

3.1 载波提取分析

3.1.1 幅度键控分析

在幅度键控中载波幅度是随着调制信号而变化的。最简单的形式是载波在二进制调制信号 1 或 0 的控制下通或断,此种调制方式称为通-断键控(OOK)。其时域表达式为

$$S_{\text{OOK}}(t) = a_n A \cos \omega_c t$$

式中, a_n 为二进制数字。

【例 3-1】 对二元序列 10110010,画出 2ASK 的波形,其中载频为码元速率的 2 倍。

载频为码元速率的 2 倍,即表明在一个符号的时间里载波刚好一个周期。其实现的 MATLAB 程序代码如下:

```
>> clear all;
t = 0.01:0.01:8;
y = sin(2 * pi * t);           % 载波
% 定义一个与二元序列对应的时间序列
x = [ones(1,100), zeros(1,100), ones(1,100), ones(1,100), ...
     zeros(1,100), zeros(1,100), ones(1,100), zeros(1,100)];
z = x .* y;                   % 幅频键控
plot(t,z, 'r')
```

运行程序,效果如图 3-1 所示。

3.1.2 相移键控分析

1. PSK 包络绘制

在载波相位调制中,在信道发送的信息调制在载波的相位上,相位通常范围是 $(0, 2\pi)$, 所以通过数字相位调制数字信号的载波相位是: $\theta_m = 2\pi m/M (m=0, 1, \dots, M-1)$ 。对二进制调制,两个载波的相位分

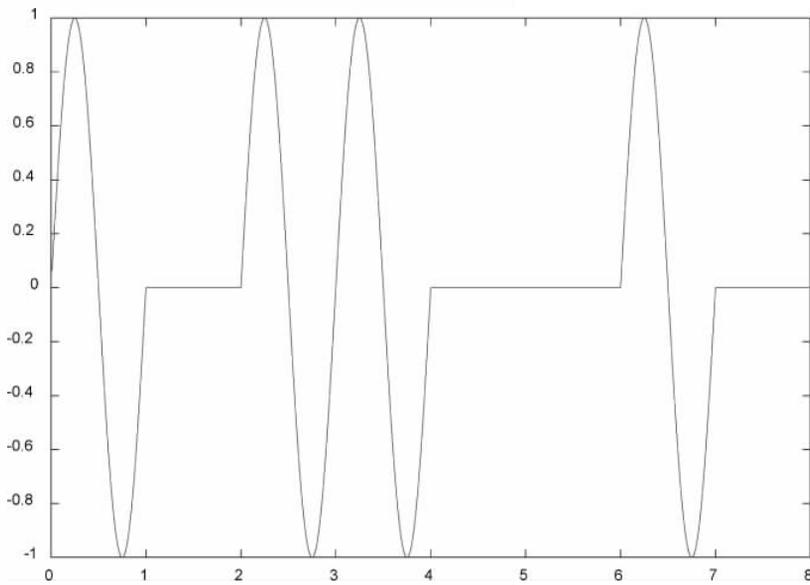


图 3-1 ASK 波形

别是 $0, \pi$ 。对于 M 进制的相位调制,一般 M 个载波调相信号的波形表达式为

$$u_m(t) = Ag_T(t)\cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi m}{M}\right) \quad (m = 0, 1, \dots, M-1)$$

式中, $g_T(t)$ 为发射端的滤波脉冲,决定了信号的频谱特征; A 是信号振幅。

相移键控的能量在调制过程中没有改变:

$$\begin{aligned} E_m &= \int_{-\infty}^{+\infty} u_m^2(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} A^2 g_T^2(t) \cos^2 c dt \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} A^2 g_T^2(t) dt + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} A^2 g_T^2(t) \cos\left(4\pi f_c t + \frac{4\pi m}{M}\right) dt \\ &= \frac{A^2}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} g_T^2(t) dt = E_s \end{aligned}$$

E_s 表示发送一个符号的能量,通常选用 $g_T(t)$ 为矩形脉冲,定义为

$$g_T(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \quad (0 \leq t \leq T)$$

此时发送信号波形在间隔 $0 \leq t \leq T$ 内表示为

$$u_m(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi m}{M}\right) \quad (m = 0, 1, \dots, M-1)$$

上式给出的发送信号有常数包络,且载波相位在每一个信号间隔的起始位置发生突变。

将 k 比特信息调制到 $M = 2^k$ 个可能相位的方法有多种,常用方法是采用格雷码编码,此种编码方式的相邻相位仅相差一个二进制比特。

在 $M=8$ 时,生成常数包络 PSK 信号波形,为了方便,将信号幅度归一化为 1,取载

波频率为 $6/T$ 。

【例 3-2】 绘制一个 PSK 包络。

其实现的 MATLAB 程序代码如下：

```
>> clear all;
T = 1; M = 8;
Es = T/2; fc = 6/T;
N = 120; delta_T = T/(N - 1);
t = 0:delta_T:T;
u1 = sqrt(2 * Es/T) * cos(2 * pi * fc * t);           % 求出 8 个波形
u2 = sqrt(2 * Es/T) * cos(2 * pi * fc * t + 2 * pi/M);
u3 = sqrt(2 * Es/T) * cos(2 * pi * fc * t + 4 * pi/M);
u4 = sqrt(2 * Es/T) * cos(2 * pi * fc * t + 6 * pi/M);
u5 = sqrt(2 * Es/T) * cos(2 * pi * fc * t + 8 * pi/M);
u6 = sqrt(2 * Es/T) * cos(2 * pi * fc * t + 10 * pi/M);
u7 = sqrt(2 * Es/T) * cos(2 * pi * fc * t + 12 * pi/M);
u8 = sqrt(2 * Es/T) * cos(2 * pi * fc * t + 14 * pi/M);
subplot(8,1,1); plot(t, u1);
subplot(8,1,2); plot(t, u2);
subplot(8,1,3); plot(t, u3);
subplot(8,1,4); plot(t, u4);
subplot(8,1,5); plot(t, u5);
subplot(8,1,6); plot(t, u6);
subplot(8,1,7); plot(t, u7);
subplot(8,1,8); plot(t, u8);
```

运行程序,效果如图 3-2 所示。

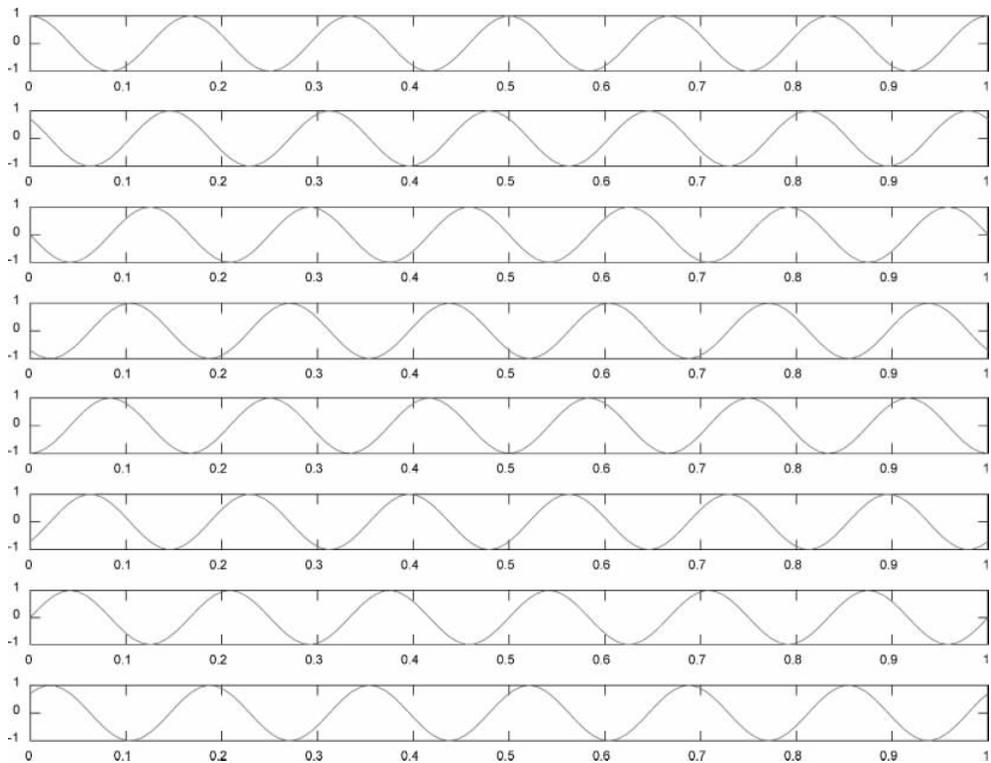


图 3-2 调相波的包络

2. PSK 的误码率计算

在接收端接收到叠加了信道噪声的信号,通常信道为加性高斯白噪声信道,在这个基础上,二进制的 PSK 调制和二进制的 PAM 相同,该误码率为

$$P_2 = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

其中, E_b 表示每比特能量。

3.1.3 频移键控分析

将数字信号调制在载波的频率上的调制方法称为频移键控(FSK),它也包括二电平频移键控(BFSK)和多电平频移键控(MFSK)。

【例 3-3】 对二元序列 10110010,画出 2FSK 的波形,其中载波频为码元速率的 2 倍。

频移键控的原理与调频类似,只是使用数字信号而已。其实现的 MATLAB 程序代码如下:

```
>> clear all;
t = 0.01:0.01:8;
% 定义一个与二元序列对应的时间序列
x = [ones(1,100), zeros(1,100), ones(1,100), ones(1,100), ...
     zeros(1,100), zeros(1,100), ones(1,100), zeros(1,100)];
y = sin(2 * pi + 2 * t); % 载波
z = x * y; % 幅频键控
plot(t, z, 'r')
```

运行程序,效果如图 3-3 所示。

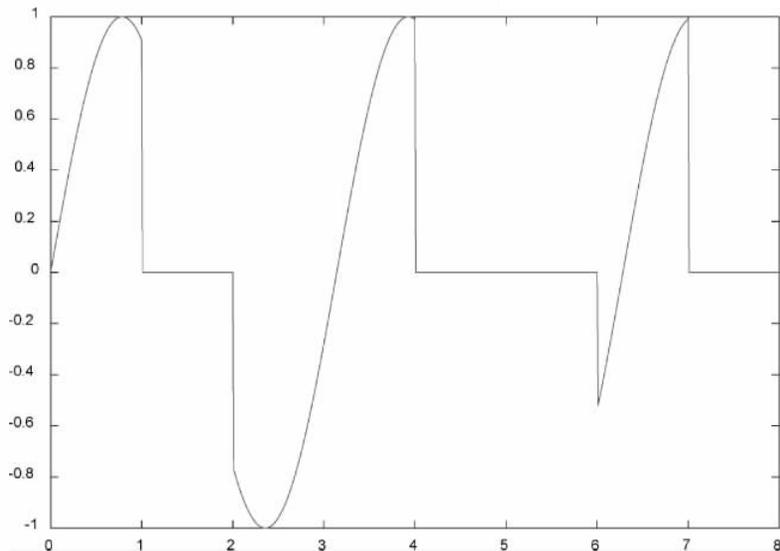


图 3-3 FSK 波形

可以看出,载频有所改变,由于调频同时必然带来了相位的改变,所以有相位的容变。

3.1.4 正交幅度调制

一个正交幅度调制(QAM)信号采用两个正交载波 $\cos 2\pi f_c t$ 和 $\sin 2\pi f_c t$,每一个载波被一个独立的信息比特序列所调制。发送信号的波形为

$$u_m(t) = A_{mc} g_T(t) \cos 2\pi f_c t + A_{ms} g_T(t) \sin 2\pi f_c t \quad (m = 0, 1, \dots, M)$$

式中, A_{mc} 和 A_{ms} 是电平集合,这些电平通过将 k 比特序列映射为信号振幅而获得。

QAM 可以看作是振幅调制与相位调制的结合。因此发送的信号也可以表示为

$$u_{mm}(t) = A_{mc} g_T(t) \cos(2\pi f_c t + \theta_n) \quad (m = 0, 1, \dots, M)$$

【例 3-4】 对一个使用举行信号星座图的 $M=16$ QAM 通信系统进行蒙特卡洛仿真。系统图如图 3-4 所示 ($M=16$ QAM 信号选择器, 4b 符号)。

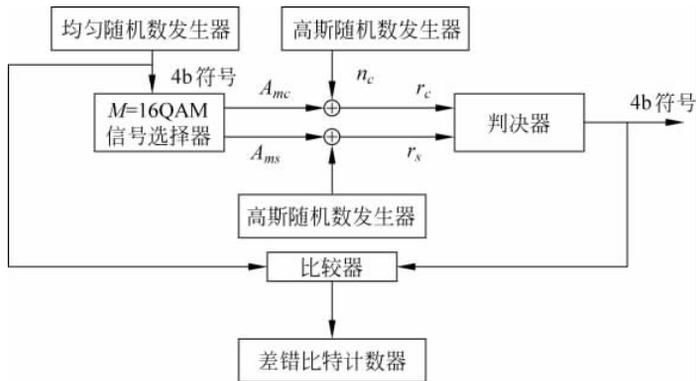


图 3-4 QAM 仿真系统图

用均匀随机数发生器产生一个对应 4 位 $b_1 b_2 b_3 b_4$ 共有 16 种可能的信息符号序列。将符号序列映射为相应的信号点,信号的坐标点为 $[A_{mc}, A_{ms}]$,用两个高斯噪声发生器产生噪声分量 $[n_c, n_s]$ 。假设信道相移为 0。接收到的信号加噪声分量为 $[A_{mc} + n_c, A_{ms} + n_s]$ 。

判决器的距离量度由下式决定:

$$D(r, s_m) = |r - s_m|^2 \quad (m = 1, 2, \dots, M)$$

$$\mathbf{r} = [r_1, r_2], \quad r_1 = A_{mc} + n_c \cos \phi - n_s \sin \phi, \quad r_2 = A_{ms} + n_c \sin \phi - n_s \cos \phi$$

$$\mathbf{s}_m = (\sqrt{E_s} A_{mc}, \sqrt{E_s} A_{ms}) \quad (m = 1, 2, \dots, M)$$

并且选择最接近接收矢量 \mathbf{r} 的信号点,记错器记录判断到的序列错误符号数。

其实现的 MATLAB 程序代码如下:

```
>> clear all;
SNRindB1 = 0:2:15;
SNRindB2 = 0:1:15;
M = 16; k = log2(M);
for i = 1:length(SNRindB1)
    s_err_prb(i) = Qmoto(SNRindB1(i));
```

```

end
for i = 1:length(SNRindB2)
    SNR = exp(SNRindB2(i) * log(10)/10);
    t_err_prb(i) = 4 * Qfun(sqrt(3 * k * SNR/(M - 1)));
end
semilogy(SNRindB1, s_err_prb, 'rp'); % 用对数坐标作出实际信噪比 - 误比特率的点
hold on;
semilogy(SNRindB2, t_err_prb); % 用对数坐标作出理论信噪比 - 误比特率曲线

```

运行程序,效果如图 3-5 所示。

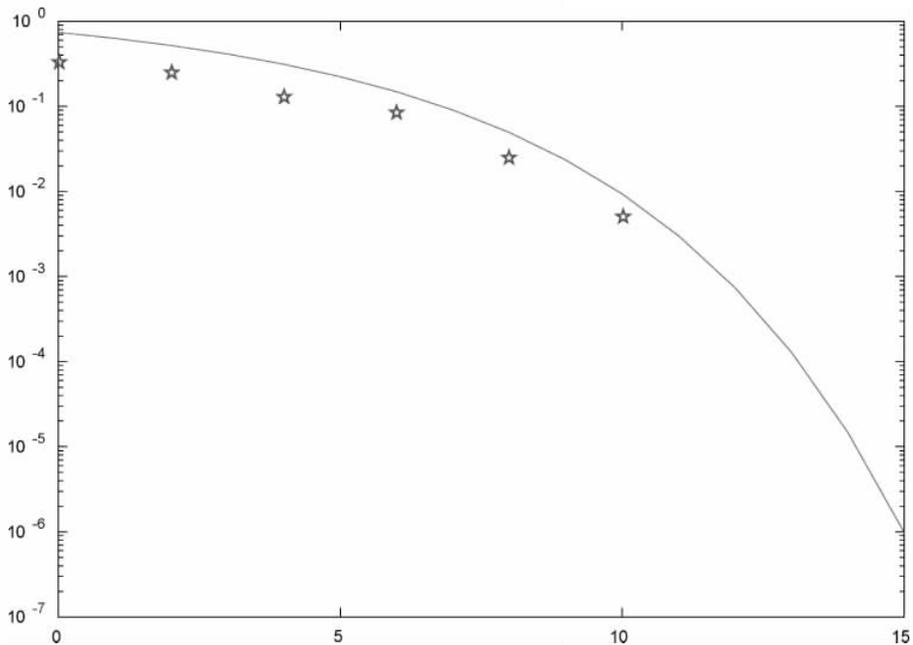


图 3-5 QAM 系统误码率仿真结果

在运行程序中调用到以下用户自定义编写的函数,其源代码如下。

```

function y = Qfun(x)
y = (1/2) * erfc(x/sqrt(2));
function p = Qmoto(s_in_dB)
N = 1000; d = 1;
Eav = 10 * d ^ 2;
snr = 10 ^ (s_in_dB/10);
sgma = sqrt(Eav/(8 * snr));
M = 16;
for i = 1:N
    temp = rand;
    dsource(i) = 1 + floor(M * temp);
end
mapping = [ -3 * d 3 * d; -d 3 * d; d 3 * d; 3 * d 3 * d; -3 * d d; -d d; d d; 3 * d d; ...
            -3 * d -d; -d -d; d -d; 3 * d -d; -3 * d -3 * d; -d -3 * d; d -3 * d; 3 * d -3 * d];
for i = 1:N
    q_sig(i, :) = mapping(dsource(i), :);

```

```

end
for i = 1:N
    n = gngauss(sgma);           % 产生高斯随机噪声
    r(i, :) = q_sig(i, :) + n;  % 在信号上叠加噪声
end
numoferr = 0;
for i = 1:N
    for j = 1:M
        metrics(j) = (r(i,1) - mapping(j,1))^2 + (r(i,2) - mapping(j,2))^2;
    end
    [m_metrics decis] = min(metrics);
    if(decis ~ = dsource(i))    % 若出现错误情况, 误比特数为 1
        numoferr = numoferr + 1;
    end
end
p = numoferr/(N);
function [g1,g2] = gngauss(m, sgma)
% 输入格式可以为 [g1,g2] = gngauss(m, sgma)
% 或 [g1,g2] = gngauss(sgma)
% 或 [g1,g2] = gngauss
% 函数生成两个统计独立的高斯分布的随机数, 以 m 为均值, sgma 为方差
% 默认时 m = 0, sgma = 1
if (nargin == 0),
    m = 0; sgma = 1;
elseif nargin == 1
    sgma = m; m = 0;
end
u = rand;           % 产生一个(0,1)间均匀分布的随机数 u
z = sgma * (sqrt(2 * log(1/(1 - u)))); % 利用上面的 u 产生一个瑞利分布随机数
u = rand;           % 重新产生(0,1)间均匀分布的随机数 u
g1 = m + z * cos(2 * pi * u);
g2 = m + z * sin(2 * pi * u);

```

3.2 调制与解调的 Simulink 模块

MATLAB 中提供了多个模拟调制解调的模块, 下面给予介绍。

3.2.1 DSB-AM 调制解调

1. DSB-AM 调制模块

DSB-AM 调制模块对输入信号进行双边带幅度调制。输出为通带表示的调制信号。输入和输出信号都是基于采样的实数标量信号。

模块中, 如果输入一个时间函数 $u(t)$, 则输出为 $(u(t) + k) \cos(2\pi f_c t + \theta)$ 。其中, k 为 Input signal offset 参数, f_c 为 Carrier frequency 参数, θ 为 Initial phase 参数。通常设定 k 为输入信号 $u(t)$ 负值部分最小值的绝对值。

在通常情况下, Carrier frequency 参数项要比输入信号的最高频率高很多。根据 Nyquist 采样理论, 模型中采样时间的倒数必须大于 Carrier frequency 参数项的两倍。

DSB-AM 调制模块及其参数设置对话框如图 3-6 所示。

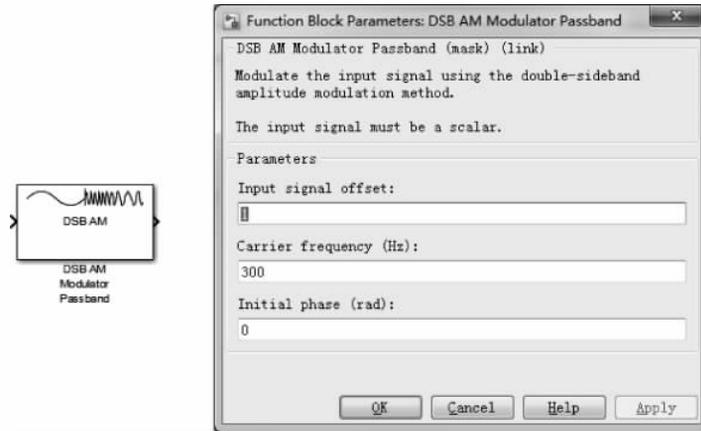


图 3-6 DSB-AM 调制模块及其参数设定项

DSB-AM 调制模块参数设置对话框中包含以下几个参数项,主要含义为

- Input signal offset: 设定补偿因子 k , 应该大于等于输入信号最小值的绝对值。
- Carrier frequency(Hz): 设定载波频率。
- Initial phase(rad): 设定载波初始相位。

2. DSB-AM 解调模块

DSB-AM 解析模块对双边带幅度调制的信号进行解调。输入信号为通带表示的调制信号,且输入/输出信号均为基于采样的实数标量信号。

在解调过程中,DSB-AM 解调模块使用了低通滤波器。在通常情况下,Carrier frequency 参数项要比输入信号的最高频率高很多。根据 Nyquist 采样理论,模型中采样时间的倒数必须大于 Carrier frequency 参数项的两倍。

DSB-AM 解调模块及其参数设置对话框如图 3-7 所示。

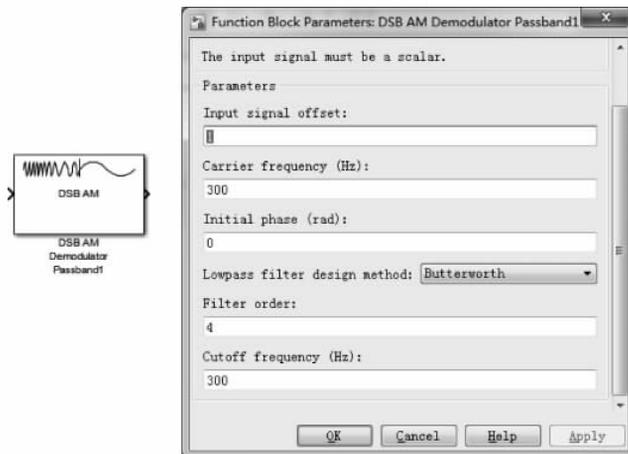


图 3-7 DSB-AM 解调模块及其参数设置对话框

DSB-AM 解调模块参数设置对话框包含几个参数选项,主要为

- Input signal offset: 设定输出信号偏移。模块中的所有解调信号都将减去这个偏移量,从而得到输出数据。
- Carrier frequency(Hz): 设定调制信号的载波频率。
- Initial phase(rad): 设定发射载波的初始相位。
- Lowpass filter design method: 滤波器的产生方法,包括 Butterworth、Chebyshev type I、Chebyshev type II、Elliptic 等。
- Filter order: 设定 Lowpass filter design method 项的滤波阶数。
- Cutoff frequency(Hz): 设定 Lowpass filter design method 项的低通滤波器的截止频率。
- Passband ripple(dB): 设定通带起伏,为通带中的峰-峰起伏。只有当 Lowpass filter design method 选定为 Chebyshev type I 和 Elliptic 滤波器时,该项有效。
- Stopband ripple(dB): 设定阻带起伏,为阻带中的峰-峰起伏。只有当 Lowpass filter design method 选定为 Chebyshev type I 和 Elliptic 滤波器时,该项有效。

3.2.2 SSB-AM 调制解调

1. SSB-AM 调制模块

SSB-AM 调制模块使用希尔伯特滤波器进行单边带幅度调制。输出为通带形式的调制信号。输入和输出均为基于采样的实数标量信号。

模块中,如果输入一个时间函数 $u(t)$,则输出为 $u(t)\cos(f_c t + \theta) \mp \hat{u}(t)\sin(f_c t + \theta)$ 。其中, f_c 为 Carrier frequency 参数, θ 为 Initial phase 参数。 $\hat{u}(t)$ 表示输入信号的 $u(t)$ 的希尔伯特转换。式中减号代表上边带,加号代表下边带。

在通常情况下,Carrier frequency 参数项要比输入信号的最高频率高很多。根据 Nyquist 采样理论,模型中采样时间的倒数必须大于 Carrier frequency 参数项的两倍。SSB-AM 调制模块及其参数设置对话框如图 3-8 所示。

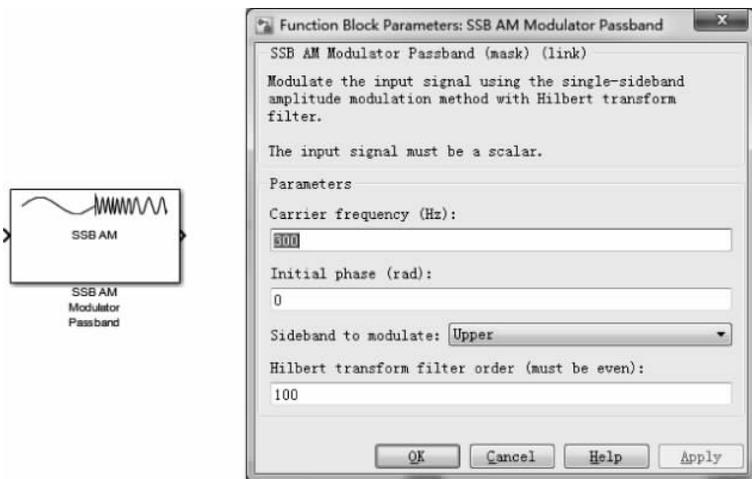


图 3-8 SSB-AM 调制模块及其参数设置对话框

SSB-AM 调制模块参数设置对话框包含以下几个参数项,含义为

- Carrier frequency(Hz): 设定载波频率。
- Initial phase(rad): 已调制信号的相位补偿 θ 。
- Sideband to modulate: 传输方式设定项。有 upper 和 lower 两种,分别为上边带传输和下边带传输。
- Hilbert Transform filter order: 设定用于希尔伯特转化的 FIR 滤波器的长度。

2. SSB-AM 解调模块

SSB-AM 解调模块对单边带幅度调制信号进行解调。输入为通带形式的调制信号。输入和输出均为基于采样的实数标量信号。

SSB-AM 解调模块及其参数设置对话框如图 3-9 所示。

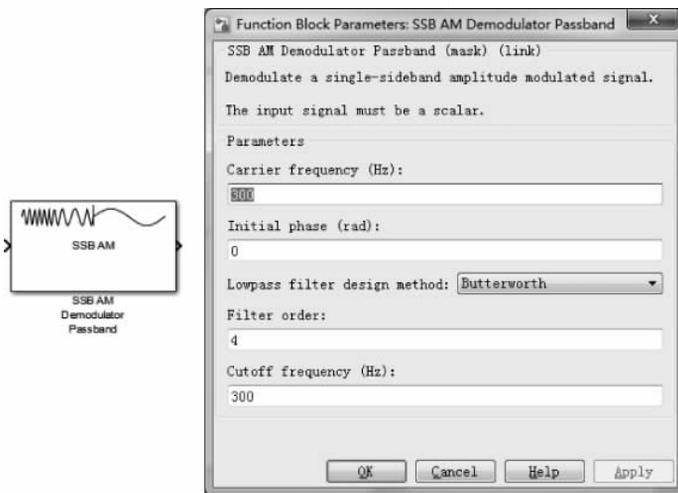


图 3-9 SSB-AM 解调模块及参数设置对话框

SSB-AM 解调模块参数设置对话框包含几个参数项,主要含义为

- Carrier frequency(Hz): SSB-AM 解调模块中调制信号的载波频率。
- Initial phase(rad): 已调制信号的相位补偿 θ 。
- Lowpass filter design method: 滤波器的产生方法,包括 Butterworth、Chebyshev type I、Chebyshev type II 及 Elliptic 等。
- Filter order: 设定 Lowpass filter design method 项中选定的数字低通滤波器的滤波阶数。
- Cutoff frequency(Hz): 设定 Lowpass filter design method 项的数字低通滤波器的截止频率。
- Passband ripper(dB): 设定通带起伏,为通带中的峰-峰起伏。只有当 Lowpass filter design method 选定为 Chebyshev type I 和 Elliptic 滤波器时,该项有效。
- Stopband ripper(dB): 设定阻带起伏,为阻带中的峰-峰起伏。只有当 Lowpass filter design method 选定为 Chebyshev type II 和 Elliptic 滤波器时,该项有效。

3.2.3 DSBSC-AM 调制解调

1. DSBSC-AM 调制模块

DSBSC-AM 调制模块进行双边带一致载波幅度调制。输出信号为通带形式的调制信号。输入和输出均为基于采样的实数标量信号。

模块中,如果输入一个时间函数 $u(t)$,则输出为 $u(t)\cos(f_c t + \theta)$ 。其中 f_c 为 Carrier frequency 参数, θ 为 Initial phase 参数。

在通常情况下,Carrier frequency 参数项要比输入信号的最高频率高得多。根据 Nyquist 采样理论,模型中采样时间的倒数必须大于 Carrier frequency 参数项的两倍。

DSBSC-AM 调制模块及其参数设置对话框如图 3-10 所示。

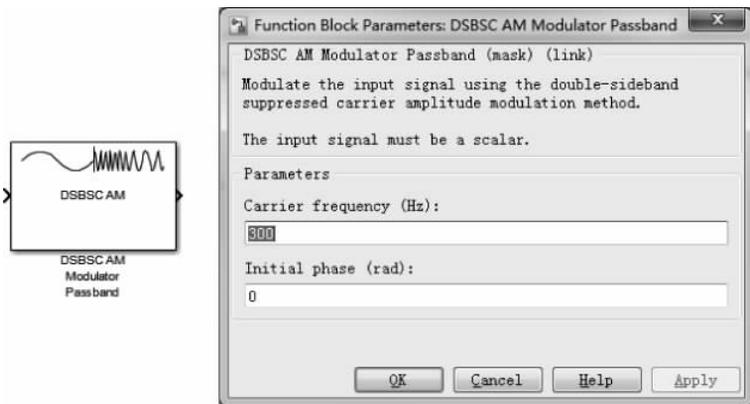


图 3-10 DSBSC-AM 调制模块及设置对话框

DSBSC-AM 调制模块参数设置对话框包含以下两个参数项。

- Carrier frequency(Hz): 设定载波频率。
- Initial phase(rad): 设定初始相位的载波频率。

2. DSBSC-AM 解调模块

DSBSC-AM 解调模块对双边带抑制载波幅度调制信号进行解调。输入信号为通带形式的调制信号。输入和输出均为基于采样的实数标量信号。

在通常情况下,Carrier frequency 参数项要比输入信号的最高频率高得多。根据 Nyquist 采样理论,模型中采样时间的倒数必须大于 Carrier frequency 参数项的两倍。

DSBSC-AM 解调模块及其参数设置对话框如图 3-11 所示。

DSBSC-AM 解调模块参数设置对话框包含几个参数项,主要含义为

- Carrier frequency(Hz): DSBSC-AM 解调模块中调制信号的载波频率。
- Initial phase(rad): 设定载波初始相位。
- Lowpass filter design method: 滤波器的产生方法,包括 Butterworth、Chebyshev type I、Chebyshev type II 及 Elliptic 等。

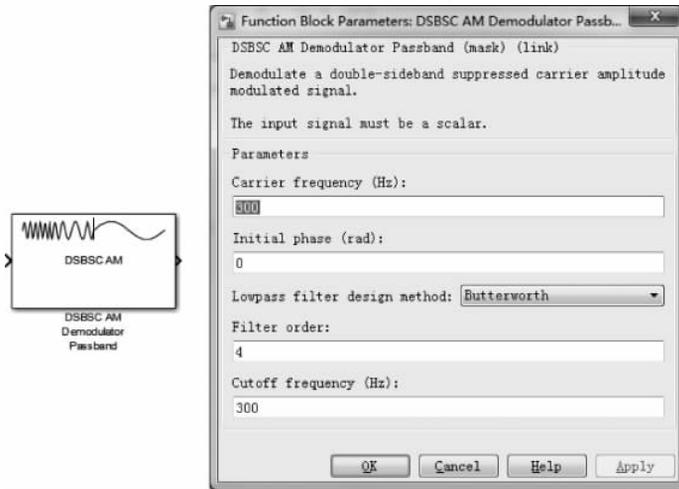


图 3-11 DSBSC-AM 解调模块及参数设置对话框

- Filter order: 设定 Lowpass filter design method 项中选定的数字低通滤波器的滤波阶数。
- Cutoff frequency(Hz): 设定 Lowpass filter design method 项的数字低通滤波器的截止频率。
- Passband ripper(dB): 设定通带起伏,为通带中的峰-峰起伏。只有当 Lowpass filter design method 选定为 Chebyshev type I 和 Elliptic 滤波器时,该项有效。
- Stopband ripple(dB): 设定阻带起伏,为阻带中的峰-峰起伏。只有当 Lowpass filter design method 选定为 Chebyshev type II 和 Elliptic 滤波器时,该项有效。

3.2.4 FM 调制解调

1. FM 调制模块

FM 调制模块用于频率调制。输出为通带形式的调制信号。输出信号的频率随着输入信号的幅度而变化,输入和输出信号均采用基于采样的实数标量信号。

模块中,如果输入一个时间函数 $u(t)$,则输出为 $\cos\left(2\pi f_c t + 2\pi K_c \int_0^t u(\tau) d\tau + \theta\right)$ 。其中 f_c 为 Carrier frequency 参数, θ 为 Initial phase 参数, K_c 为 Modulation constant 参数。

在通常情况下,Carrier frequency 参数项要比输入信号的最高频率高得多。根据 Nyquist 采样理论,模型中采样时间的倒数必须大于 Carrier frequency 参数项的两倍。

FM 调制模块及其参数设置对话框如图 3-12 所示。

FM 调制模块的参数设置对话框包含以下几个参数项。

- Carrier frequency(Hz): 表示调制信号的载波频率。
- Initial phase(rad): 表示发射载波的初始相位。
- Frequency deviation(Hz): 表示载波频率的频率偏移。

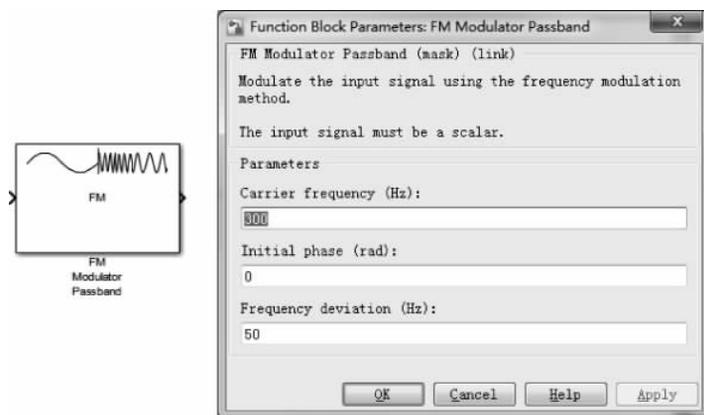


图 3-12 FM 调制模块及其参数设置对话框

2. FM 解调模块

FM 解调模块对频率调制信号进行解调。输入为通带形式的信号,输入和输出信号均采用基于采样的实数标量信号。

在解调过程中,模块要使用一个滤波器。为了执行滤波器的希尔伯特转化,载波频率最好大于输入信号采样时间的 10%。

在通常情况下,Carrier frequency 参数项要比输入信号的最高频率高得多。根据 Nyquist 采样理论,模型中采样时间的倒数必须大于 Carrier frequency 参数项的两倍。

FM 解调模块及其参数设置对话框如图 3-13 所示。

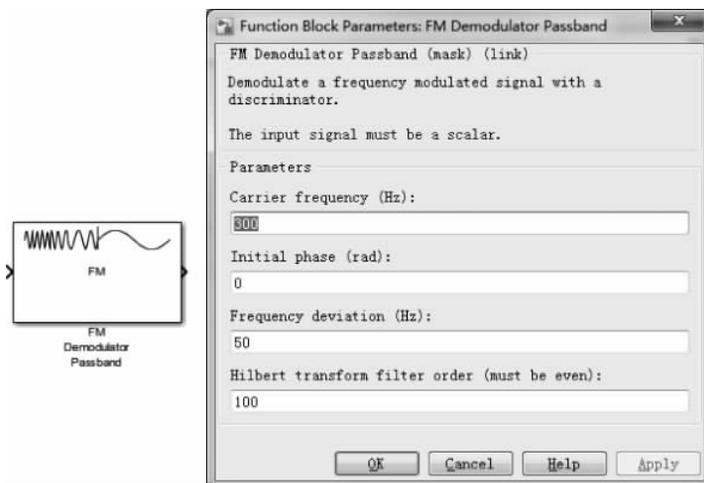


图 3-13 FM 解调模块及参数设置对话框

FM 解调模块的参数设置对话框包含以下几个参数项,含义为

- Carrier frequency(Hz): 表示调制信号的载波频率。
- Initial phase(rad): 表示发射载波的初始相位。
- Frequency deviation(Hz): 表示载波频率的频率偏移。

- Hilbert transform filter order: 表示用于希尔伯特转化的 FIR 滤波器的长度。

3.2.5 PM 调制解调

1. PM 调制模块

PM 调制模块进行通带相位调制。输出为通带表示的调制信号,输出信号的频率随输入幅度变化而变化。输入和输出信号均采用基于采样的实数标量信号。

模块中,如果输入一个时间函数 $u(t)$,则输出为 $\cos(2\pi f_c t + 2\pi K_c u(t) + \theta)$ 。其中 f_c 为 Carrier frequency 参数, θ 为 Initial phase 参数, K_c 为 Modulation constant 参数。

PM 调制模块及其参数设置对话框如图 3-14 所示。

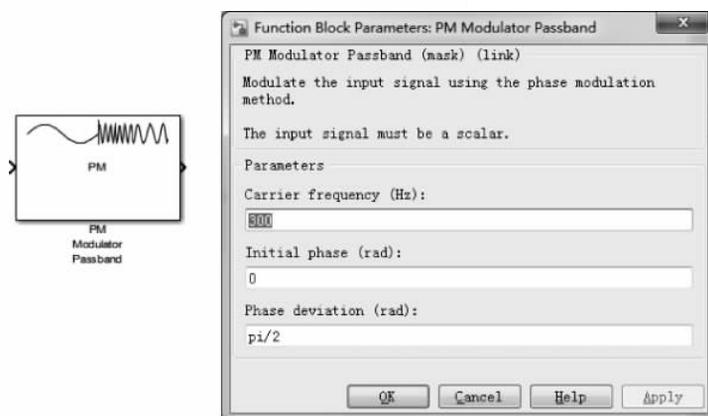


图 3-14 PM 调制模块及参数设置对话框

PM 调制模块的参数设置对话框包含以下几个参数项。

- Carrier frequency(Hz): 表示调制信号的载波频率。
- Initial phase(rad): 表示发射载波的初始相位。
- Phase deviation(rad): 表示载波频率的频率偏移。

2. PM 解调模块

PM 解调模块对通带相位调制的信号进行解调。输入信号为通带形式的已调信号,输入和输出均为基于采样的实数标量信号。

在解调过程中,模块要使用一个滤波器。为了执行滤波器的希尔伯特转化,载波频率最好大于输入信号采样时间的 10%。

在通常情况下,Carrier frequency 参数项要比输入信号的最高频率高得多。根据 Nyquist 采样理论,模型中采样时间的倒数必须大于 Carrier frequency 参数项的两倍。

PM 解调模块及其参数设置对话框如图 3-15 所示。

PM 解调模块参数设置对话框中包含以下几个参数项,含义为

- Carrier frequency(Hz): 表示调制信号的载波频率。
- Initial phase(rad): 表示发射载波的初始相位。

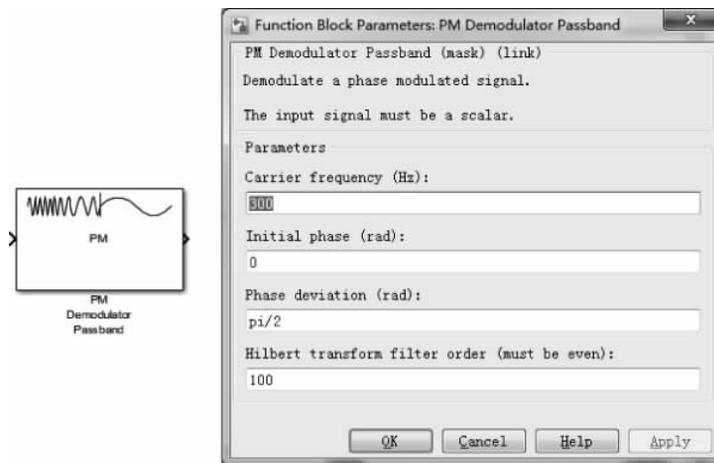


图 3-15 PM 解调模块及参数设置对话框

- Phase deviation(rad): 表示载波频率的相位偏移。
- Hilbert transform filter order: 表示用于希尔伯特转化的 FIR 滤波器的长度。