

# 浙江大学

## 本科实验报告

课程名称：通信原理实验

姓 名：黄嘉欣

学 院：信息与工程学院

系：信息与工程学系

专 业：信息工程

学 号：3190102060

指导教师：龚淑君 金向东

2022 年 4 月 6 日

# 浙江大学实验报告

专业： 信息工程  
姓名： 黄嘉欣  
学号： 3190102060  
日期： 2022 年 4 月 6 日  
地点： 东四-319

课程名称： 通信原理实验      指导老师： 龚淑君 金向东      成绩： \_\_\_\_\_  
实验名称： 幅度调制与解调      实验类型： 设计性实验      同组学生： 张维豆

## 一、实验目的

- ① 掌握幅度调制的原理和实现方法；
- ② 对调幅波信号的时域、频域特性进行测量分析；
- ③ 掌握包络检波、同步检波的实现方法；
- ④ 对解调输出信号进行测量分析。

## 二、实验原理

在通信系统中，必须将携带信息的基带信号调制到射频载波上才能发射。同样，接收到的信号必须进行相应的解调，因此调制与解调是必要的过程。调制，就是用调制信号去控制载波信号的某个参数，解调是调制的逆过程，是将载波信号里的调制信号恢复出来。幅度调制就是由调制信号去控制载波信号的振幅，使它按调制信号的规律变化。幅度调制有三种：普通调幅（AM）、抑制载波的双边带调幅（DSB）和抑制载波的单边带调幅（SSB）。

### ① 幅度调制：

设载波信号为：  $v_c(t) = V_{cm} \cos \omega_c t$ ，音频调制信号为：  $v_{\Omega}(t) = V_{\Omega m} \cos \Omega t$ 。根据幅度调制的定义，用调制信号控制载波信号的幅度，因此，调幅波信号可表示为：

$$v(t) = (V_{cm} + k v_{\Omega}(t)) \cos \omega_c t = V_{cm} (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

其中， $k$ 是由电路决定的常量， $m_a = \frac{k V_{\Omega m}}{V_{cm}}$  是调幅系数，也称调制度。当  $m_a \leq 1$  时，调幅波的包络包含了调制信号的信息，当  $m_a > 1$  时，调幅波的包络出现过零点，包络不再体现调制信号的信息，调制出现失真。

将上式展开可得：

$$v(t) = V_{cm} \cos \omega_c t + \frac{1}{2} m_a V_{cm} \cos(\omega_c + \Omega) t + \frac{1}{2} m_a V_{cm} \cos(\omega_c - \Omega) t$$

因此,从频域角度看,已调波含有三个频谱分量:载波以及载波与调制信号频率的和频、差频分量,调制信号的频谱线性搬移到了载波频率的两边。和频、差频分量携带了调制信号的信息,载波分量则没有携带任何有用信息,因此,从功率的有效传输性方面来说,效率不是很高。

从功率有效性方面考虑,将普通调幅波中的载波抑制掉,就得到抑制载波的双边带调幅信号(DSB)。将调制信号与载波信号相乘,即可得到 DSB 信号。DSB 信号的表达式如下:

$$v(t) = AV_{\Omega m}V_{cm} \cos\Omega t \cos\omega_c t = \frac{1}{2} AV_{\Omega m}V_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{1}{2} AV_{\Omega m}V_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t$$

若将 DSB 信号两个频谱分量中的一个分量用滤波器滤除,就可以得到抑制载波的单边带调幅信号(SSB)。

## ② 调幅波的解调:

### (1) 调幅波的包络检波:

普通调幅波信号的包络中包含音频调制信号的信息,因此可以使用包络检波电路将音频调制信号从已调波中解调出来。基本的包络检波电路如图 2.1 所示,由二极管和 R、C 低通滤波器构成。低通滤波器的时间常数应该大于载波信号周期,小于调制信号周期,以滤除载波信号,让音频调制信号通过。根据输入信号的大小,电路有两种工作模式:平方律检波和峰值包络检波。

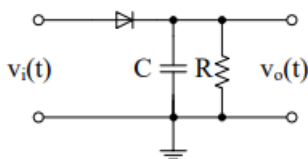


图 2.1 二极管包络检波电路

当输入的调幅波为小信号时,二极管的伏安特性在工作点处展开成幂级数函数,解调信号从函数的二次方项中获得,多余的高频分量由滤波器滤除。这种方式称为平方律检波,会出现比较多的高次谐波失真。

当输入的调幅波为大信号时,如图 2.1 所示,若输入信号大于电容两端电压,二极管导通,输入信号通过二极管对电容 C 充电,因为二极管导通电阻很小,所以充电时间短,电容 C 上的电压很快达到输入信号的峰值。若输入信号小于电容两端的电压,二极管截止,电容 C 通过电阻 R 放电,因为电阻 R 比二极管的导通电阻大很多,所以放电时间相对于充电时间来说比较长,所以在电容 C 上面的电荷还远没释放完时,在输入信号下一个正半周期的某一时

刻又开始给电容 $C$ 充电。因此，电容两端电压中的交变量是随输入信号的包络变化而变化的，也就是随调制信号的变化而变化。这种方式称为峰值包络检波。

### （2）包络检波的失真：

对于峰值包络检波器，如果元器件参数选择不当，检波输出信号会出现失真，主要考虑两种情况下的失真。

第一种是惰性失真：当 $RC$ 时间常数过大，电容 $C$ 通过电阻 $R$ 放电的速度过慢，使得电容器上的电压变化跟不上信号包络的下降速度。在输入信号的好几个周期内，二极管都没有导通，则输出电压没有反应输入信号的包络变化，出现失真。为了避免产生惰性失真，电容 $C$ 通过电阻 $R$ 放电的速度不能小于输入信号包络下降的速度。因此，不产生惰性失真的条件是：

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

第二种是负峰切割失真：在接收机中，检波器后面接音频放大器。如图 2.2 所示，假设检波器下级电路的输入阻抗为 $R_L$ ，那么检波器的直流负载为 $R$ ，交流负载为 $R//R_L$ 。检波器输出的交流、直流电流幅度的比值为：

$$m_a \frac{R}{R//R_L} = m_a \frac{R + R_L}{R_L}$$

当这个比值大于 1 时，检波电流中的交流量大于直流量，电流出现负值。因为二极管是单向导电的，电流不可能为负值，只能为零，所以检波输出电压的负峰值被削平，也就是产生负峰切割失真。因此，不产生负峰切割失真的条件就是上述比值小于 1。

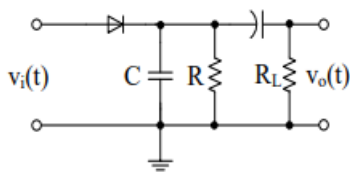


图 2.2 带负载的包络检波电路

### （3）调幅波的同步检波：

同步检波也称相干解调，它是将调幅波信号与另外一个与载波信号同频同相的同步信号相乘，然后通过滤波器将音频调制信号滤出。

以对 DSB 信号的解调为例，假设 DSB 信号为：

$$v_{DSB}(t) = AV_{\Omega m} V_{cm} \cos \Omega t \cos \omega_c t$$

同步信号与载波信号相同，为：

$$v_c(t) = V_{cm} \cos \omega_c t$$

将两信号相乘，滤除高频分量后，得到音频调制信号：

$$v_o(t) = \frac{1}{2} A V_{\Omega m} V_{cm} \cos \Omega t$$

### 三、实验电路分析

AM、DSB 调制实验电路如图 3.1 所示。使用芯片 MC1496 实现两输入信号的乘法功能， $JP_3$  端口输入高频载波信号， $JP_2$  端输入音频调制信号。AM 幅度调制信号从  $JP_4$  端输出，通过  $J_3$  跳线可以选取正向或负相已调信号的输出。在  $JP_3$  端输入高频载波信号，调节定位器  $WR_1$ ，使  $JP_4$  端输出的载波信号幅度最小，再在  $JP_2$  端输入音频调制信号，则  $JP_4$  端输出抑制载波的幅度调制信号 DSB。

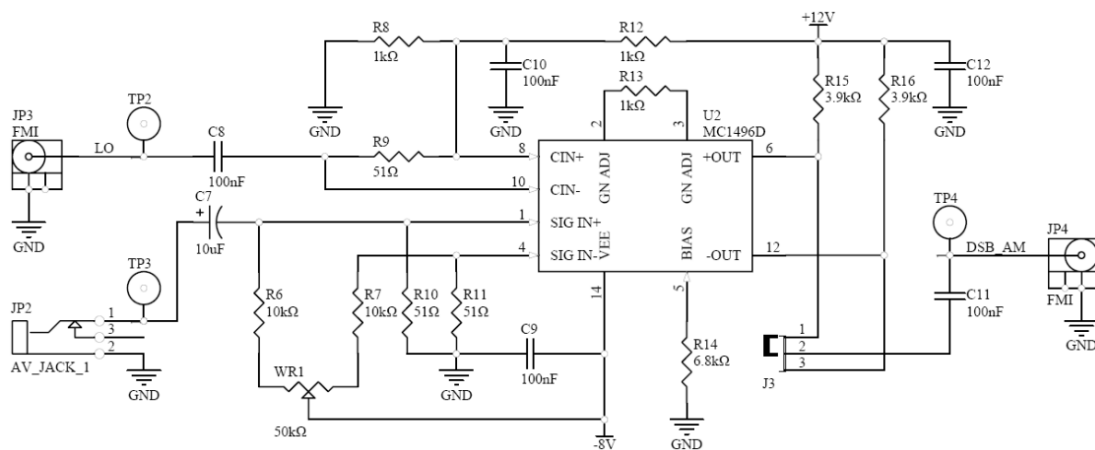


图 3.1 AM、DSB 调制电路

包络检波实验电路如图 3.2 所示。输入信号由外部信号源在  $JP_4$  端提供，接通跳线  $J_5$ ，将信号送到检波电路中。为避免实验板上其它部分电路对包络检波电路的影响，跳线  $J_3$ 、 $J_4$  要断开。在  $TP_8$  端口可以观察包络检波输出。另外，通过改变  $J_1$  的跳线方式，选择不同的直流电阻阻值，改变滤波电路的时间常数，可在  $TP_8$  端观察惰性失真情况；通过改变  $J_2$  的跳线方式，改变音频交流负载的阻抗值，在  $TP_{10}$  端可观察负峰切割失真情况。

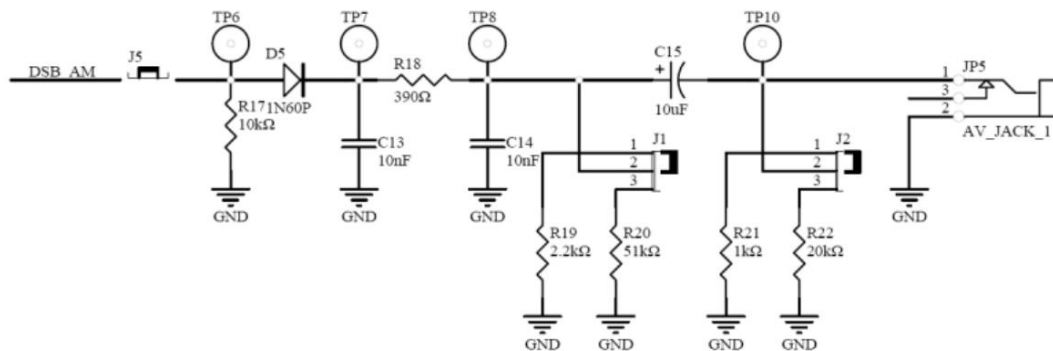


图 3.2 包络检波电路

同步相干解调实验电路如图 3.3 所示，使用调制、解调芯片 MC1496 实现两输入信号的乘法功能。本地载波信号与幅度调制时的载波信号是同一个信号，接通跳线  $J_4$ ，幅度调制信

号直接从电路板调制电路中获得。此时，为避免电路间的干扰，跳线 $J_5$ 要断开。经过滤波后的解调输出信号从 $JP_6$ 端输出。

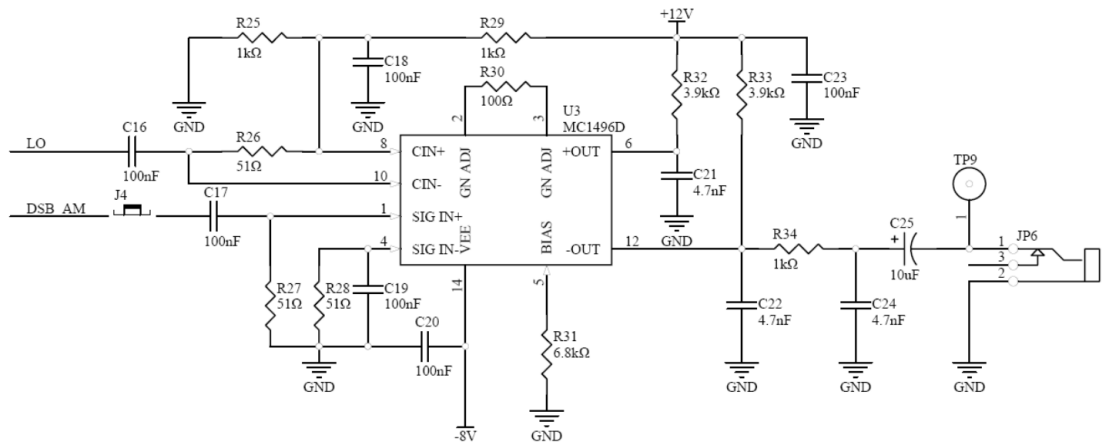


图 3.3 同步相干解调电路

#### 四、实验设备

- |               |      |
|---------------|------|
| ① 实验板 No03    | 1 块； |
| ② 信号源         | 2 台； |
| ③ 双踪示波器       | 1 台； |
| ④ 频谱分析仪（含 TG） | 1 台； |
| ⑤ 万用表         | 1 台。 |

#### 五、实验内容与步骤

- ① 幅度调制实验：
- (1) 测试电路搭建：

测试电路按照图 5.1 所示方式连接。电路板由+12V 电源供电， $JP_3$ 端是本振信号输入端， $JP_2$ 端是低频调制信号输入端。 $JP_4$ 端是已调波信号输出端，可以用示波器观察其波形，它的频率特性可以用频谱分析仪测量。

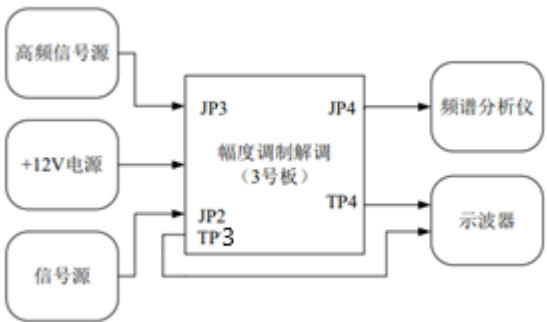


图 5.1 幅度调制测试连接图

## (2) 普通幅度调制 (AM):

$JP_3$ 端由高频信号源输入频率为 465kHz, 大小为 0dBm 的正弦波作为载波信号输入;  
 $JP_2$ 端由信号源输入频率为 1kHz, 大小为 0dBm 的正弦波作为调制信号; 接通跳线 $J_3$ 的 1、2 端或者 2、3 端; 将平衡调节电位器 $WR_1$ 逆时针或顺时针旋到底。

## i) 时域法调制度测量:

示波器观测到的 AM 调制信号波形如图 5.2 所示, 则 AM 调制度可采用下式计算得到:

$$m = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%$$

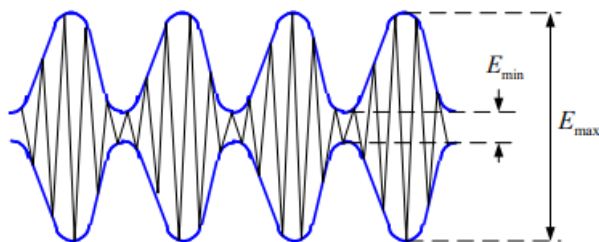


图 5.2 AM 信号时域波形

用示波器观察调制输出信号波形(注意, 示波器观察时将频谱分析仪的电缆从 $JP_4$ 脱开, 避免信号被衰减): 双通道观测, 以 $JP_2$ 端输入的调制信号为示波器的触发源, 观察调制输出 $TP_4$ 波形, 测量其调制度。改变调制信号幅度, 或调节平衡调节电位器 $WR_1$ , 分别将调制度调整到 30%、50%和 100%, 记录相应波形。

## ii) 频域法调制度测量:

AM 调制度也可以采用频谱分析法得到: 当分辨率带宽设置为 $RBW \ll$  调制频率 $f_m$  时, 频谱分析仪可以观测到载波信号 $f_c$ 及相隔一个调制频率 $f_m$ 的两个边带, 如图 5.3 所示。则调制度可由边带幅度和载波幅度的差值 $\Delta$ 计算出来:  $m = 2 \times 10^{\Delta/20} \times 100\%$ 。

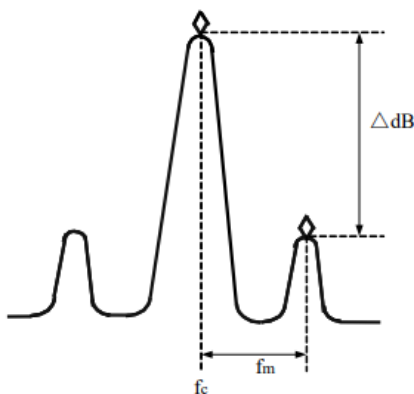


图 5.3 AM 信号频谱图

将频谱分析仪的射频输入电缆连接调制输出接口 $JP_4$ ; 设定频谱分析仪的中心频率为 465kHz, 扫描带宽为 10kHz, RBW 为 100Hz。观察调制输出信号的载波与上下边带频谱分

量。改变调制信号幅度,或调节平衡调节电位器 $WR_1$ ,将边带与载波的幅度差 $\Delta$ (可采用差值光标法测量)分别调整为-16.5dBc、-12dBc和-6dBc,分别计算相应的AM调制度。

### (3) 双边带调制(DSB):

在普通幅度调制的基础上,调节电位器 $WR_1$ ,同时观察信号频谱,直到频谱中载波分量降到最低,这就实现抑制载波幅度调制(DSB)。用示波器观察并记录调制输出信号的波形(注意,将频谱分析仪的电缆从 $JP_4$ 脱开)。

另一种实现DSB调制的调试方法可以直接采用示波器完成,步骤为:在不输入调制信号(基带)时,示波器观察调制输出 $TP_4$ 波形;调节电位器 $WR_1$ 直到输出的载波信号幅度降为最低;再在调制信号输入端 $JP_2$ 输入相应的调制信号,也可实现DSB调制。

## ② 同步相干解调实验:

### (1) 测试电路搭建:

测试电路按照图5.4所示方式连接。接通跳线 $J_4$ ,断开 $J_5$ 跳线,将幅度调制实验中的已调波作为解调输入信号,本地载波信号与调制实验中的载波信号是同一个信号。解调信号从 $JP_6$ 端输出,可以用示波器在 $TP_9$ 端口观测。

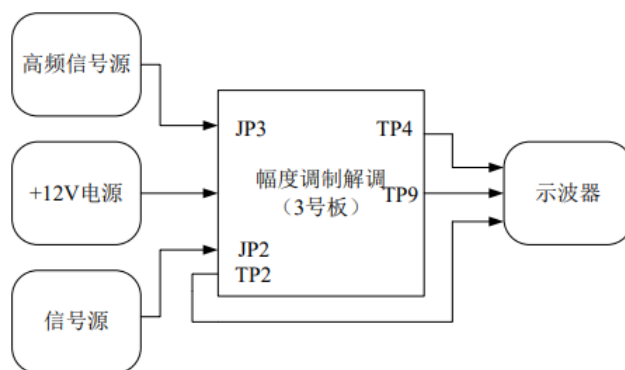


图 5.4 同步相干解调测试连接图

### (2) AM 同步解调:

调整 $WR_1$ ,使调制电路产生AM调制信号,用示波器观测同步解调输出信号。改变 $JP_2$ 端调制信号幅度,从而改变已调波信号的调制度,观察同步解调输出信号的幅度变化。

### (3) DSB 同步解调:

调整 $WR_1$ ,使调制电路产生DSB调制信号,用示波器观测同步解调输出信号。改变 $JP_2$ 端调制信号幅度,观察同步解调输出信号的幅度变化。

## ③ 包络检波实验:

### (1) 测试电路搭建:



测试电路按照图 5.5 所示方式连接。作为包络检波输入的 AM 已调波信号，由外部信号源提供，从  $JP_4$  端输入，断开跳线  $J_3$ 、 $J_4$ ，接通跳线  $J_5$ ，将输入信号送到包络检波电路中，可以用示波器在  $TP_6$  端口观测。解调信号从  $JP_5$  端口输出。在  $TP_7$  端口可以观测电容两端的充、放电波形，在  $TP_8$  端口可以观测解调输出信号的惰性失真情况，在  $TP_9$  端口可以观测解调输出信号的负峰切割失真情况。

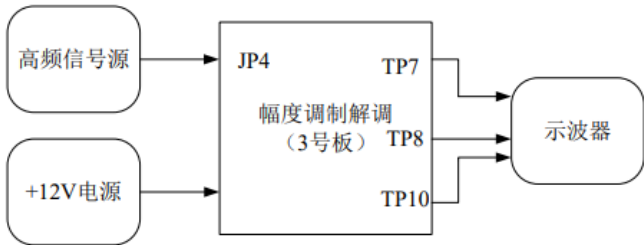


图 5.5 包络检波测试连接图

(2) 包络检波信号的测量：

由高频信号源从  $JP_4$  端输入载波频率为 465kHz，大小为 10dBm（即  $2V_{p-p}$ ），调制信号频率为 1kHz 的正弦波，调制度为 30% 的 AM 调幅信号。

- i) 改变跳线  $J_1$ ，选择不同的时间常数，用示波器在测试点  $TP_8$  观察检波输出信号的惰性失真情况；
- ii) 改变跳线  $J_2$ ，选择不同的交流阻抗，用示波器在测试点  $TP_{10}$  观察检波输出信号的负峰切割失真情况；
- iii) 在无失真时，改变输入信号的调制度，观察对输出信号的影响（何时出现失真）？

六、实验结果记录与分析

① 幅度调制实验

(1) 普通幅度调制（AM）

i) 时域法调制度测量

调整调制信号的幅度为  $-10dBm$ ，测得  $E_{max} = 0.349V$ ， $E_{min} = 0.072V$ ，故调制度  $m = \frac{E_{max}-E_{min}}{E_{max}+E_{min}} = 65.796\%$ 。同理，将调制幅度改为  $-20dBm$ ，调节  $WR_1$ ，得到调制度如下表所示：

表 6.1 时域法调制度测量记录

$E_{max}/mV$	205.5	150.0	94.5
$E_{min}/mV$	114.0	52.5	0
$m$	28.64%	48.15%	100%

三种情况对应的时域波形分别为：

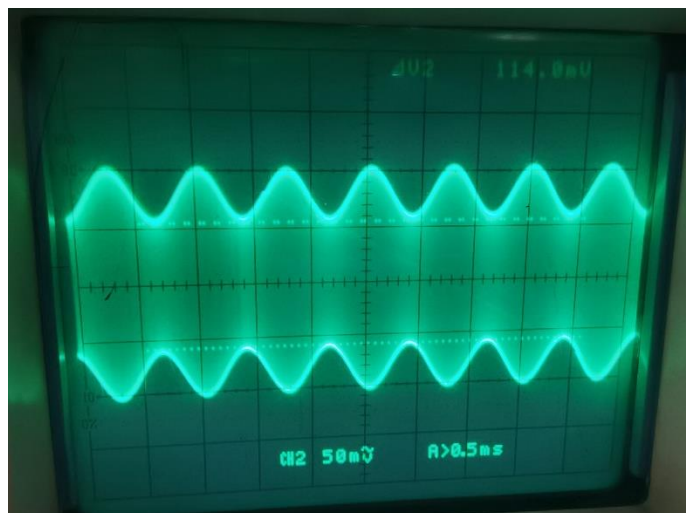


图 6.1 调制度为 28.64%时的 AM 信号时域波形

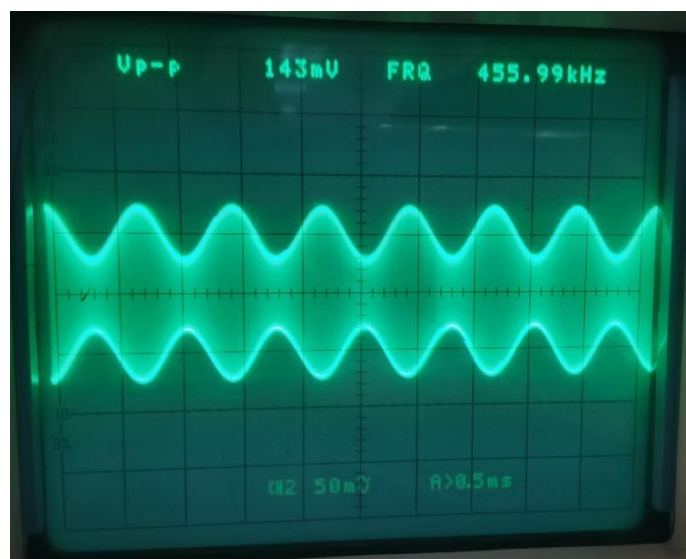


图 6.2 调制度为 48.15%时的 AM 信号时域波形

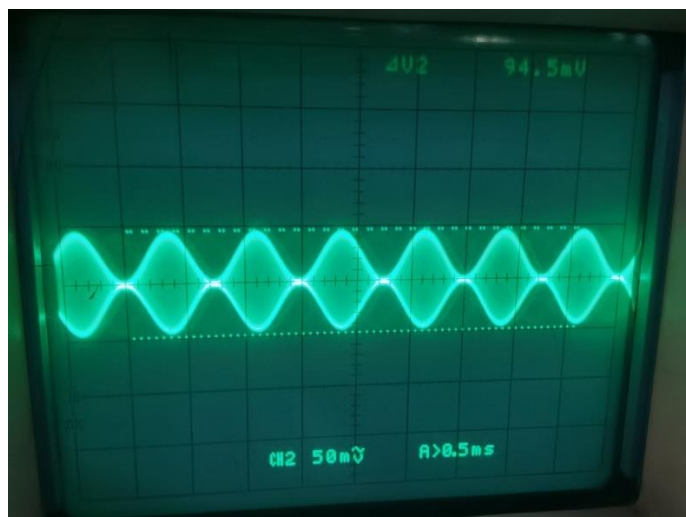


图 6.3 调制度为 100%时的 AM 信号时域波形

ii) 频域法调制度测量

调节电位器 $WR_1$ ，发现频谱仪上载波分量的幅度发生改变，而上下边带频谱分量基本不变。通过差值光标法测量边带幅度和载波幅度的差值，可以得到调制度如表 6.2 所示：

表 6.2 频域法调制度测量记录

$\Delta/\text{dBc}$	-16.32	-12.08	-6.06
$m$	30.55%	49.78%	99.55%

三种情况对应的时域波形分别为：

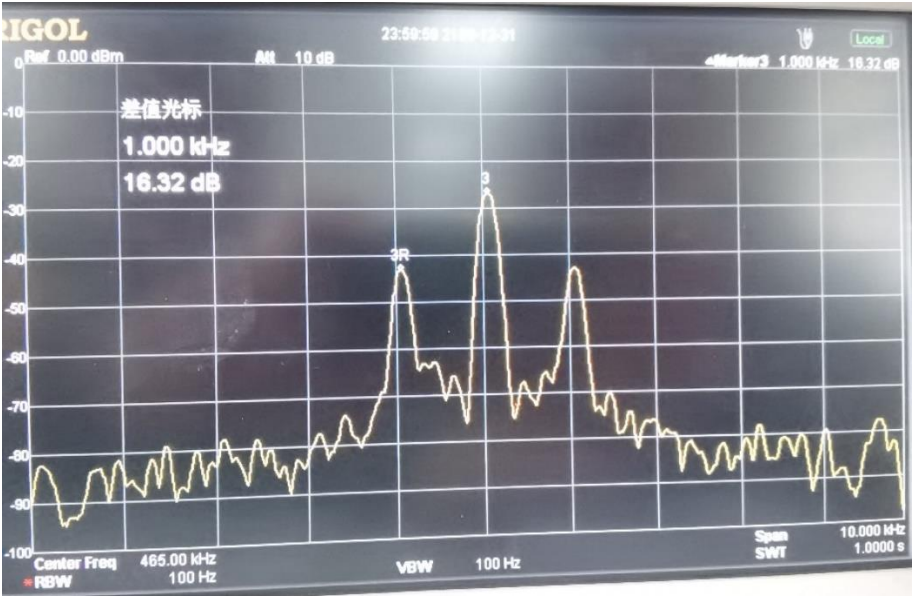


图 6.4 幅度差为-16.32dBc时的 AM 信号频域波形

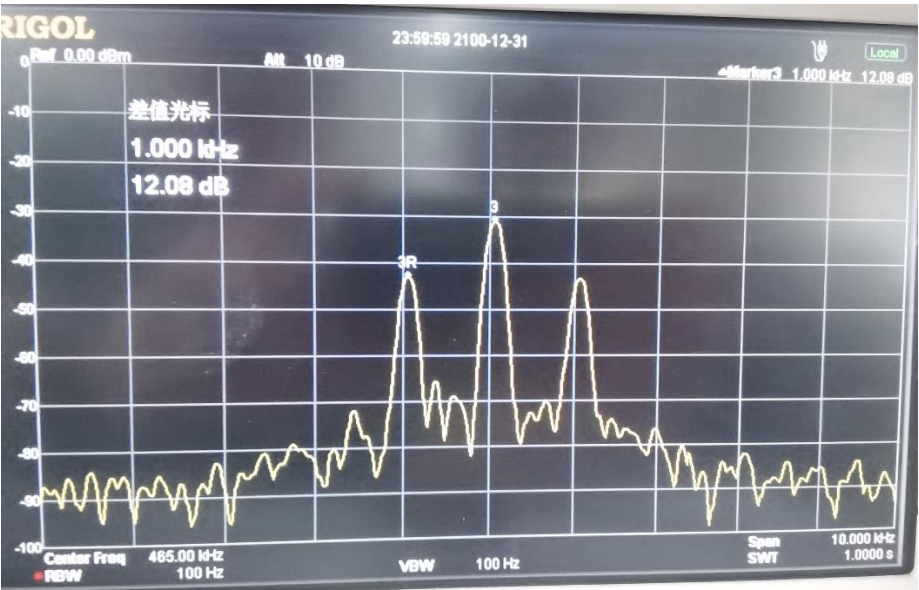


图 6.5 幅度差为-12.08dBc时的 AM 信号频域波形

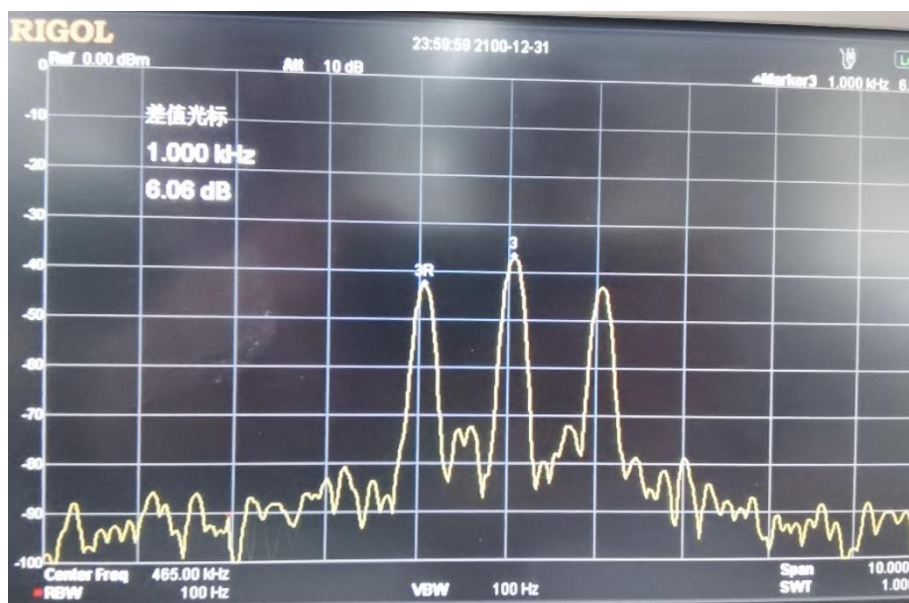


图 6.6 幅度差为 $-6.06\text{dB}$ 时的 AM 信号频域波形

## (2) 双边带调制 (DSB)

调节电位器 $WR_1$ 至信号频谱中载波分量降到最低,可用示波器观察到调制输出信号的波形如图 6.7 所示。显然,此时输出信号的包络已不直接表示调制信号。

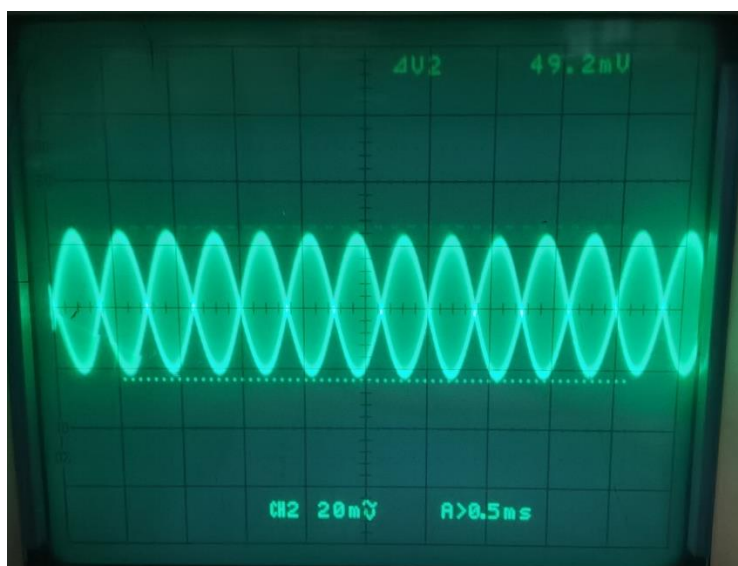


图 6.7 DSB 调制输出信号时域波形

## ② 同步相干解调实验

### (1) AM 同步解调

调整 $WR_1$ ,使调制电路产生 AM 调制信号,此时得到的解调输出信号为正弦波,其波形如下图所示:



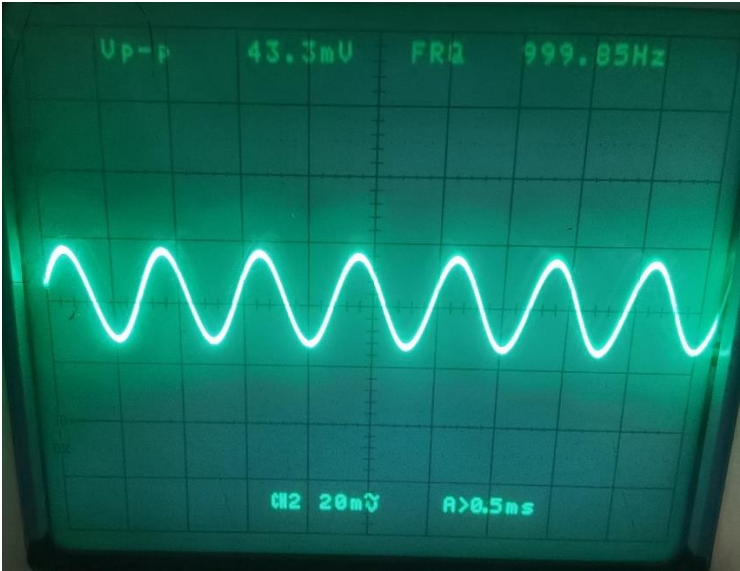


图 6.8 AM 同步解调输出信号波形

改变信号源输出的调制信号幅度，可得同步解调输出信号的幅度变化如下表所示：

表 6.3 AM 同步解调输出信号幅度变化记录

调制信号幅度/ $\text{dBm}$	-20	-10	0
输出信号幅度/ $\text{mV}$	29.4	89.6	276

可以发现，随着调制信号幅度不断增大，输出信号的幅度也在增大，与理论相一致。

(2) DSB 同步解调

同理，调整 $WR_1$ ，使调制电路产生 DSB 调制信号，此时得到的解调输出信号仍为正弦波。改变调制信号幅度，测得同步解调输出信号的幅度变化为：

表 6.4 DSB 同步解调输出信号幅度变化记录

调制信号幅度/ $\text{dBm}$	-20	-10	0
输出信号幅度/ $\text{mV}$	30.5	89.9	280

与 AM 同步解调类似，随着调制信号幅度不断增大，输出信号的幅度也在增大。除此之外，DSB 同步解调所得输出信号与 AM 同步解调的结果差异不大，与预期效果吻合较好。

③ 包络检波实验

(1) 包络检波信号的测量

i) 改变跳线 $J_1$

设置 AM 调幅信号的调制度为 30%。当接通跳线 $J_1$ 的 1、2 端时，得到的输出信号波形如下，此时未出现失真：

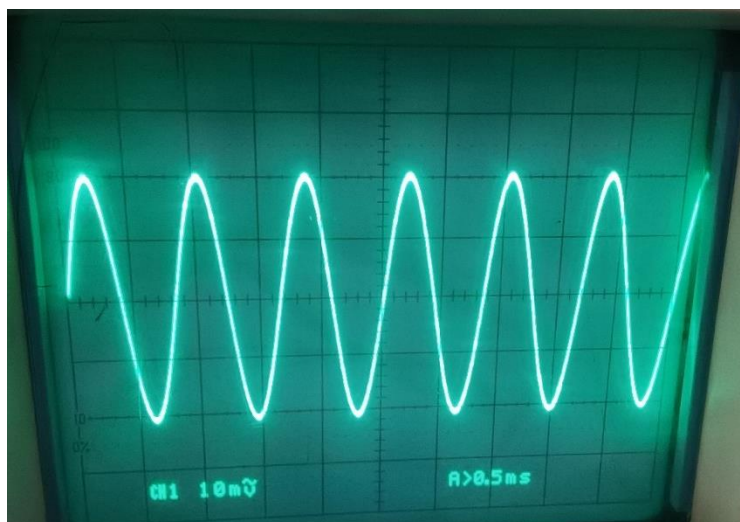


图 6.9 接通 $J_1$ 1、2 端时输出信号波形

当接通跳线 $J_1$ 的 2、3 端时，得到的输出信号波形为：

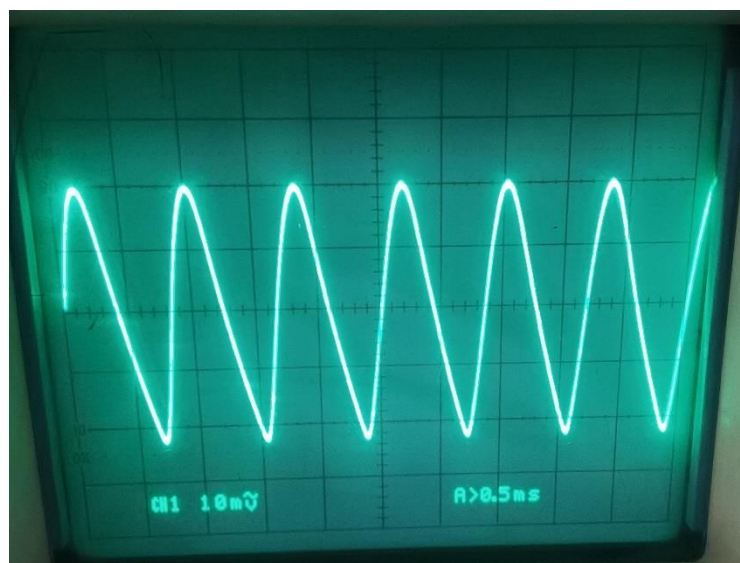


图 6.10 接通 $J_1$ 2、3 端时输出信号波形

可以发现，第二种情况下输出信号出现了惰性失真。这是因为接通跳线 $J_1$ 的 2、3 端时，接入电路的直流电阻阻值 $R = 51k\Omega$ ， $RC$ 时间常数过大，电容 $C$ 通过电阻 $R$ 放电的速度过慢，电容器上的电压变化跟不上信号包络的下降速度。在输入信号的好几个周期内，二极管都没有导通，输出电压没有反应输入信号的包络变化，导致检波输出信号出现失真。

#### ii) 改变跳线 $J_2$

设置 AM 调幅信号的调制度为 60%。当接通跳线 $J_2$ 的 2、3 端时，输出信号波形未出现失真：

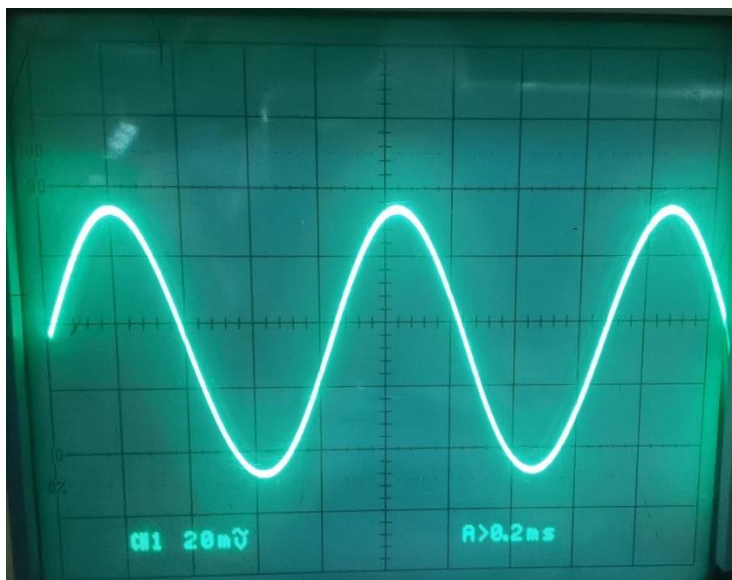


图 6.11 接通 $J_2$ 2、3 端时输出信号波形

当接通跳线 $J_2$ 的 1、2 端时，得到的输出信号波形为：

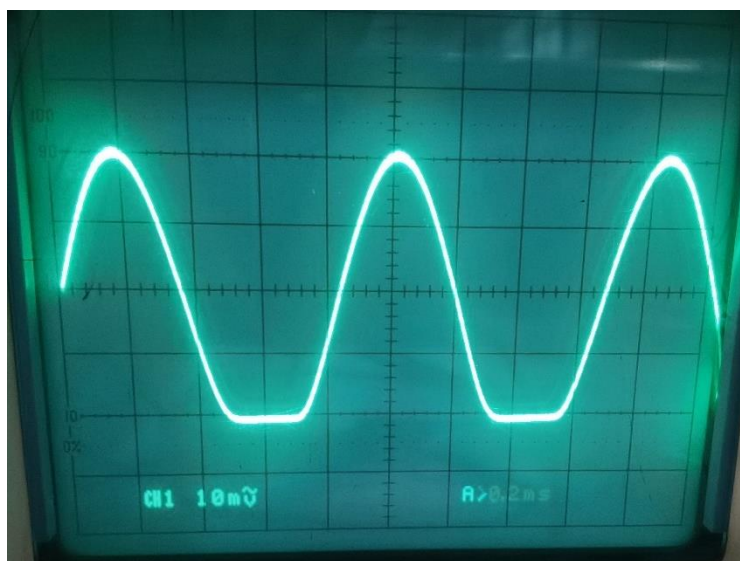


图 6.12 接通 $J_2$ 1、2 端时输出信号波形

显然，此时输出信号的电压负峰值被削平，产生了负峰切割失真。这是因为当接通跳线 $J_2$ 的 1、2 端时，音频交流负载的阻抗值相对更小，检波器输出的交流、直流电流幅度的比值大于 1，检波电流中的交流量大于直流量，电流出现负值。由于二极管单向导电，电流不可能为负值，只能为零，所以检波输出电压的负峰值被削平，出现失真。

### iii) 调制度对输出信号的影响

调整 AM 调幅信号的调制度为 30%，接通跳线 $J_1$ 的 1、2 端及跳线 $J_2$ 的 2、3 端，此时输出无失真。逐渐增大输入信号的调制度，当其为 80%时，输出波形开始发生失真，如图 6.13 所示。

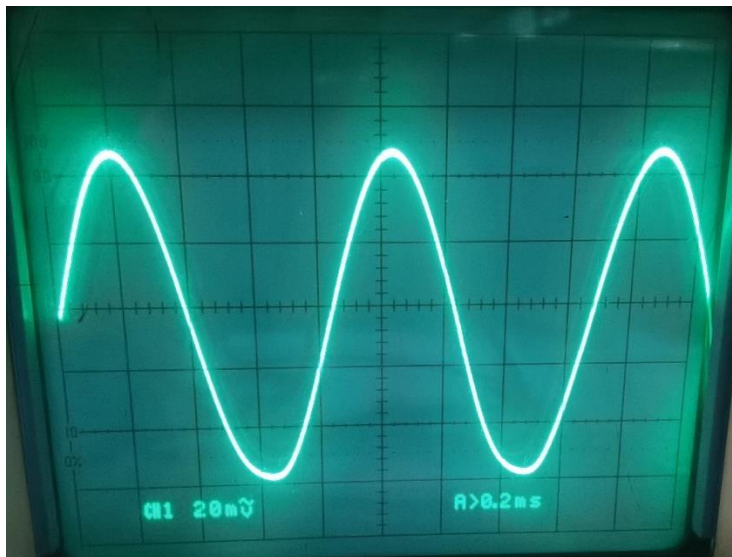


图 6.13 调制度为 80% 时输出信号波形

## 七、思考题

① AM、DSB 调制有何区别，它们分别是如何实现的呢？

答：DSB 调制是通过 AM 使频率关于载波频率对称分布，且将载波电平降低到最低程度（理想情况下完全抑制）的传输方式。因此，DSB 调制不传输载波，其大部分功率分布在边带，这意味着在相同的功率条件下，DSB 比 AM 能够传输的基带信号能量更高。

实现方法：AM 调制利用调制信号控制载波信号的幅度，即把需要传输的信号调制在载波信号（频率通常较高）的振幅上，使其包络形状等同于调制信号；DSB 调制可由调制信号与载波信号相乘实现。

② 已调波信号的调制度与什么因素有关系？

答：由理论知识  $m_a = \frac{kV_{\Omega m}}{V_{cm}}$  和实验结果可知，已调波信号的调制度既与载波信号、调制信号的最大振幅有关，也与电路本身相关。

③ 包络检波输出信号产生惰性失真和负峰切割失真的原因分别是什么？如何改善失真情况？

答：包络检波输出信号产生惰性失真是由于电路的  $RC$  时间常数过大，电容  $C$  通过电阻  $R$  放电的速度过慢，电容器上的电压变化跟不上信号包络的下降速度。在输入信号的好几个周期内，二极管都没有导通，输出电压没有反应输入信号的包络变化，出现失真。为了改善惰性失真情况，需要合理选择元器件参数，使时间常数  $RC$  不要过大；



包络检波输出信号产生负峰切割失真是由于检波器输出的交流、直流电流幅度的比值大于 1, 使得检波电流中的交流量大于直流量, 电流出现负值。因为二极管只能单向导电, 电流不可能为负值, 只能为零, 所以检波输出电压的负峰值被削平, 即产生负峰切割失真。为了改善负峰切割失真情况, 需要合理选择接入电路的电阻, 保持上述比值小于 1。

④ DSB 调制信号是否可以通过包络检波方式进行解调?

答: 不可以。包络检波方式只能解调普通调幅波 (AM), 不能解调 DSB 信号。这是因为 DSB 信号的包络不直接表示调制信号, 因此只能采用同步检波方式进行解调。