

基于 Matlab 的模拟幅度调制系统实现

1. 实验目的

- 1.1 掌握模拟幅度调制/解调的原理和方法;
- 1.2 掌握常见模拟幅度调制信号的波形和频谱特点;
- 1.3 掌握模拟幅度调制系统的 MATLAB 仿真实现方法;

2. 实验原理

2.1 滤波法幅度调制解调的基本原理

2.1.1 调制

设正弦载波为 $s(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi_0)$ ，其中， A 为载波幅度； ω_c 为载波角频率； φ_0 为载波初始相位，一般可记为 0。

则幅度调制信号及对应频谱可以表示为

$$s_m(t) = Am(t)\cos(\omega_c t + \varphi_0) \quad (1)$$

$$S_m(\omega) = \frac{A}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)] \quad (2)$$

由公式(1)(2)可以看出，已调信号的振幅随基带信号正比变化，频谱是基带信号频谱的简单搬移。由于这种搬移是线性的，因此幅度调制又称为线性调制。

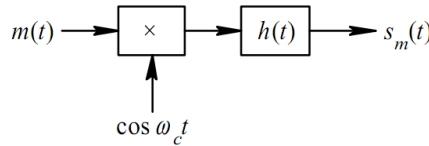


图 1 幅度调制的一般模型

图 1 为幅度调制的一般模型，我们通过选择不同的滤波器特性 $H(\omega)$ ，便可以得到各种幅度调制信号，如调幅（AM）、双边带（DSB）、单边带（SSB）及残留边带（VSB）信号等。

2.1.2 解调

幅度调制属于线性调制，它的解调方式有两种，及相干解调和非相干解调。其中，相干解调：有本地载波参与解调，利用了信号的幅度信息和相位信息，可适用于各种幅度调制方式的解调；非相干解调：利用信号的幅度信息，它仅适用于标准调幅（AM）信号的解调，这里仅介绍相干解调。

为了无失真地恢复基带信号，接收端必须提供与发送端载波严格同步（同频同相）的本地载波（称为相干载波），它与接收信号相乘并经过低通滤波后，可得到解调信号，如图 2 所示。

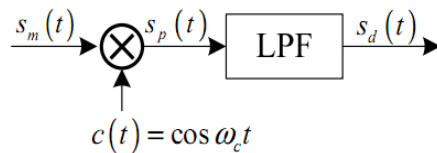


图 2 相干解调器的一般模型

记已调信号的表达式为

$$s_m(t) = s_c(t) \cos \omega_c t + s_s(t) \sin \omega_c t \quad (3)$$

与相干载波相乘（假设接收端与发送端载波同频同相）

$$\begin{aligned} s_p(t) &= s_m(t) \cos \omega_c t \\ &= \frac{1}{2} s_c(t) + \frac{1}{2} s_c(t) \cos 2\omega_c t + \frac{1}{2} s_s(t) \sin 2\omega_c t \end{aligned} \quad (4)$$

经过低通滤波和隔直流后，得到信号 $s_d(t)$ 为

$$s_d(t) = \frac{1}{2} s_c(t) \rightarrow \frac{1}{2} m(t) \quad (5)$$

对于各种线性调制方式 $s_c(t)$ 中都包含了 $m(t)$ 信息，由此，完成了解调过程。

2.2 双边带调制 (DSB)

2.2.1 DSB 信号的产生

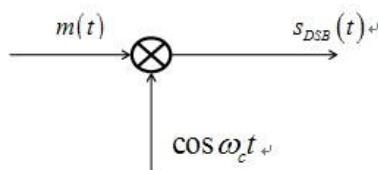


图 3 DSB 调制器模型

DSB 调制器模型如图 3 所示，可见 DSB 信号实质上就是基带信号与载波直接相乘。设均值为零的模拟基带信号为 $m(t)$ ，双边带调幅 (DSB) 信号为

$$s(t) = m(t) \cos \omega_c t \quad (6)$$

当 $m(t)$ 为随机信号，其功率谱密度为

$$P_s(f) = \frac{1}{4} [P_M(\omega - \omega_c) + P_M(\omega + \omega_c)] \quad (7)$$

当 $m(t)$ 是确知信号，其频谱为

$$S_{DSB}(\omega) = \frac{1}{2} [M(\omega - \omega_c) + M(\omega + \omega_c)] \quad (8)$$

式中： $P_M(\omega)$ 是 $m(t)$ 的功率谱密度， $M(\omega)$ 是 $m(t)$ 的频谱。

DSB 信号频谱除不含有载频分量离散谱之外与 AM 信号频谱完全相同，仍由上下对称的两个边带组成。故 DSB 信号是不带载波的双边带信号，它的带宽与 AM 信号相同，也为基带信号带宽的两倍，即

$$B_{DSB} = B_{AM} = 2B_M = 2f_H \quad (9)$$

式中： $B_M = f_H$ 为调制信号带宽； f_H 为调制信号的最高频率。

由 DSB 信号于不包含载波成分，因此其功率就等于边带功率，是调制信号功率的一半，即

$$P_{DSB} = \overline{s_{DSB}^2(t)} = P_s = \frac{1}{2} \overline{m^2(t)} = \frac{1}{2} P_m \quad (10)$$

式中： P_s 为边带功率； $P_m = \overline{m^2(t)}$ 为调制信号功率。显然，DSB 信号的调制效率为 100%。

2.2.2 DSB 信号的解调

由于 $m(t)$ 均值为 0，因此调制后的信号不含离散的载波分量，若接收端能恢复出载波分量，则可采用以下的相干解调

$$r(t) = s_{DSB}(t) \cos \omega_c t = m(t) \cos^2 \omega_c t = \frac{1}{2} m(t) + \frac{1}{2} m(t) \cos 2\omega_c t \quad (11)$$

再用低通滤波器滤去高频分量，得

$$m_0(t) = \frac{1}{2} m(t) \quad (12)$$

即无失真地恢复出原始信号。

2.3 标准调幅 (AM)

2.3.1 AM 信号的产生

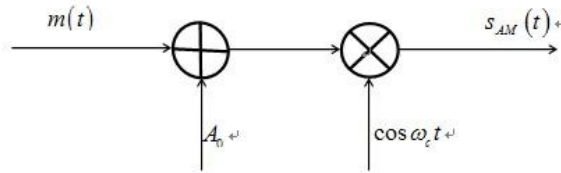


图 4 AM 调制器模型

AM 调制模型如图 4 所示，AM 是诸多调制方式中最简单的一种模拟调制方式，AM 信号的时域和频域表达式分别为：

$$s_{AM}(t) = [A_0 + m(t)] \cos \omega_c t = A_0 \cos \omega_c t + m(t) \cos \omega_c t \quad (13)$$

$$S_{AM}(\omega) = \pi A_0 [\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)] + \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)] \quad (14)$$

式中： A_0 为外加的直流分量； $m(t)$ 为模拟基带信号，可以是确知信号也可以是随机信号，但通常认为其平均值为 0，即 $\overline{m(t)} = 0$ 。

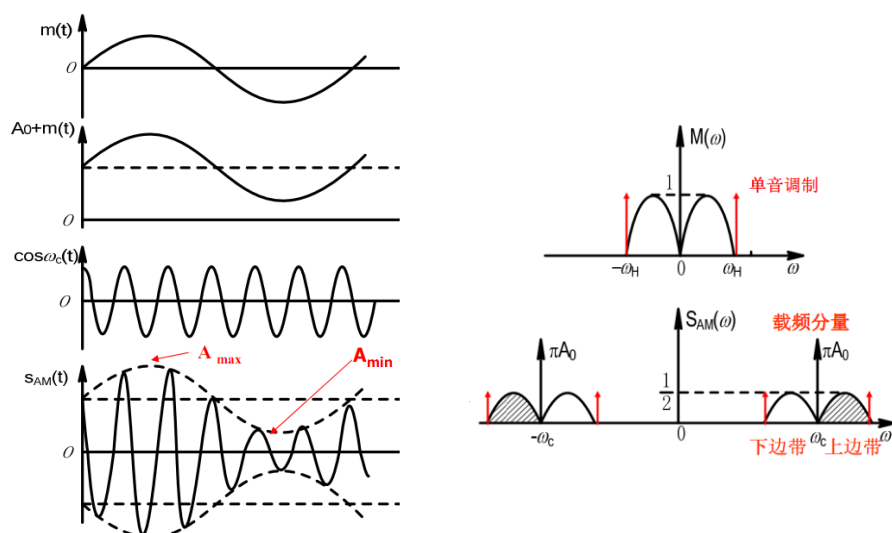


图 5 AM 信号波形和频谱

AM 信号的典型波形和频谱分别如图 5 所示，显然，调制信号 $m(t)$ 的带宽为 $B_m = f_H$ ， f_H 为 $m(t)$ 的最高频率。而 AM 信号是带有载波的双边带信号，它的带宽为基带信号带宽的两倍，即

$$B_{AM} = 2B_m = 2f_H \quad (15)$$

AM 信号波形可用包络检波法很容易恢复原始信号，但为了保证包络检波时不发生失真，必须满足 $A_0 \geq |m(t)|_{\max}$ ，否则将出现过调幅现象而带来失真。

2.3.2 AM 信号的解调

一般说来 AM 信号有两种解调方式，相干解调和非相干解调法，这里只介绍相干解调法：

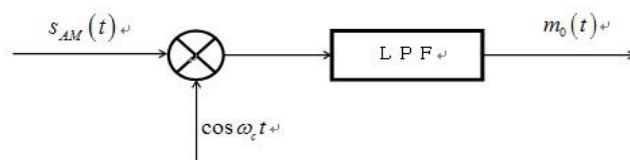


图 6 相干解调原理框图

将已调 AM 信号乘上一个与调制器同频同相的载波，得

$$s_{AM}(t) \cos \omega_c t = [A_0 + m(t)] \cos^2 \omega_c t = \frac{1}{2} [A_0 + m(t)] + \frac{1}{2} [A_0 + m(t)] \cos 2\omega_c t \quad (16)$$

再经过低通滤波器，滤去第 2 项高频分量，即可无失真地恢复出原始的调制信号

$$m_0(t) = \frac{1}{2} [A_0 + m(t)] \quad (17)$$

2.3 单边带调制 (SSB)

如图 7 所示，模拟基带信号 $m(t)$ 经过双边带调制后，频谱搬移到中心频率为 $\pm f_c$ 处，但从恢复原信号频谱的角度看，只要传输双边带信号的一半，带宽就可以完全恢复出原信号的频谱。因此，单边带信号（上边带）可以表示成

$$\begin{aligned}
s(t) &= m(t)\cos 2\pi f_c t - \hat{m}(t)\sin 2\pi f_c t \\
&= \operatorname{Re}\left[(m(t) + j\hat{m}(t))e^{j2\pi f_c t}\right] \\
&= \frac{1}{2}\left[(m(t) + j\hat{m}(t))e^{j2\pi f_c t} + (m(t) - j\hat{m}(t))e^{j2\pi f_c t}\right] \\
&= F^{-1}\left\{\frac{1}{2}\left[M^+(f - f_c) + M^-(f + f_c)\right]\right\}
\end{aligned} \tag{18}$$

其中, $M^+(f)$ 、 $M^-(f)$ 分别表示 $M(f)$ 的正负频率分量。同理, 单边带下边带信号可表示为

$$s(t) = m(t)\cos 2\pi f_c t + \hat{m}(t)\sin 2\pi f_c t \tag{19}$$

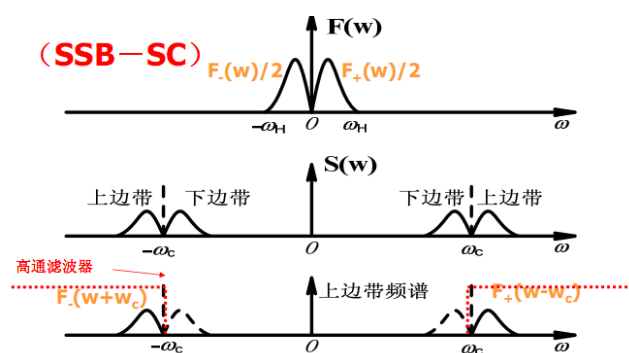


图 7 单边带调制示意图

在接收端, 可以通过图 2 相干解调的方式对单边带信号进行解调。

3. 实验内容及步骤

3.1 实验内容

3.1.1 基本内容:

实现一个基本的 AM 或 DSB 调制解调系统

3.1.2 拓展内容:

实现一个 SSB 调制解调系统

3.2 实验步骤

Step1. 打开 matlab 新建一个 M 文件

Step2. 编写幅度调制代码

- (1) 产生一个信息信号
- (2) 产生一个载波信号
- (3) 调制

Step3. 添加噪声

Step4. 带通滤波

Step5. 相干解调

(1) 经过乘法器

(2) 低通滤波

主要函数介绍:

➤ 添加噪声:

$y = \text{awgn}(x, \text{SNR})$ 在信号 x 中加入高斯白噪声。信噪比 SNR 以 dB 为单位。 x 的强度假定为 0dBW。如果 x 是复数, 就加入复噪声。

$y = \text{awgn}(x, \text{SNR}, \text{SIGPOWER})$ 如果 SIGPOWER 是数值, 则其代表以 dBW 为单位的信号强度; 如果 SIGPOWER 为 'measured', 则函数将在加入噪声之前测定信号强度。

$y = \text{awgn}(\dots, \text{POWERTYPE})$ 指定 SNR 和 SIGPOWER 的单位。POWERTYPE 可以是 'dB' 或 'linear'。如果 POWERTYPE 是 'dB', 那么 SNR 以 dB 为单位, 而 SIGPOWER 以 dBW 为单位。如果 POWERTYPE 是 'linear', 那么 SNR 作为比值来度量, 而 SIGPOWER 以瓦特为单位。

➤ 滤波器设计:

在 MATLAB 下设计 IIR 滤波器可使用 Butterworth 函数设计出巴特沃斯滤波器, 使用 Cheby1 函数设计出契比雪夫 I 型滤波器, 使用 Cheby2 设计出契比雪夫 II 型滤波器, 使用 ellipord 函数设计出椭圆滤波器。下面主要介绍第一个方法。

主要函数用到的函数有:

[B, A] = butter(n, Wn, 'ftype')

其中 n 代表滤波器阶数, W_n 代表滤波器的截止频率, 这两个参数可使用 buttord 函数来确定。buttord 函数可在给定滤波器性能的情况下, 求出巴特沃斯滤波器的最小阶数 n , 同时给出对应的截止频率 W_n 。buttord 函数的用法为:

[n, Wn] = buttord (Wp, Ws, Rp, Rs)

其中 W_p 和 W_s 分别是通带和阻带的拐角频率 (截止频率), 取值范围为 0 至 1 之间 (用 $f_s/2$ 归一化)。如设置 40-60Hz 的带通滤波器就设置下面代码中的 a 为 [40 60], b 只要大于这个范围如 [30 75] 都可以, 与 R_p, R_s (R_p 和 R_s 分别是通带和阻带区的波纹系数) 一起调整, 在设计可实现的前提下, R_p 的取值应越小越好, R_s 的取值则越大越好。

当其值为 1 时代表采样频率的一半。不同类型 (高通、低通、带通和带阻) 滤波器对应的 W_p 和 W_s 值遵循以下规则:

- ◆ 高通滤波器: W_p 和 W_s 为一元矢量且 $W_p > W_s$;
- ◆ 低通滤波器: W_p 和 W_s 为一元矢量且 $W_p < W_s$;
- ◆ 带通滤波器: W_p 和 W_s 为二元矢量且 $W_p < W_s$, 如 $W_p = [0.2, 0.7], W_s = [0.1, 0.8]$;
- ◆ 带阻滤波器: W_p 和 W_s 为二元矢量且 $W_p > W_s$, 如 $W_p = [0.1, 0.8], W_s = [0.2, 0.7]$ 。

下面给出设计一个 Butterworth 型 IIR 滤波器的主要程序:

$W_p = a/(f_s/2);$

若为低通滤波器 a, b 分别为一个固定的值, 且 $a < b$;
若为高通滤波器 a, b 分别为一个固定的值, 且 $a > b$;
若为带通滤波器 a, b 分别为一个区间如 $[a_1 \ a_2], [b_1 \ b_2]$; 且 $a_1 > b_1, a_2 < b_2$ 。

`Ws=b/(fs/2;`

`Rp=c; %% c 为通带最大衰减分贝`

`Rs=d; %% d 为阻带最小衰减分贝`

`[N,Wn]= Butterd(Wp,Ws,Rp,Rs) ; %%%求滤波器的阶数和截止频率`

`[B,A]=Butter(N,Wn,'stype'); %%%stype 为滤波器类型 可选: bandpass、low、high 等`

`q=filtfilt(B,A,p); 将信号 p 通过所设计的滤波器。`

(3) 频谱绘制

第一步: `Y = fft(X);` 将信号 X 进行傅里叶变换, 点数为信号长度。

第二步: `f=(0:40000)*fs/40001-fs/2;`

第三步: `plot(f,fftshift(abs(Y)))`; `fftshift` 是将 FFT 的直流分量移到频谱中心。

4. 实验报告内容及要求

(1) 选择 AM 或 DSB 中的任何一个写出: 实验原理框图, 实验结果及分析, 程序源代码;

(2) 要求画出信号频率为 10Hz, 载波频率为 50Hz, 采样率为 1000Hz, 信噪比为 5 时, 对应框图每一点的波形及频谱图 (信息信号, 载波信号, 已调制信号 (0%; 50%; 100%调制), 通过带通滤波器后的信号, 解调后的信号) 并附上程序源代码。