

通信原理仿真实验二时间安排及验收内容

星期 月 周		一	二	三	四	五	六	日	说 明
3月	四周	22	23号 8:00-9:30 通信一班仿真实验二 讲解与问题讨论, 319实验室 9:40-11:10通信二班仿真实验二 讲解与问题讨论, 319实验室 备注: 自带笔记本、纸笔	24	25	26	27	28	验收内容: 现场带笔记本 运行程序, 展 示结果, 并讲 解编程思路。 验收通过后写 实验报告。
	五周	29	30 号 8:00-11:00 通信一班仿真实验二 上机, 319实验室 8:00-11:00 通信二班仿真实验二 上机, 315实验室 备注: 自带笔记本	31					
4月					1	2	3	4	
	六周	5	6号 8:00-11:00 通信一班仿真实验二 上机, 319实验室 8:00-11:00 通信二班仿真实验二 上机, 315实验室 备注: 自带笔记本	7	8	9	10 号 上午 8:00-11:00 仿真实验二 验收(一班), 319实验室 下午 2:00-5:00仿真实验二 验收(二班), 319实验室	11	

# 通信原理软件仿真实验二

## MPSK通信系统的设计与性能研究

山东大学信息科学与工程学院  
朱雪梅

# 一 实验目的

1. 提高独立学习的能力
2. 培养发现问题，解决问题，分析问题的能力
3. 学习Matlab的使用
4. 掌握MPSK通信系统的Monte Carlo仿真方法
5. 掌握MPSK通信系统的组成原理
6. 学习实验报告的写作、排版方法，掌握报告写作的重点，体现个人工作量和创新性。

## 二 实验原理

### 1. 调制解调原理

一组M载波相位调制信号波形的一般表示式为：

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

式中

$g_T(t)$  是发送滤波器的脉冲形状，决定了传输信号的频谱特性。

A是信号的幅度，PSK信号对所有的m都具有相同的能量，即

$$\mathcal{E}_m = \int_{-\infty}^{\infty} u_m^2(t) dt = \mathcal{E}_s \quad (2)$$

其中的  $\mathcal{E}_s$  代表每个传输符号的能量。

当  $g_T(t)$  是一个矩形脉冲时，定义为

$$g_T(t) = \sqrt{\frac{2}{T}}, 0 \leq t \leq T \quad (3)$$

这时在符号区间  $0 \leq t \leq T$  内传输的信号波形可以表示为（用  $A = \sqrt{\varepsilon_s}$ ）

$$u_m(t) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{T}} \cos(2\pi f_c t + \frac{2\pi m}{M}), m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

把式中的余弦函数的相角看成两个相角的和，可以将上式表示为

$$\begin{aligned} u_m(t) &= \sqrt{\varepsilon_s} g_T(t) \cos\left(\frac{2\pi m}{M}\right) \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\varepsilon_s} g_T(t) \sin\left(\frac{2\pi m}{M}\right) \sin(2\pi f_c t) \\ &= s_{mc} \Psi_1(t) + s_{ms} \Psi_2(t) \end{aligned} \quad (5)$$

这里

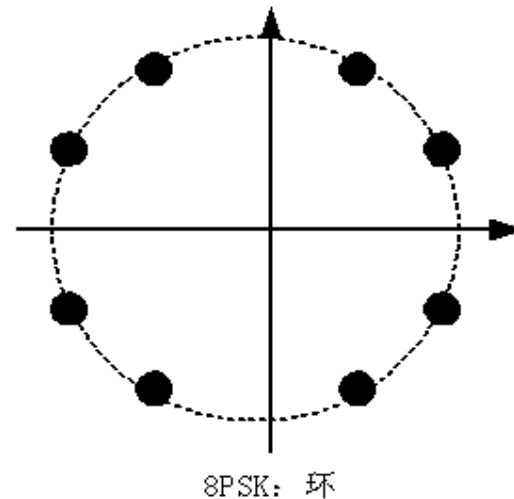
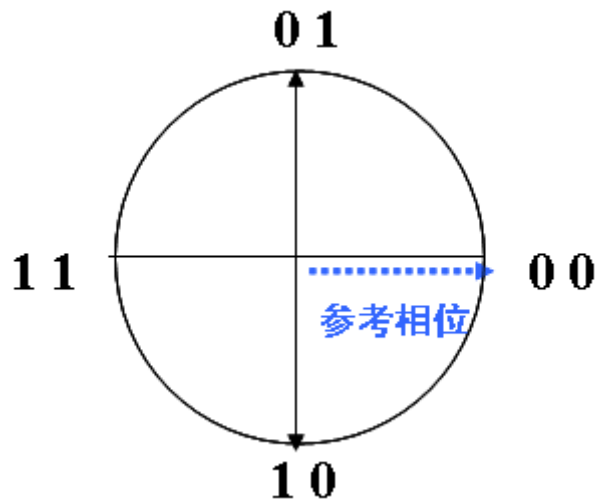
$$s_{mc} = \sqrt{\varepsilon_s} \cos \frac{2\pi m}{M}, s_{ms} = \sqrt{\varepsilon_s} \sin \frac{2\pi m}{M} \quad (6)$$

$\Psi_1(t)$ 、 $\Psi_2(t)$  是两个正交基函数，定义为

$$\Psi_1(t) = g_T(t) \cos(2\pi f_c t), \Psi_2(t) = -g_T(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (7)$$

适当地将  $g_T(t)$  归一化，就可以将这两个基函数的能量归一化到1。这样一个相位调制信号可以看作两个正交载波，因此，数字相位调制信号在几何上可用  $s_{mc}$  和  $s_{ms}$  的二维向量来表示，即

$$s_m = \left( \sqrt{\varepsilon_s} \cos \frac{2\pi m}{M}, \sqrt{\varepsilon_s} \sin \frac{2\pi m}{M} \right) \quad (8)$$



在AWGN信道中，在一个区间内接受到的带通信号可以表示为

$$r(t) = u_m(t) + n(t) = u_m(t) + n_c(t)\cos(2\pi f_c t) - n_s(t)\sin(2\pi f_c t) \quad (9)$$

其中  $n_c(t)$  和  $n_s(t)$  是加性噪声的同相分量和正交分量，将这个接收信号与给出的  $\Psi_1(t)$  和  $\Psi_2(t)$  作相关，两个相关器的输出可以表示为：

$$r = s_m + n = \left( \sqrt{\varepsilon_s} \cos \frac{2\pi m}{M} + n_c, \sqrt{\varepsilon_s} \sin \frac{2\pi m}{M} + n_s \right) \quad (10)$$

$$n_c = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} g_T(t) n_c(t) dt, \quad n_s = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} g_T(t) n_s(t) dt \quad (11)$$

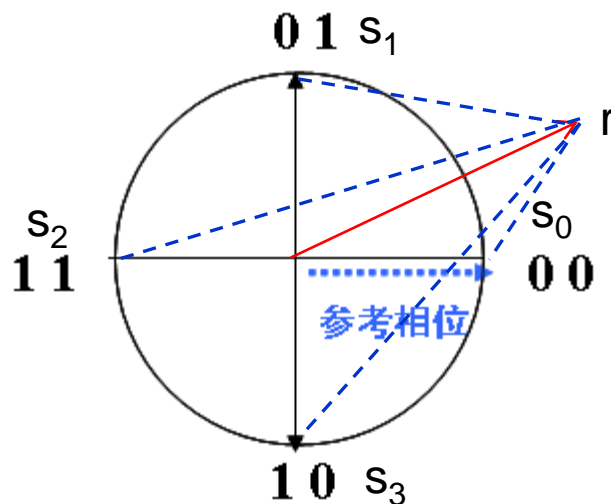
$n_c(t)$  和  $n_s(t)$  这两个正交的噪声分量是零均值，互不相关的高斯随机过程，这样

$$E(n_c) = E(n_s) = 0 \quad E(n_c n_s) = 0, \quad \text{方差为 } E(n_c^2) = E(n_s^2) = \frac{N_0}{2}$$

**最佳检测器**将接收到的信号向量 $\mathbf{r}$ 投射到 $M$ 个可能的传输信号向量 $\{s_m\}$ 之一上去，并选取对应与最大投影的向量，从而得到相关度量准则为

$$C(\mathbf{r}, \vec{s}_m) = \mathbf{r} \bullet \vec{s}_m \quad (12)$$

**最小欧式距离准则判决**：求出接收到的信号向量与 $M$ 个传输向量的欧式距离，选取对应的最小欧式距离的向量，该向量对应的符号即为判决输出符号。





(1) 由于二相相位调制与二进制**PAM**是相同的, 所以**BPSK**差错概率为

$$P_{2psk} = Q\left[\sqrt{\frac{2\varepsilon_b}{N_0}}\right] \quad (13)$$

式中  $\varepsilon_b$  是每比特能量。QPSK误比特率与BPSK的一样。

(2)  $M = 4$  时系统码元错误概率为:

$$\begin{aligned} P_4 &= 1 - P_c \\ &= 2Q\left(\sqrt{\frac{2\varepsilon_b}{N_0}}\right) \left[1 - \frac{1}{2} Q\left(\sqrt{\frac{2\varepsilon_b}{N_0}}\right)\right] \end{aligned} \quad (14)$$

(3) **MPSK**的误符号率(相干、最佳接收机) ( $M$ ) 4)

$$\begin{aligned} P_{s,MPSK} &= 2Q\left(\sqrt{2\frac{E_s}{N_0} \sin \frac{\pi}{M}}\right) \\ &= 2Q\left(\sqrt{2\frac{kE_b}{N_0} \sin \frac{\pi}{M}}\right) = 2Q\left(\sqrt{2\frac{(\log_2 M)E_b}{N_0} \sin \frac{\pi}{M}}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

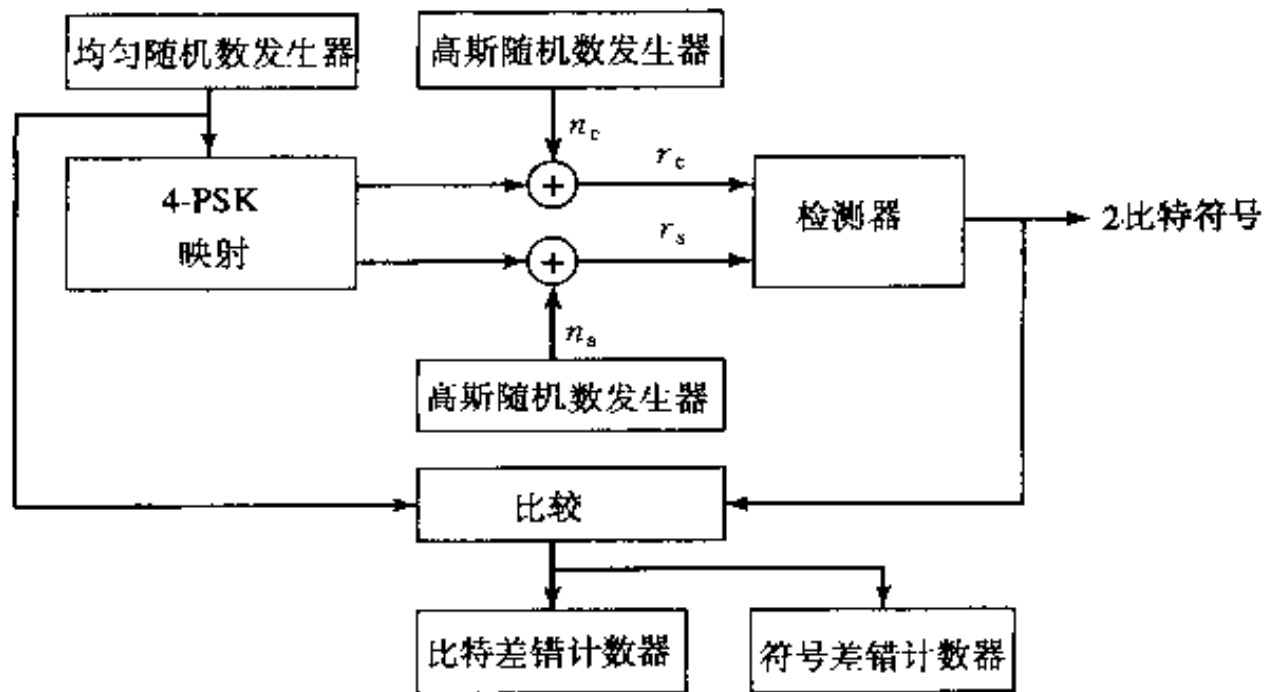
- 误差函数:  $erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz = 2\Phi(\sqrt{2}x) - 1$

$$erfc(x) = 1 - erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-z^2} dz$$

- Q函数:  $Q(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{a}{\sqrt{2}}\right)$

### 三、系统框图

根据QPSK的框图，  
8PSK的调制框图请同  
学自己画出并实现。



第一步：先产生二进制信号序列，由均匀分布随机变量发生器产生。

第二步：通过QPSK映射为4个信号点，采用格雷码映射。

第三步：加入高斯白噪声。产生一对相互独立的高斯白噪声随机变量 $n_c$ 、 $n_s$ ，并且叠加在相互正交的两个信号支路上，产生相关接收机的两路输出 $r_c$ 、 $r_s$ 。

第四步：检测器判决。将接收机的两路输出 $r_c$ 、 $r_s$ 按最大投影准则判决成相应的信号点。

第五步：将检测器的输出与发送端的二进制信号序列进行比较，累加错码个数。

第六步：统计误比特率、误符号率

## 四、实验内容

### (一) 未加信道纠错编码的QPSK调制通信系统

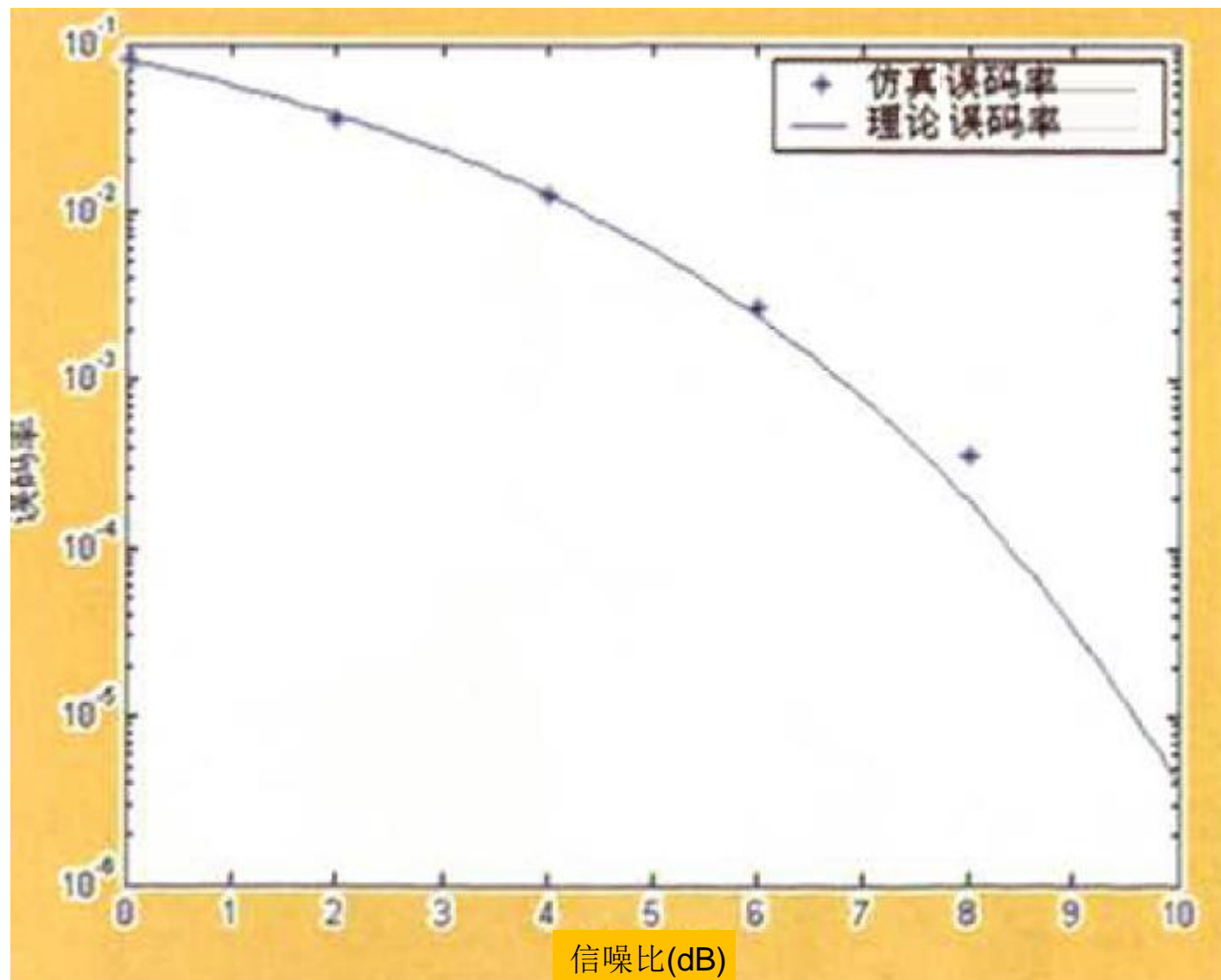
#### 1) 最大投影点准则进行判决

- a, 画出噪声方差  $\sigma^2$  分别为0、0.1、0.5、1.0时，  
在检测器输入端1000个接收到的信号加噪声的样本（星座图）；
- b, 在AWGN信道下，分别画出数据点为1000、10000、100000时的Monte Carlo仿真误比特率曲线和理论误比特率曲线，比较差别，  
分析数据点的数量对仿真结果的影响（横坐标是 $\text{snr}=\text{Eb}/\text{No}$  dB，格雷码映射）

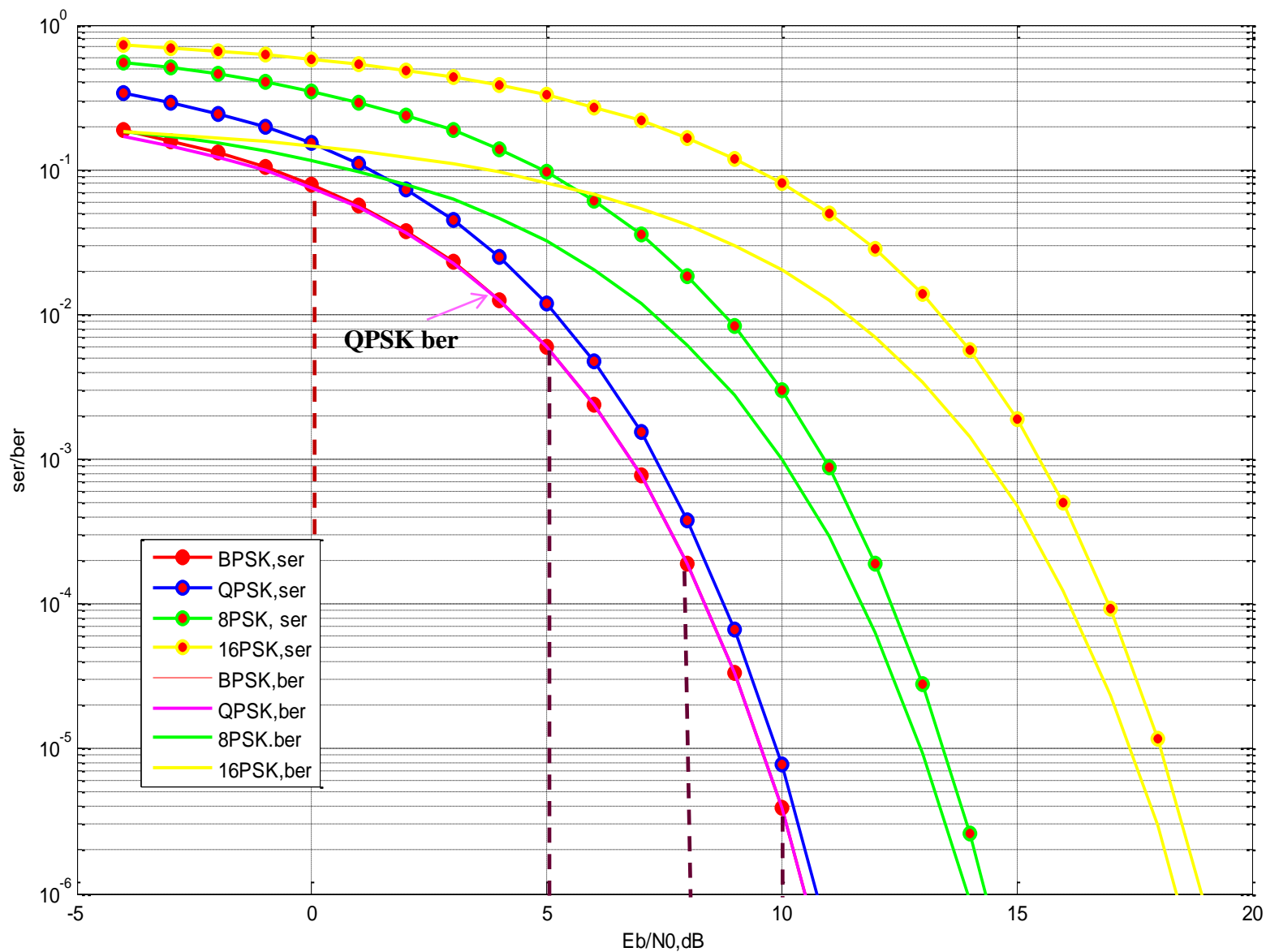
#### 2) 将检测器的判决准则改为最小距离法（星座图上符号间的距离）

- A, 画出数据点为100000时的Monte Carlo仿真误比特率曲线和理论误比特率曲线  
（横坐标是 $\text{snr}=\text{Eb}/\text{No}$  dB，格雷码映射，在AWGN信道下）；
- B. 比较与最大投影点准则进行判决结果的区别。
- C. 并理论分析证明两种判决方法是等价的。
- D. 理论证明QPSK误比特率与BPSK的一样。

**（二）在AWGN信道下，未加信道纠错编码的8PSK调制通信系统检测器的判决准则选为最小距离法（星座图上符号间的距离），格雷码映射，比较数据点为100000时8PSK与QPSK的Monte Carlo仿真误符号率曲线、理论误符号率曲线，比较差别（横坐标是 $\text{snr}=\text{Eb}/\text{No}$ ）。（一张图上呈现4条曲线）**



纵坐标通过semilogy实现



**QPSK误比特率与BPSK的一样。** 验证0dB,5dB,8dB,10dB处QPSK的误比特率。

## 四、实验进行过程

**第一步：深刻理解原理，完成系统子函数的设计，给出子函数功能和输入输出，实现思路。**

**第二步：编写代码，实现各个子函数，并构造整个频带系统。**

**第三步：系统调试，学会调试过程，学会检查代码错误的方式和方法。**

- ✓ 根据分析报错，修正语法错误。
- ✓ 设置断点，进行调试，利用工作区或屏幕显示数据，与理想情况对比，修正代码错误。
- ✓ 需要一个过程，有耐心。
- ✓ 记录调试过程中的错误和问题，记录解决方案。

**第四步：整理实验报告，体现个人工作量。**



# 五、实验报告要求

## （一）报告排版要求

- ✓ 一级标题：三号字体，黑体。
- ✓ 二级标题：四号字体，黑体。
- ✓ 正文：小四号，1.5倍行距，宋体，每段首行缩进2字符，西文和数字用Times New Roman。
- ✓ 图、表居中，需要编号，加说明，说明为五号字体。

插图的图题说明位于图的下方居中，五号宋体，图要统一标上编号（例如第一个图，写为图1，第二个图，写为图2，依次类推）。图中若有分图时，分图号用a）、b）等置于分图之下。插图与其图题为一个整体，不得拆开排写于两页。插图处的该页空白不够排写该图整体时，则可将其后文字部分提前排写，将图移到次页最前面。如图1所示：

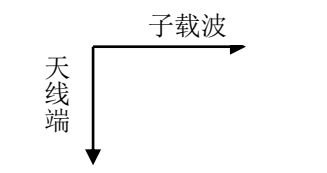


图1 双天线端口时的SFBC

表格的表序与表名置于表上，按顺序编号，五号宋体，若有分页，需在另一页第一行添加续表。如表1所示：

表1 MCS与调制阶数的对应关系

QPSK		

画图时注意标注坐标轴的含义和单位。Matlab运行结果图形不能用截屏方式，采用复制图形方式，在文件中粘贴。仿真图形清晰，每个图形要编号并加以说明。具体说明此图形对应的具体参数配置是什么。

**公式居中写，公式末不加标点，序号按顺序编排并位于页面最右侧。**公式中用斜线表示“除”的关系时应采用括号，以免含糊不清，如 $1/(b\cos x)$ 。通常“乘”的关系在前，如 $a\cos x/b$ 而不写成 $(a/b)\cos x$ 。具体格式如下：

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1)$$

- ✓ 需有页眉、页码（见附录4）。
- ✓ 公式用编辑器生成，原理图、系统框图、流程图自己画，禁止贴图片。
- ✓ 自动生成目录。
- ✓ 代码精简，图形可灵活排列，一行多图。

## (二) 具体实验报告要求

- 1、根据各系统组成框图用Matlab编写程序。程序要详细注释，包括变量参数的含义。
- 2、验收完后上交一份电子版，邮箱：**2131019403@qq.com**
- 3、写出完整的实验报告（注意实验报告概念清晰、结构合理、层次分明、文理通顺、格式规范）

### 1) 用自己的语言描述实验原理

### 2) 写编程思路

A: 主函数编程思路及主程序实现的代码、流程图。

B: 子函数编程思路及子程序实现的代码。

例如：信源信号产生的子函数source()

输入：比特个数num\_bit，进制M

输出：log2(M)列，num行的0，1序列

方法：利用rand(n,m)函数，产生0-1的n列共m个随机数，  
并且以0.5为界限进行判决将其划分为0，1序列；

- 3) 列出根据实验内容做的仿真结果（包括数据、图、表），  
详尽的进行分析和得出有意义的结论，以及完成实验内容中要求的理论证明。
- 4) 详细总结编程过程中遇到的问题和解决方案（至少给出三处遇到的具体问题和解决方法的示例）。

## 六、成绩综合评定

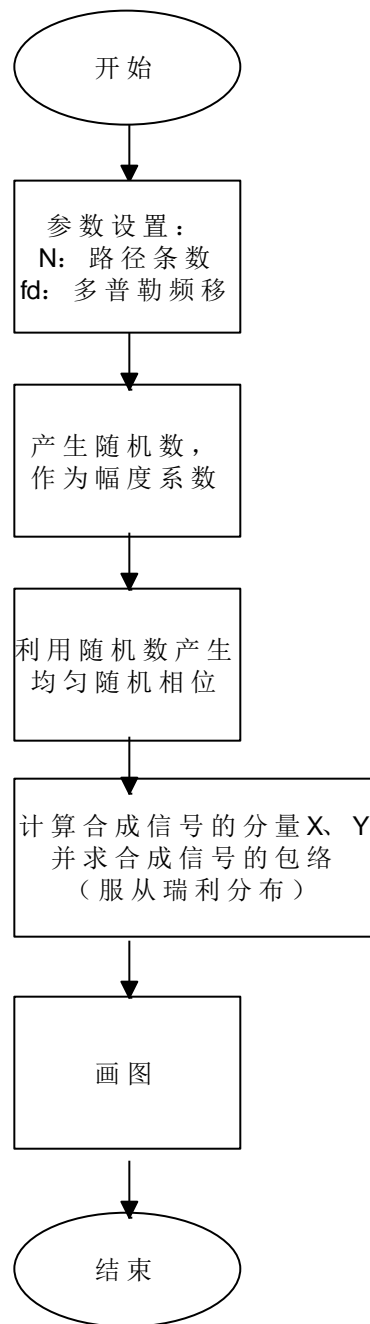
- ✓ 禁止抄袭、照搬他人（包含网络上的）的代码，实验报告雷同者一律扣分（包含网络上的）。
- ✓ 参考完成的先后顺序和验收情况。
- ✓ 实现的系统功能、信号波形和编程实现。
- ✓ 总结报告的写作（语言表达、格式规范、体现技术含量，体现与众不同。）
- ✓ 平时表现和学习态度。

## 附录1：蒙特卡洛（Monte Carlo）仿真

蒙特卡罗（Monte Carlo，以下简称MC）仿真方法也称为随机仿真方法，它是一种与一般数值计算方法有本质区别的计算方法，主要用来模拟一些不易进行数值分析的随机现象，属于试验数学的一个分支。

MC仿真方法的基本思想是：为了求解数学、物理、工程技术及生产管理等方面的问题，首先建立一个概率模型或随机过程，使它的参数等于问题的解；然后通过对模型或过程的观察或抽样试验来计算所求随机参数的统计特征；最后给出所求解的近似值，解的精度可用估计值的标准误差来表示。

## 附录2：流程图示例



## 附录3：

- 三种方法可实现产生两路正交的零均值高斯白噪声序列

法一：

```
function [ noise ] = gaussian_sigma( length,sigma )%产生高斯随机噪声子函数 ,sigma为标准方差
noise=zeros(1,length);% length为噪声序列的长度
for k=1:length/2
    u=rand;
    z=sigma*sqrt(2*log(1/(1-u)));
    u=rand;
    nc(k)=z*cos(2*pi*u);
    ns(k)=z*sin(2*pi*u);
    noise(2*k-1)=nc(k);% noise为输出噪声
    noise(2*k)=ns(k);
end
end
```

$z = \sigma \sqrt{2 \log(1/(1-u))}$ ; 的产生来源于下面的说明中的 (2.2.14 式) :

图产生一个具有正态分布函数的随机数。

在实际系统中所遇到的噪声往往是由正态(或高斯)噪声。

图 2.5 所示。这个概率密度函数由下式给出:

$$f(C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-C^2/(2\sigma^2)}, \quad -\infty < C < \infty \quad (2.2.8)$$

其中  $\sigma^2$  是  $C$  的方差, 它是概率密度函数  $f(C)$  的分散程度的一种度量。概率分布函数  $F(C)$  是在区间  $(-\infty, C)$  内  $f(C)$  下所包围的面积, 即

$$F(C) = \int_{-\infty}^C f(x) dx \quad (2.2.9)$$

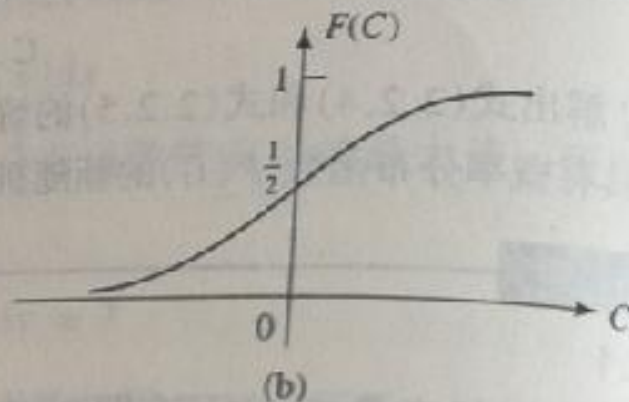
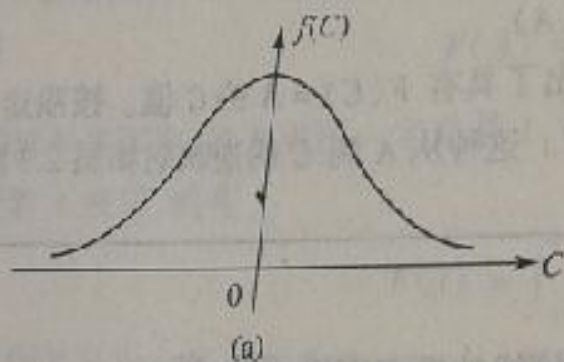


图 2.5 高斯概率密度函数和对应的概率分布函数

遗憾的是, 式(2.2.9)的积分无法用简单的函数来表示, 使得完成逆映射很困难。



到了克服这个难题的一种办法。由概率论知道,具有概率分布函数为:

$$F(R) = \begin{cases} 0, & R < 0 \\ 1 - e^{-R^2/(2\sigma^2)}, & R \geq 0 \end{cases} \quad (2.2.10)$$

的瑞利分布随机变量  $R$  与一对高斯随机变量  $C$  和  $D$  是通过如下变换:

$$C = R \cos \Theta \quad (2.2.11)$$

$$D = R \sin \Theta \quad (2.2.12)$$

关联的。这里  $\Theta$  是在  $(0, 2\pi)$  内的均匀分布变量, 参数  $\sigma^2$  是  $C$  和  $D$  的方差。因为式(2.2.10)容易求得逆函数, 所以:

$$F(R) = 1 - e^{-R^2/(2\sigma^2)} = A \quad (2.2.13)$$

并且

$$R = \sqrt{2\sigma^2 \ln\left(\frac{1}{1-A}\right)} \quad (2.2.14)$$

其中  $A$  是在  $(0, 1)$  内均匀分布的随机变量。现在, 如果我们产生了第二个均匀分布的随机变量  $B$ , 而定义:

$$\Theta = 2\pi B \quad (2.2.15)$$

那么, 从式(2.2.11)和式(2.2.12)可求得两个统计独立的高斯分布随机变量  $C$  和  $D$ 。

上面所述的方法在实际中常被作为产生高斯分布的随机变量。正如在图 2.5 中所看到的, 这些随机变量有一个零均值和方差  $\sigma^2$ 。如果想要一个非零均值的高斯随机变量, 那么用加一个均值的方法将变量  $C$  和  $D$  进行转换即可。

法二:

```
function rn = awgn1(un,var)
%rn 信道输出信号
%un 信道输入信号
%var 噪声方差
L = length(un(1,:));
nc = randn(1,L)*sqrt(var);
ns = randn(1,L)*sqrt(var);
rn = un;
rn(1,:) = rn(1,:)+nc;
rn(2,:) = rn(2,:)+ns;
End
```

法三:

```
function noise=Gauss_Noise(M,N,sigma)
%Gauss_Noise 为高斯随机数发生器,产生M 路噪声
%输入N 为序列长度
%输入sigma 为噪声 标准差
%输出noise 为产生的高斯噪声,是M*N 的矩阵
```

```
noise=normrnd(0,sigma,[M,N]);%分别生成均值为0 , 标准差为sigma 的M 个高斯随机数
end
```

- 给定信噪比，噪声标准方差计算子函数。

设信道高斯噪声的方差为  $\sigma^2$ ，则噪声的单边功率谱密度  $N_0 = 2\sigma^2$

。如计算出的发送信号的平均比特能量为  $E_b$ （由发送滤波器的输出计算或根据QPSK星座图设 $E_s=1$ ，则  $E_b=1/2$ ），则信噪比为

$SNR = 10 \cdot \log_{10}(E_b / N_0)$  dB。故给定信噪比，则

$$N_0 = \frac{E_b}{10^{SNR/10}}$$

$$\sigma = \sqrt{N_0 / 2}$$

# 附录4：封面和目录示例



山东大学

信息科学与工程学院

2020—2021 学年第二学期

## 实验报告

课程名称：通信原理

实验名称：

专 业 班 级

学 生 学 号

学 生 姓 名

实 验 时 间

指 导 教 师

## 目 录

1 原理概述	1
1.1 PSK 信号的调制与解调	1
1.2 判决准则	2
1.2 误码率与误比特率性能	2
2 未加信道纠错编码的 QPSK 通信系统设计与实现	3
2.1 二进制比特序列生成子函数	3
2.2 四进制符号序列生成子函数	4
2.3 星座图坐标映射子函数	5
2.4 高斯白噪声生成子函数	5
2.5 AMGN 信道输出信号子函数	6
2.6 最大投影准则判决子函数	6
2.7 最小欧氏距离判决函数	7
2.8 误码率计算子函数	7
2.9 误比特率计算子函数	8
2.10 星座图子函数	8
2.11 不同噪声方差下性能测试主函数	9
2.12 不同数据点下误比特率曲线绘制主函数	10
3 未加信道纠错编码的 QPSK 通信系统的仿真和性能测试	11
3.1 不同噪声方差下的性能研究	11
3.2 不同数据点下的性能研究	13
4 未加信道纠错编码的 QPSK 通信系统设计与实现	14
4.1 二进制比特序列生成子函数	14
4.2 八进制符号序列生成子函数	15
4.2 误符号率曲线性能测试主函数	16
5 未加信道纠错编码的 QPSK 通信系统的仿真和性能测试	17
6 遇到的问题及解决方案	18
7 总结收获	19