

电子科技大学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

# 项目 2 汇报书



题    目\_\_\_\_\_通信系统仿真\_\_\_\_\_

小    组\_\_\_\_\_第 三 组\_\_\_\_\_

成    员\_\_\_\_\_黄思宇、汪锦琛、谢秋雨、朱若愚\_\_\_\_\_

# 一、调制-解调系统的基本原理

---

## 1.1 2ASK

二进制幅移键控调制 (Binary Amplitude-Shift Keying) , 通过控制载波的幅度来调制信号。

### 1.1.1 调制原理

假设原始信号为  $s(t)$ , 载波信号  $f_c(t)=A\cos(\omega_c t+\theta)$ , 则调制后的信号为

$$f(t)=\left\{ \begin{array}{l} s(t)f_c(t), s(t)=1 \\ 0, s(t)=0 \end{array} \right.$$

### 1.1.2 解调原理

先使用带通滤波器, 让 2ASK 信号完整通过, 滤去其他频段的噪声。然后乘上与调制时完全相同的一列载波, 信号被解调为

$$f(t)=\left\{ \begin{array}{l} 2A_2s(t)+2A_2\cos(2\omega_c t+2\theta), s(t)=1 \\ 0, s(t)=0 \end{array} \right.$$

再通过低通滤波器, 滤去高频成分  $2A_2\cos(2\omega_c t+2\theta)$ 。至此, 代表 “1” 的信号段振幅应接近  $2A_2$ , 代表 “0” 的信号段振幅应接近 0。

最后, 通过参数合适的滞回比较器, 就能够还原初始的电平信号。

## 1.2 2FSK

二进制频移键控调制 (Binary Frequency-Shift Keying) , 通过控制载波的频率来调制信号。

### 1.2.1 调制原理

假设原始信号为  $s(t)$ ，载波信号  $f_{c1}(t)=A\cos(\omega_1t+\theta_1)$ ， $f_{c2}(t)=A\cos(\omega_2t+\theta_2$

)，则调制后的信号为

$$f(t)=\left\{ \begin{array}{ll} f_{c1}(t), & s(t)=1 \\ f_{c2}(t), & s(t)=0 \end{array} \right.$$

### 1.2.2 解调原理

先仿照 2ASK，使用带通滤波器、相同载波、低通滤波器解调，高低频载波各

得到一个解调信号。这两个解调信号，一个的“1”对应高电平，另一个的

“1”对应低电平。然后通过比较器比较这两个电平，就能够判断出真实的原始电平。

## 1.3 2PSK

二进制相移键控调制（Binary Phase-Shift Keying），通过控制载波的**相位**来调制信号。

### 1.3.1 调制原理

由于在 2PSK 中，两列载波的相位之差为  $\pi$ ，即瞬时值刚好互为相反数，所以

我们可以考虑预先将原始信号变为双极性信号，即将原始信号的 0 映射到-1；

这样我们就可以只使用一列载波，为调制解调大大减少了麻烦。而这样的映射

可以通过  $s-s$  实现。

假设原始信号为  $s(t)$ ，载波信号  $f_c(t)=A\cos(\omega t+\theta)$ ，则调制后的信号为

$$f(t)=\left\{ \begin{array}{ll} f_c(t), & s(t)=1 \\ -f_c(t), & s(t)=0 \end{array} \right.$$

### 1.3.2 解调原理

与 2ASK 基本相同，使用带通滤波器、相同载波、低通滤波器解调，此时代表

“1”的信号段振幅约为  $2A_2$ ，代表“0”的信号段振幅约为  $-2A_2$ 。

所以当信号振幅跨越 0 时，就代表着原始信号 0 和 1 的变化，因此使用滞回比较器就能够还原原始信号。

## 1.4 QPSK

正交相移键控调制（Quadrature Phase Shift Keying），通过**两路正交载波**调制**二比特信号**。

### 1.4.1 调制原理

在四电平信号中，一个码元可以传输 2 个比特。QPSK 首先通过串并变换，将第一个比特送入 I 路，第二个比特送入 Q 路；然后 I 路、Q 路乘上正交的两列载波；最后相加，即得到 QPSK 信号。

假设原始信号为  $s(t)$ ，I 路载波信号  $f_{c1}(t)=A\cos(\omega t+\theta)$ ，Q 路载波信号  $f_{c2}$

$(t)=-A\sin(\omega t+\theta)$ ，则调制后的信号为

$$f(t)=\left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{array} \right\} \left( 2A\cos(\omega t+\theta+4\pi), s(t)=11 \right) 2A\cos(\omega t+\theta+43\pi$$

$$), s(t)=01 \quad 2A\cos(\omega t+\theta+45\pi), s(t)=00 \quad 2A\cos(\omega t+\theta+47\pi), s(t)=10$$

### 1.4.2 解调原理

同样经过带通滤波滤除噪声后，将信号送入 I 路、Q 路；两路分别乘以相同载波、低通滤波后，两路高电平对应振幅为  $2A_2$ ，低电平对应振幅为  $-2A_2$ ；再通过采样判断，就能够分别在两路重现发送端的 I 路、Q 路双极性信号；最后通过脉冲激励判断进行并串变换，合并两路得到原始双极性信号。

## 1.5 16-QAM

16-QAM (16-Quadrature Amplitude Modulation) ，结合 QPSK 和 4ASK，通过**两列正交载波调制四比特信号**。

### 1.5.1 调制原理

类似于 QPSK，QAM 先通过串并变换，将双极性四比特信号的 1、3 位送入 I 路，2、4 位送入 Q 路；然后使用逻辑电路，将每路的 2 比特 2 电平信号映射到 1 比特 4 电平信号；乘上正交载波后相加，即得到 16-QAM 信号。

本组采用的 2-4 电平映射法则如下表所示：

原信号	双极性信号	4 电平信号
0 0	-1 -1	-3
0 1	-1 1	-1
1 0	1 -1	1
1 1	1 1	3

例如，原信号某一四比特片段为 1101，经串并变换后 I 路得到 10，Q 路得到

11，映射后分别得到 1 和 3，最后的调制信号为

$$f(t)=A\cos(\omega t+\theta)-3\sin(\omega t+\theta)$$

其他片段同理。

## 1.5.2 解调原理

与 QPSK 类似，经过带通滤波滤除噪声后，将信号送入 I 路、Q 路；两路分别乘以相同载波、低通滤波后，两路四种电平的对应该幅分别为  $2A_2$ 、 $2A_2$ 、 $-2A_2$ 、 $-2A_2$ ；再通过采样量化、使用反映射解码，就能够分别在两路重现发送端的 I 路、Q 路信号（可以直接解码为单极性）；最后通过脉冲激励判断进行并串变换，合并两路得到原始信号。

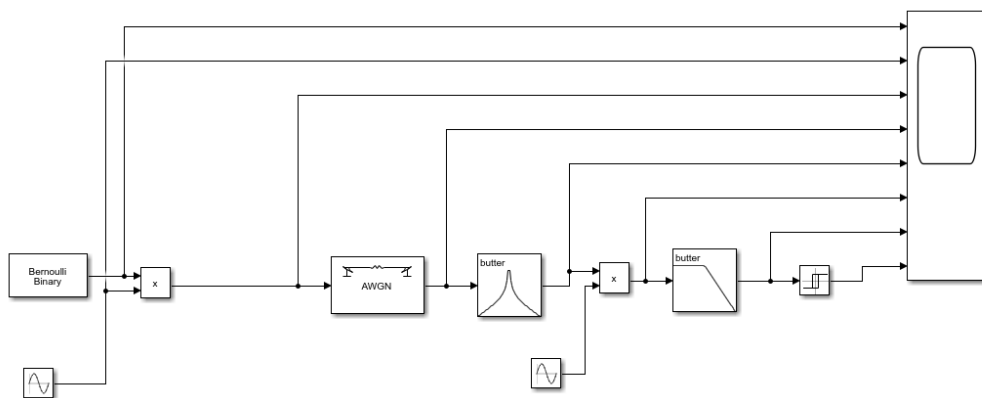
例如，上一节中 1101 的调制信号  $f(t)$  在 I 路振幅约  $2A_2$ ，在 Q 路振幅约  $2A_2$ 。采样量化后，将 I 路反映射为 10，Q 路反映射为 11，最后并串变换得到原始信号 1101。

## 二、基于 Simulink 对调制-解调系统的仿真

---

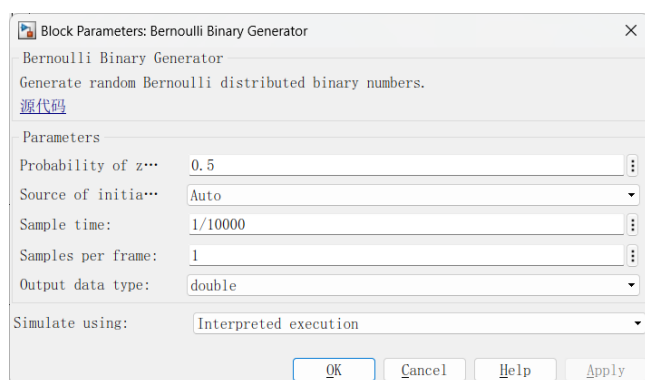
### 2.1 2ASK

#### 2.1.1 仿真结构



上图为 2ASK 仿真系统的结构

参数设置如下：



**Block Parameters: Analog Filter Design**

Analog Filter Design (mask) (link)

Design one of several standard analog filters, implemented in state-space form.

Parameters

Design method: Butterworth

Filter type: Bandpass

Filter order: 8

Lower passband edge frequency (rad/s):  $2\pi \cdot 10000 \cdot 985$

Upper passband edge frequency (rad/s):  $2\pi \cdot 10000 \cdot 1015$

? OK Cancel Help Apply

**Block Parameters: Relay**

Relay

Output the specified 'on' or 'off' value by comparing the input to the specified thresholds. The on/off state of the relay is not affected by input between the upper and lower limits.

Main Signal Attributes

Switch on point: 0.3

Switch off point: 0.3

Output when on: 1

Output when off: 0

Input processing: Elements as channels (sample based)

☒ Enable zero-crossing detection

? OK Cancel Help Apply

**Block Parameters: Analog Filter Design1**

Analog Filter Design (mask) (link)

Design one of several standard analog filters, implemented in state-space form.

Parameters

Design method: Butterworth

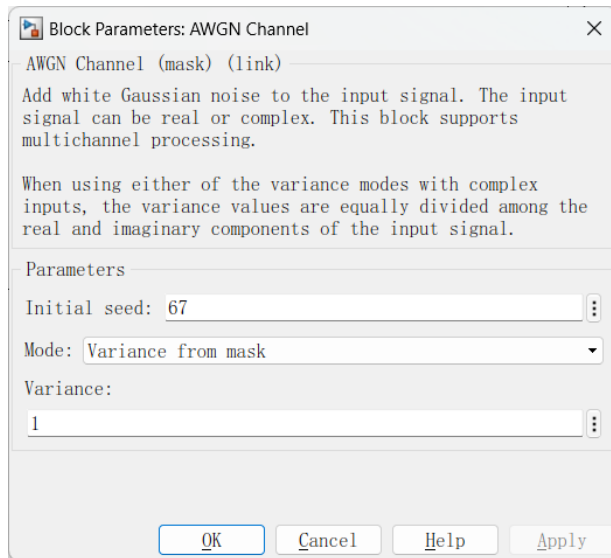
Filter type: Lowpass

Filter order: 8

Passband edge frequency (rad/s):  $2\pi \cdot 10050$

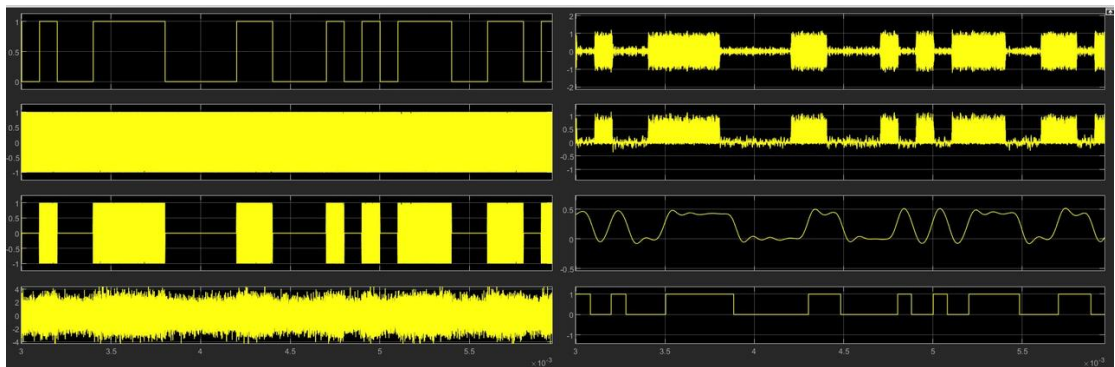
? OK Cancel Help Apply





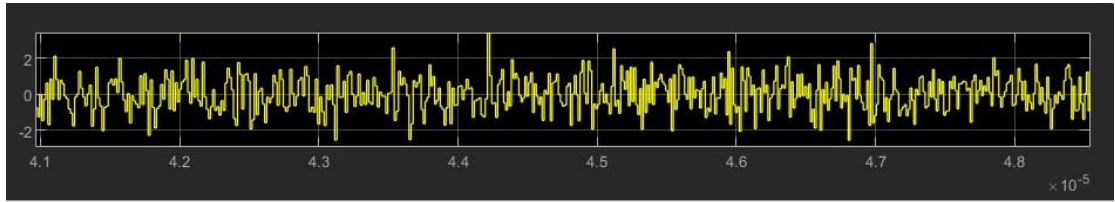
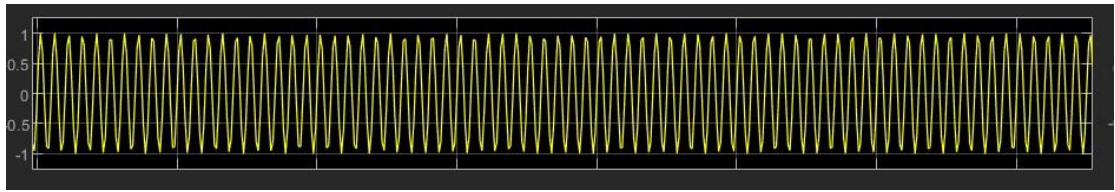
其余参数均为软件默认值。

## 2.1.2 仿真结果



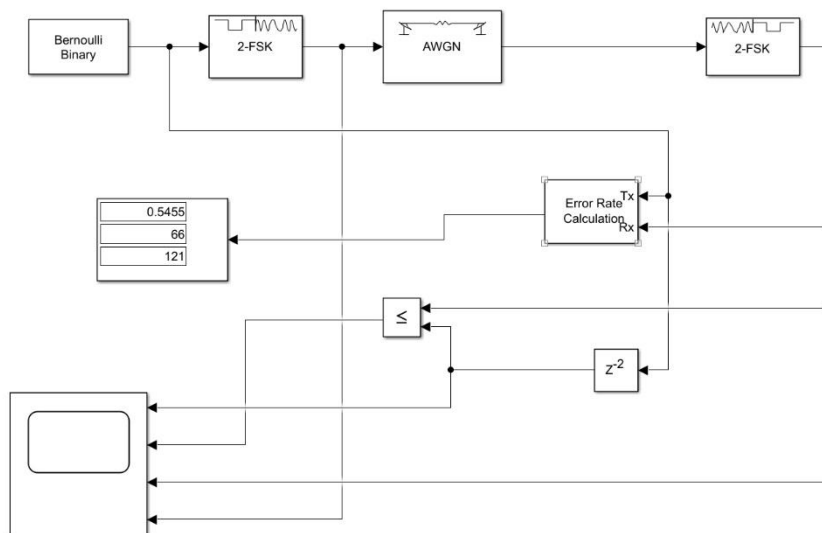
八个波形从上到下、从左到右依次为方波波形、载波波形、2ASK 信号波形、加上高斯白噪声后的 2ASK 波形、通过带通滤波器滤去部分高斯白噪声的波形、用载波与传输波形相乘得到的波形、通过低通滤波器滤过载波的波形、通过取样判决器还原的方波。

其中，载波波形和加上高斯白噪声后的 2ASK 波形放大后如下：



## 2.2 2FSK

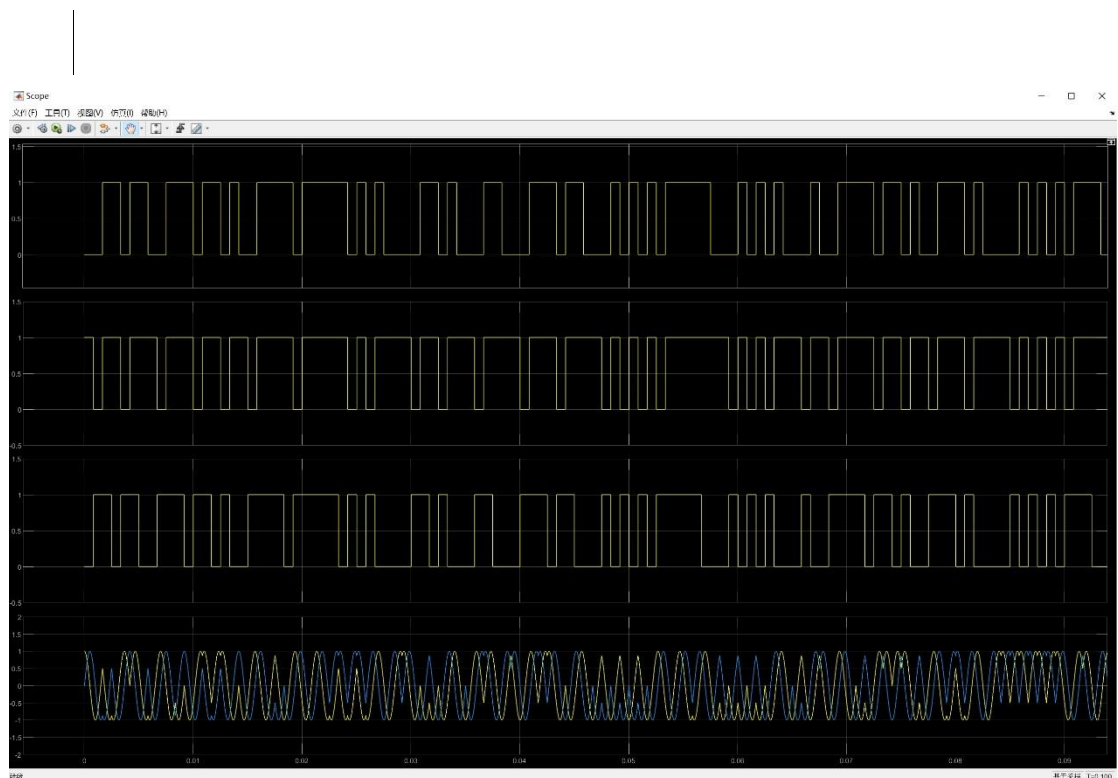
### 2.2.1 仿真结构



上图为 2FSK 仿真系统的结构

Bernoulli Binary Generator,采样时间设置为 1/1200。M-FSK 模块,将参数设置为 2, 频率 1000Hz, Sample per symbol 为 1200.AWGN Channel 高斯白噪声模块,设置 Es/No 为 10dB, Symbol period 为 1/1200, Error Rate Calculator 误码计算模块,设置 Output data 输出至 port。

## 2.2.2 仿真结果

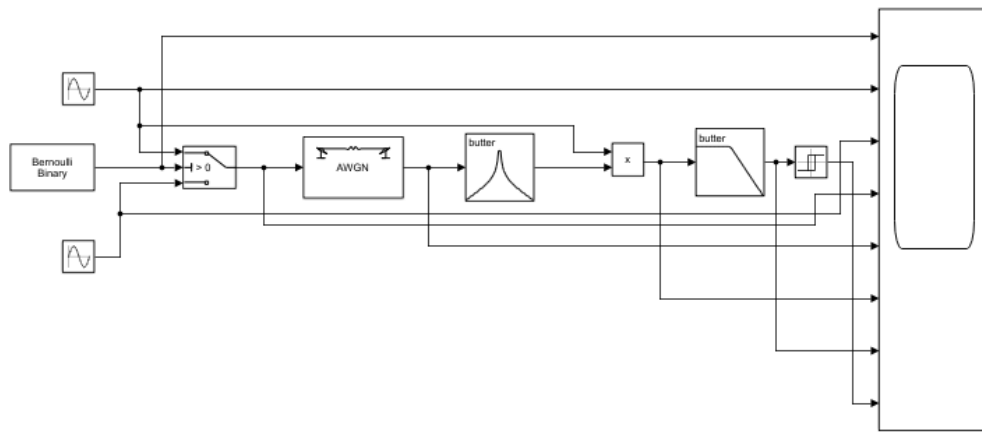


误码率 0.5455,误码数 66, 总码数 12。仿真效果如图。

第一个波形: 接收信号与延迟后的源信号比较结果;第二个波形: 延迟后的源信号波形;第三个波形: 接收到的信号经过解调后的波形;第四个波形: 源信号经过 2FSK 调制后的波形

## 2.3 2PSK

### 2.3.1 仿真结构



上图为 2PSK 仿真系统的结构

参数设置如下：

Block Parameters: Bernoulli Binary Generator

Bernoulli Binary Generator

Generate random Bernoulli distributed binary numbers.

[源代码](#)

Parameters

Probability of z... 0.5

Source of initia... Auto


Sample time: 1/10000

Samples per frame: 1

Output data type: double

Simulate using: Interpreted execution

OK Cancel Help Apply

 Block Parameters: 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.

Parameters

Initial seed: 1234

Mode: Signal to noise ratio (SNR)

SNR (dB): 10


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

OK

Cancel

Help

Apply

 Block Parameters: Analog Filter Design

Analog Filter Design (mask) (link)

Design one of several standard analog filters, implemented in state-space form.

Parameters


Design method: Butterworth

Filter type: Bandpass

Filter order: 8

Lower passband edge frequency (rad/s):  $2\pi \cdot 10000 \cdot 985$

Upper passband edge frequency (rad/s):  $2\pi \cdot 10000 \cdot 1015$

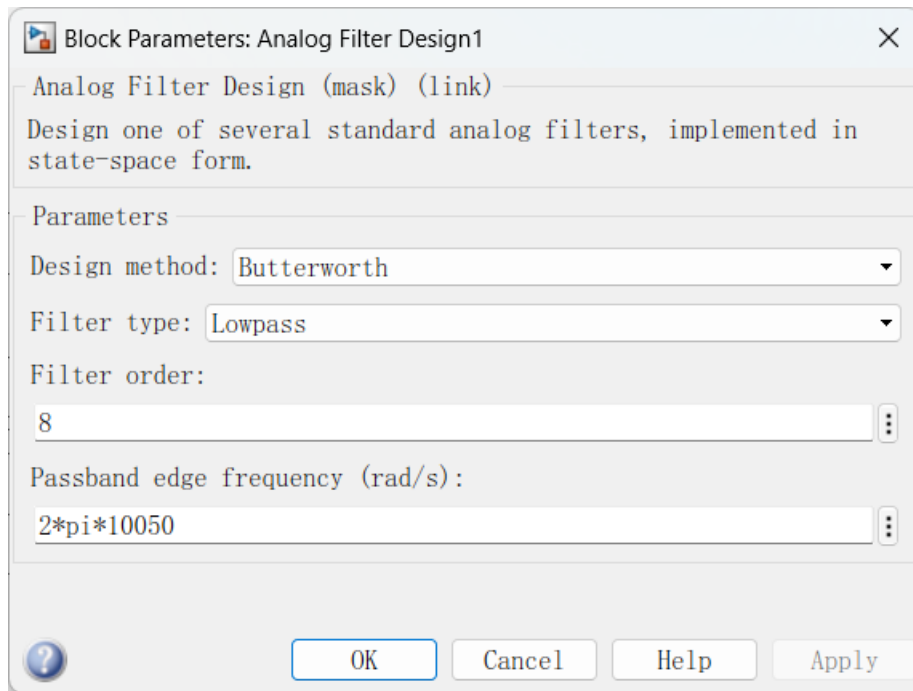


OK

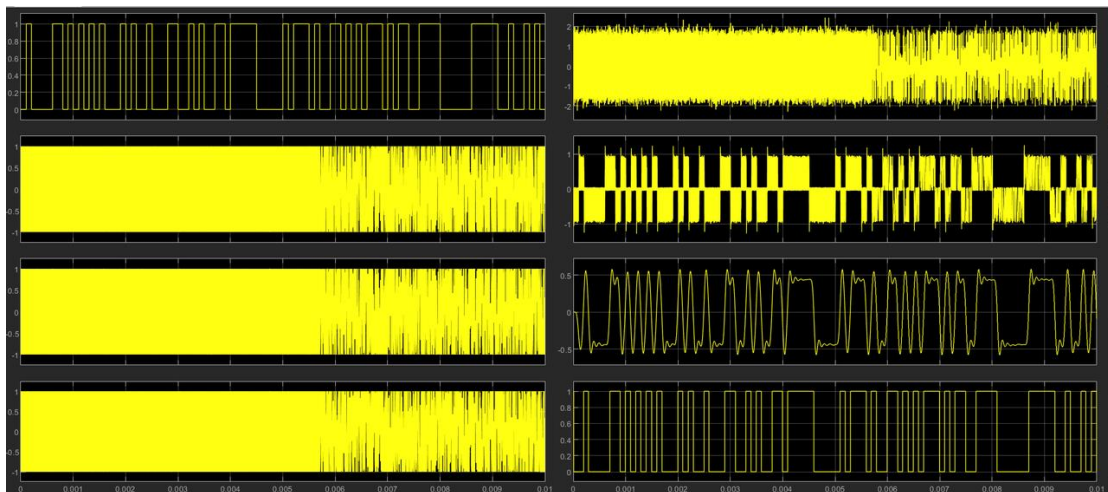
Cancel

Help

Apply

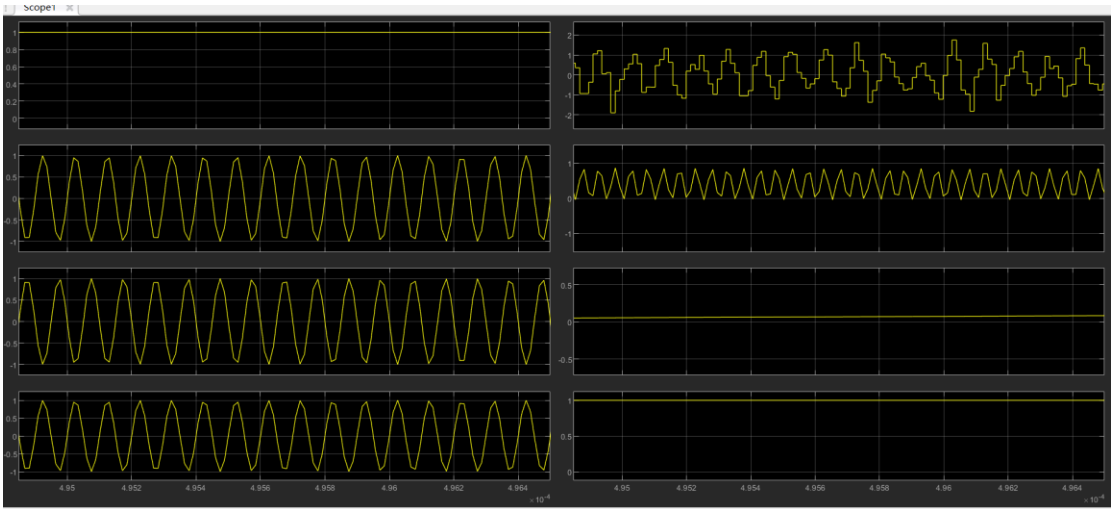


## 2.3.2 仿真结果



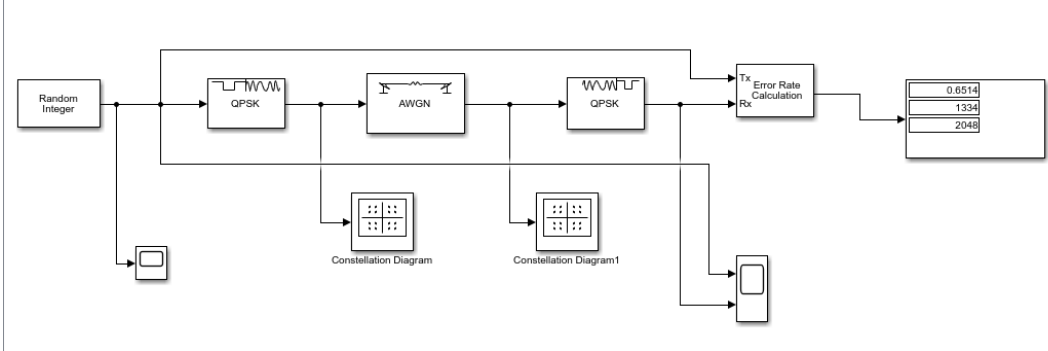
如上图所示：八个波形从上到下、从左到右依次为方波波形、载波波形、反相载波波形、2PSK 信号波形、加上高斯白噪声后的 2PSK 波形、通过带通滤波器滤去部分高斯白噪声然后进行相乘处理的波形、通过低通滤波器滤过载波的波形、通过取样判决器还原的方波。

放大版：




## 2.4 QPSK

### 2.4.1 仿真结构



上图为 QPSK 仿真系统的结构

参数设置如下

Block Parameters: Random Integer Generator

×

Random Integer Generator

Generate random uniformly distributed integers in the range  $[0, M-1]$ , where  $M$  is the set size.

[源代码](#)

Parameters

Set size:

4

⋮

Source of initial seed:

Parameter

▼

Initial seed:

10

⋮

Sample time:

0.005

⋮

Samples per frame:

64

⋮

Output data type:


double

▼

Simulate using:

Interpreted execution

▼




OK

Cancel

Help

Apply

Block Parameters: QPSK Modulator Baseband

×

QPSK Modulator Baseband (mask) (link)

Modulate the input signal using the quaternary phase shift keying method.

Main

Data Types

Parameters

Input type:

Integer

▼

Constellation ordering:

Binary

▼

Phase offset (rad):

$\pi/4$

⋮

View Constellation

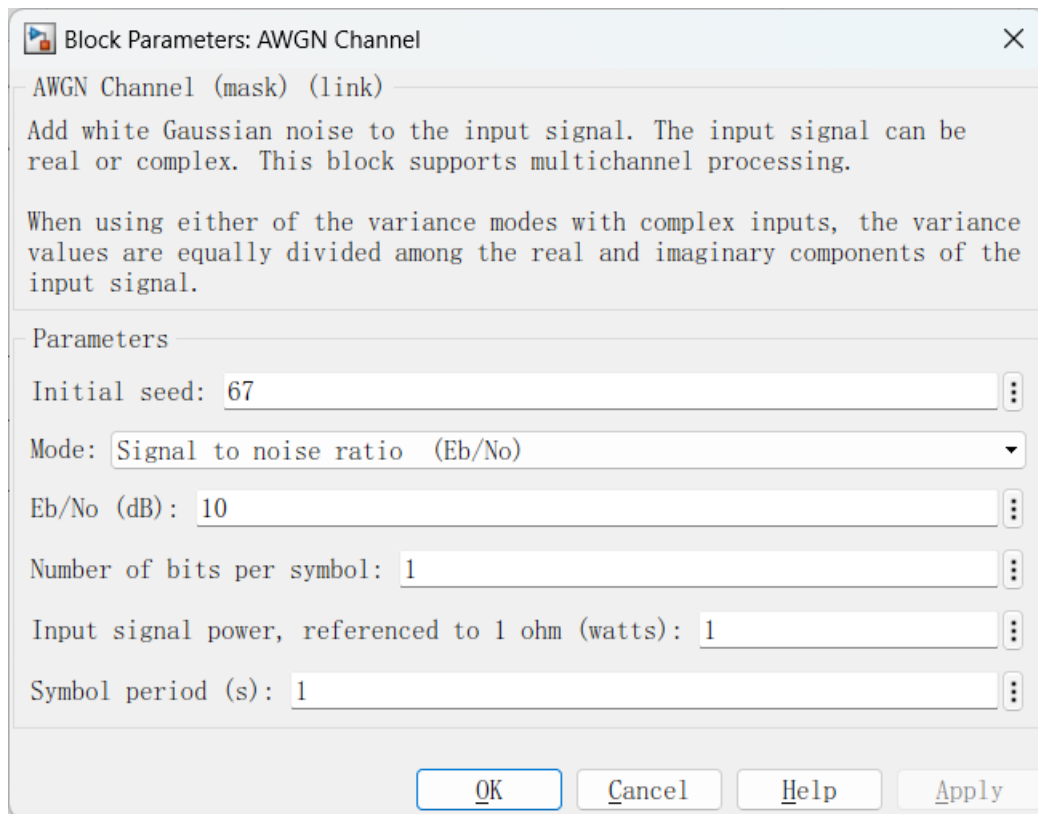
OK

Cancel

Help

Apply



The dialog box is titled "Block Parameters: AWGN Channel". It contains a description of the block's function and a list of parameters to be configured.

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.

Parameters

Initial seed: 67

Mode: Signal to noise ratio (Eb/No)

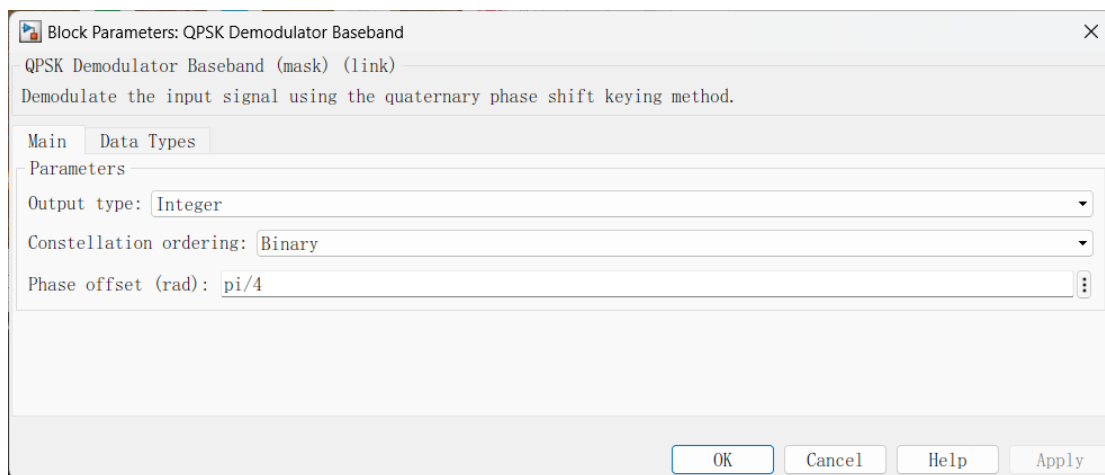
Eb/No (dB): 10

Number of bits per symbol: 1

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

Symbol period (s): 1

OK Cancel Help Apply

The dialog box is titled "Block Parameters: QPSK Demodulator Baseband". It contains a description of the block's function and a list of parameters to be configured.

Block Parameters: QPSK Demodulator Baseband

QPSK Demodulator Baseband (mask) (link)

Demodulate the input signal using the quaternary phase shift keying method.

Main Data Types

Parameters

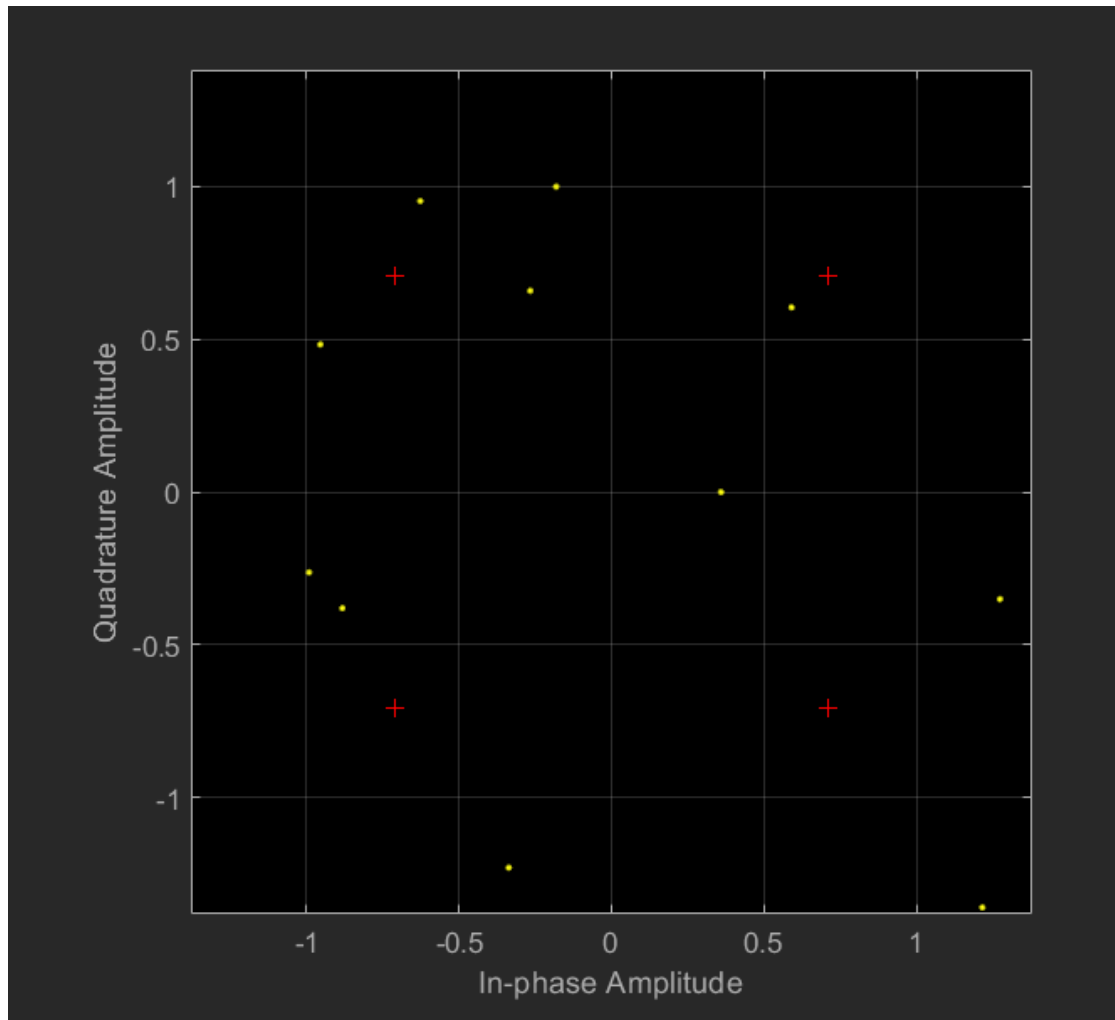
Output type: Integer

Constellation ordering: Binary

Phase offset (rad):  $\pi/4$

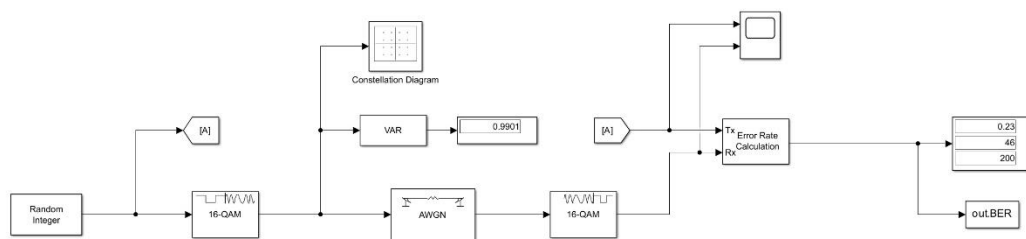
OK Cancel Help Apply

## 2.4.2 仿真结果

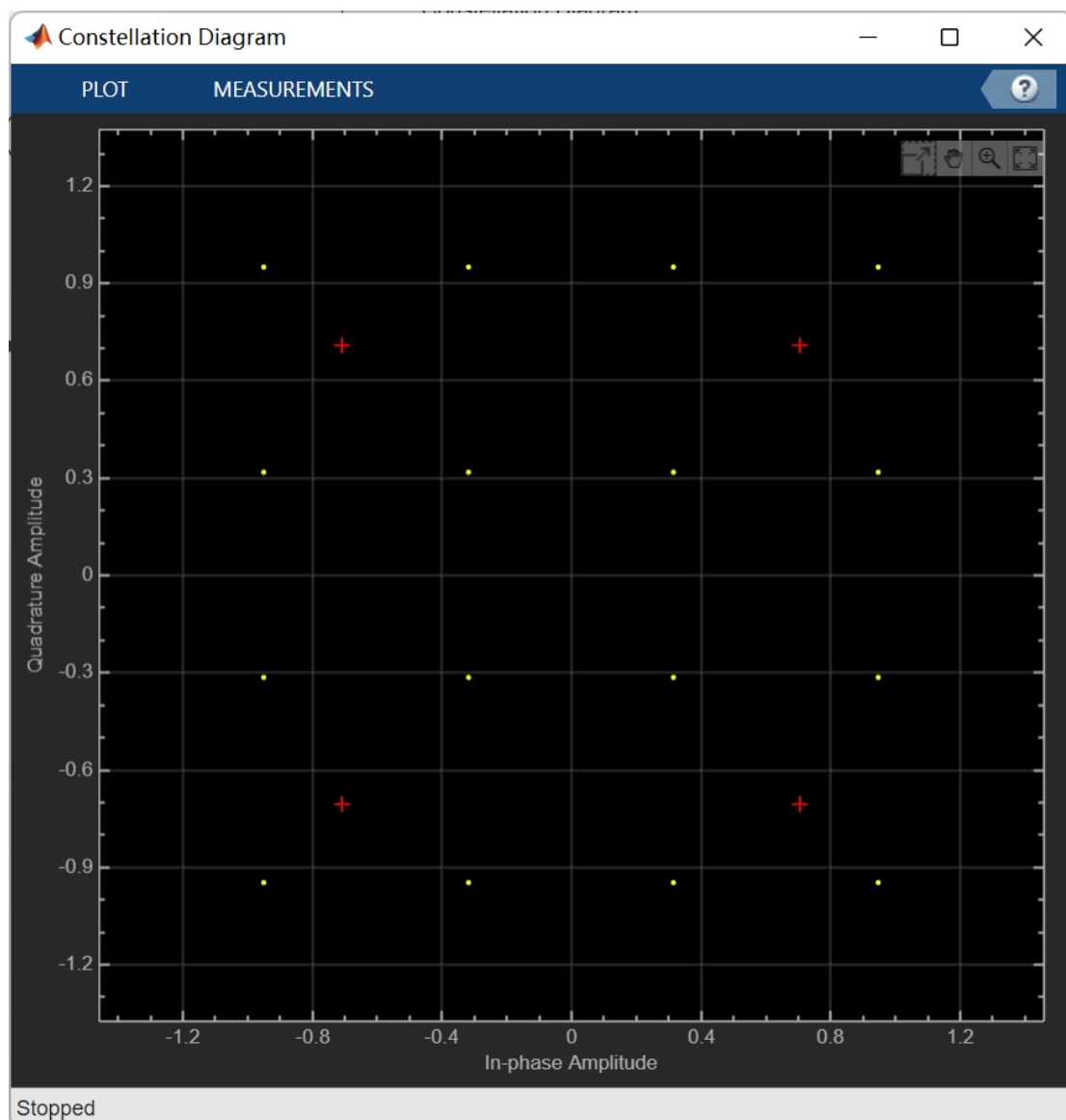


## 2.5 16-QAM

### 2.5.1 仿真结构



## 2.5.2 仿真结果



### 三、信道环境对信号的影响

---

我们容易知道，信噪比 SNR 越高，误码率 BER 应当越低。现以 2PSK 仿真为例，改变 AWGN 的 SNR，记录每次对应的 BER 并绘图。（绘图源代码见附录）

可以看到，结果与预测基本一致：信噪比越高，误码率越低。当 SNR=15 时，误码率已经低于万分之一。

### 四、QPSK 与 QAM 的区别与优势

---

#### 4.1 QPSK 与 QAM 的区别

- QPSK 是 4 电平编码，一个码元包含 2 个比特；16-QAM 是 16 电平编码，一个码元包含 4 个比特。
- QPSK 只是用正交载波对奇偶位分别进行调制，调制仅限于相位；16-QAM 在正交载波基础上还使用 4ASK 进一步调制，调制包括相位和幅度。
- 为了达到相同的误码率，16-QAM 相比于 QPSK，需要更高的信噪比——从星座图角度理解，这是因为 16-QAM 的基准点间的距离比 QPSK 更近，更容易出现误判。

#### 4.2 QPSK 与 QAM 的优势

它们都使用多电平编码，将高速的信号转换为低速信号（QPSK 将速度降至  $21$ ，16-QAM 将速度降至  $41$ ）。所以，在信道容量不变的情况下，发送端可以以更高的速率发送信号。单位时间传输的信息量越大，频谱利用率也越高。

## 五、结论与心得

---

### 5.1 实验结论

1. 本小组根据原理完成了 2ASK、2FSK、2PSK、QPSK、16-QAM 的调制与解调，观测结果基本与按原理预测的一致；
2. 信道的信噪比越高，传输的误码率越低，星座图的离散点越集中；并且随信噪比提高，误码率降低的速度越来越快；
3. 多电平编码可以降低信号传输速率，从而提高频谱利用率；但对信噪比的要求也越高，越容易出现误码。

### 5.2 心得体会

通过本项目，我们小组对物理层传输信号的方式有了深入的了解。

我们掌握了数字信号基本的调制解调方法，了解了通信系统的基础部件构成，感受到了信道环境对传输质量的重大影响，对 QPSK、QAM 的优缺点也有了深刻的体会。

同时，我们小组对“接收端收到发送端的第一个信号前”的电平信号处理仍有缺陷，这包括 2FSK 中的高电平毛刺，和 16-QAM 中的连续高电平。这些异常

信号虽然不影响实际解调的结果，但也的确使结果变得不那么美观、信服。解决方案可以是在结果上再“ $\times$ ”上一个先 0 后 1（接收到第一个信号后由 0 变为 1）的变量，但这在实际运用中显然会造成不必要的电力浪费。