

# 现代编码技术上机实验指导书

2021 年 10 月

# 一 连续动态系统建模与仿真

## 一、实验目的及要求

1. 连续动态系统建模及解析分析。
2. 利用 Matlab/Simulink 建模与仿真求解连续动态系统。
3. 分析仿真结果。

## 二、实验原理

1. 系统的数学模型可以用多种相互等价的数学方程形式来表达,例如微分方程组与连续状态方程、差分方程组与离散状态方程等等,对于线性时不变系统还经常在变换域中来描述,例如频域、复频域和 Z 域描述等等。对于单输入单输出的线性时不变系统还常用传递函数或冲激响应来描述系统。

2. 除了用方程形式描述外,系统的数学模型还可以有多种描述方法。例如工程上常用的方框图法,信号流图法等。

3. 如果系统是以传递函数表达的,那么使用传递函数模块来构建 Simulink 模型是最为直接的;如果给定了系统的零极点,则用零极点形式的 Simulink 模型来构建比较方便;如果系统的数学模型是状态方程和输出方程,那么就可用状态空间模块来建立模型;若系统以信号流图或等价的方框图描述,用户也可以直接利用基本的积分模拟、相加模块以及增益模块来直接根据信号流图建立系统。

## 三、实验内容

一个电路系统及其方框图模型如下图所示,将电压源  $v(t)$  视为输入信号  $f(t)$ ,电容两端的电压  $u(t)$  视为输出信号  $y(t)$ ,设系统的状态变量为电感元件上的电流以及电容元件两端的电压,即  $x_1(t)=i(t)$ ,  $x_2(t)=u(t)$ 。试列写的该电路的微分方程,并改写为系统状态方程形式。然后根据状态方程画出系统的实现方框图和信号流图,并求出系统的传递函数模型以及对应的冲激响应解析表达式。通过编程仿真来验证结果。要求 M 文件和 Simulink 仿真模型两种仿真方法完成。

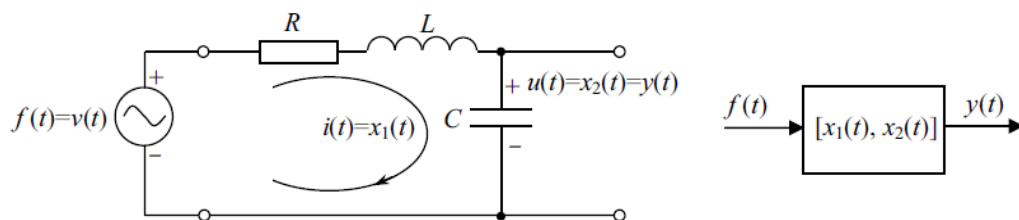


图 1-1 RLC 电路图和等效系统模型

提示: 1、设置电阻值  $R=100\ \Omega$ , 电感值  $L=2\text{mH}$ , 电容值  $C=0.1\ \mu\text{F}$ 。

2、仿真步长为  $2\ \mu\text{s}$ , 仿真时间段为  $500\ \mu\text{s}$ 。

## 四、实验步骤:

## 1、建立 RLC 电路的数学模型

- (1) RLC 电路的微分方程。
- (2) RLC 电路的标准状态方程及输出方程。
- (3) 画出系统的实现框图及系统流程图。
- (4) 求出系统的传递函数模型。
- (5) 求出系统的冲激响应解析解表达式。

## 2、Matlab 编程仿真

- (1) 根据系统的标准状态方程编写状态方程函数。

参考程序：

```
function xdot=ex1statefun(t, x, flag, R, L, C)
% 考虑 RLC 串联环路的状态方程函数
% 输入: t 当前计算时刻, flag 此处不用
% x 为 2*1 矩阵, x(1) 为电感上的电流; x(2) 为电容电压
% R: 电阻值
% L: 电感值
% C: 电容值
xdot=zeros(2,1); % 状态变量矩阵初始化
A=[-R/L, -1/L; 1/C, 0]; % 状态方程系数矩阵
B=[1/L; 0];
xdot=A*x+B*f(t); % 状态方程
function input=f(t)
input=(t>=0); % 输入信号为单位阶跃
```

- (2) 使用 Matlab 求解器对状态方程求解。

参考程序：

```
% ex1prglexample.m
clear;
R=100; L=2e-3; C=1e-7; % 设置电路元件的参数
ts=2e-6;
t_start=-1e-4;
t_end=4e-4;
t=t_start:ts:t_end; % 设置求解的离散时间点序列
i_L0=0; u_C0=0; % 系统初始状态为零
x0=[i_L0;u_C0]; % 系统状态变量初始赋值
tic
[t_out, x_out]=ode45('ex1statefun', t, x0, [], R, L, C); % 仿真计算
toc
```

```

s_t_simu=x_out(:,2);          % 阶跃响应仿真结果
h_t_simu=x_out(:,1)./C;      % 等价的冲激响应仿真结果
figure(1);plot(t_out, s_t_simu, 'k-');
grid on; xlabel('时间 t ');ylabel('电容电压 ');
axis([t_start,t_end, 1.1*min(s_t_simu), 1.1*max(s_t_simu)]);
legend('单位阶跃响应仿真结果');
figure(2);plot(t_out, h_t_simu, 'k. ');
axis([t_start,t_end, 1.1*min(h_t_simu), 1.1*max(h_t_simu)]);
hold on;
%—理论结果
alfa=R/(2*L);
beta=sqrt(1/(L*C)-(R^2)/(4*L^2));
h_t=(L*C*beta)^(-1)*exp(-alfa*t).*sin(beta*t).*(t>=0);% 冲激响应
plot(t,h_t,'k'); legend('冲激响应仿真数值结果','冲激响应理论计算结果');
grid on; xlabel('时间 t ');ylabel('电容电压 ');

```

### 3、建立 RLC 电路的 Simulink 模型并仿真（停止时间设为 5e-4）

方案一：利用传递函数（Transfer Fcn）建模并仿真。

方案二：利用状态空间方程(State-Space)建模并仿真。其中， $A = [-R/L, -1/L; 1/C, 0]$ ； $B = [1/L; 0]$ ； $C = [0, 1]$ ； $D = 0$ 。

方案三：利用信号流图建模并仿真。

参考模型：

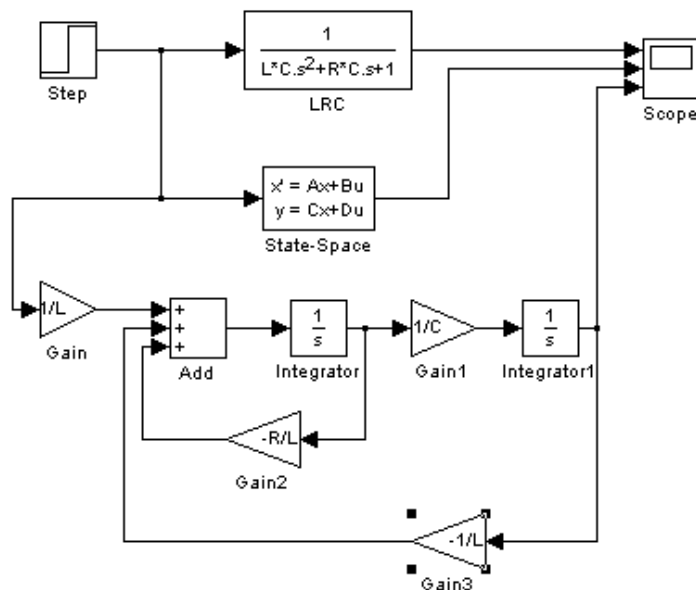
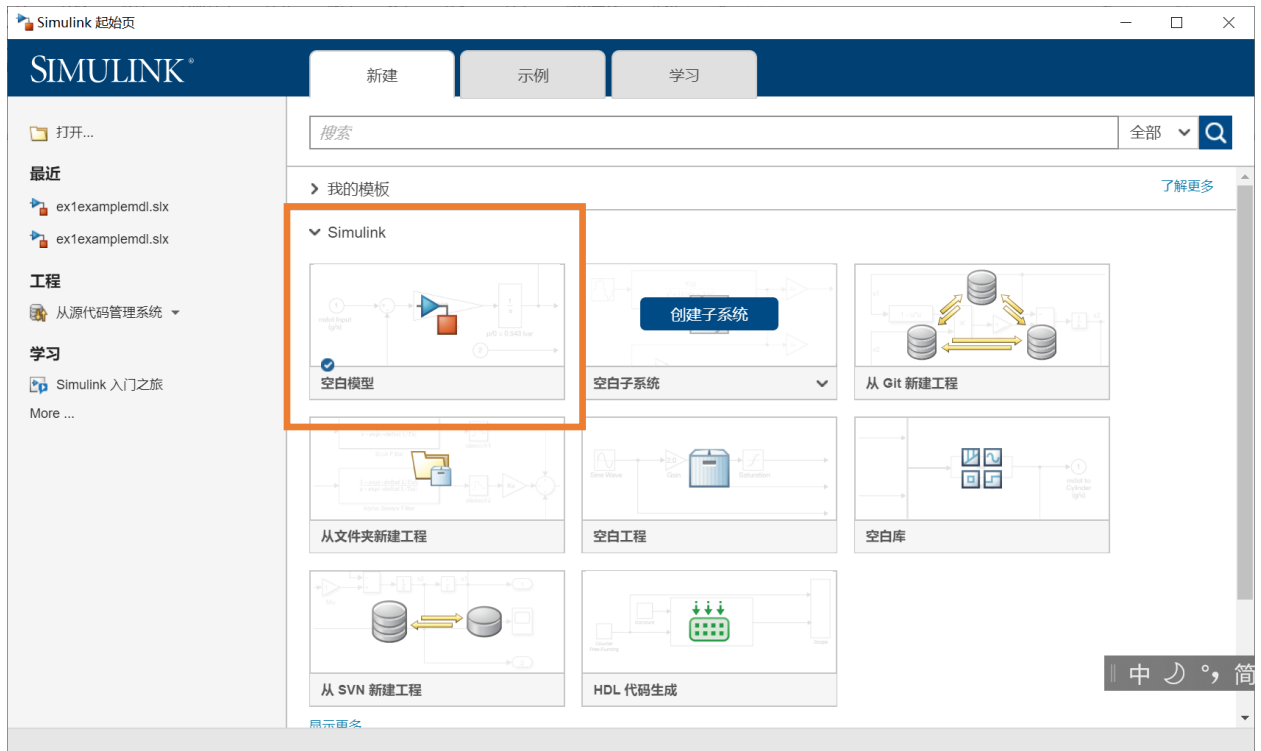


图 1-2 系统等价的三种 Simulink 建模模型

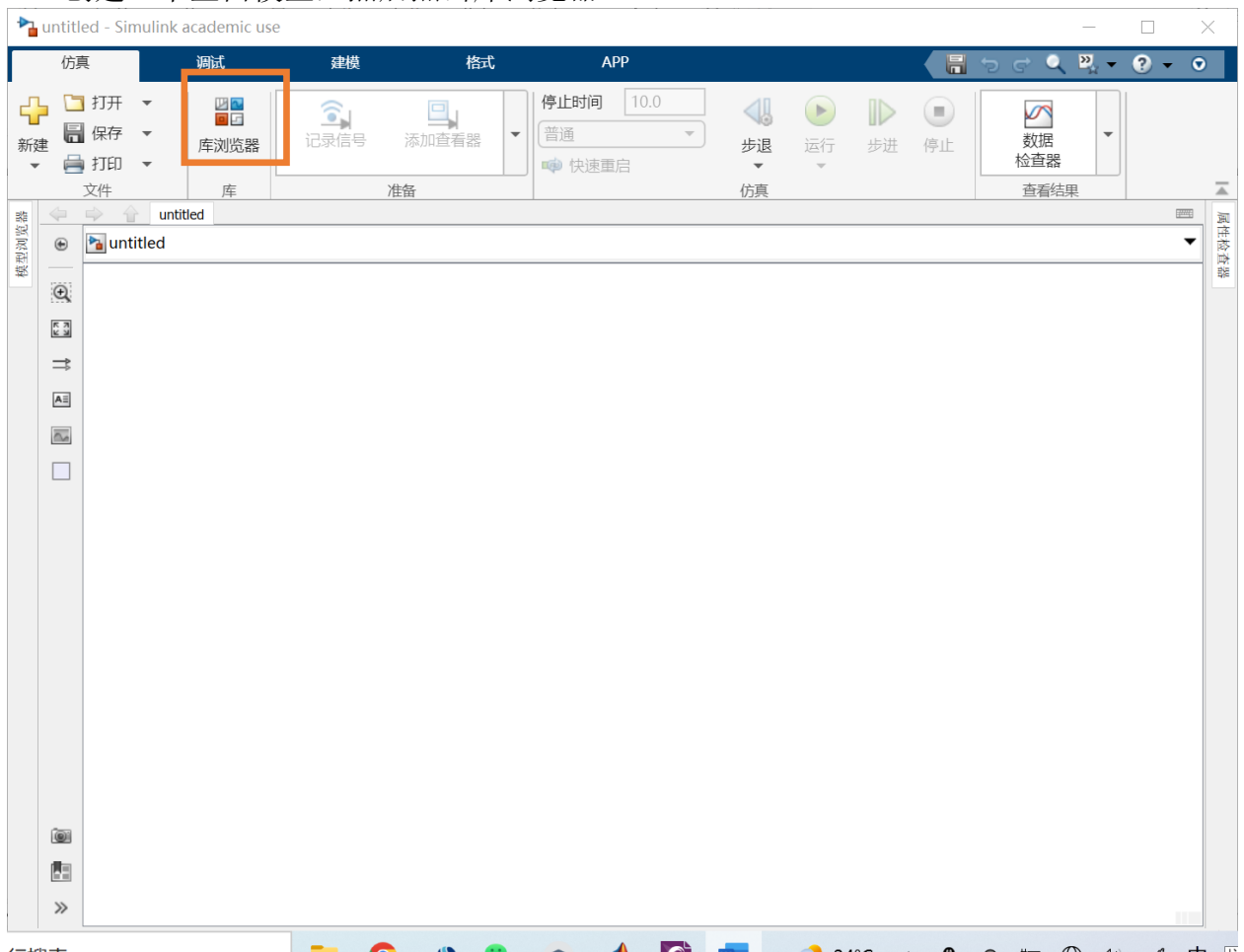
步骤：

1. 在执行这个实验前，必须先执行前两个实验的程序。

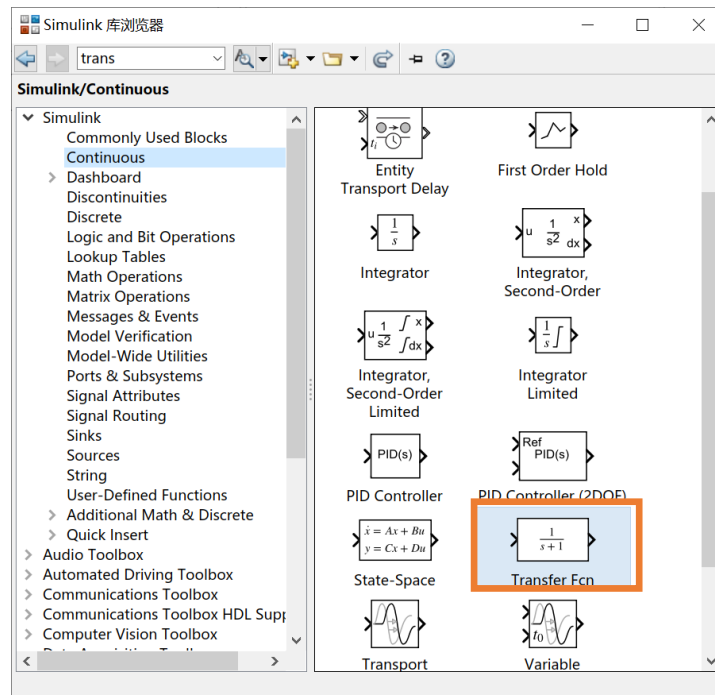
2. 在 Matlab 的命令行窗口输入：simulink，打开 SIMULINK 窗口。



3. 创建一个空白模型，然后点击库浏览器。



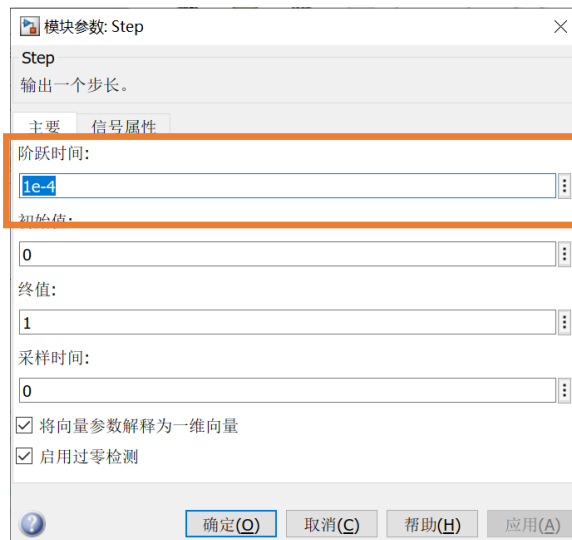
4. 在库浏览器左边栏，选择 Simulink->Continuous->Transfer Fcn 这个模块。



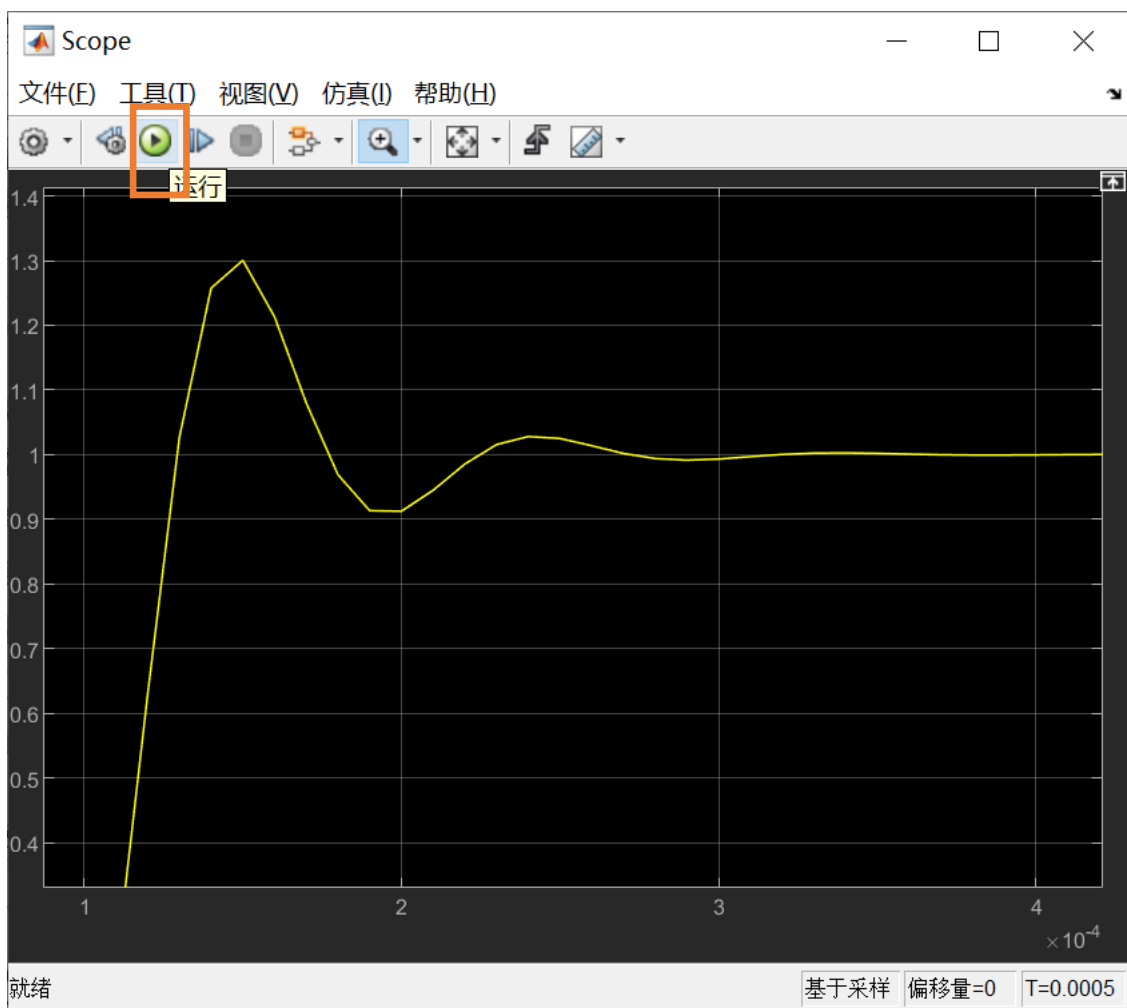
5. 双击模块，把分子系数设为[1]，分母系数设为[L\*C R\*C 1]，把这个模块拖到模型中间。

6. 按照类似的方法（可以用搜索的方法），找到 Step 模块，Scope 模块，然后按照下图连接。设置 Step 模块的阶跃时间为  $1e-4$ ，仿真的停止时间为  $5e-4$

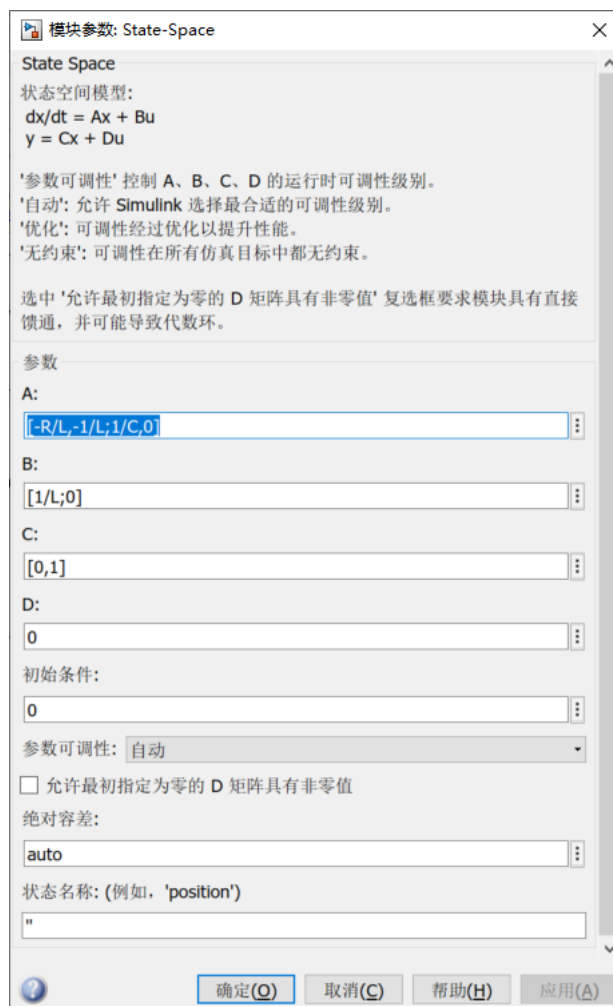




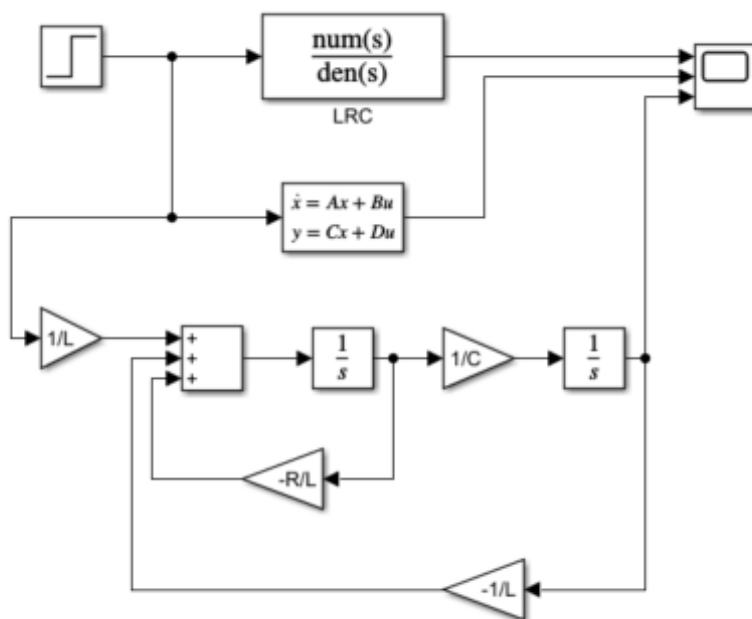
7. 双击 Scope 模块，然后按下运行按钮，查看仿真结果，如下图。



8. 依照前几个步骤的方法，添加模块 State-Space（在 Simulink->Continuous->State-Space），按照下图进行配置。

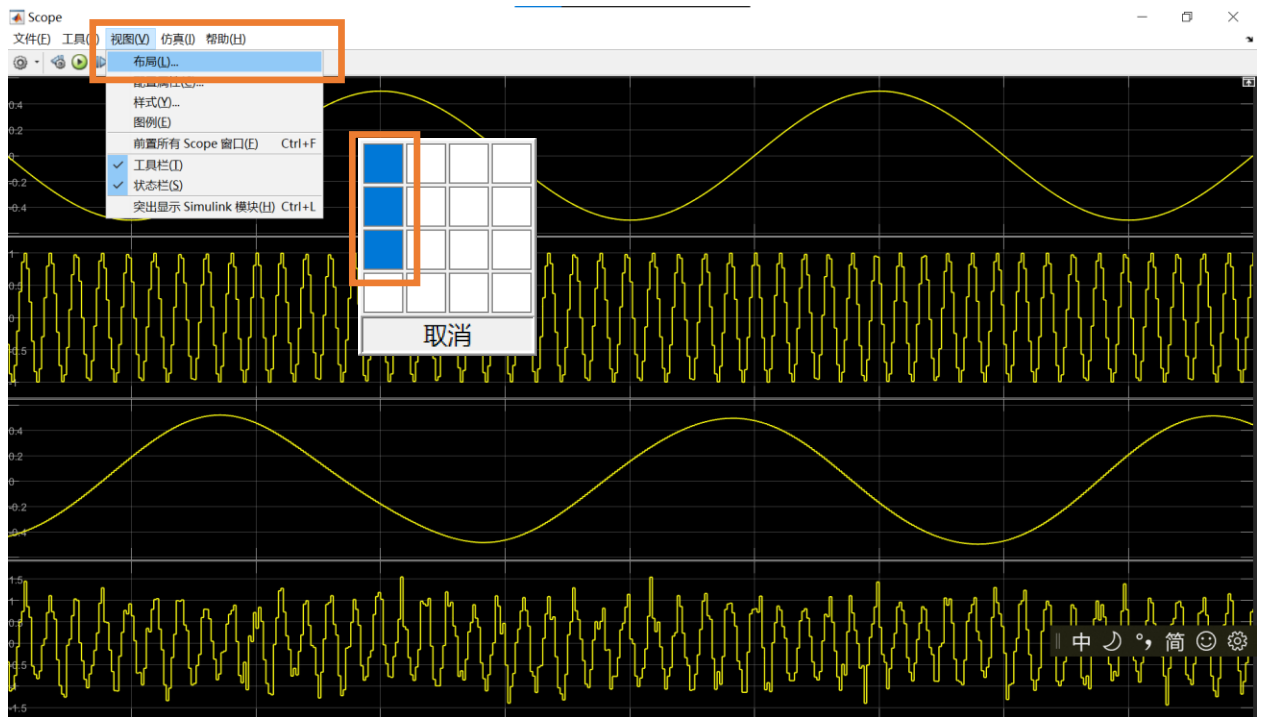


9. 添加模块 Gain, Add, Integrator 等，按照下图进行连接和配置，实现用三种不同的方案进行仿真。（其结果应当都一样。）





10. 如果不知道怎么设置 Scope 的多通道输入/显示，可以看下图：



## 二 模拟通信系统建模与仿真

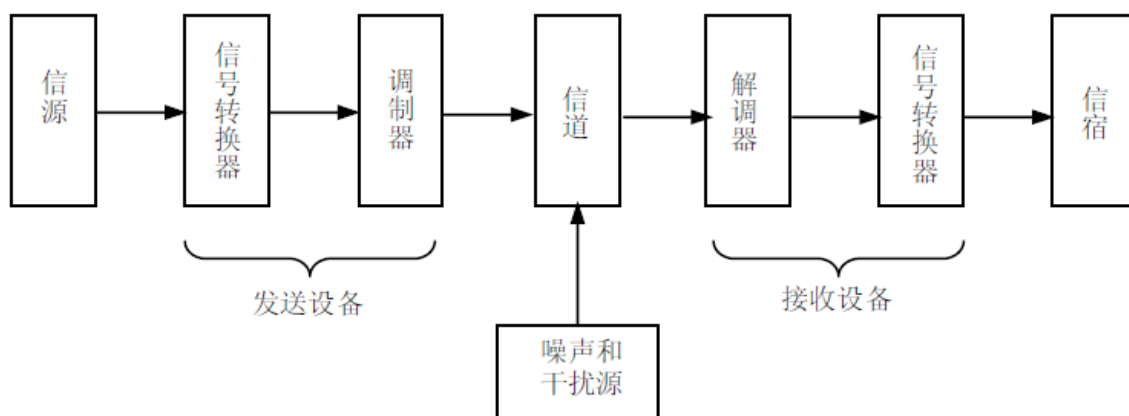
### 一、实验目的及要求

1. 掌握基本通信模块的建模与仿真。
2. 掌握模拟通信系统建模与仿真的方法及过程。
3. 利用 Matlab/Simulink 仿真模拟通信系统。
4. 分析仿真结果。

### 二、实验原理

如果信源输出是模拟信号，在发送设备中没有将其转换为数字信号，而是直接对其进行时域或频域处理（如放大、滤波、调制等）之后就进行传输，则这样的通信系统称为模拟通信系统。模拟通信系统的概念模型如图 2-1 所示。

图 2-1 模拟通信系统的概念模型



在发送端，信号转换器负责将其他物理量表示的模拟信号转换为模拟电信号，如各种传感器、摄像头、话筒等。基带处理部分对输入的模拟电信号进行放大、滤波后，送入调制器进行调制，转变为频带信号，称为已调信号。频带处理部分负责对已调信号的滤波、上变频、及功率放大，并输出到有线信道中或通过天线发送到无线信道中。

在接收端，信号经过频带处理部分选频接收、下变频和中频放大后，送入解调器进行解调，还原出基带信号，再经过适当的基带信号处理之后送入信号转换器，如显示器、扬声器等，最终还原为最初发送类型物理量表示的模拟信号。

### 三、实验内容

**实验 2.1** 试仿真得出一个幅度系统的输入输出波形。设输入被调制信号是一个幅度为  $2v$ ，频率为  $1000\text{Hz}$  的余弦波，调制度为  $0.5$ ，调制载波信号是一个幅度为  $5v$ ，频率为  $10\text{KHz}$  的余弦波。所有余弦波的初相位为  $0$ 。

#### 要求：

- （1）仿真分别得出输入被调制信号、载波信号和调制输出信号的波形图。

(2) 仿真模型拓展：考虑产生载波的振荡器存在相位噪声，并且接收机收到的调制信号在传输过程中会受到加性噪声的影响。

### 实验步骤：

(1) 建立调幅系统的数学模型

$$y(t) = (M + m_a M \cos 2\pi f_m t) \times A \cos 2\pi f_c t$$

(2) 编程实现

参考程序：

```
% ex2example1prg1.m
dt=1e-5; % 仿真采样间隔
T=3*1e-3; % 仿真终止时间
t=0:dt:T;
input=2*cos(2*pi*1000*t); % 输入被调信号
carrier=5*cos(2*pi*1e4*t); % 载波
output=(2+0.5*input).*carrier; % 调制输出
% 作图: 观察输入信号, 载波, 以及调制输出
subplot(3,1,1); plot(t,input);xlabel('时间 t');ylabel('被调信号');
subplot(3,1,2); plot(t,carrier);xlabel('时间 t');ylabel('载波');
subplot(3,1,3); plot(t,output);xlabel('时间 t');ylabel('调幅输出');
```

(3) 仿真模型拓展。

考虑了考虑了相位噪声  $\phi_n(t)$  的载波表达为：

$$v(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_n(t))$$

设信道是无衰减的，其加性噪声为  $n(t)$ ，那么在接收机所收到的调幅信号：

$$r(t) = y(t) + n(t)$$

将仿真时间区间划分成若干段，每段称为一帧，示波器的扫描周期等于帧周期，即每次仿真得出一帧数据就显示刷新一次。

参考程序：

```
% ex2example1prg2.m
dt=1e-6; % 仿真采样间隔
T=2*1e-3; % 仿真的帧周期
for N=0:500 % 总共仿真的帧数
    t=N*T+(0:dt:T); % 帧中的取样时刻
    input=2*cos(2*pi*1005*t); % 输入被调信号
    carrier=5*cos(2*pi*(1e4)*t+0.1*randn); % 载波
    output=(2+0.5*input).*carrier; % 调制输出
```

```

noise=randn(size(t));           % 噪声
r=output+noise;                 % 调制信号通过加性噪声信道
% 作图: 观察输入信号, 载波, 以及调制输出
subplot(3,1,1); plot([0:dt:T],input);xlabel('时间 t');
ylabel('被调信号');text(T*2/3,1.5,['当前帧数:  N=',num2str(N)]);
subplot(3,1,2); plot([0:dt:T],carrier);
xlabel('时间 t');ylabel('载波');
subplot(3,1,3); plot([0:dt:T],r);
xlabel('时间 t');ylabel('调幅输出');
set(gcf,'DoubleBuffer','on');   % 双缓冲避免作图闪烁
drawnow;
end

```

**实验 2.2** 对一个频率调制解调系统进行建模仿真。仿真的系统参数为：载波频率  $f_c=100\text{Hz}$ ，最大频偏  $\Delta f=10\text{Hz}$ ，被调基带信号为正弦波，其频率为  $5\text{Hz}$ ，振幅为  $0.5\text{V}$ 。调频输出信号幅度为  $1\text{V}$ 。传输信道是高斯白噪声信道，信噪比为  $10\text{dB}$ 。仿真步进为  $0.001$  秒（即系统采样率为  $1000\text{Hz}$ ）。要求观察调频输出信号、信道输出信号以及解调输出的波形和频谱，并计算该调频信号的带宽，通过仿真验证之。

### 实验步骤：

#### （1）建立数学模型

频率调制的数学表达式为：

$$y(t) = \cos(2\pi f_c t + 2\pi K_c \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau + \theta)$$

根据题意，输入信号为：

$$m(t) = 0.5 \cos 2\pi 5t$$

将其代入式 2.1，得到调频输出为：

$$y(t) = \cos(2\pi f_c t + 2\pi K_c \int_{-\infty}^t 0.5 \cos(10\pi\tau) d\tau + \theta)$$

其瞬时频率为：

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} (2\pi f_c t + 2\pi K_c \int_{-\infty}^t 0.5 \cos(10\pi\tau) d\tau + \theta) \\
 &= f_c + K_c \times 0.5 \cos(10\pi t)
 \end{aligned}$$

因此得出最大频偏

$$\Delta f = \max(K_c \times 0.5 \cos 10\pi t) = 0.5 K_c$$

题设最大频偏为  $\Delta f = 10\text{Hz}$ ，故求得  $K_c = 20\text{Hz/V}$ 。调频输出信号的带宽为：

$$B_{FM} = 2(f_m + \Delta f) = 2 \times (5 + 10) = 30\text{Hz}$$

(2) 建立仿真模型并设置参数。

参考模型：

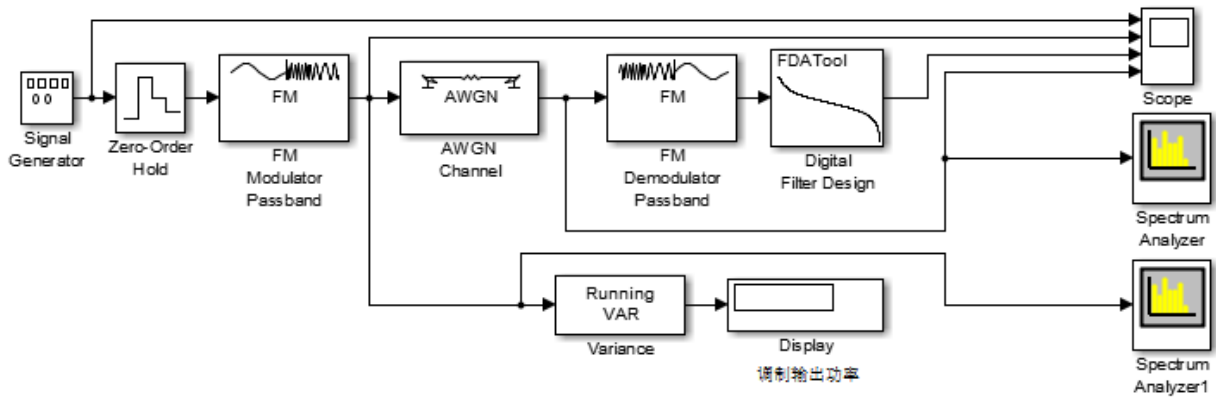


图 2-2 频率调制、传输和解调系统仿真测试模型

参考步骤：


1. 在 Simulink 中寻找 Signal Generator、Zero-Order Hold、FM Modulator Passban、AWGN Channel、FM Demodulator Passban、Digital Filter Design、Variance、Display 等模块，按照上图连接。

2. 设置仿真模型参数：

ex2\_2example - Simulink academic use



## 2. 各模块参数设置:

 模块参数: Signal Generator

Signal Generator

输出各种波形:  
 $Y(t) = \text{Amp} * \text{Waveform}(\text{Freq}, t)$

参数

波形: 正弦


时间(t): 使用仿真时间

振幅:  
0.5

频率:  
5

单位: Hertz

☒ 将向量参数解释为一维向量

 确定(O) 取消(C) 帮助(H) 应用(A)

 模块参数: Zero-Order Hold

Zero-Order Hold

零阶保持。

参数

采样时间(-1 表示继承):  
1/1000

 确定(O) 取消(C) 帮助(H) 应用(A)

模块参数: FM Modulator Passband

×

FM Modulator Passband (mask) (link)

Modulate the input signal using the frequency modulation method.

The input signal must be a scalar.

参数

Carrier frequency (Hz):

Initial phase (rad):

Frequency deviation (Hz):

?

确定(O)

取消(C)

帮助(H)

应用(A)

模块参数: AWGN Channel

×

AWGN Channel (mask) (link)

Add white Gaussian noise to the input signal. The input signal can be real or complex. This block supports multichannel processing.

When using either of the variance modes with complex inputs, the variance values are equally divided among the real and imaginary components of the input signal.

参数

Initial seed:

Mode:

SNR (dB):


Input signal power, referenced to 1 ohm (watts):

确定(O)

取消(C)

帮助(H)

应用(A)


模块参数: FM Demodulator Passband

FM Demodulator Passband (mask) (link)

Demodulate a frequency modulated signal with a discriminator.

The input signal must be a scalar.

参数

Carrier frequency (Hz):

100

Initial phase (rad):


0

Frequency deviation (Hz):

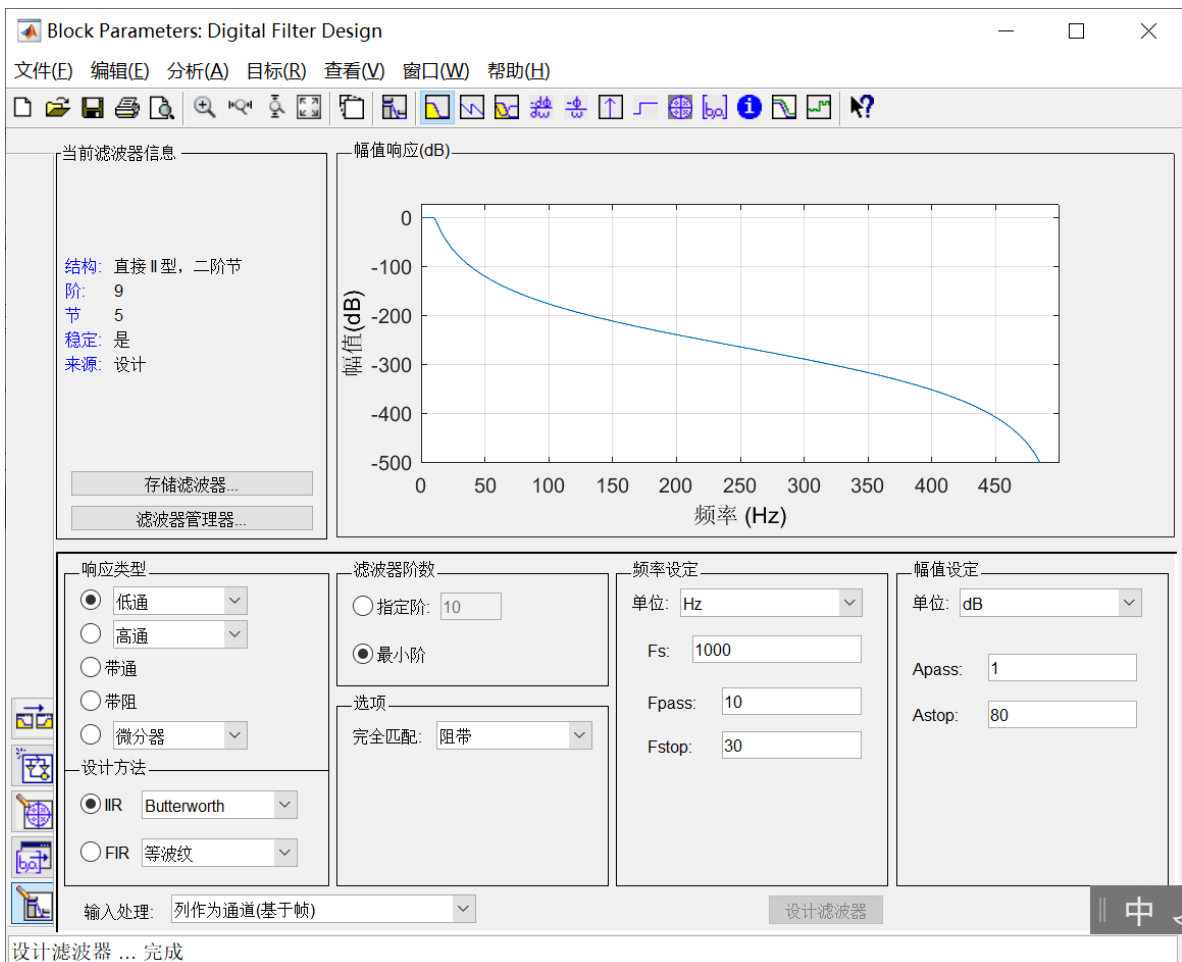
10

Hilbert transform filter order (must be even):

100



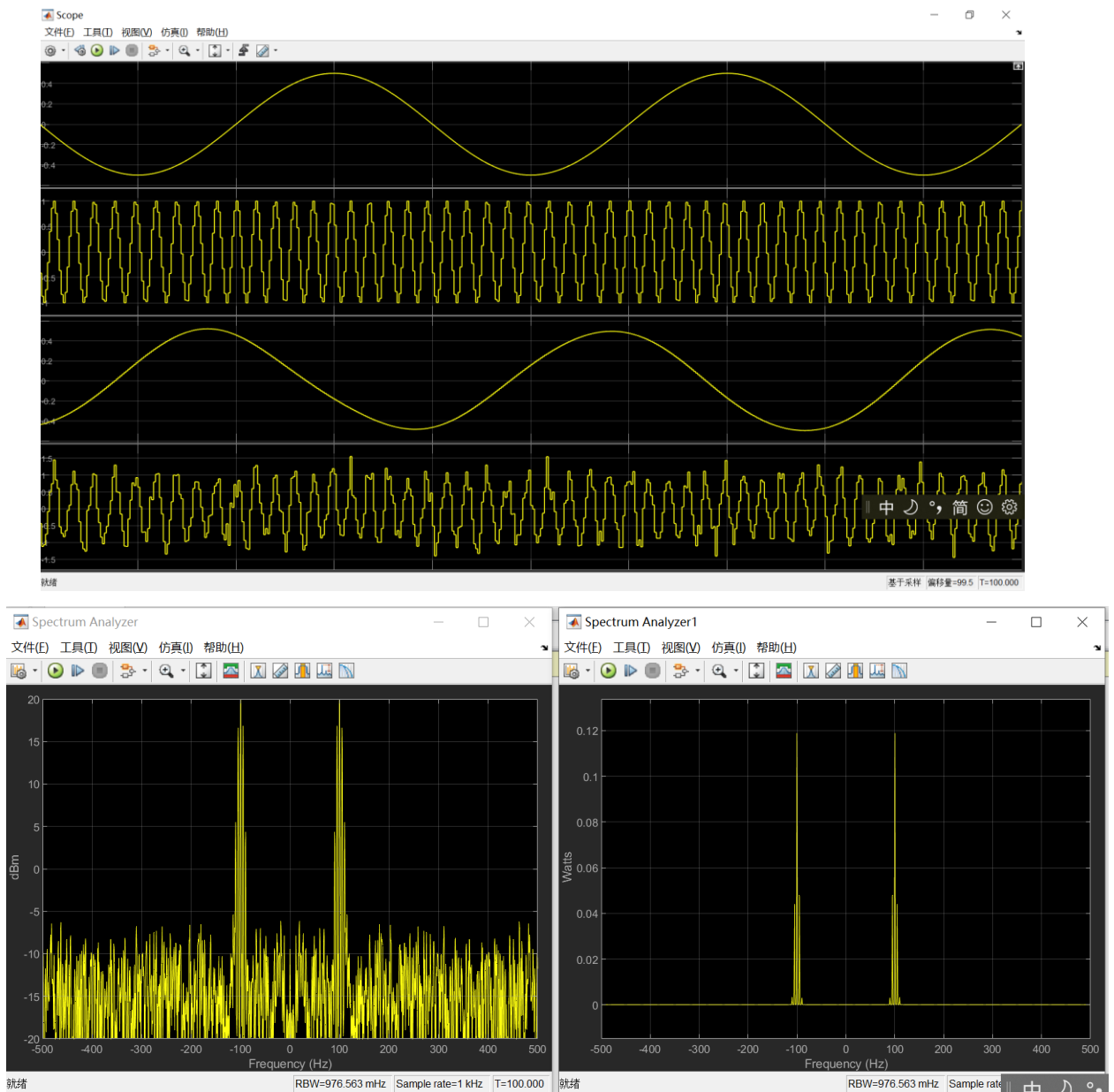
确定(O)
取消(C)
帮助(H)
应用(A)







3. 最终显示效果:



**实验 2.3**（选做）试对中波调幅广播传输系统进行仿真，模型参数指标参照实际系统设置。

（1）基带信号：音频，最大幅度为 1。基带测试信号频率在 100Hz 到 6000Hz 内可调。实验中可设基带信号为幅度是 0.3 的 1000Hz 正弦波。

（2）载波：给定幅度的正弦波，为简单起见初相位设为 0，频率为 550KHz 到 1605KHz 可调。实验中可设幅度是 1 的 1MHz 正弦波。

（3）接收机选频滤波器带宽为 12KHz，中心频率为 1000KHz。

（4）在信道中加入噪声。当调制度为 0.3 时，设计接收机选频滤波器输出信噪比为 20dB，要求计算信道中应该加入噪声的方差，并能够测量接收机选频滤波器实际输出信噪比。

### 实验步骤：

(1)仿真参数设计：

系统工作最高频率为调幅载波频率 1605KHz，设计仿真采样率为最高工作频率的 10 倍左右，因此取仿真步长为

$$t_{step} = \frac{1}{10f_{max}} = 6.23 \times 10^{-8} s$$

相应的仿真带宽为仿真采样率的一半

$$W = \frac{1}{2} \frac{1}{t_{step}} = 8025.7 kHz$$

设基带测试正弦信号为  $m(t) = A \cos 2\pi Ft$ ，载波为  $c(t) = \cos 2\pi f_c t$ ，则调制度为  $m_a$  的调制输出信号  $s(t)$  为

$$s(t) = (1 + m_a \cos 2\pi Ft) \cos 2\pi f_c t$$

显然， $s(t)$  的平均功率为

$$P = \frac{1}{2} + \frac{m_a^2}{4}$$

设信道无衰减，其中加入的白噪声功率谱密度为  $N_0/2$ ，那么仿真带宽  $(-W, W)$  内噪声样值的方差为

$$\sigma^2 = \frac{N_0}{2} \times 2W = N_0 W$$

设接收选频滤波器的功率增益为 1，带宽为 B，则选频滤波器输出噪声功率为

$$N = \frac{N_0}{2} \times 2B = N_0 B$$

因此，接收选频滤波器输出信噪比为

$$SNR_{out} = \frac{P}{N} = \frac{P}{N_0 B} = \frac{P}{\sigma^2 B/W}$$

故信道中的噪声方差为

$$\sigma^2 = \frac{P}{SNR_{out}} \times \frac{W}{B}$$

代入设计要求的输出信噪比  $SNR_{out}$  可计算出相应信道中应加入的噪声方差值，计算程序如下：

```
SNR_dB=20;      % 设计要求的输出信噪比(dB)
SNR=10.^(SNR_dB/10);
m_a=0.3;        % 调制度
P=0.5+(m_a^2)/4; % 信号功率
W=8025.7e3;     % 仿真带宽 Hz
B=12e3;         % 接收选频滤波器带宽 Hz
sigma2=P/SNR*W/B % 计算结果：信道噪声方差
```

(2) 根据以上计算进行仿真模型的参数设置。

参考模型：

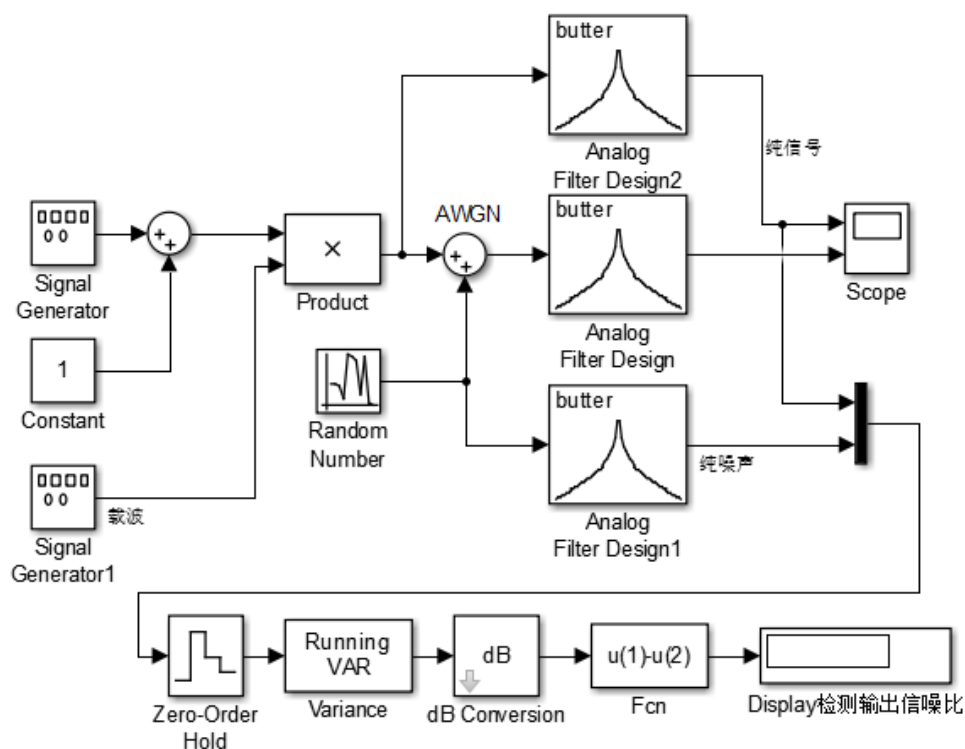
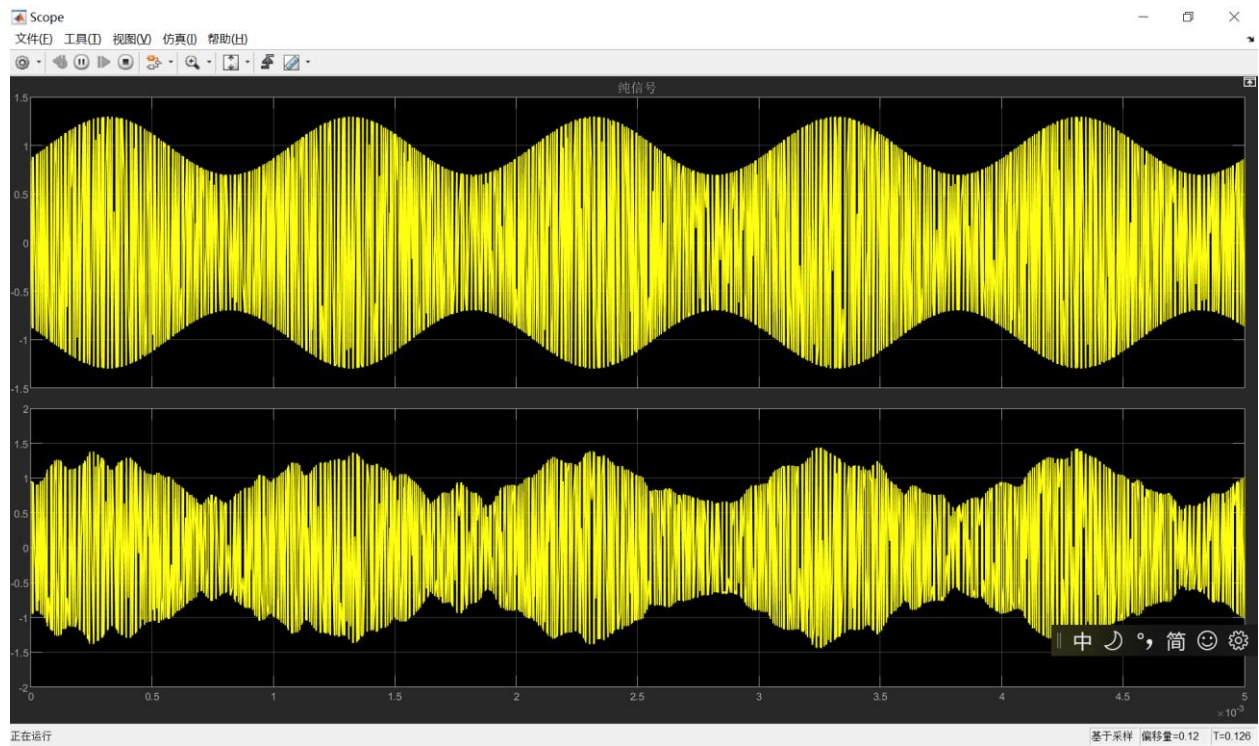


图 2-3 中波调幅广播传输系统仿真模型

(3) 效果



信噪比会在  $2.x-3.x * 1e-7$  这个范围之内浮动