

哈尔滨工业大学（深圳）

通信系统仿真

实验报告

题	目	<u>通信系统仿真基本方法</u>
专	业	<u>通信工程</u>
学	号	<u>190210303</u>
姓	名	<u>陈兴基</u>
日	期	<u>2022/4/20</u>

## 通信系统仿真实验任务书

姓 名：陈兴基 院（系）：电子与信息工程学院  
专 业：通信工程 班 号：1902103  
任务起至日期： 2021 年 4 月 20 日至 2021 年 5 月 16 日

**实验题目：**通信系统仿真基本方法

**实验目的：**通过对通信系统仿真基本方法学习和仿真实验，掌握采样重构方法、掌握带通信号和系统的低通等效方法、掌握一些典型的系统仿真的后处理方法。

**实验内容：**

### 实验 2-1：

(1) 使用每秒 10 个采样的频率  $f_s$  对信号

$$x(t) = 5\cos(6\pi t) + 3\sin(8\pi t)$$

进行采样，画出  $X(f)$  和  $X_s(f)$ 。假定重构滤波器是带宽为  $\frac{f_s}{2}$  的理想低通

滤波器，具有通带增益  $T_s = \frac{1}{f_s}$ ，画出重构滤波器的输出。

(2) 使用每秒 7 个采样点的采样频率重复上面的问题。

### 实验 2-2：

采用  $x(t) = A \sum_{k=0}^{\infty} a_k p(t - kT - \Delta)$  模型进行数据传送

(1) 成形脉冲为如图三角形脉冲。

(2) MSK 信号的能量谱密度如下，其中  $T_b$  是比特时间。

$$G_{MSK}(f) = \frac{16T_b \cos^2(2\pi T_b f)}{\pi^2 [1 - (4T_b f)^2]^2}$$

(3) QPSK 信号的能量谱密度如下，其中  $T_b$  是比特时间。

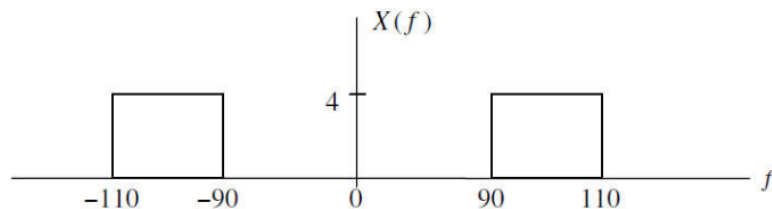
$$G(f) = 2T_b \text{sinc}^2(2T_b f)$$

编写程序画出每符号从 4 到 20 采样点时的混叠信噪比  $(SNR)_a$ 。

和矩形形成脉冲得到的结果都画在同一个坐标系里作比较，并解释其结果。

### 实验 2-3:

信号  $X(t)$  的傅里叶变换如图所示，假设对于所有的  $f$ ,  $X(f)$  都为正实数。



- (1) 对  $f_0 = 100$  的情况，确定并画出  $X_d(f)$  和  $x_d(t)$ 。
- (2) 对  $f_0 = 95$  的情况，确定并画出  $X_d(f)$  和  $x_d(t)$ 。
- (3) 对  $f_0 = 90$  的情况，确定并画出  $X_d(f)$  和  $x_d(t)$ 。
- (4) 比较并讨论以上结果。

### 实验 2-4:

某角度调制信号定义如下

$$X(t) = 6 \cos[240\pi t + 2 \sin 24\pi t]$$

- (1) 解析地确定并画出  $x_d(t)$  和  $x_q(t)$ 。
- (2) 使用 MATLAB 和 FFT 变换，确定并画出  $X(f)$ ，要求画出幅度和相位。
- (3) 使用 MATLAB，确定并画出等效低通信号的频谱。
- (4) 使用 MATLAB，确定并画出  $x_d(t)$  和  $x_q(t)$ 。
- (5) 比较 (1) 和 (4) 的结果。

### 实验 2-5:

试编写 Matlab 程序对  $\pi/4$  DQPSK 接收机进行仿真。通过对接收机和前面发射机进行联合仿真，证明接收机仿真可以正常工作。

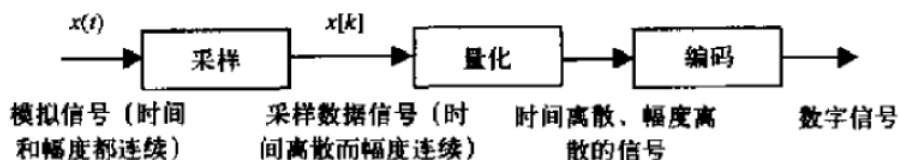
# 实验一

## 1 基本原理

在多数的通信应用中，是通过要研究的系统来产生和处理信号波形的。当然，计算机只能处理所关心的表示信号波形的采样点数值。

计算机存在有效字长的问题。采样值是有限精度的，采样值是要经过量化过程。因此，在所有的数字仿真中，采样和量化都是根本的操作，其中每一个操作都会给仿真结果带来误差，而完全消除这些误差源是不可能的，所以需要在性能中进行折中，使采样和量化对仿真精度的影响最小化。

数字信号是通过对模拟信号进行采样、量化和编码得到的。模拟信号是时间和幅度都连续的信号。采样的结果是产生幅度连续而时间离散的信号，这样的信号常被称为采样数据信号。通过将时间采样值编码到一个有限的数值集合，可由采样数据信号得到数字信号。但是在这每一步的处理中都会引入误差。



对时间连续信号到数字信号转换的第一步就是对其进行等时间间隔的采样，得到

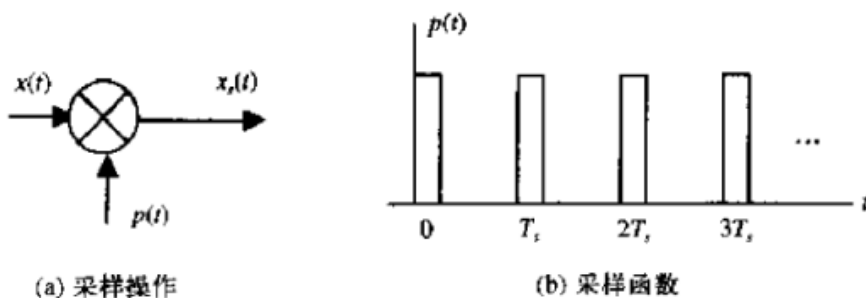
$$x_s(t) = x(kT_s) = x[k]$$

其中， $T_s$  是采样周期，其倒数就是采样频率  $f_s$ 。

采样信号是用信号乘以周期脉冲来产生的。

$$x_s(t) = x(t)p(t)$$

信号  $p(t)$  为采样函数。



采样函数是周期的，可以用傅里叶级数表示：

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp(j2\pi n f_s t)$$

其中，傅里叶系数

$$C_n = \frac{1}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} p(t) \exp(-j2\pi n f_s t) dt$$

所以有

$$x_s(t) = x(t)p(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp(j2\pi n f_s t)$$

通过傅里叶变化得到采样信号的频谱：

$$X_s(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp(j2\pi n f_s t) \exp(-j2\pi f t) dt$$

交换积分和求和的顺序

$$X_s(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp[-j2\pi(f - n f_s)t] dt$$

连续信号的傅里叶变换为：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-j2\pi f t) dt$$

带入  $X_s(f)$  可得：

$$X_s(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n X(f - n f_s)$$

可以发现，对时间连续信号的采样导致了信号频谱在直流( $f=0$ )点和所有采样点的谐波处( $f=n f_s$ )产生重复。用采样脉冲  $p(t)$  的傅里叶级数展开的响应系数对变换后的信号频谱做了加权。

定义采样函数为冲激函数，为

$$p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - k T_s)$$

带入傅里叶系数，可得

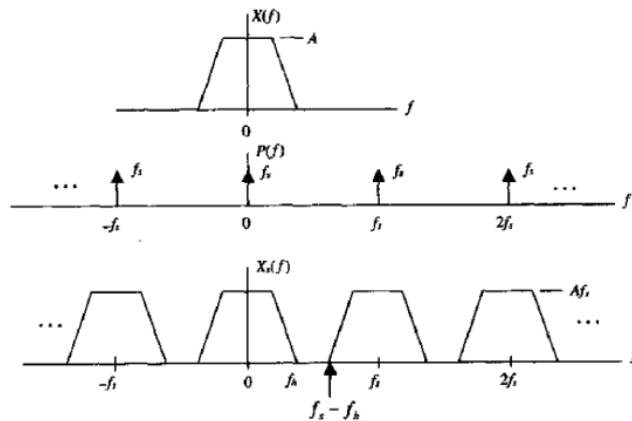
$$C_n = \frac{1}{T_s} \int_{-\frac{T_s}{2}}^{\frac{T_s}{2}} \delta(t) \exp(-j2\pi n f_s t) dt$$

所以，化简有

$$C_n = \frac{1}{T_s} = f_s$$

同理，得

$$X_s(f) = X(f) \otimes P(f)$$

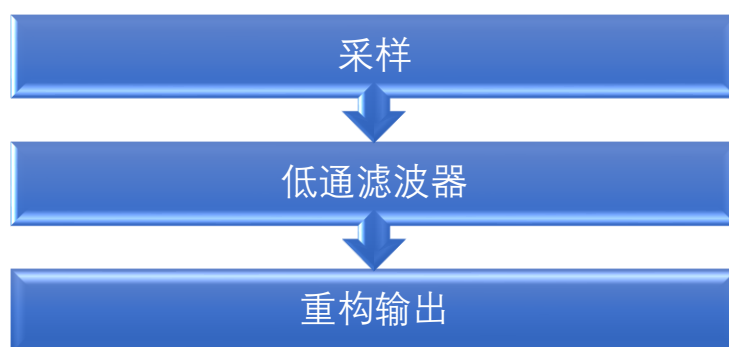


为了在采样  $x(nT_s)$  中包含时间连续信号  $x(t)$  的所有信息，以便在采样过程中不损失信息，进行的采样必需保证可以通过采样点  $x(nT_s)$  无差错的重构信号  $x(t)$ 。

使用低通滤波器在  $n = 0$  附近提取  $x(nT_s)$  的频谱，可以完成从采样信号到原信号的重构。

要完成无差错的重构，要求在  $x(nT_s)$  附近的频谱  $f = \pm f_h$  与在  $f = 0$  处的频谱没有重叠，即满足  $f_s > 2f_h$ 。

## 2 仿真实验设计



### 3 仿真实验实现

#### (1) 每秒 10 个采样点

```
close all
fs=10;
ts=1/fs;
N=200;
df=0.01;
t=0:ts:(N-1)*ts;
x=5*sin(6*pi*t)+3*sin(8*pi*t);

%% original signal
figure
plot(t,x)
xlim([0 10])
title('original signal time-base')
xlabel('time')
ylabel('altitude')

[X,x0,df1]=fftseq(x,ts,df);
X1=X/N;
f=[0:df1:5*df1*length(x0)-1*df1]-5*fs/2;
figure
P=[X1 X1 X1 X1 X1];
plot(f,fftshift(abs(P)))
title('original signal frequency-base')
xlabel('frequency')
ylabel('altitude')

%% singal passes LPF
P1=[X1];
f1=[0:df1:df1*length(x0)-df1]-fs/2;
figure
plot(f1,fftshift(abs(P1)))
title('singal passes LPF')
xlabel('frequency')
ylabel('altitude')

%% restored signal
I=ifft(X1);
figure
```

```
plot(t, x, t, I(1:length(t))*N)
xlim([0 10])
title('restored signal')
xlabel('time')
ylabel('altitude')
```

## (2) 每秒 7 个采样点

```
close all
fs=7;
ts=1/fs;
N=200;
df=0.01;
t=0:ts:(N-1)*ts;
x=5*sin(6*pi*t)+3*sin(8*pi*t);

%% original signal
figure
plot(t, x)
xlim([0 10])
title('original signal time-base')
xlabel('time')
ylabel('altitude')

[X, x0, df1]=fftseq(x, ts, df);
X1=X/N;
f=[0:df1:5*df1*length(x0)-1*df1]-5*fs/2;
figure
P=[X1 X1 X1 X1 X1];
plot(f, fftshift(abs(P)))
title('original signal frequency-base')
xlabel('frequency')
ylabel('altitude')

%% singal passes LPF
P1=[X1];
f1=[0:df1:df1*length(x0)-df1]-fs/2;
figure
plot(f1, fftshift(abs(P1)))
title('singal passes LPF')
```

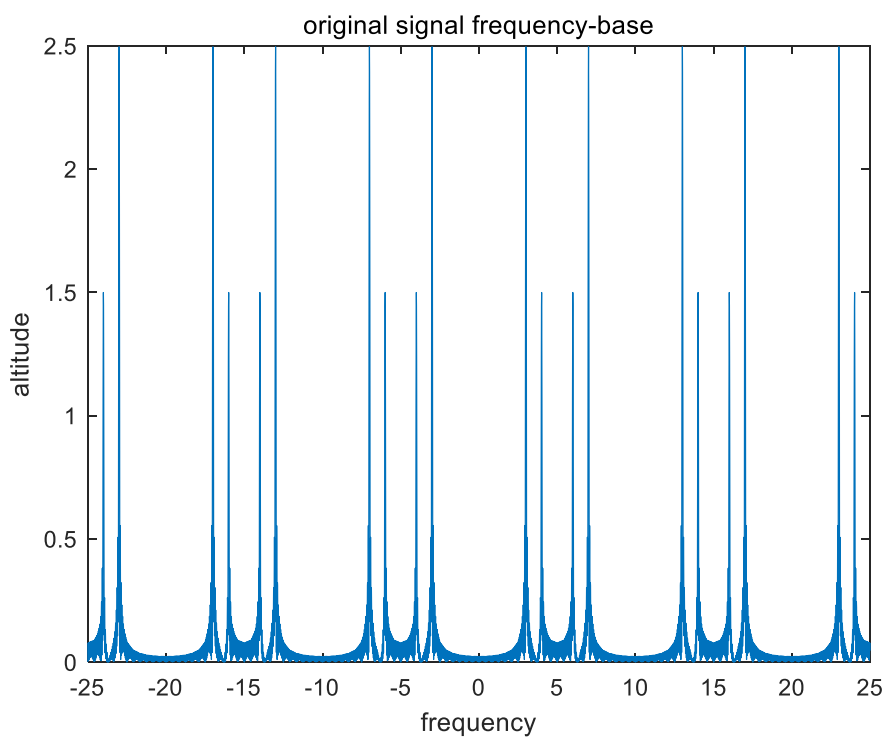
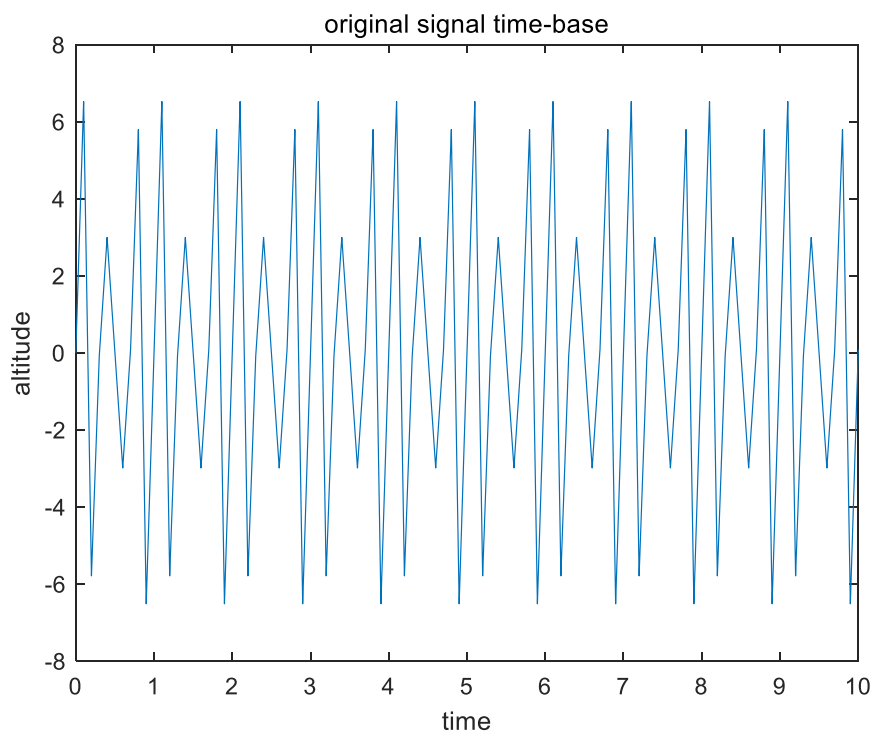


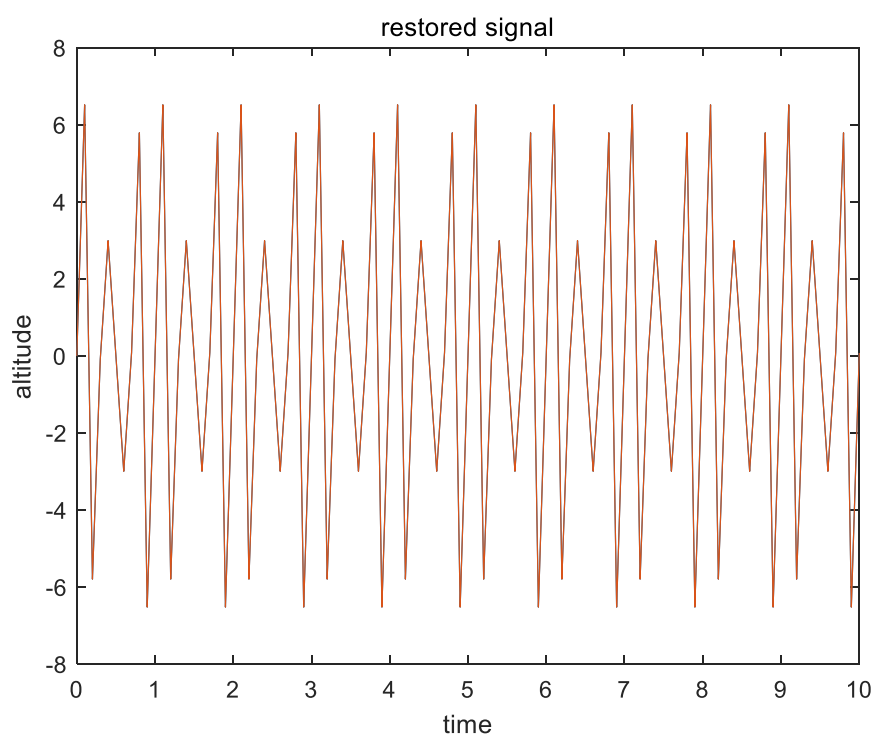
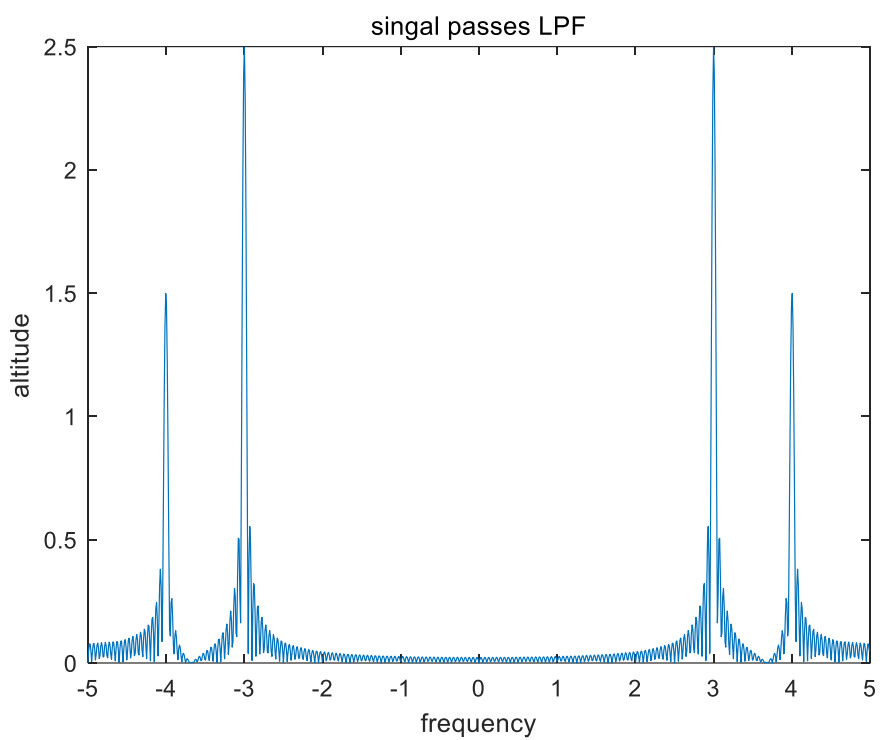
```
xlabel('frequency')
ylabel('altitude')

%% restored signal
I=ifft(X1);
figure
plot(t, x, t, I(1:length(t))*N)
xlim([0 10])
title('restored signal')
xlabel('time')
ylabel('altitude')
```

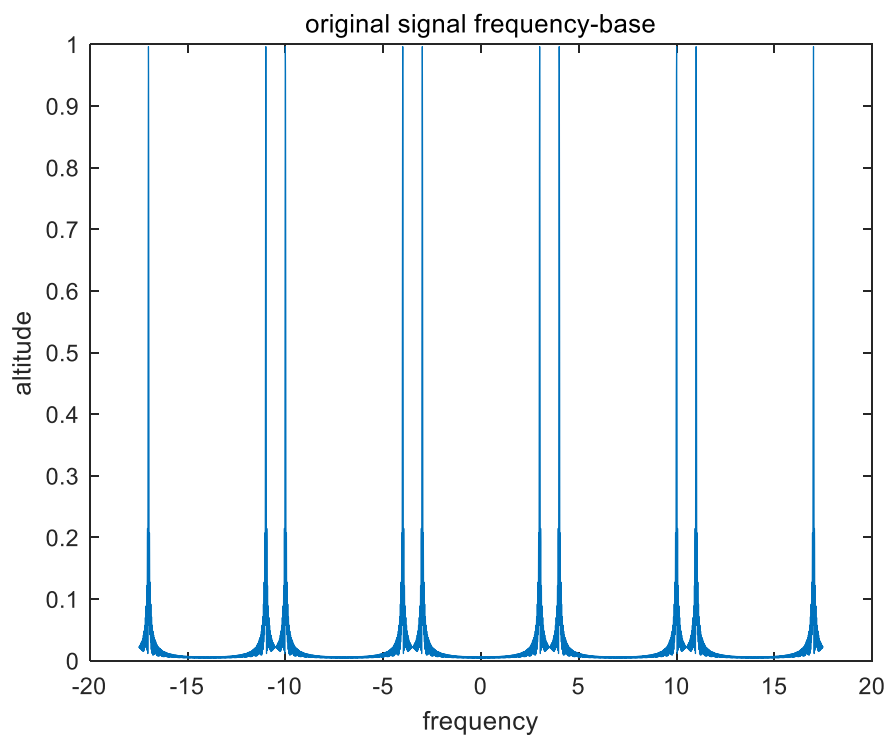
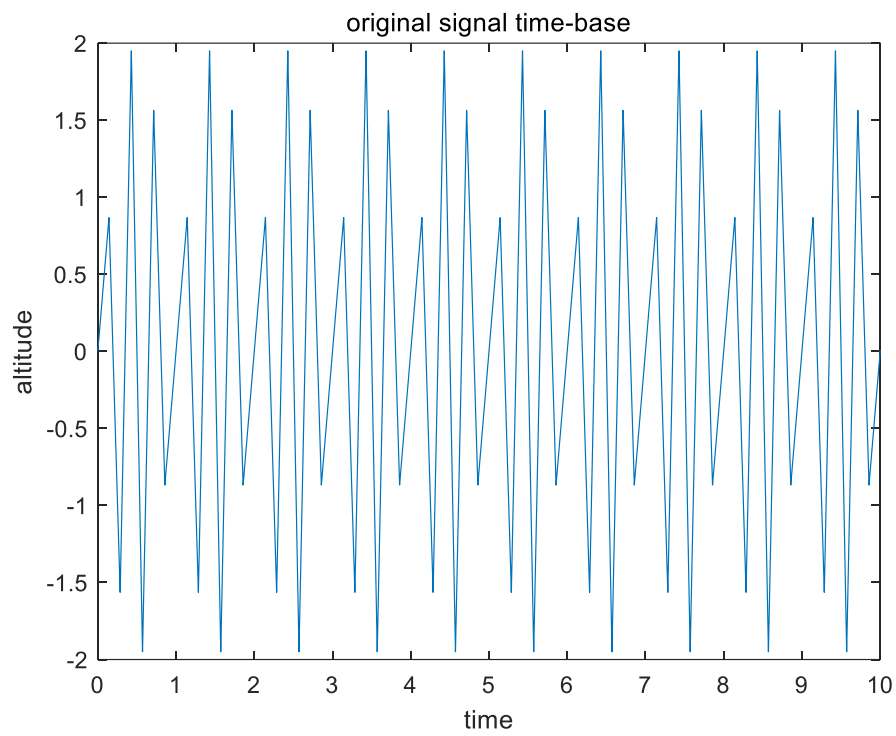
## 4、仿真实验结论

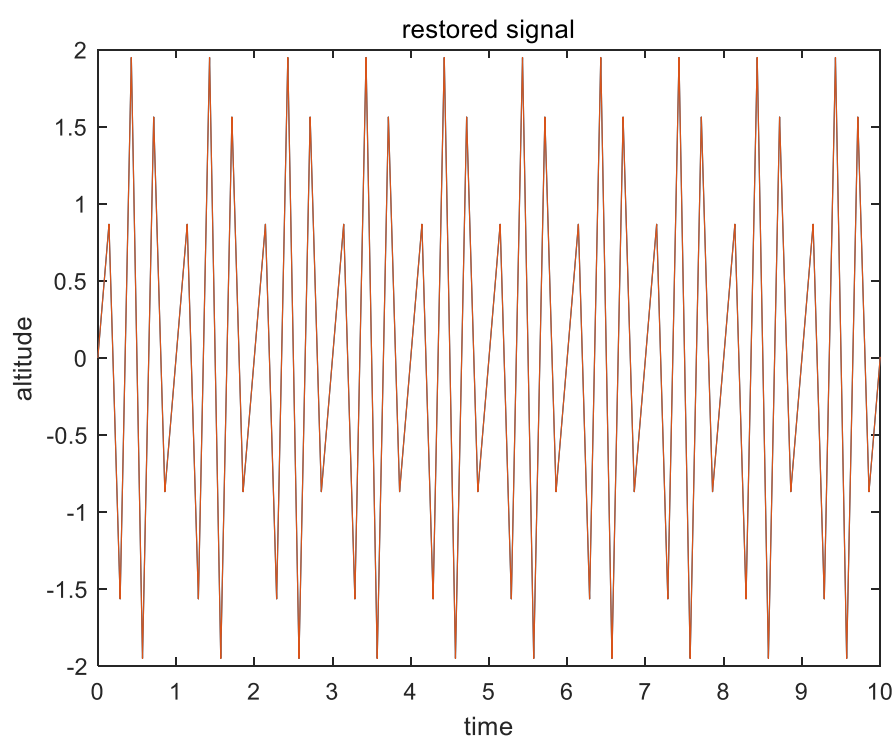
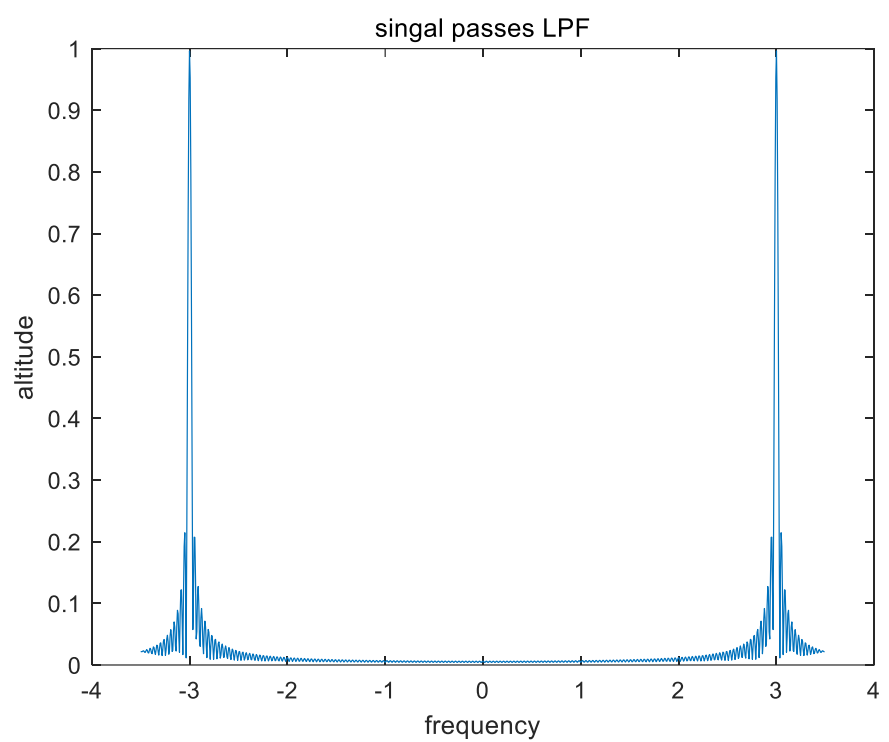
### （1） 每秒 10 个采样点





(2) 每秒 7 个采样点





## 实验二

### 1 基本原理

数字通信系统中，信号传输的通用模型

$$x(t) = A \sum_{k=0}^{\infty} a_k p(t - kT - \Delta)$$

$$E\{a_k\} = 0$$

$$E\{a_k a_{k+m}\} = R_m$$

$$R_{XX}(\tau) = A^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m r(\tau - mT)$$

$$r(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} p(t) p(t + \tau) dt$$

$$S_X(f) = A^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m r(\tau - mT) \right] \exp(-j2\pi f \tau) d\tau$$

$$\downarrow \alpha = \tau - mT$$

$$S_X(f) = A^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m \int_{-\infty}^{\infty} r(\alpha) \exp[-j2\pi f(\alpha + mT)] d\alpha$$

$$\downarrow S_r(f) = \int_{-\infty}^{\infty} r(\alpha) \exp(-j2\pi f \alpha) d\alpha$$

$$S_X(f) = A^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m S_r(f) \exp(-j2\pi f mT)$$

$$r(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} p(t) p(t + \tau) dt$$

$$S_r(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} p(t) p(t + \tau) dt \right) \exp(-j2\pi f \alpha) d\alpha$$

$$\downarrow \beta = t + \alpha$$

$$S_r(f) = \frac{1}{T} \left( \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \exp(j2\pi f t) dt \right) \left( \int_{-\infty}^{\infty} p(\beta) \exp(-j2\pi f \beta) d\beta \right)$$

$$S_r(f) = \frac{|P(f)|^2}{T} = \frac{G(f)}{T}$$

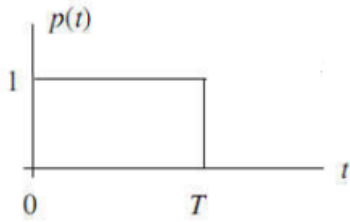
$$\downarrow S_X(f) = A^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m S_r(f) \exp(-j2\pi f mT)$$

$$S_X(f) = A^2 \frac{G(f)}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m \exp(-j2\pi f mT)$$

在许多的应用中可假定数据符号是独立的。这种假定可以导致极大的简化。如

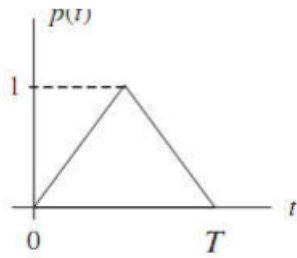
果数据符号是独立的，那么自相关就变为

$$\begin{aligned}
 R_m &= E\{a_k a_{k+m}\} = E\{a_k\} E\{a_{k+m}\} = a_k^2 \delta[m] \\
 \downarrow S_X(f) &= A^2 \frac{G(f)}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m \exp(-j2\pi fmT) \\
 S_X(f) &= A^2 \frac{a_k^2 G(f)}{T} \\
 \downarrow a_k &= \pm 1 \\
 S_X(f) &= A^2 \frac{G(f)}{T}
 \end{aligned}$$



单位幅度矩形波脉冲成形函数

$$S_x(f) = A^2 T \text{sinc}^2(fT)$$



单位幅度三角波脉冲成形函数

$$S_x(f) = \frac{A^2 T}{4} \text{sinc}^4\left(f \frac{T}{2}\right)$$

采样频率和给定脉冲成形相关联是通过考虑采样过程的信噪比来完成的，其中的噪声功率来自于混叠。

目标是选择一个采样频率，使得混叠误差相对于仿真所考察的系统性能的降低是可以忽略的。

$$\begin{aligned}
 S_{X_s}(f) &= f_s^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_X(f - nf_s) \\
 \downarrow S_X(f) &= A^2 T \text{sinc}^2(fT) \\
 S_{X_s}(f) &= f_s^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} A^2 T \text{sinc}^2[(f - nf_s)T]
 \end{aligned}$$

以每个符号  $m$  个采样 ( $f_s = \frac{m}{T}$ ) 对数据序列进行采样有

$$\begin{aligned}
 S_{X_s}(f) &= f_s^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} A^2 T \text{sinc}^2\left[\left(f - \frac{nm}{T}\right)T\right] \\
 S_{X_s}(f) &= f_s^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} A^2 T \text{sinc}^2(fT - nm)
 \end{aligned}$$

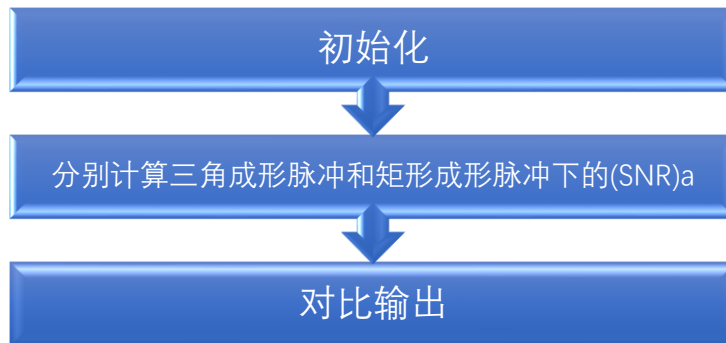
计算由混叠导致的信噪比

$$\begin{aligned}
 (SNR)_a &= \frac{S}{N_a} \\
 S &= \int_{-f_s/2}^{f_s/2} f_s^2 A^2 \text{sinc}^2(fT) df \\
 &= 2f_s^2 A^2 T \int_{-f_s/2}^{f_s/2} \text{sinc}^2(fT) df \\
 N_a &= \int_{-f_s/2}^{f_s/2} f_s^2 \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} A^2 T \text{sinc}^2(fT - nm) df \\
 &= 2f_s^2 A^2 T \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} \int_0^{f_s/2} \text{sinc}^2(fT - nm) df \\
 &\quad \downarrow \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} \int_0^{f_s/2} \text{sinc}^2(fT - nm) df = \int_{f_s/2}^{\infty} \text{sinc}^2(fT) df \\
 (SNR)_a &= \frac{S}{N_a} = \frac{\int_0^{f_s/2} \text{sinc}^2(fT) df}{\int_{f_s/2}^{\infty} \text{sinc}^2(fT) df}
 \end{aligned}$$

对连续频率变量  $f$  进行采样，令  $f = jf_1$ ，要求  $f_1 \ll \frac{1}{T}$ ，若设  $f_1 = \frac{1}{kT}$ ，每个旁瓣（带宽为  $\frac{1}{T}$ ）采  $k$  个点，则  $f_T = \frac{j}{k}$ 。同时，利用  $\frac{f_s}{2}$  对应  $\frac{km}{2}$ ，将上式中积分替换为求和，可得

$$(SNR)_a = \frac{S}{N_a} \cong \frac{\sum_{j=0}^{\frac{km}{2}} \text{sinc}^2(\frac{j}{k})}{\sum_{j=\frac{km}{2}}^{\infty} \text{sinc}^2(\frac{j}{k})}$$

## 2 仿真实验设计





### 3 仿真实验实现

#### (1) MSK

```

k=50;
nsamp=50000;
snrdb=zeros(1,17);
snrdb_triangle=zeros(1,17);
x=4:20;

for m=4:20
    signal=0;
    noise=0;
    signal_triangle=0;
    noise_triangle=0;
    f_fold=k*m/2;
    for j=1:f_fold
        term=(sin(pi*j/k)/(pi*j/k))^2;
        term_triangle=(cos(2*pi*j/k))^2/(pi^2*(1-(4*j/k)^2)^2);
        signal=signal+term;
        signal_triangle=signal_triangle+term_triangle;
    end
    for j=(f_fold+1):nsamp
        term=(sin(pi*j/k)/(pi*j/k))^2;
        term_triangle=(cos(2*pi*j/k))^2/(pi^2*(1-(4*j/k)^2)^2);
        noise=noise+term;
        noise_triangle=noise_triangle+term_triangle;
    end
    snrdb(m-3)=10*log10(signal/noise);
    snrdb_triangle(m-3)=10*log10(signal_triangle/noise_triangle);
end

plot(x, snrdb, x, snrdb_triangle);
xlabel('Samples per symbol');
ylabel('signal-to-aliasing noise ratio');
legend('MSK ( rectangular pulse )','MSK ( triangle pulse )')

```

#### (2) QPSK

```

k=50;
nsamp=50000;

```

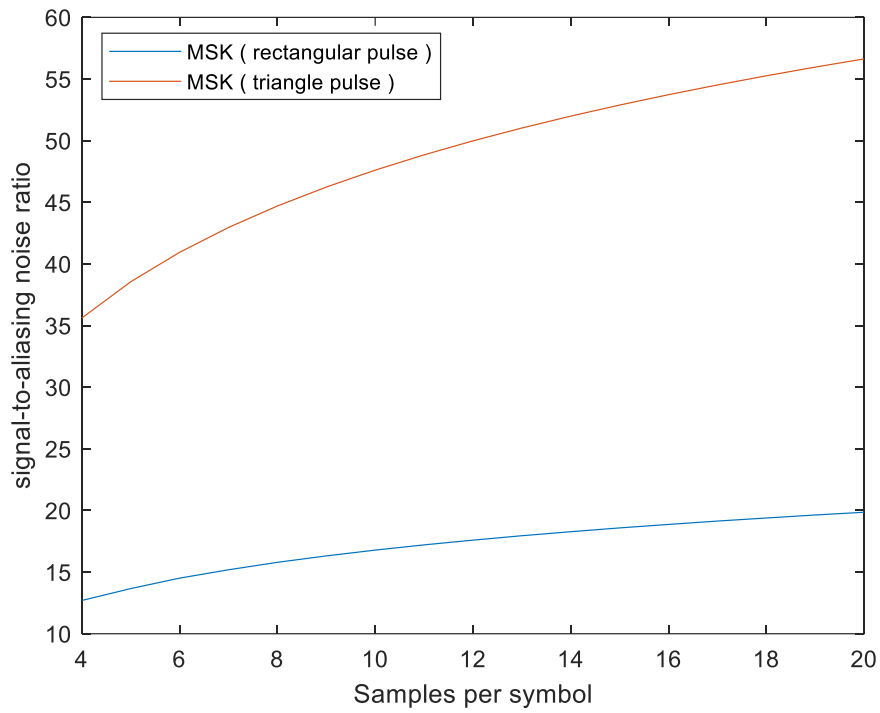
```
snrdb=zeros(1,17);
snrdb_triangle=zeros(1,17);
x=4:20;

for m=4:20
    signal=0;
    noise=0;
    signal_triangle=0;
    noise_triangle=0;
    f_fold=k*m/2;
    for j=1:f_fold
        term=(sin(pi*j/k)/(pi*j/k))^2;
        term_triangle=(sinc(2*pi*j/k))^2;
        signal=signal+term;
        signal_triangle=signal_triangle+term_triangle;
    end
    for j=(f_fold+1):nsamp
        term=(sin(pi*j/k)/(pi*j/k))^2;
        term_triangle=(sinc(2*pi*j/k))^2;
        noise=noise+term;
        noise_triangle=noise_triangle+term_triangle;
    end
    snrdb(m-3)=10*log10(signal/noise);
    snrdb_triangle(m-3)=10*log10(signal_triangle/noise_triangle);
end

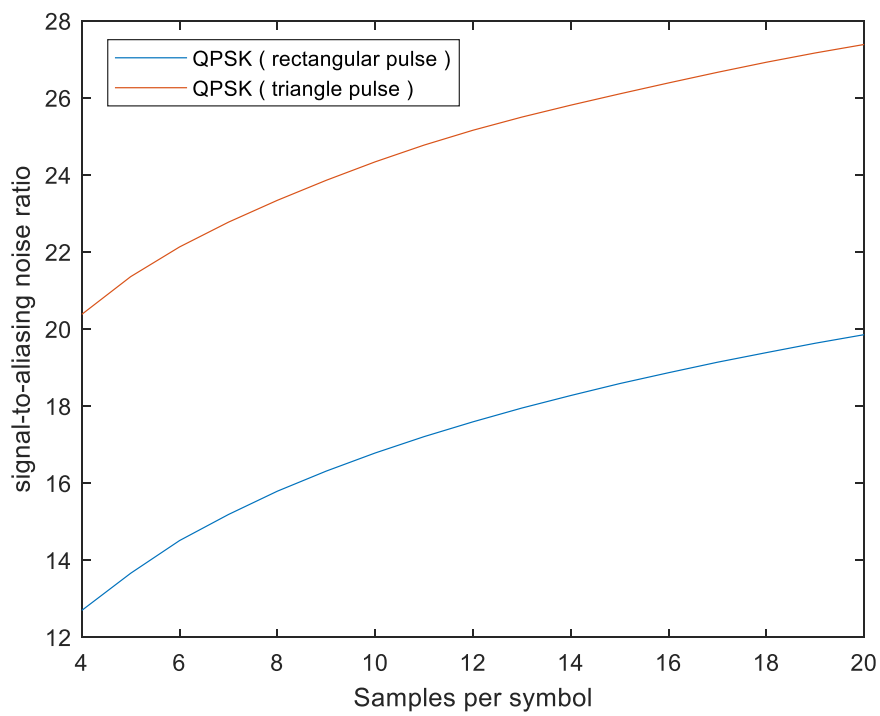
plot(x,snrdb,x,snrdb_triangle);
xlabel('Samples per symbol');
ylabel('signal-to-aliasing noise ratio');
legend('QPSK ( rectangular pulse )','QPSK ( triangle pulse )')
```

## 4、仿真实验结论

### (1) MSK



### (2) QPSK



从图中可以看出，两种调制方式下，当成形脉冲是矩形脉冲信号时，混叠信噪比  $(SNR)_a$  都小于三角成形脉冲。由于三角脉冲信号可以看作矩形脉冲信号的卷积，所以抗混叠能力更强。

# 实验三

## 1 基本原理

一般的带通信号可表示成

$$x(t) = A(t) \cos[2\pi f_0 t + \phi(t)]$$

这里  $A(t)$  是信号的幅度，或者说是实包络， $\phi(t)$  是相位偏移。如果上式是调制器的输出信号， $f_0$  是载波频率， $2\pi f_0 t$  是未调制载波的瞬时相位。

$$\downarrow \exp(j\theta) = \cos \theta + j \sin \theta$$

$$x(t) = \operatorname{Re}\{A(t) \exp[j\phi(t)] \exp(j2\pi f_0 t)\}$$

即

$$x(t) = \operatorname{Re}\{\tilde{x}(t) \exp(j2\pi f_0 t)\}$$

$$\tilde{x}(t) = A(t) \exp[j\phi(t)]$$

这就是实信号  $x(t)$  的复包络。

通常可用矩形波的形式来表示复包络，即

$$\tilde{x}(t) = x_d(t) + jx_q(t)$$

复包络的实部和虚部分别代表  $x(t)$  的同相分量和正交分量。因此：

$$x_d(t) = A(t) \cos \Phi(t)$$

$$x_q(t) = A(t) \sin \Phi(t)$$

实际应用中所关心的  $A(t)$  和  $\phi(t)$  是低通函数，其带宽远小于  $f_0$ ，所以  $x_d(t)$  和  $x_q(t)$  也是低通信号。

根据复数的定义， $A(t), \phi(t), x_d(t), x_q(t)$  有如下的关系

$$\Phi(t) = \arctan \frac{x_q(t)}{x_d(t)}$$

$$A(t) = |\tilde{x}(t)| = \sqrt{x_d^2(t) + x_q^2(t)}$$

时域信号  $x(t)$  可以写成

$$x(t) = \operatorname{Re}\{\tilde{x}(t) \exp(j2\pi f_0 t)\}$$

$$\downarrow \tilde{x}(t) = x_d(t) + jx_q(t)$$

$$x(t) = \operatorname{Re}\{[x_d(t) + jx_q(t)][\cos(j2\pi f_0 t) + j \sin(j2\pi f_0 t)]\}$$

化简

$$x(t) = x_d(t) \cos(j2\pi f_0 t) - x_q(t) \sin(j2\pi f_0 t)$$

$$\uparrow \cos[a+b] = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b)$$

$$x(t) = A(t) \cos[2\pi f_0 t + \phi(t)]$$

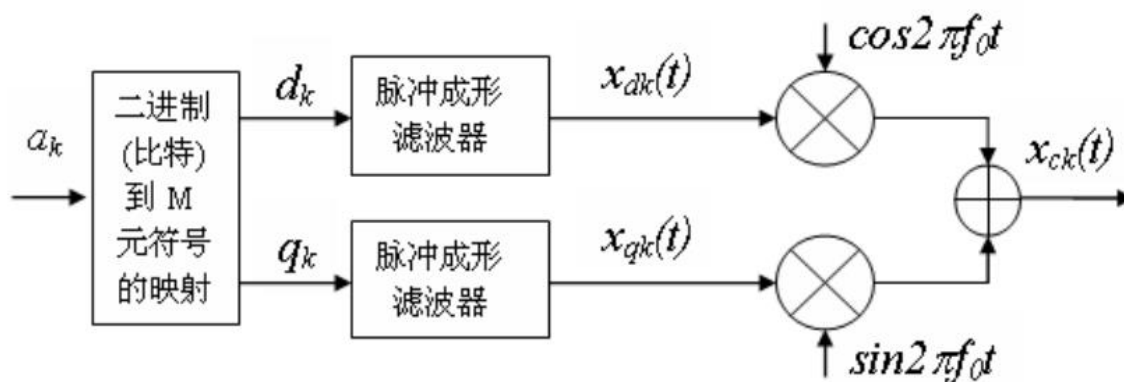
$$\downarrow x_d(t) = A(t) \cos \Phi(t)$$

$$x_q(t) = A(t) \sin \Phi(t)$$

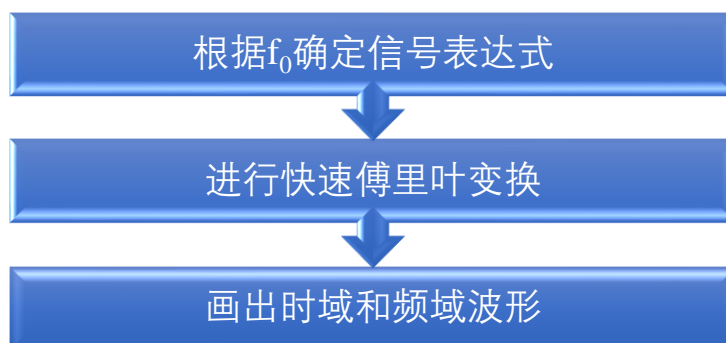
$$x(t) = x_d(t) \cos(2\pi f_0 t) - x_q(t) \sin(2\pi f_0 t)$$

注意：通常选择  $f_0$  为带通信号的中心频率， $f_0$  是可以任意选的，可以根据方便性原则来选择。

但是， $x_d(t)$  和  $x_q(t)$  取决于  $f_0$ ，故仿真时要选取合适的  $f_0$  以便使计算量减到最小。



## 2 仿真实验设计



### 3 仿真实验实现

(1)  $f_0 = 100$

```
clear all

t=-10:1/100:10;
xdt=8./(pi.*t).*sin(20.*pi.*t);

figure
plot(t,xdt)
xlim([-1 1])
xlabel('xd(t)')
ylabel('amplitude')

xdt(isnan(xdt))==0;
xdf=fft(xdt);
f=(0:length(xdf)-1)*99/length(xdf);

figure
plot(f-50,abs(fftshift(xdf)))
xlabel('Xd(f)')
ylabel('amplitude')
```

(2)  $f_0 = 95$

```
clear all

t=-10:1/95:10;
xdt=8./(pi.*t).*sin(20.*pi.*t);

figure
plot(t,xdt)
xlim([-1 1])
xlabel('xd(t)')
ylabel('amplitude')

xdt(isnan(xdt))==0;
xdf=fft(xdt);
f=(0:length(xdf)-1)*99/length(xdf);
```

```
figure
plot(f-50,abs(fftshift(xdf)))
xlabel('Xd(f)')
ylabel('amplitude')
```

(3)  $f_0 = 90$

```
clear all

t=-10:1/90:10;
xdt=8./(pi.*t).*sin(20.*pi.*t);

figure
plot(t,xdt)
xlim([-1 1])
xlabel('xd(t)')
ylabel('amplitude')

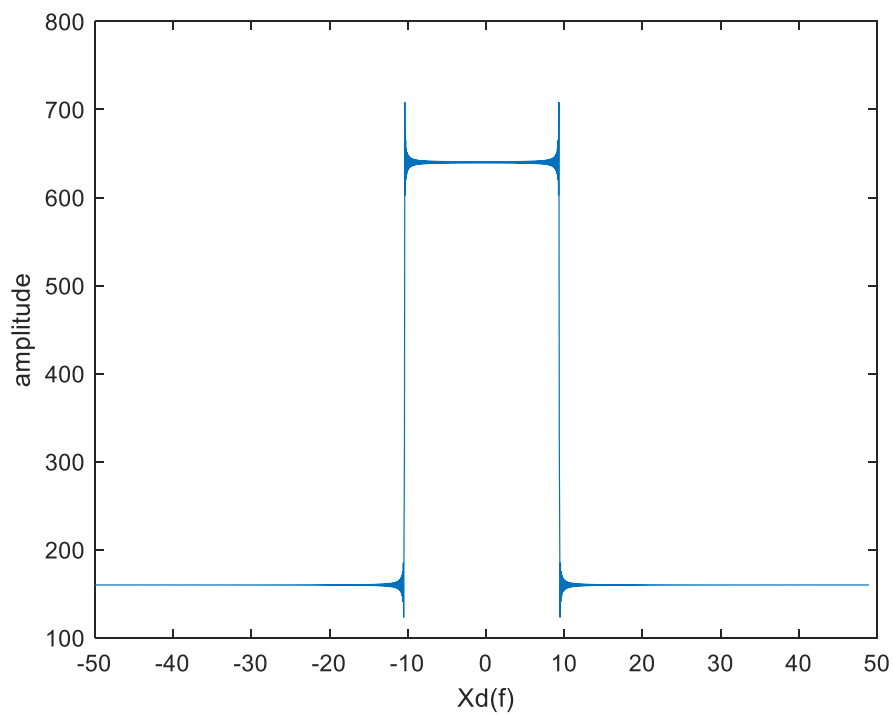
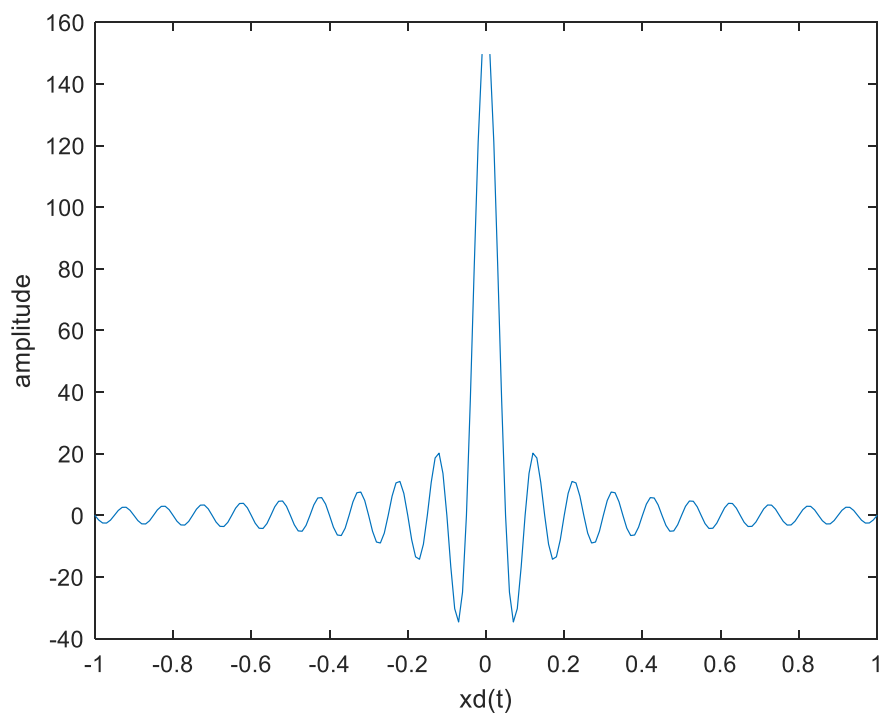
xdt(isnan(xdt))==0;
xdf=fft(xdt);
f=(0:length(xdf)-1)*99/length(xdf);

figure
plot(f-50,abs(fftshift(xdf)))
xlabel('Xd(f)')
ylabel('amplitude')
```

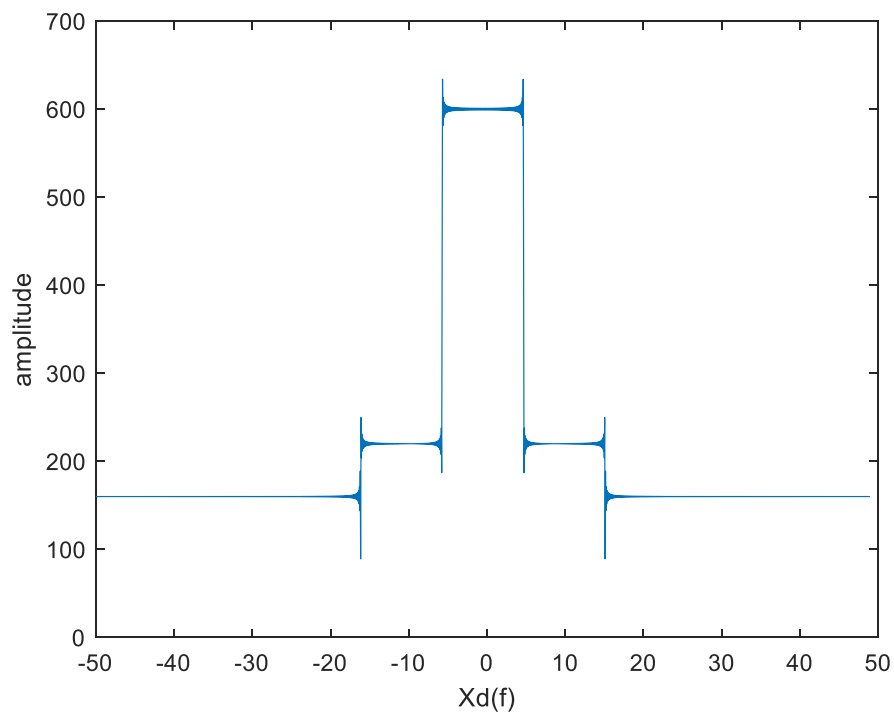
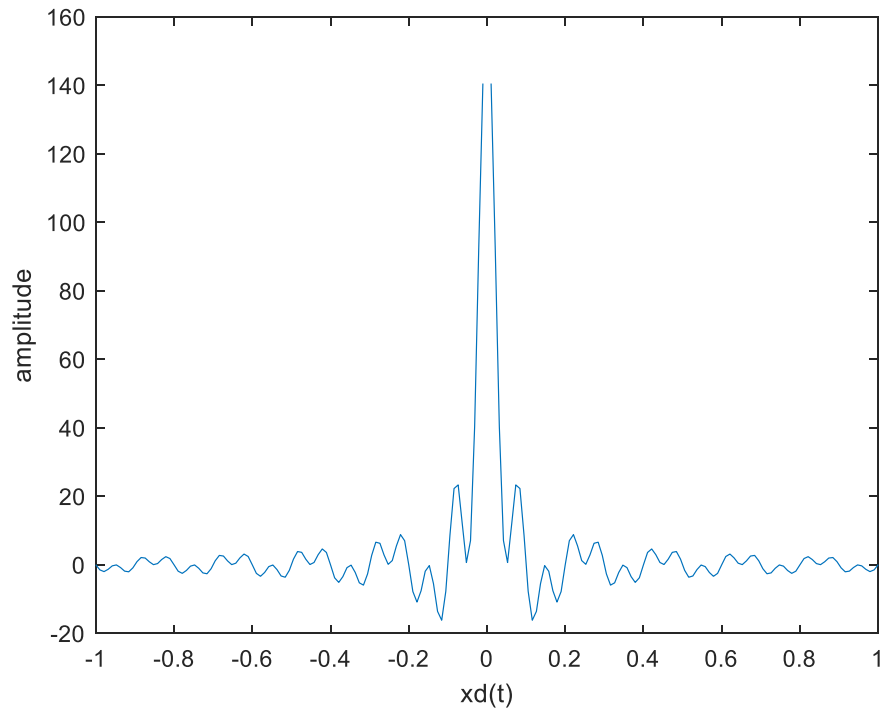


## 4、仿真实验结论

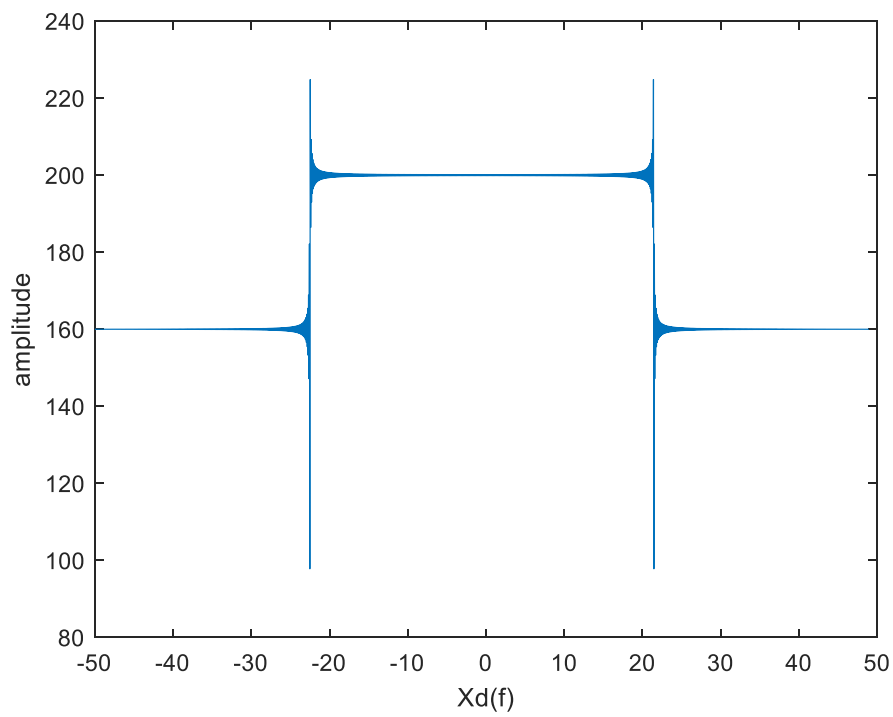
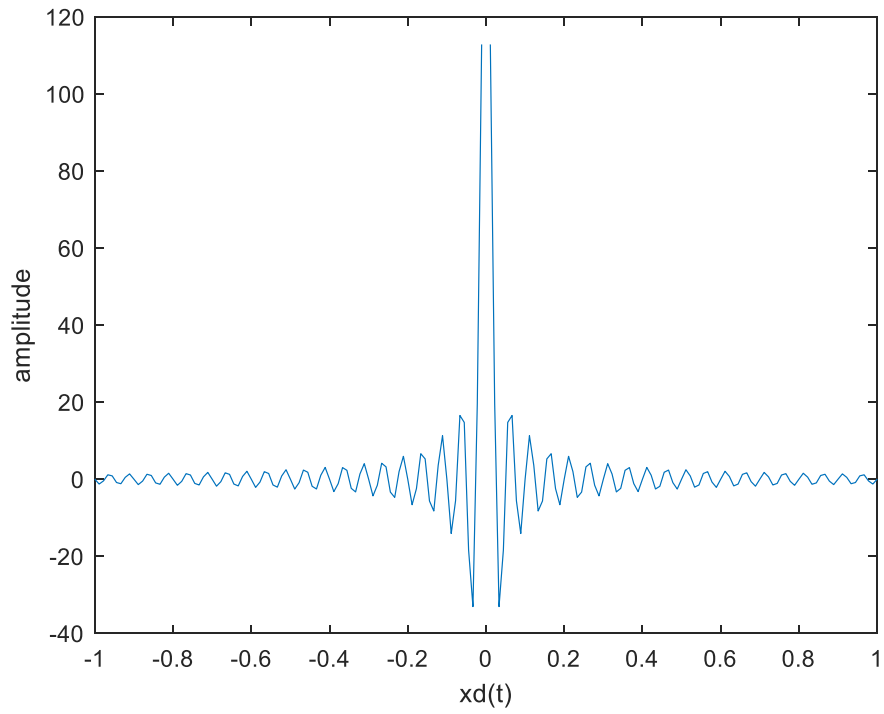
(1)  $f_0 = 100$



(2)  $f_0 = 95$



(3)  $f_0 = 90$



(4) 结论

通过对比以上三个结果，可以看出  $x_d(t)$  和  $X_d(f)$  均与  $f_0$  的选取有关。

$f_0$  是可以任意选的，可以根据方便性原则来选择。通常选择  $f_0$  为带通信号的中心频率，但是， $x_d(t)$  和  $x_q(t)$  取决于  $f_0$ ，故仿真时要选取合适的  $f_0$  以便使计算量减到最小。

# 实验一

## 1 基本原理

因为

$$x(t) = \text{Re}\{\tilde{x}(t) \exp(j2\pi f_0 t)\}$$

$$x(t) = A(t) \cos[2\pi f_0 t + \phi(t)]$$

其中

$$\tilde{x}(t) = A(t) \exp[j\phi(t)]$$

所以

$$x(t) = \frac{1}{2} \tilde{x}(t) \exp(j2\pi f_0 t) + \frac{1}{2} \tilde{x}^*(t) \exp(-j2\pi f_0 t)$$

两边同时乘以  $\exp(-j2\pi f_0 t)$

$$2x(t) \exp(-j2\pi f_0 t) = \tilde{x}(t) + \tilde{x}^*(t) \exp(-j4\pi f_0 t)$$

化简

$$\tilde{x}(t) = 2x(t) \exp(-j2\pi f_0 t) + \tilde{x}^*(t) \exp(-j4\pi f_0 t)$$

因为  $\tilde{x}(t)$  是一个低通信号(信号的频谱仅在  $f = 0$  附近是非零的)。抽取其低通部分得到:

$$\tilde{x}(t) = LP\{2x(t) \exp(-j2\pi f_0 t) + \tilde{x}^*(t) \exp(-j4\pi f_0 t)\}$$

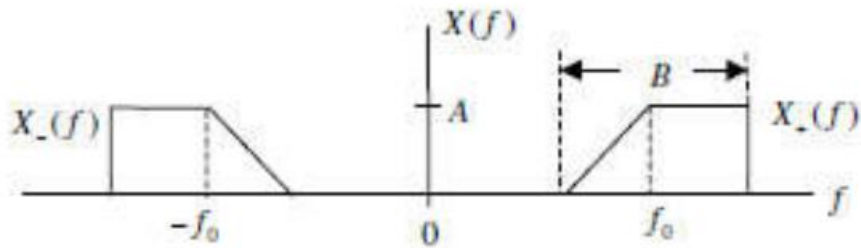
又因为

$$\tilde{x}(t) = 2x(t) \exp(-j2\pi f_0 t) + \tilde{x}^*(t) \exp(-j4\pi f_0 t)$$

傅里叶变换

$$\tilde{X}(f) = 2X(f + f_0) - \tilde{X}^*(f + 2f_0)$$

$X(f)$  在除了  $f = \pm f_0$  附近之外的所有地方都为零, 其中  $X_+(f)$  表示  $X(f)$  的正频率部分,  $X_-(f)$  表示  $X(f)$  的负频率部分。



$\tilde{X}^*(f + 2f_0)$  对除了在  $f = -f_0$  (即  $X_+(f)$  左移  $2f_0$ ) 和  $f = -3f_0$  (即  $X_-(f)$  左移  $2f_0$ ) 附近之外的所有地方都为零。所以对  $\tilde{X}(f)$  并不会产生影响。

$X(f + f_0)$  对除了在  $f = -2f_0$  (即  $X_-(f)$  左移  $f_0$ ) 和  $f = 0$  (即  $X_+(f)$  左移  $f_0$ ) 附近之外的所有地方都为零。所以只有  $X_+(f + f_0)$  对  $\tilde{X}(f)$  产生影响。

由于是低通部分, 所以

$$\tilde{X}(f) = 2X_+(f + f_0)$$

如果用传递函数为  $U(f)$  的滤波器来实现低通滤波器，上式则可表示为

$$\tilde{X}(f) = 2X(f + f_0)U(f + f_0)$$

显然有

$$\tilde{X}(f) = X_d(f) + jX_q(f)$$

$$X_d(f) = \frac{1}{2}(\tilde{X}(f) + \tilde{X}^*(-f))$$

$$X_q(f) = \frac{1}{2j}(\tilde{X}(f) - \tilde{X}^*(-f))$$

用  $-f$  代替  $f$  得

$$\tilde{X}(-f) = X_d(-f) + jX_q(-f)$$

因为  $x_d(t)$  和  $x_q(t)$  是实函数，有

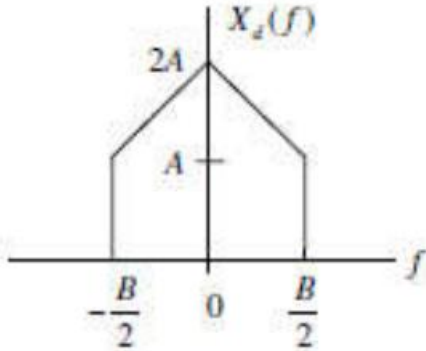
$$X_d(-f) = X_d^*(f)$$

所以

$$\tilde{X}(-f) = X_d^*(f) + jX_q^*(f)$$

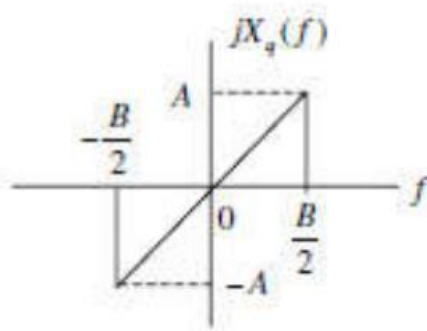
取复共轭得

$$\tilde{X}^*(-f) = X_d(f) - jX_q(f)$$



$$X_d(f) = \frac{1}{2}(\tilde{X}(f) + \tilde{X}^*(-f))$$

同相分量的频谱 (偶)

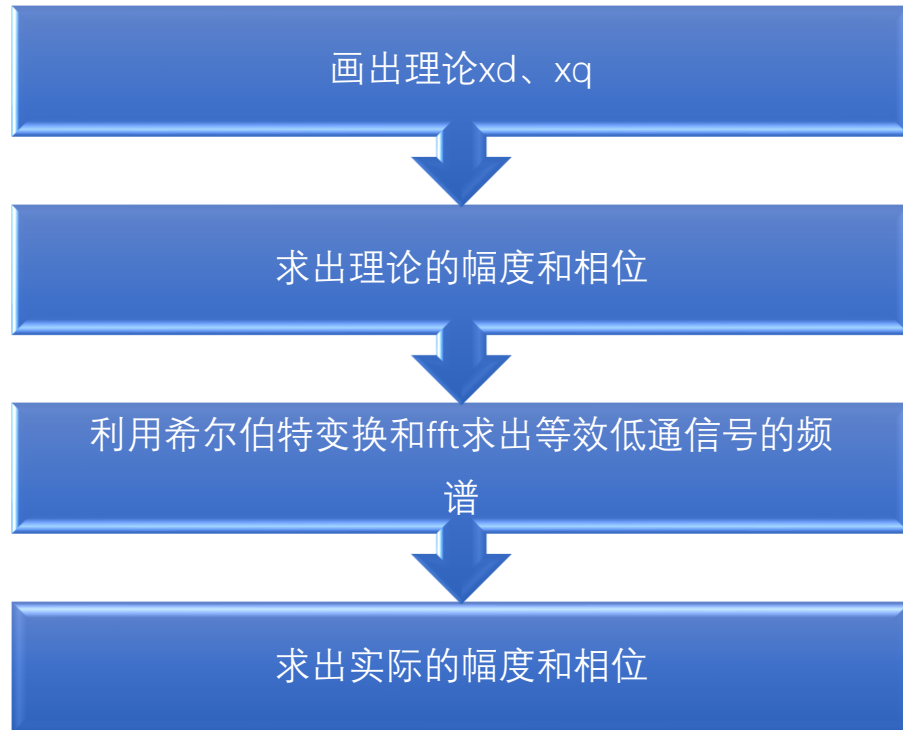


$$X_q(f) = \frac{1}{2j}(\tilde{X}(f) - \tilde{X}^*(-f))$$

正交分量的频谱(奇)

实带通信号  $x(t)$  的频谱  $X(f)$  关于  $f_0$  不对称，因此，低通复包络  $\tilde{x}(t)$  的抽样值取复数值。 $\tilde{x}(t)$  的实部  $x_d(t)$  和虚部  $x_q(t)$  都具有  $\frac{B}{2}$  的带宽，是实带通信号  $x(t)$  带宽的一半。因此  $x_d(t)$  和  $x_q(t)$  必须以每秒大于  $2 \times \frac{B}{2} = B$  个样值的速率来采样，采样操作的结果是每秒至少能产生  $2B$  个采样。相反，如果  $X(f)$  关于  $f_0$  共轭对称，就关于  $f=0$  共轭对称。这样， $\tilde{x}(t)$  就是实数，而且不用再对正交部分取样了。

## 2 仿真实验设计



### 3 仿真实验实现

(1) 解析地确定并画出  $x_d(t)$  和  $x_q(t)$

```
clear all

t = 0:0.005:0.7;
xd= 6*cos(2*sin(24*pi*t));
xq= 6*sin(2*sin(24*pi*t));

subplot(2,1,1)
plot(t,xd)
title('theoretical xd')
xlabel('time')
ylabel('amplitude')

subplot(2,1,2)
plot(t,xq)
title('theoretical xq')
xlabel('time')
ylabel('amplitude')
```

(2) 使用 MATLAB 和 FFT 变换, 确定并画出  $X(f)$ , 画出幅度和相位

```
clear all

t = 0:0.001:0.5;
x = 6*cos(240*pi*t+2*sin(24*pi*t));
y = fft(x);
m = abs(y);
p = angle(y);
f = (0:length(y)-1)*99/length(y);

subplot(2,1,1);
plot(f,m);
title('amplitude of X(f)');
xlabel('frequency')
ylabel('amplitude')
set(gca,'XTick',[15 40 60 85]);

subplot(2,1,2);
```



```
plot(f,p);
title('phase of X(f)');
xlabel('frequency')
ylabel('phase')
set(gca,'XTick',[15 40 60 85]);
```

(3) 使用 MATLAB, 确定并画出等效低通信号的频谱

```
clear all

t = 0:0.001:0.6;
x = 6*cos(240*pi*t+2*sin(24*pi*t));
z = hilbert(x);
x1= fft(z.*exp(-j*2*pi*100*t));
m = abs(x1);
f = (0:length(x1)-1)*99/length(x1);

subplot(2,1,1);
plot(f,m);
title('amplitude of  $\tilde{X}(f)$ ');
xlabel('frequency')
ylabel('amplitude')

p=angle(x1);
subplot(2,1,2);
plot(f,p);
title('phase of  $\tilde{X}(f)$ ');
xlabel('frequency')
ylabel('phase')
```

(4) 使用 MATLAB, 确定并画出  $x_d(t)$  和  $x_q(t)$

```
clear all

t = 0:0.001:0.7;
x = 6*cos(240*pi*t+2*sin(24*pi*t));
z = hilbert(x);
x1= z.*exp(-j*2*pi*120*t);
xd= real(x1);
xq= -j*(x1-xd);
```

```
subplot(2,1,1)
plot(t,xd);
title('practical xd')
xlabel('time')
ylabel('amplitude')
```

```
subplot(2,1,2);
plot(t,xq);
title('practical xq')
xlabel('time')
ylabel('amplitude')
```

#### (5) 比较 (1) 和 (4) 的结果

```
clear all

t = 0:0.001:0.7;
xd1= 6*cos(2*sin(24*pi*t));
xq1= 6*sin(2*sin(24*pi*t));

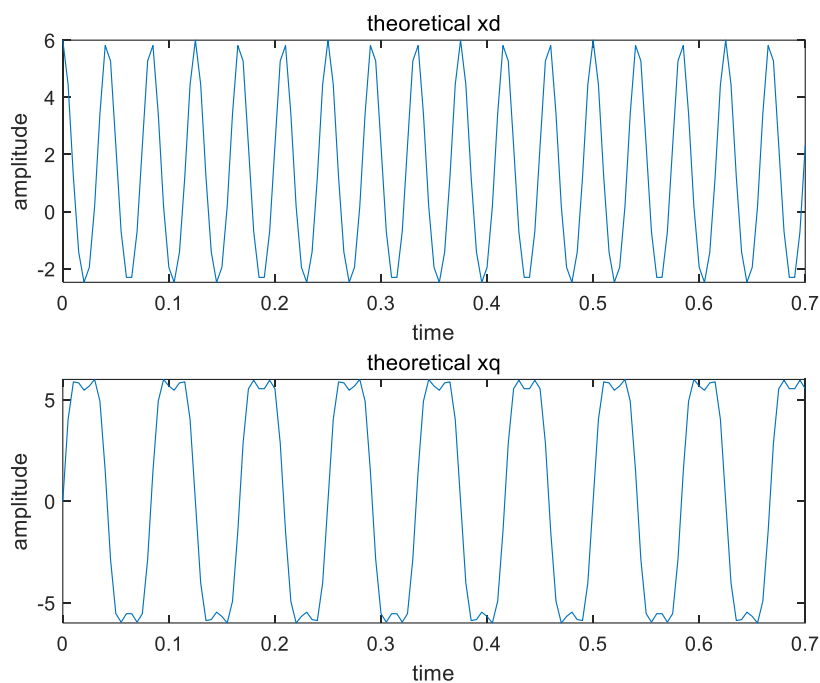
x = 6*cos(240*pi*t+2*sin(24*pi*t));
z = hilbert(x);
x1= z.*exp(-j*2*pi*120*t);
xd2= real(x1);
xq2= -j*(x1-xd2);

subplot(2,1,1)
plot(t,xd1,t,xd2)
title('xd')
xlabel('time')
ylabel('amplitude')
legend('theoretical xd','practical xd')

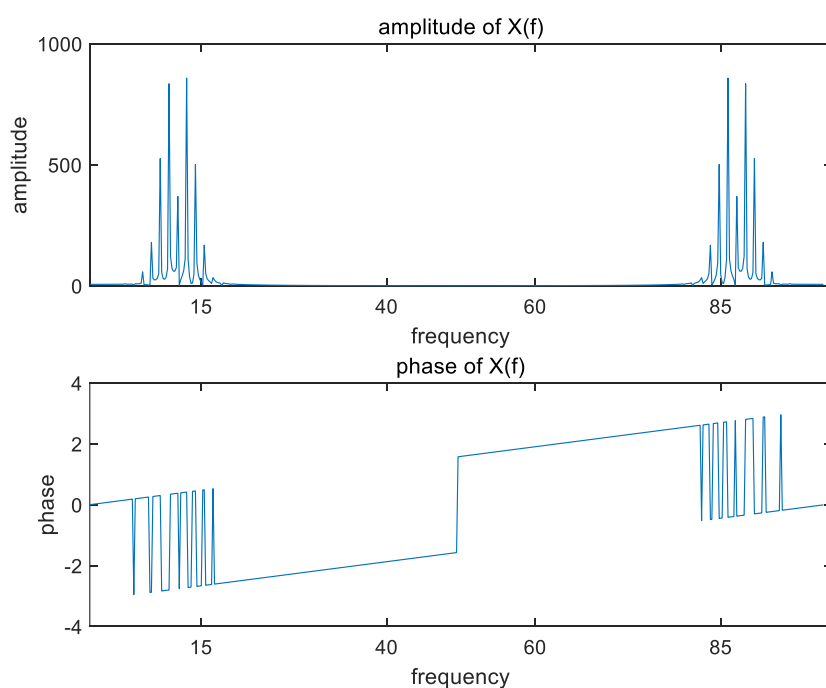
subplot(2,1,2)
plot(t,xq1,t,xq2)
title('xq')
xlabel('time')
ylabel('amplitude')
legend('theoretical xq','practical xq')
```

## 4、仿真实验结论

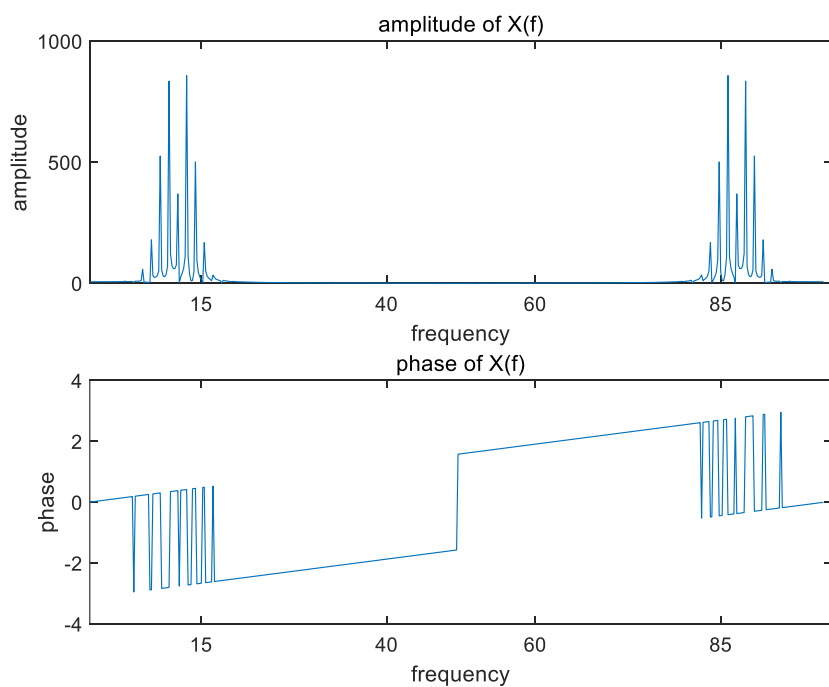
(1) 解析地确定并画出  $x_d(t)$  和  $x_q(t)$



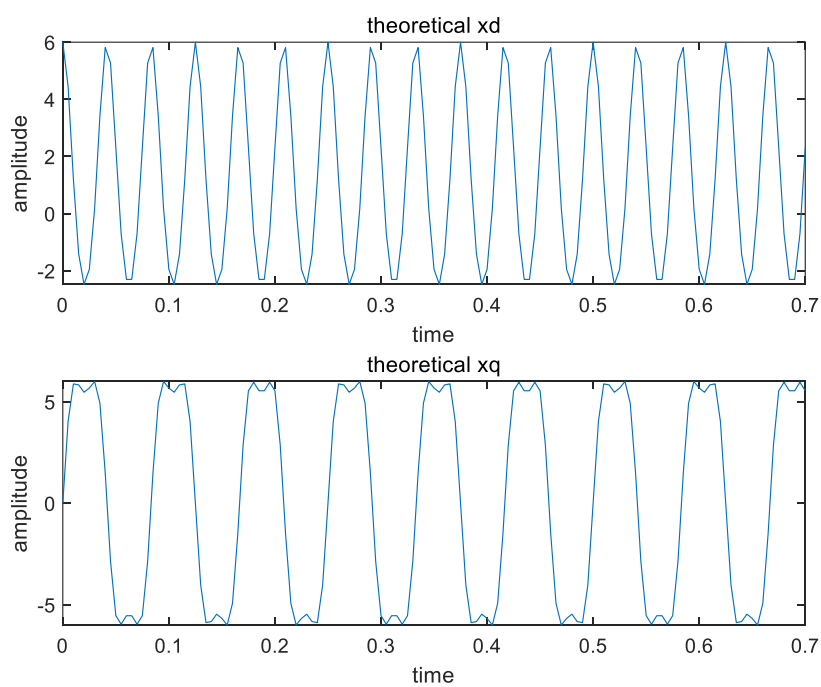
(2) 使用 MATLAB 和 FFT 变换，确定并画出  $X(f)$ ，画出幅度和相位



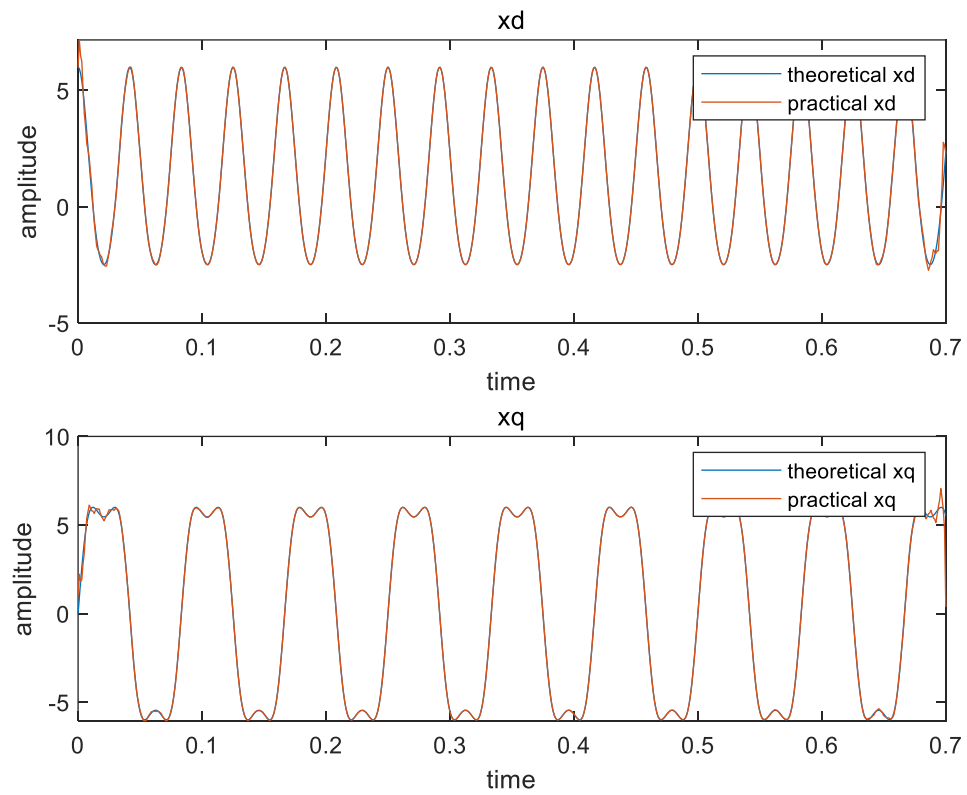
(3) 使用 MATLAB, 确定并画出等效低通信号的频谱



(4) 使用 MATLAB, 确定并画出  $x_d(t)$  和  $x_q(t)$



(5) 比较 (1) 和 (4) 的结果

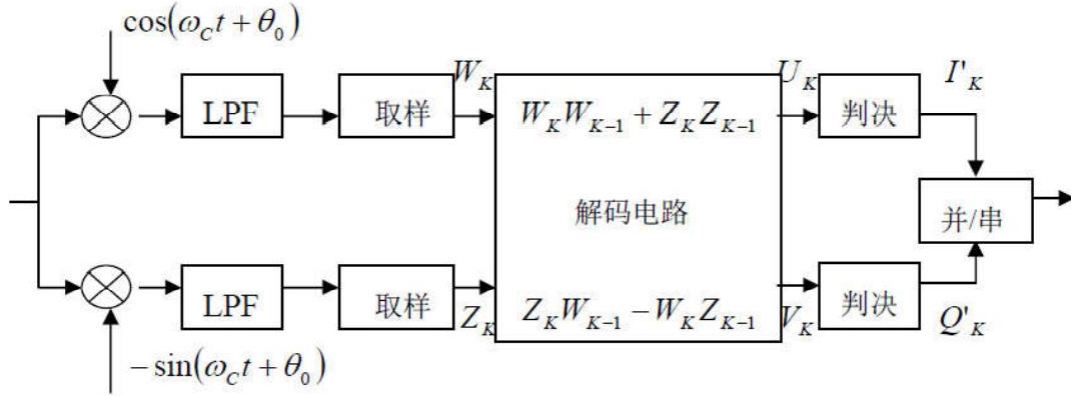


由图可知，(1) 和 (4) 的结果是一致的。

## 实验五

### 1 基本原理

$\pi/4$  DQPSK 接收机差分解调原理



设输入信号为  $S_K(t) = \cos(\omega_c t + \varphi_K)$ ，他在同相支路与本地载波  $\cos(\omega_c t + \theta_0)$  相乘，滤出的低频分量经取样后，得

$$W_K = \frac{1}{2} \cos(\varphi_K - \theta_0)$$

在正交支路与本地载波  $-\sin(\omega_c t + \theta_0)$  相乘，滤出的低频分量经取样后，得

$$Z_K = \frac{1}{2} \sin(\varphi_K - \theta_0)$$

式中：  $\theta_0$  为固定相位差。

所用的低通滤波器应与发端调制器所用的低通滤波器相匹配，以消除码间干扰。

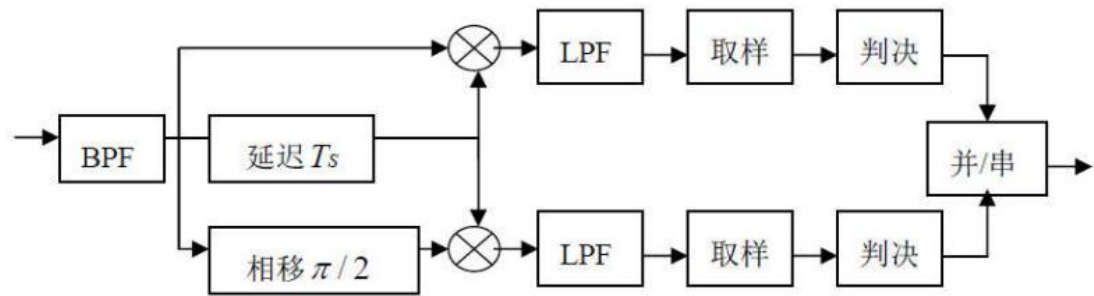
解码规则为：

$$\begin{cases} U_K = W_K W_{K-1} + Z_K Z_{K-1} \\ V_K = Z_K W_{K-1} - W_K Z_{K-1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_K = \frac{1}{2} \cos(\varphi_K - \theta_0) \times \frac{1}{2} \cos(\varphi_{K-1} - \theta_0) + \frac{1}{2} \sin(\varphi_K - \theta_0) \times \frac{1}{2} \sin(\varphi_{K-1} - \theta_0) \\ \quad = \frac{1}{4} \cos(\varphi_K - \varphi_{K-1}) = \frac{1}{4} \cos \Delta \varphi_K \\ V_K = \frac{1}{2} \sin(\varphi_K - \theta_0) \times \frac{1}{2} \cos(\varphi_{K-1} - \theta_0) - \frac{1}{2} \cos(\varphi_K - \theta_0) \times \frac{1}{2} \sin(\varphi_{K-1} - \theta_0) \\ \quad = \frac{1}{4} \sin(\varphi_K - \varphi_{K-1}) = \frac{1}{4} \sin \Delta \varphi_K \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_K > 0 & I'_K \text{判为 } 1 \\ U_K < 0 & I'_K \text{判为 } -1 \\ V_K > 0 & Q'_K \text{判为 } 1 \\ V_K < 0 & Q'_K \text{判为 } -1 \end{cases}$$

$\pi/4$  DQPSK 接收机中频差分解调原理



经过延迟的信号

$$S_{K-1}(t) = \cos(\omega_c t + \varphi_{K-1})$$

与支路信号相乘

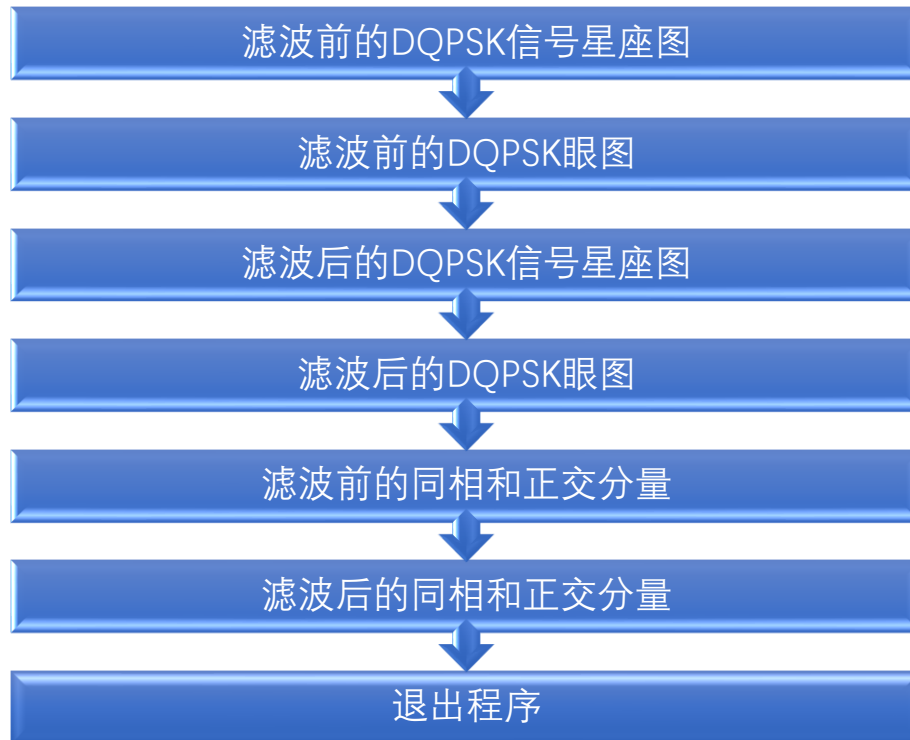
$$\cos(\omega_c t + \varphi_K) \cos(\omega_c t + \varphi_{K-1})$$

$$\sin(\omega_c t + \varphi_K) \cos(\omega_c t + \varphi_{K-1})$$

经滤波和取样

$$\begin{cases} U_K = \frac{1}{2} \cos(\varphi_K - \varphi_{K-1}) = \frac{1}{2} \cos \Delta \varphi_K \\ V_K = \frac{1}{2} \sin(\varphi_K - \varphi_{K-1}) = \frac{1}{2} \sin \Delta \varphi_K \end{cases}$$

## 2 仿真实验设计



## 3 仿真实验实现

### (1) 主程序

```

m = 200; bits = 2*m;
sps = 10;
iphase = 0;
order = 5;
bw = 0.2;
data = zeros(1,bits); d = zeros(1,m); q = zeros(1,m);
dd = zeros(1,m); qq = zeros(1,m); theta = zeros(1,m);
thetaout = zeros(1,sps*m);
data = round(rand(1,bits));
dd = data(1:2:bits-1);
qq = data(2:2:bits);
theta(1) = iphase;
thetaout(1:sps) = theta(1)*ones(1,sps);
for k=2:m
    
```



```

    if dd(k) == 1
        phi_k = (2*qq(k)-1)*pi/4;
    else
        phi_k = (2*qq(k)-1)*3*pi/4;
    end
    theta(k) = phi_k + theta(k-1);
    for i=1:sps
        j = (k-1)*sps+i;
        thetaout(j) = theta(k);
    end
end
d = cos(thetaout);
q = sin(thetaout);
[b,a] = butter(order,bw);
df = filter(b,a,d);
qf = filter(b,a,q);
kk = 0;

while kk == 0
    k = menu('pi/4 DQPSK Plot Options',...
        'Unfiltered pi/4 DQPSK Signal Constellation',...
        'Unfiltered pi/4 DQPSK Eye Diagram',...
        'Filtered pi/4 DQPSK Signal Constellation',...
        'Filtered pi/4 DQPSK Eye Diagram',...
        'Unfiltered Direct and Quadrature Signals',...
        'Filtered Direct and Quadrature Signals',...
        'Exit Program');
    if k == 1
        sigcon(d,q)
        pause
    elseif k == 2
        dqeye(d,q,4*sps)
        pause
    elseif k == 3
        sigcon(df,qf)
        pause
    elseif k == 4
        dqeye(df,qf,4*sps)
        pause
    elseif k == 5
        numbsym = 10;
    end
end
    
```

```

dt = d(1:numbsym*sps);
qt = q(1:numbsym*sps);
dqplot(dt,qt)
pause
elseif k == 6
    numbsym = 10;
    dft=df(1:numbsym*sps);
    qft=qf(1:numbsym*sps);
    dqplot(dft,qft)
    pause
elseif k == 7
    kk = 1;
end
end

```

## (2) 子程序: dqeye

```

function [] = dqeye(xd,xq,m)
lx = length(xd);
kcol = floor(lx/m);
xda = [0,xd]; xqa = [0,xq];
for j = 1:kcol
for i = 1:(m+1)
    kk = (j-1)*m+i;
    y1(i,j) = xda(kk);
    y2(i,j) = xqa(kk);
end
end
subplot(211)
plot(y1);
title('D/Q EYE DIAGRAM');
xlabel('Sample Index');
ylabel('Direct');
subplot(212)
plot(y2);
xlabel('Sample Index');
ylabel('Quadrature');
subplot(111)
% End of function file.

```

(3) 子程序: dqplot

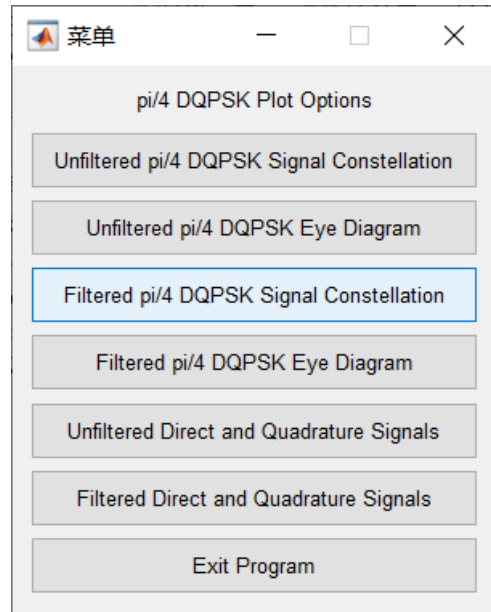
```
function [] = dqplot(xd, xq)
lx = length(xd);
t = 0:lx-1;
nt = t/(lx-1);
nxd = xd(1,1:lx);
nxq = xq(1,1:lx);
subplot(211)
plot(nt, nxd);
a = axis;
axis([a(1) a(2) 1.5*a(3) 1.5*a(4)]);
title('Direct and Quadrature Channel Signals');
xlabel('Normalized Time');
ylabel('Direct');
subplot(212)
plot(nt, nxq);
a = axis;
axis([a(1) a(2) 1.5*a(3) 1.5*a(4)]);
xlabel('Normalized Time');
ylabel('Quadrature');
subplot(111)
% End of function file.
```

(4) 子程序: sigcon

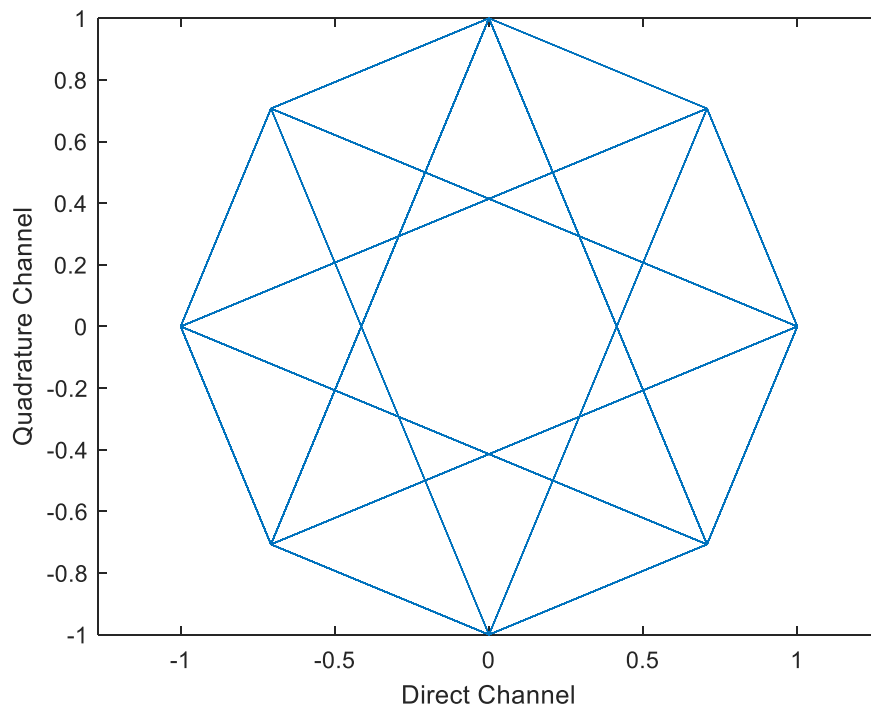
```
function []=sigcon(x, y)
plot(x, y)
axis('square')
axis('equal')
xlabel('Direct Channel')
ylabel('Quadrature Channel')
% End of function file.
```

## 4 仿真实验结论

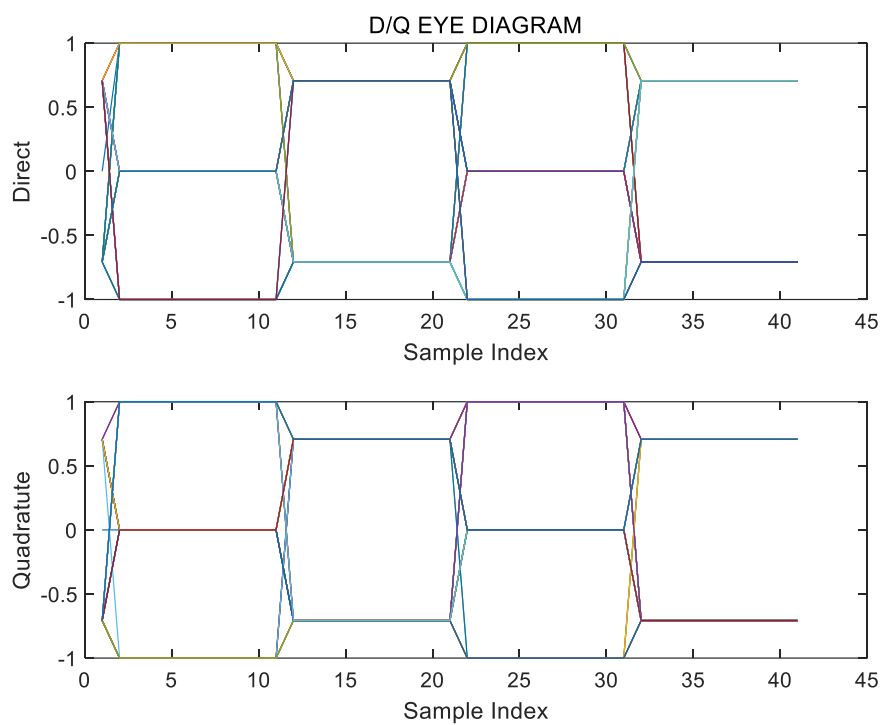
### (1) 菜单



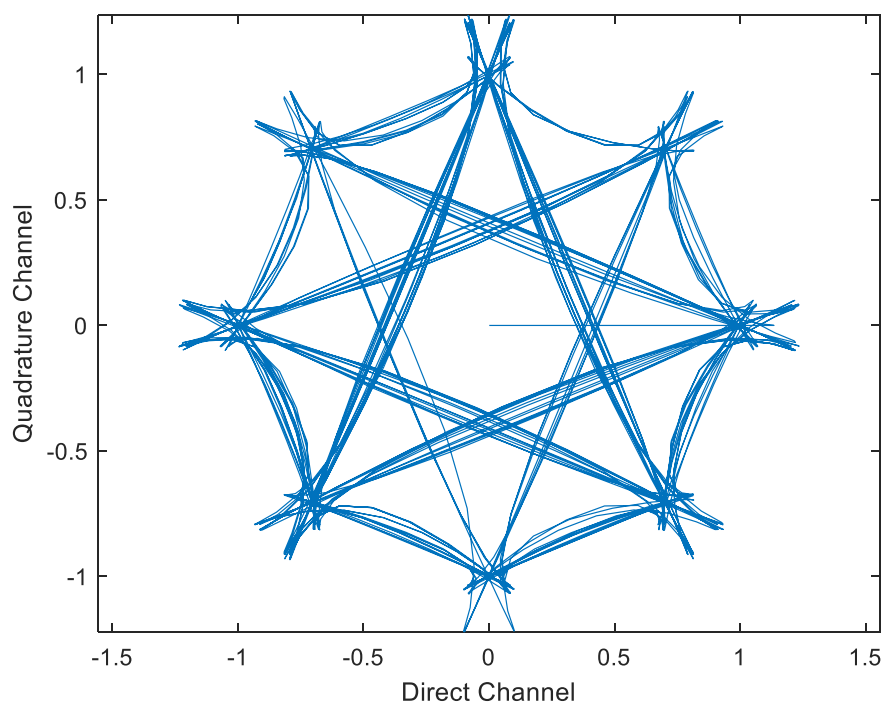
### (2) 滤波前的 DQPSK 信号星座图



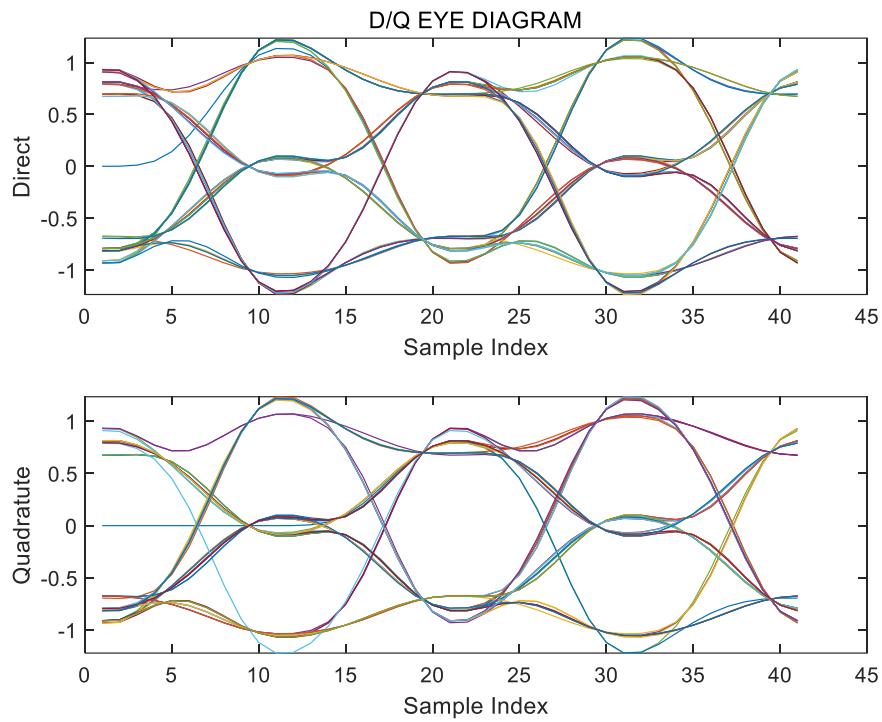
(3) 滤波前的 DQPSK 眼图



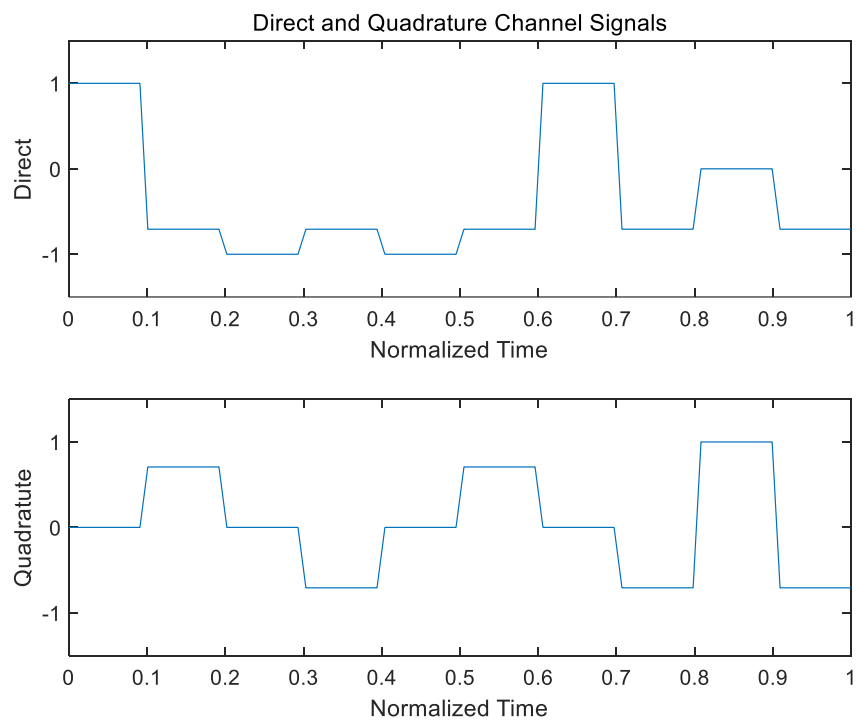
(4) 滤波后的 DQPSK 信号星座图



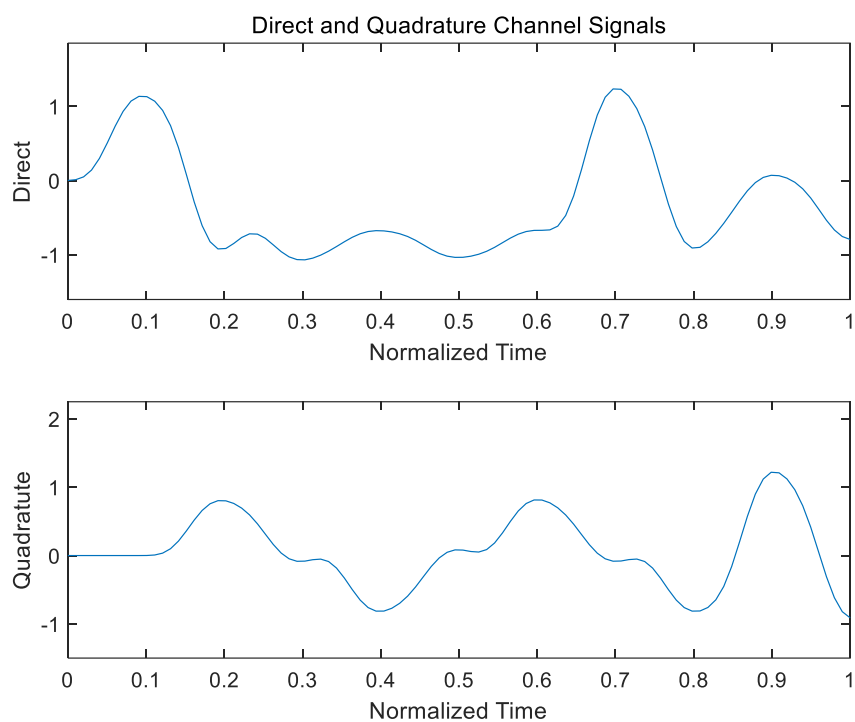
(5) 滤波后的 DQPSK 眼图



(6) 滤波前的同相和正交分量



(7) 滤波后的同相和正交分量



通过与已经给出的  $\pi/4$  DQPSK 发射机进行联合仿真，验证了接收机可以正常工作。