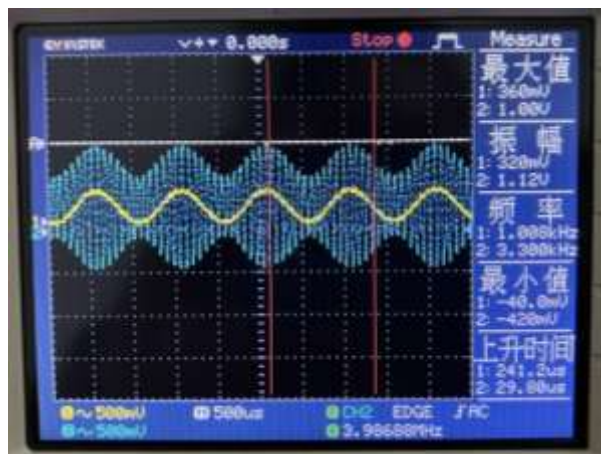
电阻变大, $M_a \leq \frac{R}{R_{i2} + R} = \frac{Z_L(0)}{Z_L(\Omega)}$ 更不满足, 出现负峰切割失真并且失真更严重

5. 电阻 $30k\Omega$ + 电容 $0.1\mu F$:



负峰切割失真并且失真更严重

6. 电阻 $30k\Omega$ + 电容 $1\mu F$:



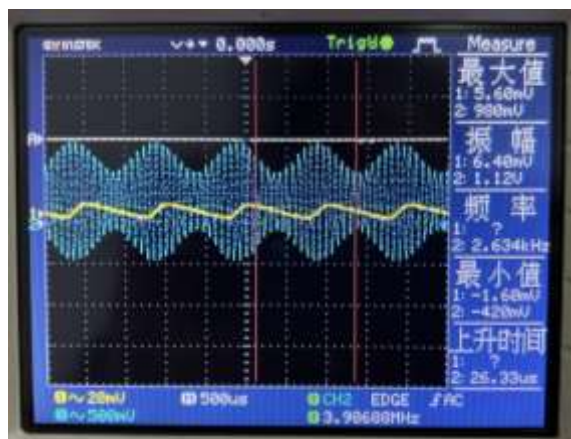
负峰切割失真并且失真更严重

7. 电阻 $47k\Omega$ + 电容 $0.01\mu F$:



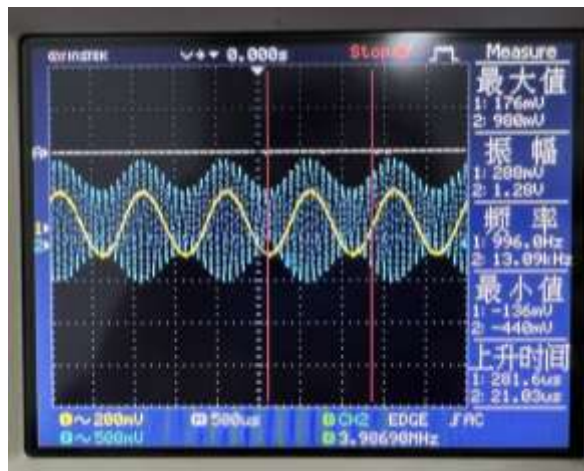
负峰切割失真并且失真更严重

8. 电阻 $47k\Omega$ + 电容 $0.1\mu F$:



负峰切割失真并且失真更严重

9. 电阻 $47\text{k}\Omega$ + 电容 $1\mu\text{F}$:

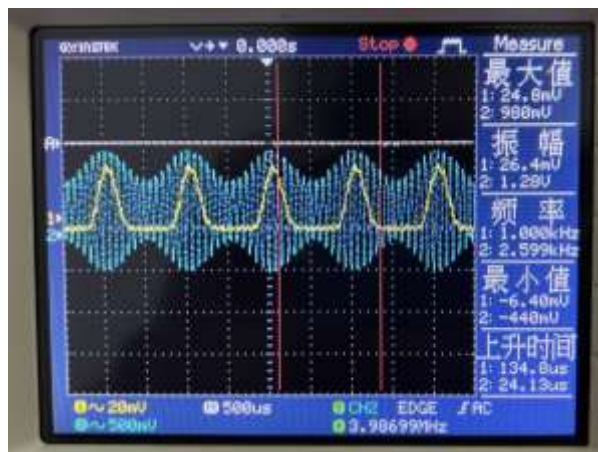


负峰切割失真和惰性失真并且失真非常严重

(2) 取步骤一中最理想的电阻 R_1 和电容 C_1 的值, 分别接通开关 10K07、10K08, 即改变等效负载 R_{i2} 的大小, 用示波器观察输出波形变化。

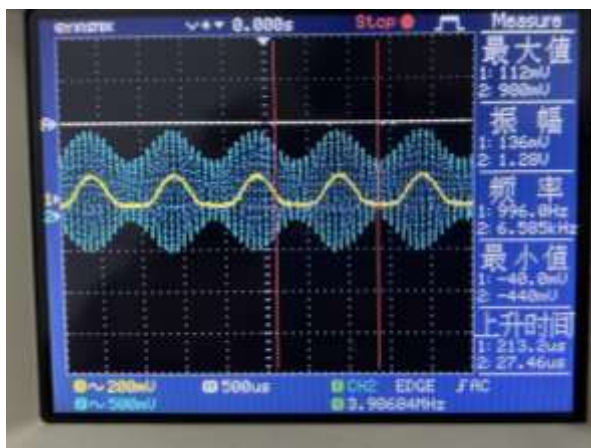
波形最理想的为电容为 $0.01\mu\text{F}$, 电阻为 $4.7\text{k}\Omega$

1. 接通 10K07:



负峰切割失真

2. 接通 10K08:



负载增大，满足 $M_a \leq \frac{R}{R_{i2} + R} = \frac{Z_L(0)}{Z_L(\Omega)}$ 条件，输出相对完整的正弦波。

(3) 将开关 10K11 接通，开关 10K04~10K08 断开，从 100UT02 端输出。

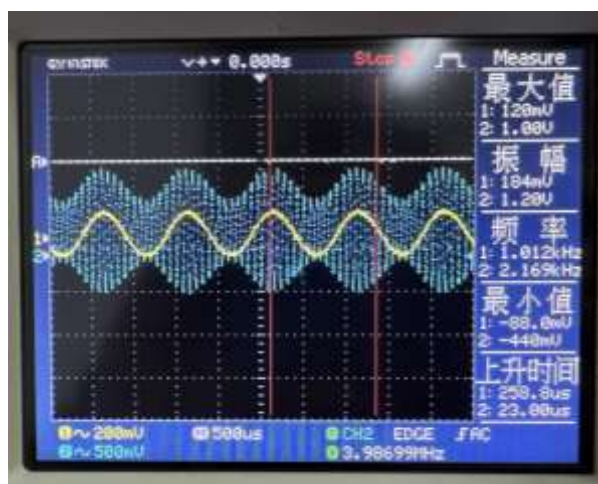
1. 断开开关 10K09、10K10 分别接通开关 10K01、10K02、10K03，即改变低通滤波器的滤波电容 C1 的大小，用示波器观察输出信号的波形并记录。

1. 滤波电容为 $0.01\mu F$ ：



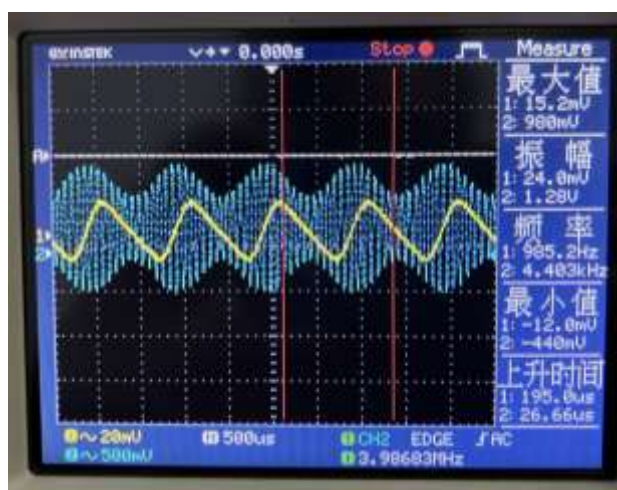
能输出相对完整的正弦波

2. 滤波电容为 $0.1\mu F$ ：



未出现负峰切割失真

3. 滤波电容为 $1\mu F$:

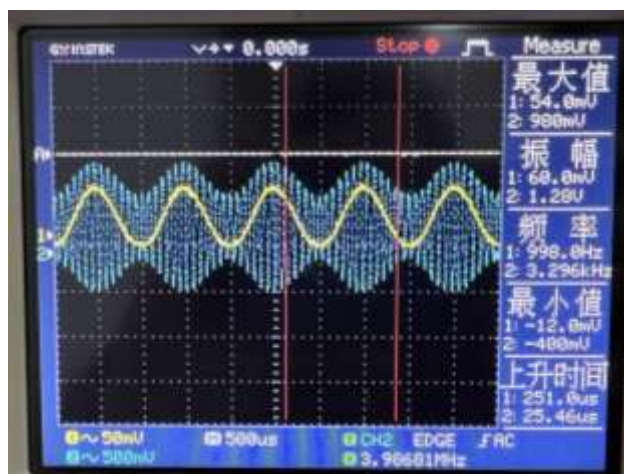


时间常数大，出现惰性失真

2. 取步骤 1 中输出波形最理想的电容 C_L 的值，分别接通开关 10K09、10K10，即改变等效负载 R_{i2} 的大小，用示波器观察输出信号的波形并记录。

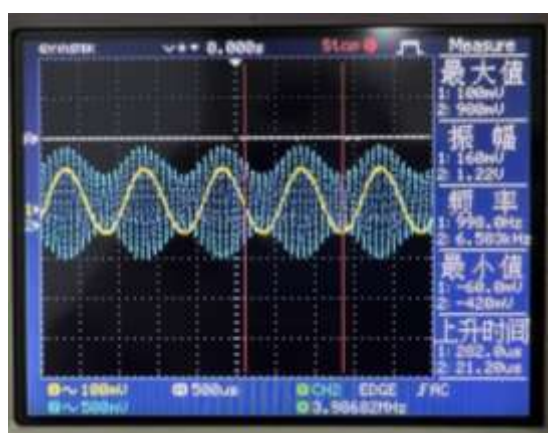
波形最理想时 $C_L = 0.01\mu F$

1. 接通 10K09:



按理说应该出现负峰切割失真，但是实验结果好像不理想

2. 接通 10K10:



分负载检波电路没有完全消除负峰切割失真。

【思考题】

1. 产生惰性失真的原因

过分增大 R_L 和 C 值，致使二极管截止期间 C 通过 R_L 的放电速度过慢，在某时刻跟不上输入调幅波包络的下降速度。

2. 产生顶峰失真的原因

调制系数 M_a 较大时，调制信号的最小振幅可能低于 V_r ，使二极管截止，不受输入信号控制。