

# 通信系统仿真

## 第6章 系统信道的建模与仿真02

何晨光

哈尔滨工业大学

电子与信息工程学院

*Communication Research Center*



# 第6章系统信道的建模与仿真

- 1 时变系统的建模和仿真
  - 2 通信信道仿真
  - 3 多径衰落信道
    - 3.1 多径衰落信道模型
    - 3.2 随机过程模型
    - 3.3 散射多径衰落信道的仿真
    - 3.4 离散多径衰落信道的仿真
-



## 2 通信信道仿真

物理通信信道如电缆、波导、自由空间和光纤通常表现为线性的。某些信道(如移动无线信道)虽然也表现出线性，但具有随机的时变特性。

**时不变信道的传递函数模型：**假设信道本质上是静态的(即信道具有时不变的冲激响应)，由于信道中的固定延迟，这种信道会产生特定的频率响应。

- 如果信道对信源在其带宽的响应具有恒定增益，则称这个时不变信道的传递函数为“**平坦的**”。
  - 如果信道对信源在其带宽的响应增益变化显著，则称该信道为“**频率选择性的**”。
-



## 2 通信信道仿真

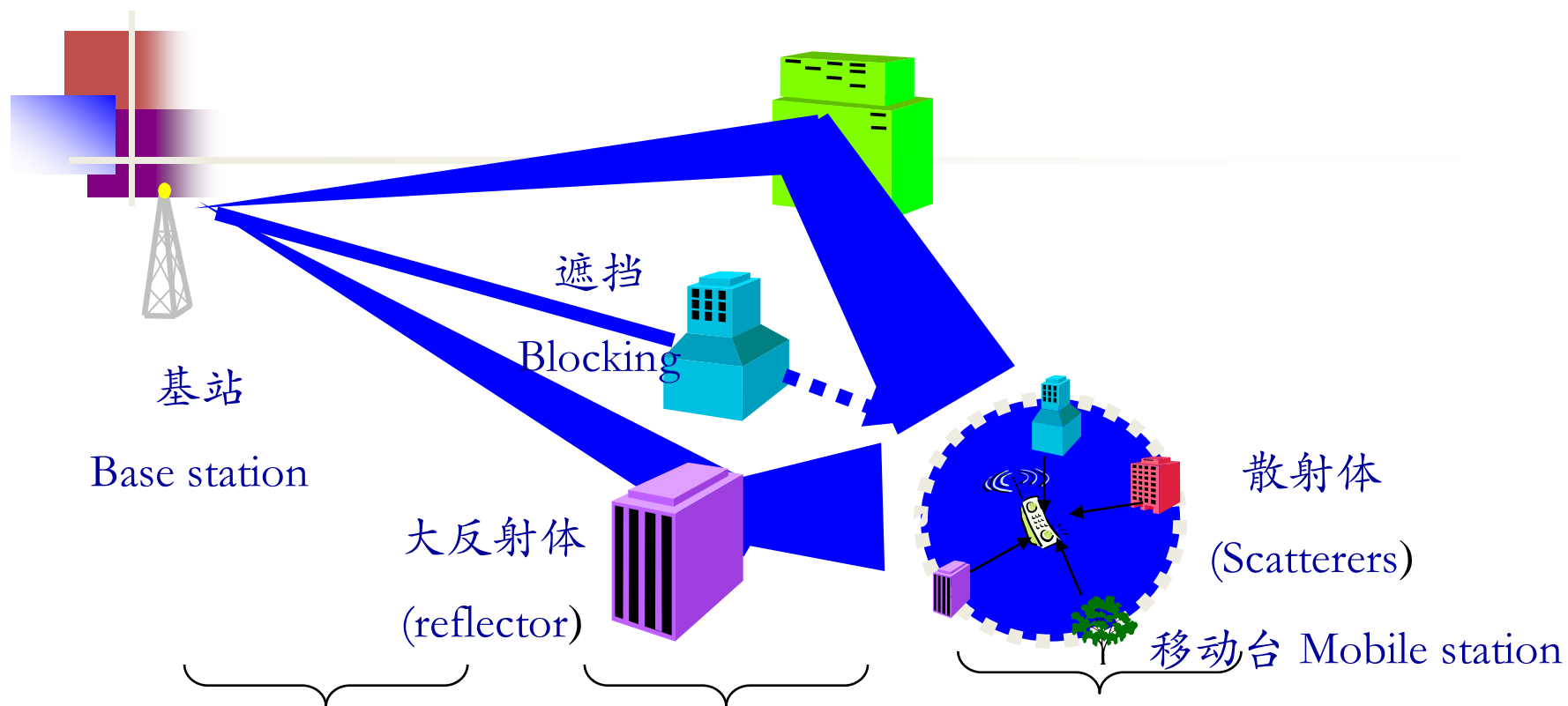
物理通信信道如电缆、波导、自由空间和光纤通常表现为线性的。某些信道(如移动无线信道)虽然也表现出线性，但具有随机的时变特性。

**时变信道的抽头延时线模型**：假设信道特性随时间而变化。

如果在传输信号最小时间间隔内，信道发生变化，则称该信道为“**快衰落**”信道。

如果信道在信源的大量连续时间间隔内保持静态，则称该信道为“**慢衰落**”信道。

---



电波衰减随着移动台到基站的距离增大而增加.

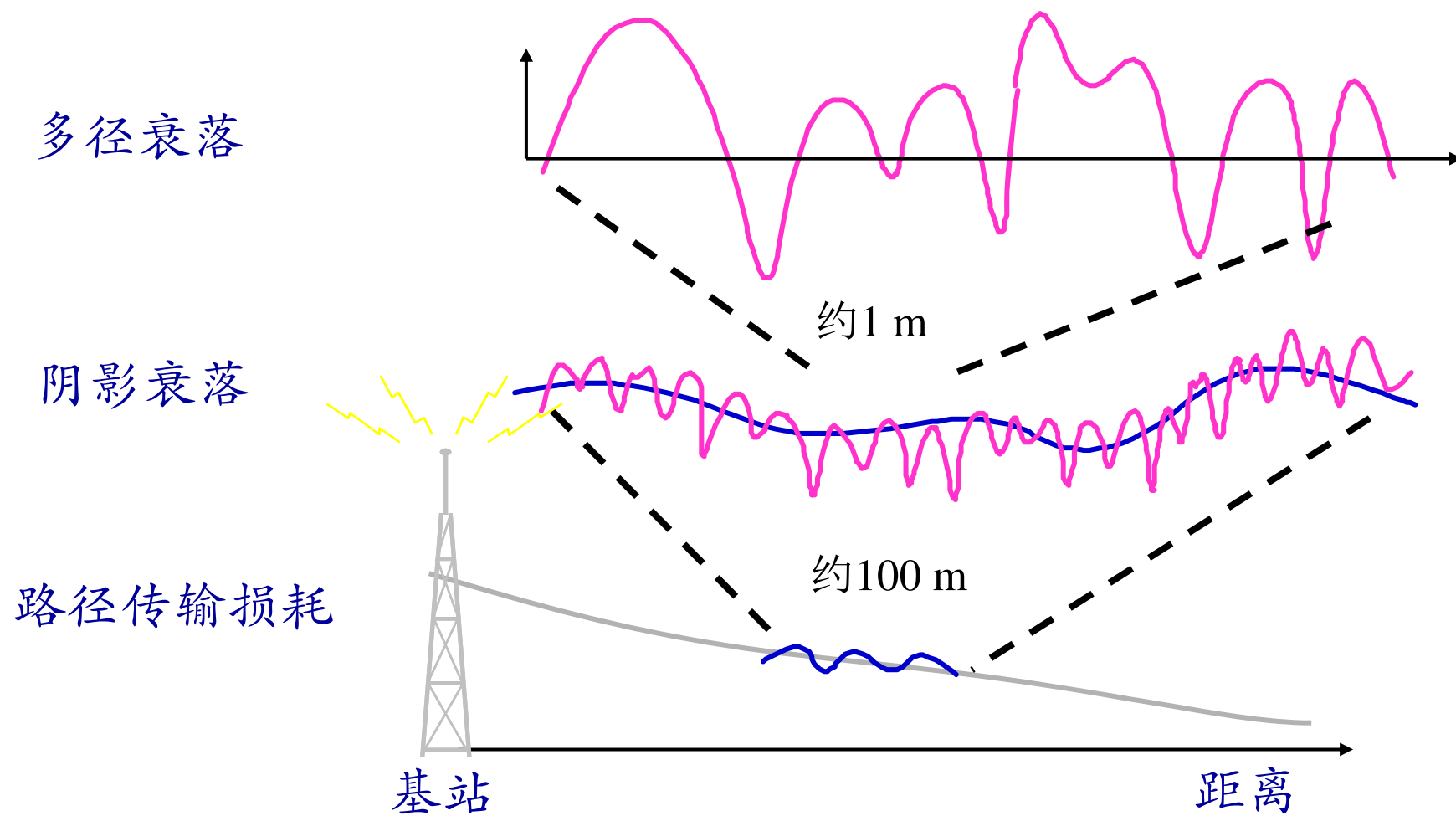
由于基站与移动台之间的建筑物等对电波的遮挡与反射, 到达移动台周边的电波能量有缓慢的变动.

由移动台周边散射物对电波的反射, 折射与散射, 这些波的相互干涉使得接收功率产生瞬时的变动.

大尺度衰落 Large scale fading

小尺度衰落 Small scale fading

## 2 通信信道仿真





## 2 通信信道仿真

### 移动信道衰落模型

#### 大尺度衰落

- 路径传输损耗：长距离范围接收信号强度缓慢变化的规律；
- 阴影衰落：它是重叠在大尺度传播特性中值电平上的平均功率变化；

#### 小尺度衰落

- 多径衰落：短距离或短时间内接收信号强度的快速变化。
-



### 3 多径衰落信道

多径和移动导致的衰落是在无线信道中对性能影响最严重的两种现象。

在任何无线通信信道中，发送和接收天线之间通常存在多于一条的信号传播路径。

多径的出现可能是因为大气的反射或折射，或建筑物和其他物体的反射，多径和衰落可能出现在所有的无线通信系统中。

---





## 3.1 多径衰落信道模型

在N条路径的情况下，信道的输出(移动接收机的输入信号)是

$$y(t) = \sum_{n=1}^N a_n(t)x(t - \tau_n(t))$$

其中。 $a_n(t)$ 和 $\tau_n(t)$ 表示与第N条多径分量相关的衰减和传播延迟。

延迟和衰减都表示为时间的函数，表明在汽车移动时，**衰减、延迟以及多径分量的个数**通常都是时间的函数。

---

假设信道的输入(发送信号)是一个经过调制的信号, 其形式如下  $x(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \phi(t))$

$$y(t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) x(t - \tau_n(t)) \quad \downarrow$$

$$y(t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) A(t - \tau_n(t)) \cos [2\pi f_c (t - \tau_n(t)) + \phi(t - \tau_n(t))]$$

$$y(t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) A(t - \tau_n(t)) \cdot \operatorname{Re} \{ \exp [j\phi(t - \tau_n(t))] \exp [-j2\pi f_c \tau_n(t)] \exp (j2\pi f_c t) \}$$

$$y(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N a_n(t) A(t - \tau_n(t)) \exp [j\phi(t - \tau_n(t))] \cdot \exp [-j2\pi f_c \tau_n(t)] \exp (j2\pi f_c t) \right\}$$

$a_n(t)$  和  $A_n(t)$  都是实函数

假设信道的输入(发送信号)是一个经过调制的信号, 其形式如下  $x(t) = A(t) \cos(2\pi f_c t + \phi(t))$

发送信号的复包络:  $\tilde{x}(t) = A(t) \exp[j\phi(t)]$

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

$$y(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N a_n(t) A(t - \tau_n(t)) \exp[j\phi(t - \tau_n(t))] \cdot \exp[-j2\pi f_c \tau_n(t)] \exp(j2\pi f_c t) \right\}$$

$$y(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N \underline{a_n(t)} \underline{\tilde{x}(t - \tau_n(t)) \exp[-j2\pi f_c \tau_n(t)]} \exp(j2\pi f_c t) \right\}$$

定义复路径衰减:  $\tilde{a}_n(t) = a_n(t) \exp[-j2\pi f_c \tau_n(t)]$

$$y(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N \tilde{a}_n(t) \tilde{x}(t - \tau_n(t)) \exp(j2\pi f_c t) \right\}$$

### 3.1 多径衰落信道模型

$$y(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{n=1}^N \tilde{a}_n(t) \tilde{x}(t - \tau_n(t)) \exp(j2\pi f_c t) \right\}$$

因此，接收机输入的复包络：

$$\tilde{y}(t) = \sum_{n=1}^N \tilde{a}_n(t) \tilde{x}(t - \tau_n(t))$$

上式定义的信道输入-输出关系对应于一个线性时变系统，其冲激响应为

$$\tilde{h}(\tau, t) = \sum_{n=1}^N \tilde{a}_n(t) \delta(t - \tau_n(t))$$

$\tilde{h}(\tau, t)$  是假设在时间  $t - \tau$  时刻加上脉冲后时刻  $t$  测得的信道冲激响应。因此， $\tau$  表征了流逝时间 (elapsed time) 或传播延迟。

### 3.1 多径衰落信道模型

如果传播中不存在运动或其他改变，即使出现了多径。输入-输出关系依旧是非时变的。那么，第 $n$ 条传播路径的传输延迟和衰减都是常数(信道是固定的)，即

$$\tilde{y}(t) = \sum_{n=1}^N \tilde{a}_n \tilde{x}(t - \tau_n)$$

对一固定的信道情况，信道可以在时域内表示为一个冲激响应，表示为：

$$\tilde{h}(\tau) = \sum_{n=1}^N \tilde{a}_n \delta(\tau - \tau_n)$$

在频域中，表示为：

$$H(f) = \sum_{n=1}^N \tilde{a}_n \exp(-j2\pi f\tau_n)$$

所以，对时不变的情况，信道简单地扮演了一个作用于发送信号的滤波器的角色。



## 3.1 多径衰落信道模型 例5

例5：对有3条固定路径的AWGN多径信道中的QPSK系统进行BER性能仿真，并与在理想的AWGN信道(没有多径)中同样系统的BER性能进行比较。

为了简化仿真模型，作如下假设：

1. 信道中有三条路径，包括一条是没有衰落的LOS路径和两条具有瑞利分量的路径。与各路径相应的接收功率级以及路径间的延迟差是仿真的参数。
  2. 信道的瑞利衰落仅影响发送信号的幅度，不影响瞬时相位。
  3. 在符号间隔内各多径分量的衰减幅度是常数，并与相邻间隔无关(不需要多普勒频谱成形)。
  4. 没有使用发射机滤波，接收机模型也是理想的积分-清除接收机。
-

### 3.1 多径衰落信道模型 例5

接收信号可以写为

$$\tilde{y}(t) = \underbrace{a_0 \tilde{x}(t)}_{\text{LOS}} + \underbrace{a_1 R_1 \tilde{x}(t)}_{\text{Rayleigh}} + \underbrace{a_2 R_2 \tilde{x}(t - \tau)}_{\text{Delayed Rayleigh}}$$

其中 $R_1$ 和 $R_2$ 是表示两条路径瑞利衰落两个独立瑞利随机变量， $\tau$ 是两个瑞利分量的相对延迟。

对上式作傅里叶变换为：

$$\tilde{Y}(f) = a_0 \tilde{X}(f) + a_1 R_1 \tilde{X}(f) + a_2 R_2 \tilde{X}(f) \exp(-j2\pi f\tau)$$

由此可以推导出信道传递函数为

$$\tilde{H}(f) = a_0 + a_1 R_1 + a_2 R_2 \exp(-j2\pi f\tau)$$

上式清楚的说明如果在信号所占频段内 $f\tau$ 的乘积不能忽略不计，则信道是频率选择性的，而这又将导致时延扩展和ISI。

### 3.1 多径衰落信道模型 例5

$a_0$ 、 $a_1$ 和 $a_2$ 的值决定了三个多径分量的相对功率级 $P_0$ 、 $P_1$ 和 $P_2$ 。

Scenario	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$\tau$ (samples)	Comments
1	1.0	0	0	0	Validation
2	1.0	0.2	0	0	Ricean flat fading
3	1.0	0	0.2	0	Ricean flat fading
4	1.0	0	0.2	8	Ricean frequency selective fading
5	0	1.0	0.2	0	Rayleigh flat fading
6	0	1.0	0.2	8	Rayleigh frequency selective fading

上表中给出的六组参数值，对于每种情形，都使用半解析的估计方法来估算BER。在表中，延迟是用采样周期来表示的。由于仿真的采样频率是每个符号16样点，因此， $\tau = 8$ 对应半个采样周期的延迟。





## 3.1 多径衰落信道模型 例5

```
% Default parameters
%
NN = 256;                               % number of symbols
tb = 0.5;                               % bit time
fs = 16;                               % samples/symbol
ebn0db = [1:2:14];                      % Eb/N0 vector
%
% Establish QPSK signals
%
x = random_binary(NN,fs)+i*random_binary(NN,fs); % QPSK signal
```

产生QPSK信号

---

(代码见c603.m)

## 3.1 多径衰落信道模型 例5

通过功率和时延值确定仿真场景

```
% Input powers and delays
%
p0 = input('Enter P0 > ');
p1 = input('Enter P1 > ');
p2 = input('Enter P2 > ');
delay = input('Enter tau > ');
delay0 = 0; delay1 = 0; delay2 = delay;
```

Scenario	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$\tau$ (samples)	Comments
1	1.0	0	0	0	Validation
2	1.0	0.2	0	0	Ricean flat fading
3	1.0	0	0.2	0	Ricean flat fading
4	1.0	0	0.2	8	Ricean frequency selective fading
5	0	1.0	0.2	0	Rayleigh flat fading
6	0	1.0	0.2	8	Rayleigh frequency selective fading

## 3.1 多径衰落信道模型 例5

```
% Set up the Complex Gaussian (Rayleigh) gains
```

```
%
```

```
gain1 = sqrt(p1)*abs(randn(1,NN) + i*randn(1,NN));
```

```
gain2 = sqrt(p2)*abs(randn(1,NN) + i*randn(1,NN));
```

```
for k = 1:NN
```

```
    for kk=1:fs
```

```
        index=(k-1)*fs+kk;
```

```
        ggain1(1,index)=gain1(1,k);
```

```
        ggain2(1,index)=gain2(1,k);
```

```
    end
```

```
end
```

```
y1 = x;
```

```
for k=1:delay2
```

```
    y2(1,k) = y1(1,k)*sqrt(p0);
```

```
end
```

```
for k=(delay2+1):(NN*fs)
```

```
    y2(1,k)= y1(1,k)*sqrt(p0) + ...
```

```
        y1(1,k-delay1)*ggain1(1,k)+...
```

```
        y1(1,k-delay2)*ggain2(1,k);
```

```
end
```

确定复高斯增益

按下式生成输出信号

$$\tilde{y}(t) = \underbrace{a_0 \tilde{x}(t)}_{\text{LOS}} + \underbrace{a_1 R_1 \tilde{x}(t)}_{\text{Rayleigh}} + \underbrace{a_2 R_2 \tilde{x}(t - \tau)}_{\text{Delayed Rayleigh}}$$

(代码见c603.m)

## 3.1 多径衰落信道模型 例5

```
% Matched filter
```

```
%
```

```
b = ones(1,fs); b = b/fs; a = 1;
```

```
y = filter(b, a, y2);
```

匹配滤波

```
[cor lags] = vxcorr(x,y);
```

```
[cmax nmax] = max(abs(cor));
```

```
timelag = lags(nmax);
```

```
theta = angle(cor(nmax))
```

```
y = y*exp(-i*theta);
```

通过互相关计算时延

(代码见c603.m)

## 3.1 多径衰落信道模型 例5

采用半解析的方法，同第2章例9

```
% Noise BW calibration
```

```
%
```

```
hh = impz(b,a); ts = 1/16; nbw = (fs/2)*sum(hh.^2);
```

```
index = (10*fs+8:fs:(NN-10)*fs+8);
```

```
xx = x(index);
```

```
yy = y(index-timelag+1);
```

```
[n1 n2] = size(y2); ny2=n1*n2;
```

```
eb = tb*sum(sum(abs(y2).^2))/ny2; 调整输入端的比特能量
```

```
eb = eb/2;
```

```
[peideal,pesystem] = qpsk_berest(xx,yy,ebn0db,eb,tb,nbw);
```

```
figure
```

```
semilogy(ebn0db,peideal,'b*-',ebn0db,pesystem,'r+-')
```

```
xlabel('E_b/N_0 (dB)'); ylabel('Probability of Error'); grid
```

```
axis([0 14 10^(-10) 1])
```

$$B_N = \int_0^\infty |H(f)|^2 df$$

$$P_E = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Q\left(\frac{\widetilde{S}_k}{\sigma_n}\right)$$

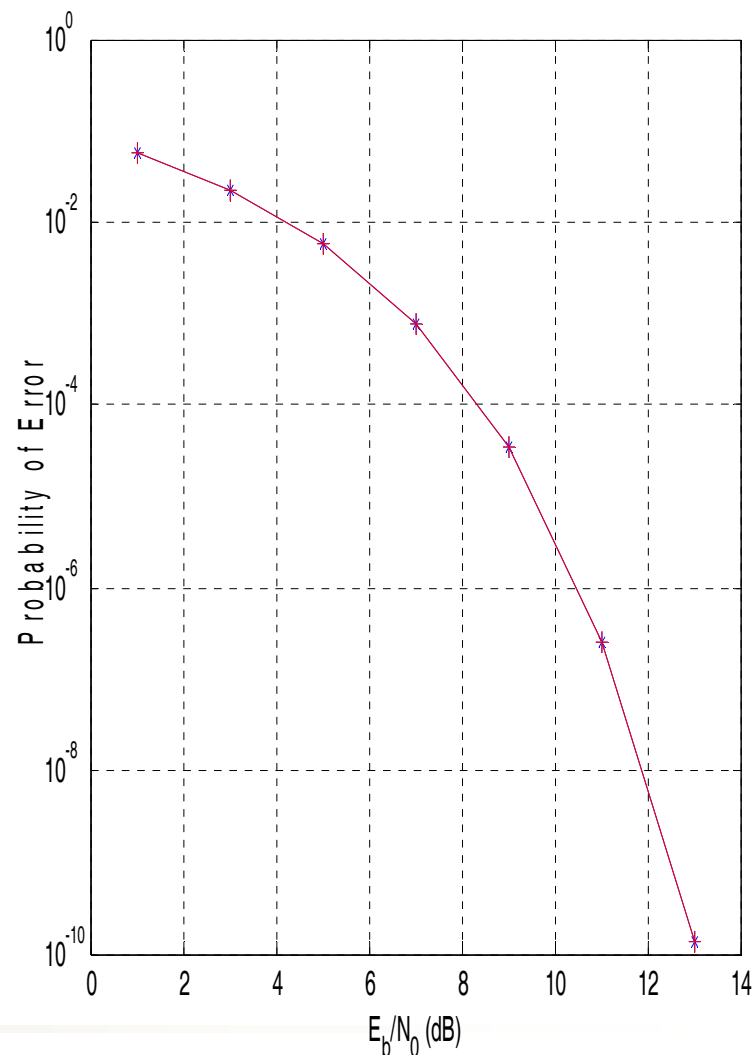
(代码见c603.m)

## 3.1 多径衰落信道模型 例5

```
>> c603_threeray  
Enter P0 > 1  
Enter P1 > 0  
Enter P2 > 0  
Enter tau > 0
```

在情形1中，只出现了一个视距分量，没有多径。因而，这个结果提供了QPSK系统在AWGN环境下运行时的BER半解析估计。

这个仿真起到验证仿真方法论的作用，同时提供了理想QPSK系统的结果。

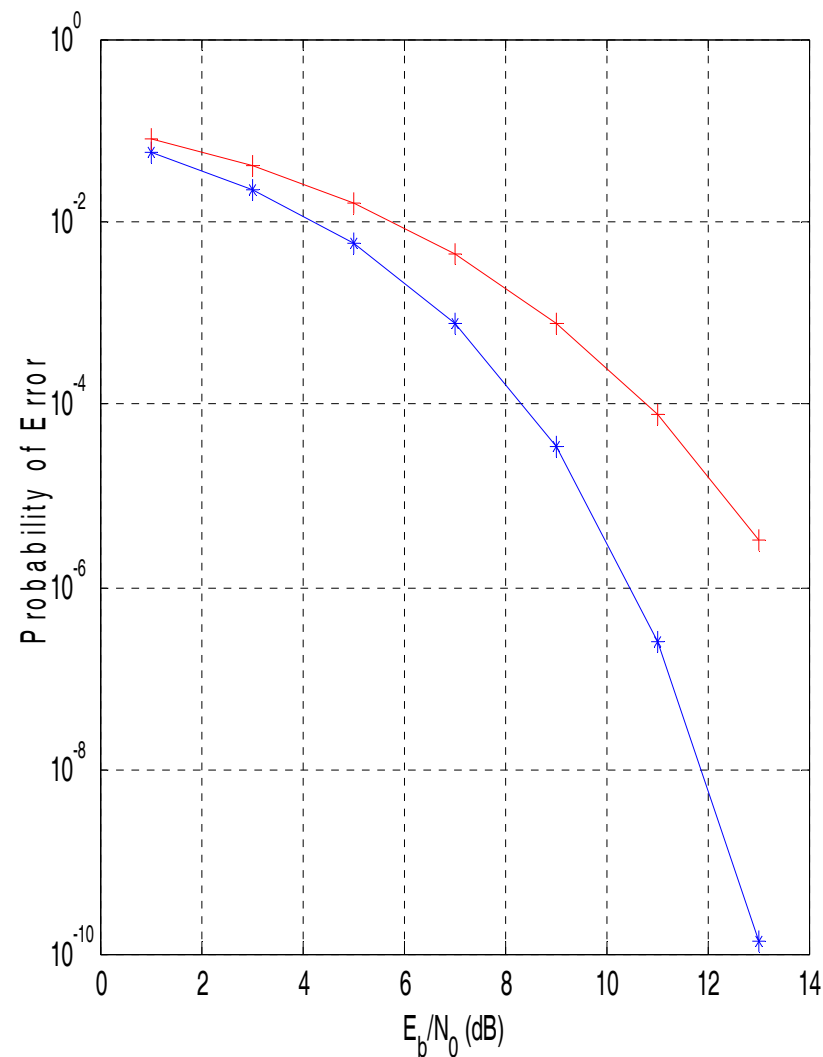


## 3.1 多径衰落信道模型 例5

```
>> c603_threeray  
Enter P0 > 1  
Enter P1 > 0.2  
Enter P2 > 0  
Enter tau > 0
```

情形2在情形1的LOS分量上增加了一个瑞利衰落分量，这导致了莱斯衰落信道。

由于  $\tau=0$ ，情形2是平坦衰落(非频率选择性衰落)。与没有衰落情形1结果相比，BER增加了



## 3.1 多径衰落信道模型 例5

```
>> c603_threeray
```

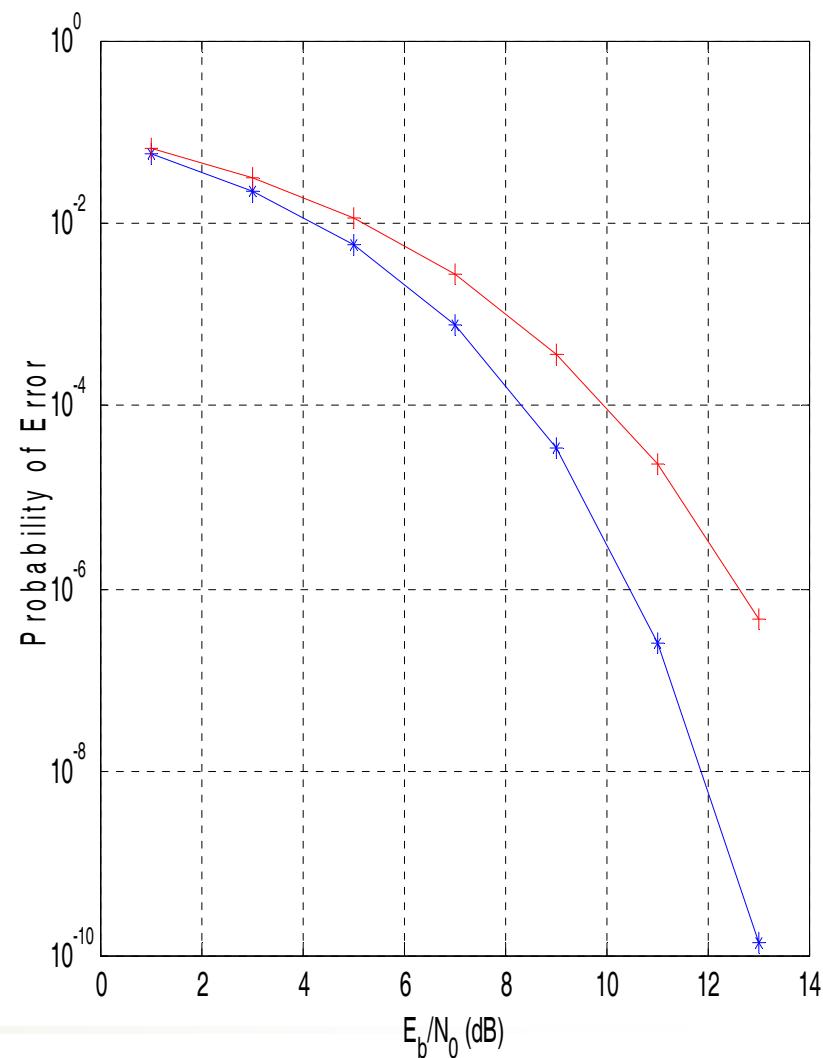
```
Enter P0 > 1
```

```
Enter P1 > 0
```

```
Enter P2 > 0.2
```

```
Enter tau > 0
```

情形3基本上与情形2相同，细微的差别是由于衰落产生过程与情形2中使用的随机数发生器的初始值不同而造成的。

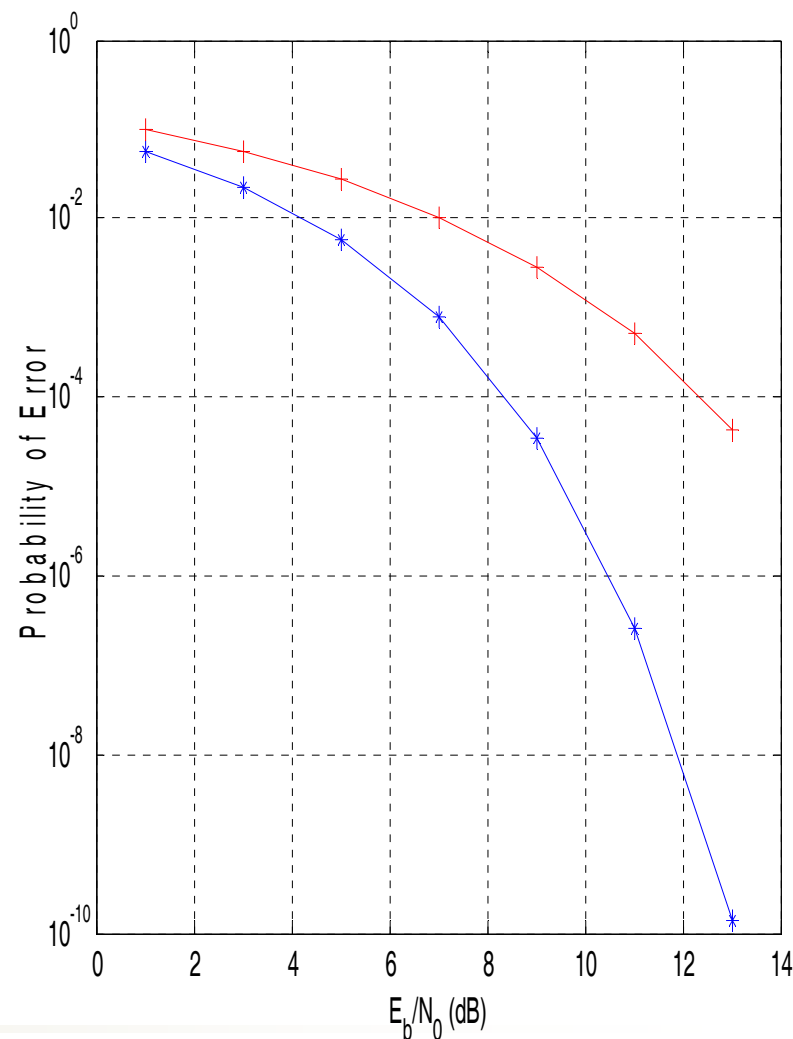




## 3.1 多径衰落信道模型 例5

```
>> c603_threeray  
Enter P0 > 1  
Enter P1 > 0  
Enter P2 > 0.2  
Enter tau > 8
```

情形4的衰落变成了频率选择性的，系统性能进一步恶化。

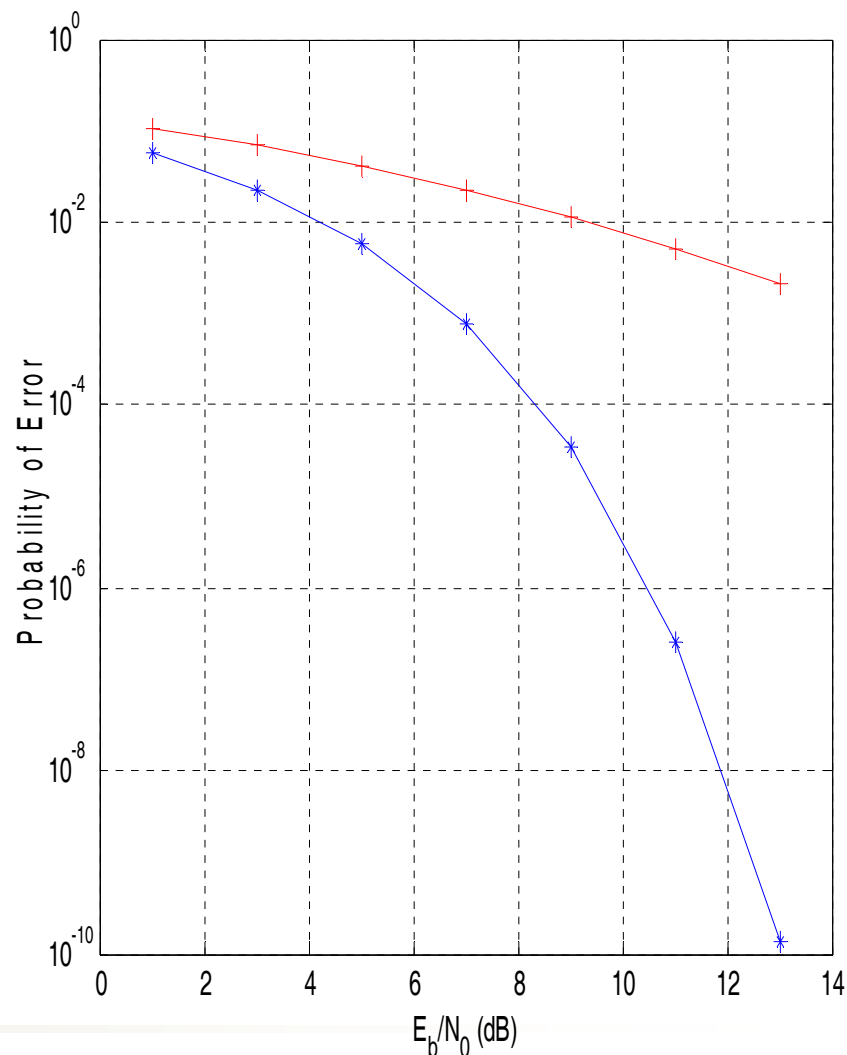


## 3.1 多径衰落信道模型 例5

```
>> c603_threeray  
Enter P0 > 0  
Enter P1 > 1  
Enter P2 > 0.2  
Enter tau > 0
```

情形5中，接收机输入端没有出现视距分量。由于没有时延，所以是瑞利平坦衰落。

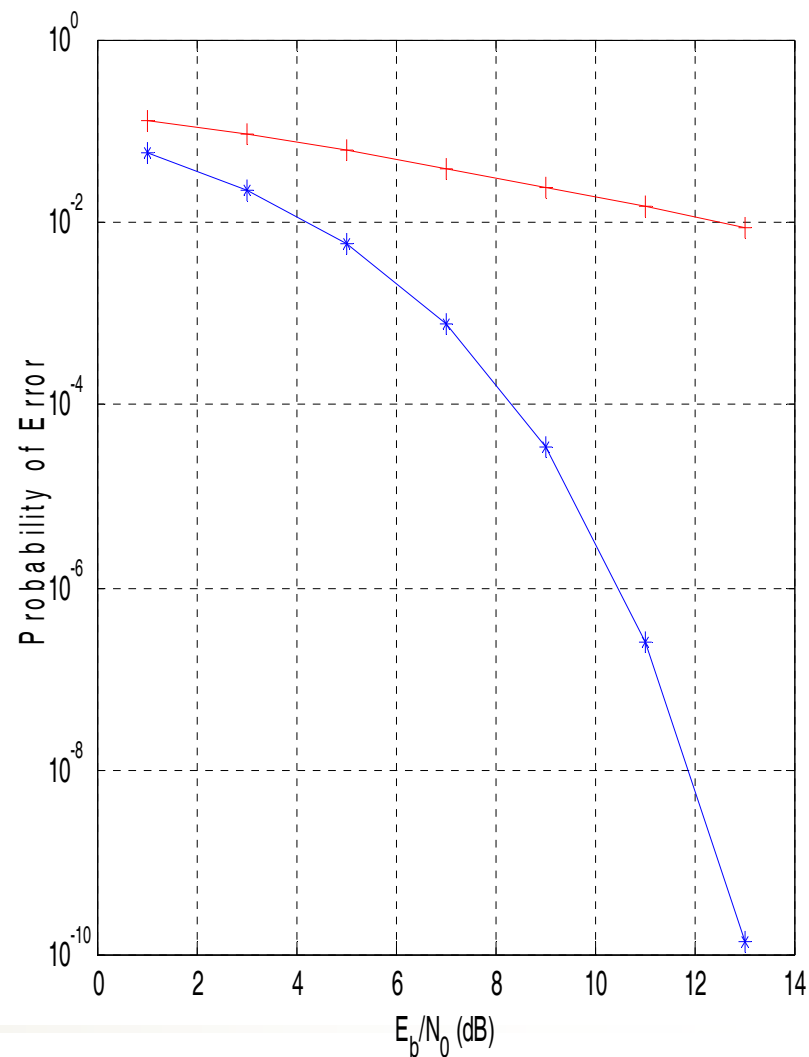
与前面4种结果比较，即使是平坦衰落情形，它的性能也比有视距分量存在的任何情形都要差。



## 3.1 多径衰落信道模型 例5

```
>> c603_threeray  
Enter P0 > 0  
Enter P1 > 1  
Enter P2 > 0.2  
Enter tau > 8
```

情形6中，接收机输入端没有出现视距分量。  
衰落变成了瑞利频率选择性的，系统性能进一步恶化。





## 3.2 随机过程模型

多径衰落信道道都被建模为具有复低通等效响应  $\tilde{c}(\tau, t)$  的线性时变系统。

如果有N个离散的多径分量存在，则信道的输出是N个被延迟和衰减的输入信号之和。因此有

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \tilde{a}_k(t) \tilde{x}(t - \tau_k(t))$$

冲激响应为

$$\tilde{c}(\tau, t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \tilde{a}_k(t) \delta(\tau - \tau_k(t))$$

其中N(t)为多径分量的数量，而  $\tilde{a}_k(t)$  和  $\tau_k(t)$  是在t时刻第k条路径的复衰减和延迟。

## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型

由衰落引起的接收信号随机波动可以被建模为时间 $t$ 的随机过程 $\tilde{c}(\tau, t)$ 。

如果接收信号是各路径的大量散射分量之和，则由中心极限定理可知， $\tilde{c}(\tau, t)$  表示为时间 $t$ 的复高斯过程。

如果 $\tilde{c}(\tau, t)$  具有零均值，则包络 $R = |\tilde{c}(\tau, t)|$  具有形式如下的瑞利概率密度函数

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad r > 0$$

如果 $\tilde{c}(\tau, t)$  具有非零均值，包络具有形式如下的莱斯概率密度函数

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right), \quad r > 0$$



## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型

根据  $\tilde{c}(\tau, t)$  的pdf来确定信道是瑞利衰落信道或莱斯衰落信道，也可能具有其他分布如Nakagami和Weibul分布。

$\tilde{c}(\tau, t)$  的概率密度函数描述了复冲激响应的瞬时值，而时变特性可以使用变量 $t$ 的随机过程适当的自相关函数或功率谱密度来建模。

---



## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型

对信道的时变特性进行数学建模，可将视为一个参数 $\alpha$ 的平稳随机过程，其自相关函数为

$$R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau_1, \tau_2, \alpha) = E \{ \tilde{c}^*(\tau_1, t) \tilde{c}(\tau_2, t + \alpha) \}$$

在大多数的多径信道中，假设对应于不同延迟(即不同路径)的衰减和相位偏移不相关。那么用  $R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, \alpha)$  表示自相关函数，则有

$$R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, \alpha) = E \{ \tilde{c}^*(\tau, t) \tilde{c}(\tau, t + \alpha) \}$$

对自相关函数作傅里叶变换，我们可以得到衰落信道的频域模型，用功率谱密度表示为

$$S(\tau, \lambda) = F \{ (R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, \alpha)) \} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, \alpha) \exp(-j2\pi\lambda\alpha) d\alpha$$

## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型

$$S(\tau, \lambda) = F \{ (R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, \alpha)) \} = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, \alpha) \exp(-j2\pi\lambda\alpha) d\alpha$$

$S(\tau, \lambda)$  被称为信道的散射函数，是一个有两个自变量的函数，其中一个是时域变量(延迟)，另一个是频域变量(多普勒频率变量)。散射函数以延迟和多普勒频率的函数形式，给出了一个信道平均功率输出的度量。

$$p(\tau) = R_{\tilde{c}\tilde{c}}(\tau, 0) = E \left\{ |\tilde{c}(\tau, t)|^2 \right\}$$

上式表示作为延迟函数的平均接收功率，被称为功率-延迟曲线

功率-延迟曲线：

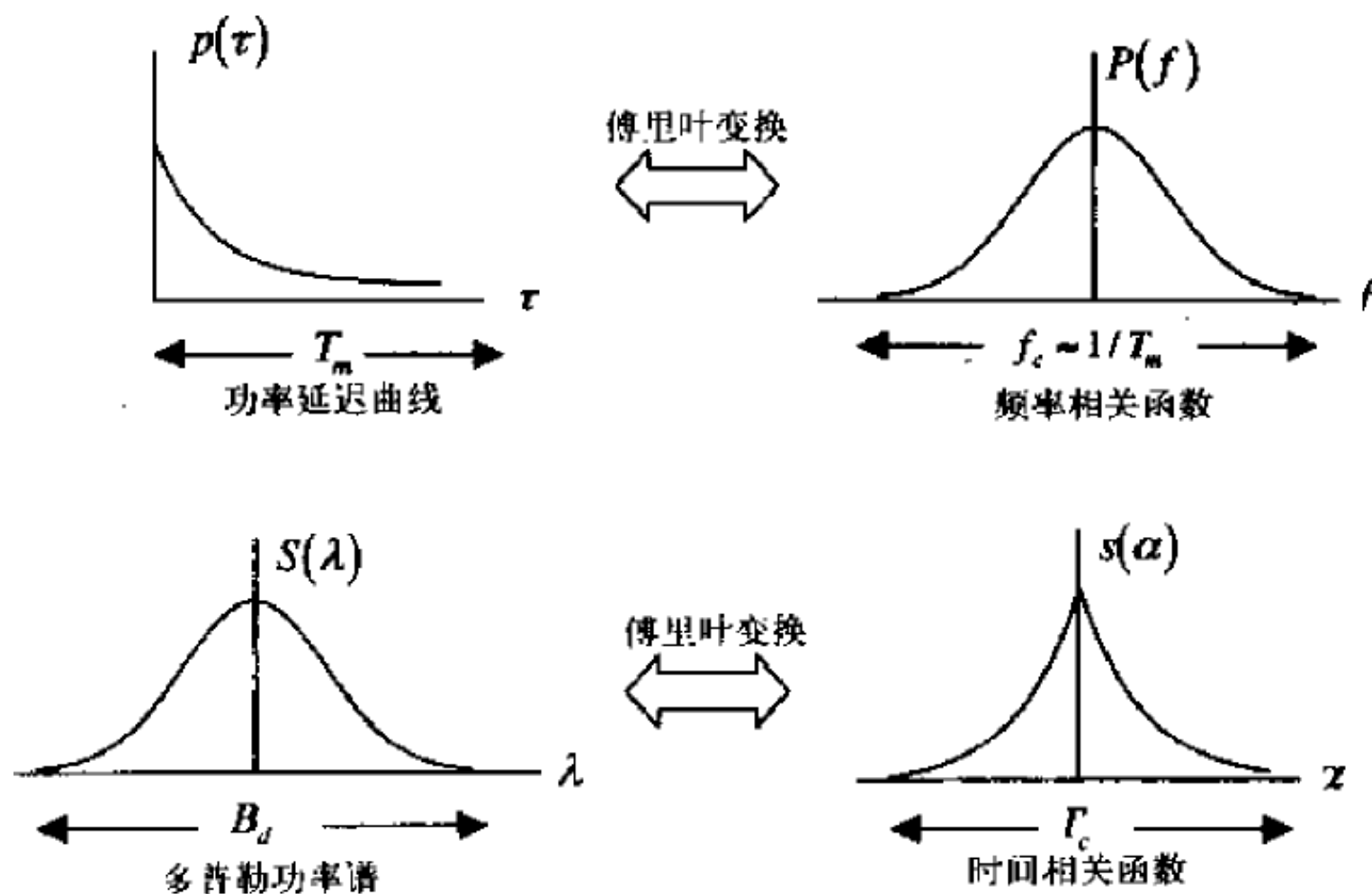
$$p(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, \lambda) d\lambda$$

多普勒功率谱：

$$S_d(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, \lambda) d\tau$$



## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型



## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型

多径扩展是反映多径效应严重程度的重要指标。

(最大)时延扩展  $T_{\max}$  表示在此延迟值以外接收功率  $p(\tau)$  很小；

均方根的时延扩展  $\sigma_\tau$  定义为  $\sigma_\tau = [\langle \tau^2 \rangle - \langle \tau \rangle^2]^{1/2}$   
其中  $\langle x \rangle$  表示  $x$  的时间均值，而  $\langle \tau^k \rangle = \frac{\int \tau^k p(\tau) d\tau}{\int p(\tau) d\tau}$

当时延扩展与系统的符号周期在同一量级或大于它时，延迟的多径分量将在不同的符号间隔到达并引起码间干扰，影响系统性能，等价于信道的时变传递函数的带宽小于信号带宽。此时，信道具有带限滤波器的特性，被称为具有频率选择性。



## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型

如果信道为**非频率选择性**，则最大的时延扩展要远远小于符号周期 $T_s$ ，即

$$T_{\max} \ll T_s \quad \text{or} \quad \sigma_T < 0.1T_s$$

在非频率选择的情况下，所有的延迟多径分量到达的时段仅为一个符号时间的一小部分。在这种情况下，信道可以用**单一路径来建模**，**输入-输出关系可以表示为乘法**。也就是说

$$\tilde{y}(t) = \tilde{a}(t) \tilde{x}(t)$$

---



## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型

对于频率选择性型信道

$$T_{\max} \gg T_s \quad \text{or} \quad \sigma_T > 0.1T_s$$

输入-输出关系为如下卷积

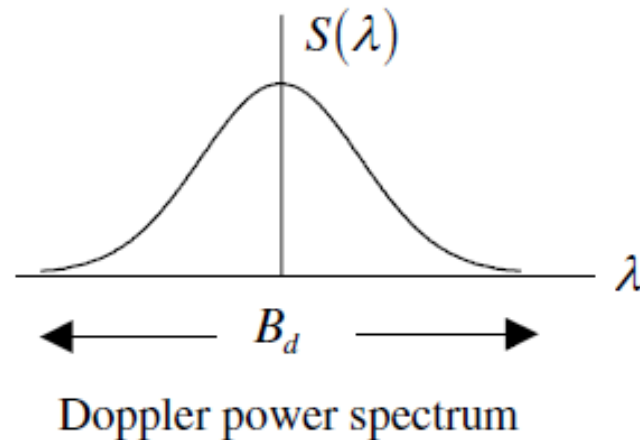
$$\tilde{y}(t) = \tilde{c}(\tau, t) \circledast \tilde{x}(t)$$

---

## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型

多普勒带宽，或多普勒扩展， $B_d$ ，是下式定义的多普勒频  $S_d(\lambda)$  的带宽，指示了信道特性作为时间的函数变化(衰落)多快。

$$S_d(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, \lambda) d\tau$$



## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型

如果多普勒带宽  $B_d$  与信号的带宽  $B_s (\approx 1/T_s)$  在同一数量级上，则信道特性变化(衰落)的速率与符号的速率相当，这时信道被称为**快衰落**，否则信道被称为**慢衰落**。

即

$$B_d \ll B_s \approx 1/T_s \quad (\text{Slow fading channel})$$
$$B_d \gg B_s \approx 1/T_s \quad (\text{Fast fading channel})$$

如果信道是慢衰落，则可以采用瞬时值方法来对信道仿真以获得性能评估。否则，必须直接仿真出信道状况的动态变化。

---



## 3.2 多径衰落信道的随机过程模型

如果多普勒带宽  $B_d$  与信号的带宽  $B_s (\approx 1/T_s)$  在同一数量级上，则信道特性变化(衰落)的速率与符号的速率相当，这时信道被称为**快衰落**，否则信道被称为**慢衰落**。

即

$$B_d \ll B_s \approx 1/T_s \quad (\text{Slow fading channel})$$
$$B_d \gg B_s \approx 1/T_s \quad (\text{Fast fading channel})$$

如果信道是慢衰落，则可以采用瞬时值方法来对信道仿真以获得性能评估。否则，必须直接仿真出信道状况的动态变化。

---



### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

多径分量的数目将随信道的类型而改变。  
在固定微波站之间的微波通信链路中，由于使用了大型定向天线(窄波束)，多径分量的数目将很小。  
而在市区移动通信系统中，由于使用了全向天线，建筑物的反射将会产生大量的多径分量。

在某些情形下，如对流层信道或某些移动无线信道，将接收信号视为多径分量的连续体而不是由一组离散分量组成更恰当，这种情形叫**散射多径**。

为了方便仿真，可以将散射多径信道近似为一个(采样形式的)离散多径信道。

---



### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

散射多径信道是一个线性时变(LTV)系统, 可用连续的而非离散的时变冲激响应  $\tilde{c}(\tau, t)$  来描述。

假设信道的低通输入是带宽B限制在 $r/2$ 这个数量级的带限信号, 其中 $r$ 是符号速率(在带通情况下), 因此应用采样定理可得:

$$\tilde{x}(t - \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)}$$

其中 $T=1/r$ 是采样间隔。

$$\tilde{y}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \tilde{x}(t - \tau) d\tau$$

$$\tilde{y}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right\} d\tau$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \left\{ \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right\} d\tau$$

### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

$$\tilde{y}(\tau) := \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \left\{ \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right\} d\tau$$

$$\tilde{y}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \tilde{g}_n(t)$$

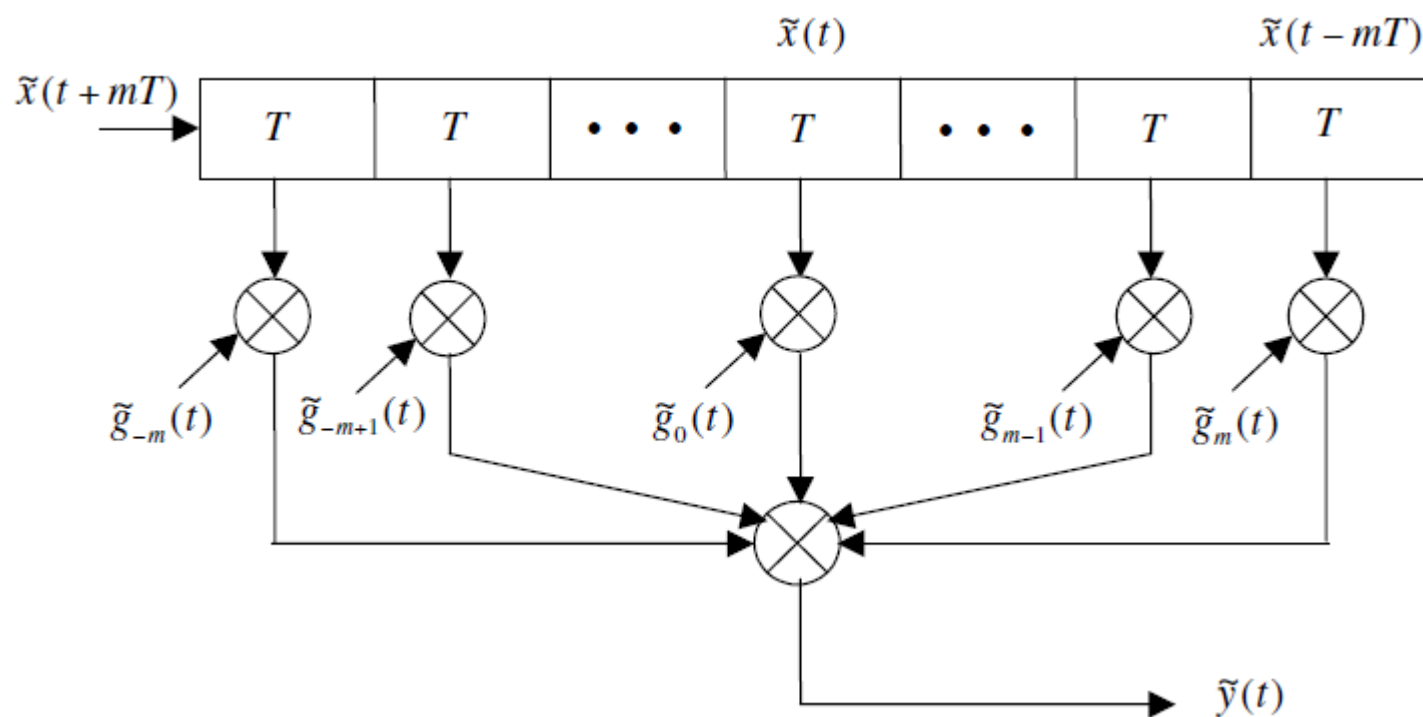
$$\tilde{g}_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \left\{ \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right\} d\tau$$

截短:  $\tilde{g}_n(t) \approx T \tilde{c}(nT, t)$

$$\begin{aligned} \tilde{y}(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t - nT) \tilde{g}_n(t) \approx \sum_{n=-m}^m \tilde{x}(t - nT) \tilde{g}_n(t) \\ &\approx T \sum_{n=-m}^m \tilde{x}(t - nT) \tilde{c}(nT, t) \end{aligned}$$

### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

$$\tilde{y}(\tau) \approx T \sum_{n=-m}^m \tilde{x}(t - nT) \tilde{c}(nT, t)$$



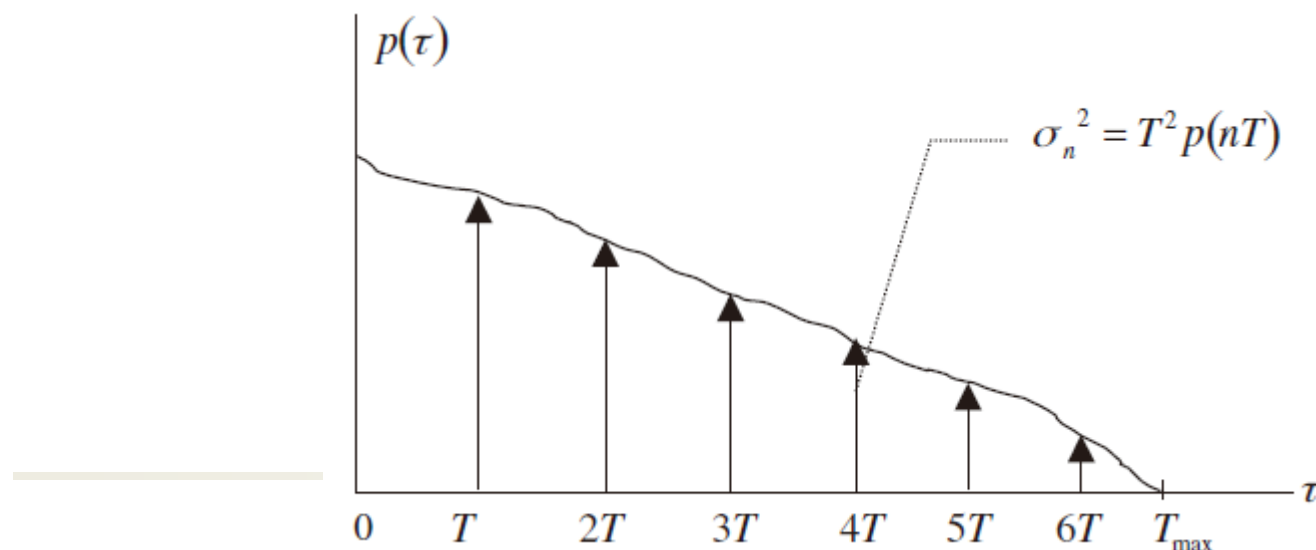
抽头增益为  $\tilde{g}_n(t) \approx T \tilde{c}(nT, t)$  的散射多径信道的延迟抽头线模型

### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

对于瑞利衰落信道，抽头增益是具有零均值，不相关的复高斯过程。每个抽头增益的功率谱密度都是由多普勒频谱决定，于是第 $n$ 个抽头增益的方差  $\sigma_n^2$  为

$$E \left\{ |\tilde{g}_n(t)|^2 \right\} \approx \sigma_n^2 = T^2 E \{ |\tilde{c}(nT, t)|^2 \} = T^2 p(nT)$$

可以从多径功率延迟曲线 $p(\tau)$ 的采样值获得以上方差





### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

特殊情况：信道是时不变的

如果信道是时不变的，则  $\tilde{c}(\tau, t) = \tilde{c}(\tau)$ ，抽头增益变成常数。

$$\tilde{g}_n(t) = \tilde{g}_n \approx T \tilde{c}(nT)$$

此时，抽头增益是线性时不变系统的冲激响应的采样值，而抽头延时线模型退化为在时域作卷积的FIR滤波器。

如果信道是非频率选择性的，则模型中只有一个抽头，即  $\tilde{y}(t) = \tilde{x}(t)\tilde{g}(t)$ ，其中  $\tilde{g}(t)$  为瑞利或莱斯过程。

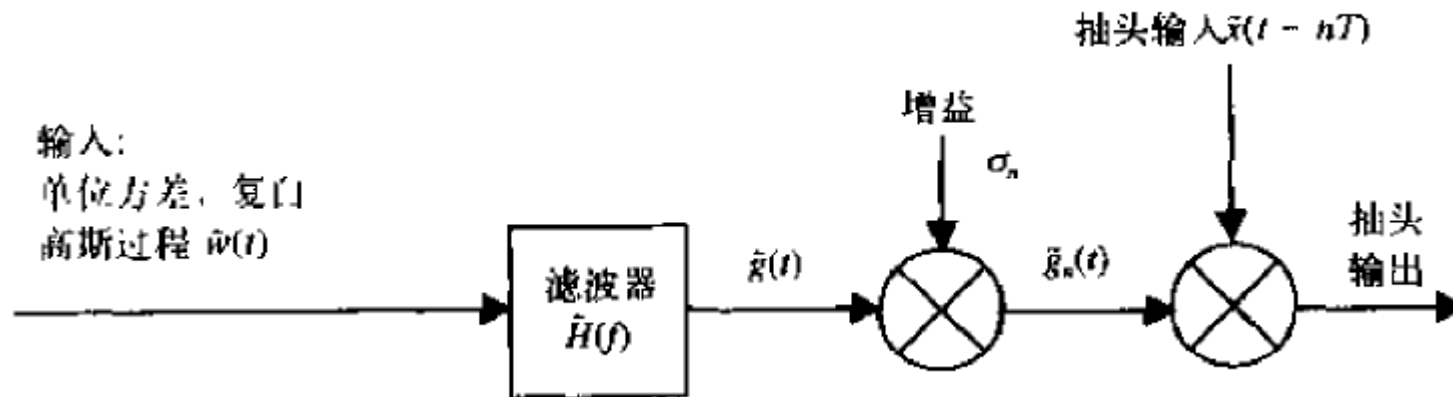
---

### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

#### 抽头增益过程的产生

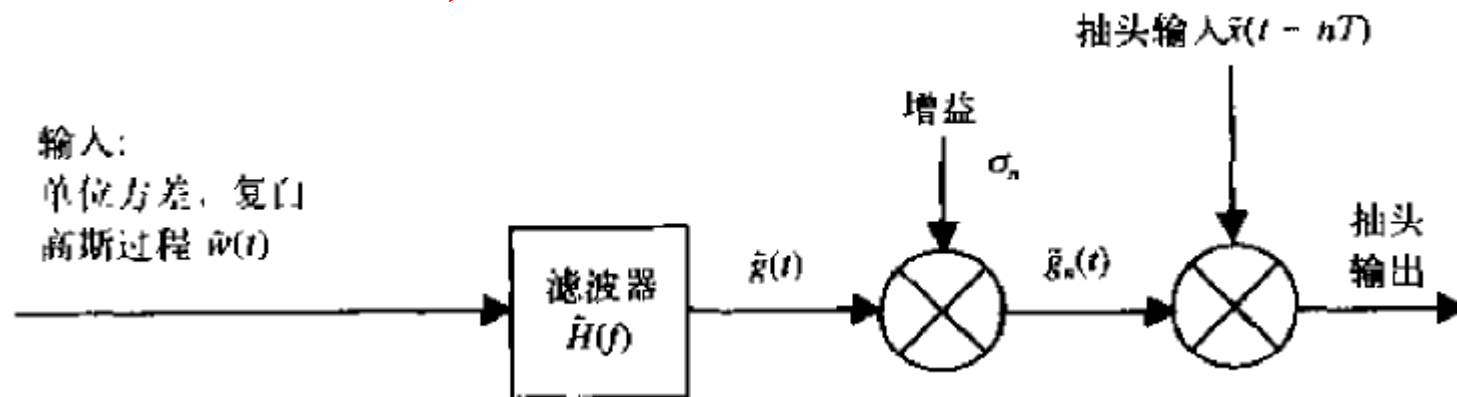
抽头增益过程是具有高斯概率密度函数和任意功率谱密度函数的平稳随机过程。

最简单的抽头增益过程模型假设它们都是不相关的复高斯过程，并具有零均值、相同功率谱密度和不同方差，可以通过对白高斯过程进行滤波来产生。



### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

#### 抽头增益过程的产生



选择滤波器传递函数，使其产生所需的多普勒功率谱密度。选择 $H(f)$ 使

$$S_{\bar{g}\bar{g}}(f) = S_d(f) = S_{\bar{w}\bar{w}}(f) \left| \tilde{H}(f) \right|^2 = \left| \tilde{H}(f) \right|^2$$

$S_{\bar{w}\bar{w}}(f)$  是输入白噪声过程的功率谱密度，设置为1；

$S_{\bar{g}\bar{g}}(f)$  是给定的抽头增益过程的多普勒功率谱密度。

### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

#### 多普勒功率谱密度

在移动应用中，最常使用的多普勒功率谱密度模型假设存在多个多径分量，其中每个分量的延迟不同，但都具有相同的多普勒频谱。

每个多径分量(射线)实际上都是由大量同时到达的、不可分离的多径分量组成，假设信号的到达角度(angle of arrival)在接收天线处为均匀角分布。贝尔实验室的Jakes等人使用这个信道模型推导出反映了多普勒效应和幅度衰落效应的第一个全面的移动无线信道模型——Jakes多普勒频谱

$$S_d(f) = S_{\tilde{g}_n \tilde{g}_n}(f) = \frac{K}{\sqrt{1 - (f/f_d)^2}}, \quad -f_d \leq f \leq f_d$$



### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

多普勒功率谱密度——Jakes多普勒频谱

$$S_d(f) = S_{\tilde{g}_n \tilde{g}_n}(f) = \frac{K}{\sqrt{1 - (f/f_d)^2}}, \quad -f_d \leq f \leq f_d$$

其中 $f_d = v/\lambda$ 是最大多普勒频移， $v$ 是车速，单位为米每秒， $\lambda$ 是载波的波长。该式定义的多普勒频谱适于密集散射环境，如城市区域。

如果而在乡村等空旷环境中由于存在一个强LOS路径，存在莱斯衰落，此时可以使用“莱斯频谱”。莱斯多普勒频谱具有如下形式：

$$S_d(f) = S_{\tilde{g}_n \tilde{g}_n}(f) = \frac{0.41}{\sqrt{1 - (f/f_d)^2}} + 0.91\delta(f \pm 0.7f_d), \quad -f_d \leq f \leq f_d$$

### 3.3 散射多径衰落信道的仿真

例6: Jakes 多普勒频谱:

一个运动中的无线系统的仿真需要产生具有以下功率谱密度的随机过程:

$$S(f) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1-(f/f_d)^2}}, & |f| < f_d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

用来表示多普勒效应。上式中 $f_d$ 表示最大多普勒频移。所求滤波器的传递函数为

$$H(f) = \begin{cases} [1 - (f/f_d)^2]^{-1/4}, & |f| < f_d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

对上式的样本值进行反DFT变化, 得到一个FIR滤波器。这个滤波器即为所求的滤波器。



## 3.3 散射多径衰落信道的仿真

### 产生滤波器的冲激响应

```
% Generate and test the impulse response of the filter.  
%  
fd = 100; % maximum doppler  
impw = jakes_filter(fd); % call to Jakes filter  
fs = 16*fd; ts = 1/fs; % sampling frequency and time  
time = [1*ts:ts:128*ts]; % time vector for plot
```

---

(代码见c604.m)



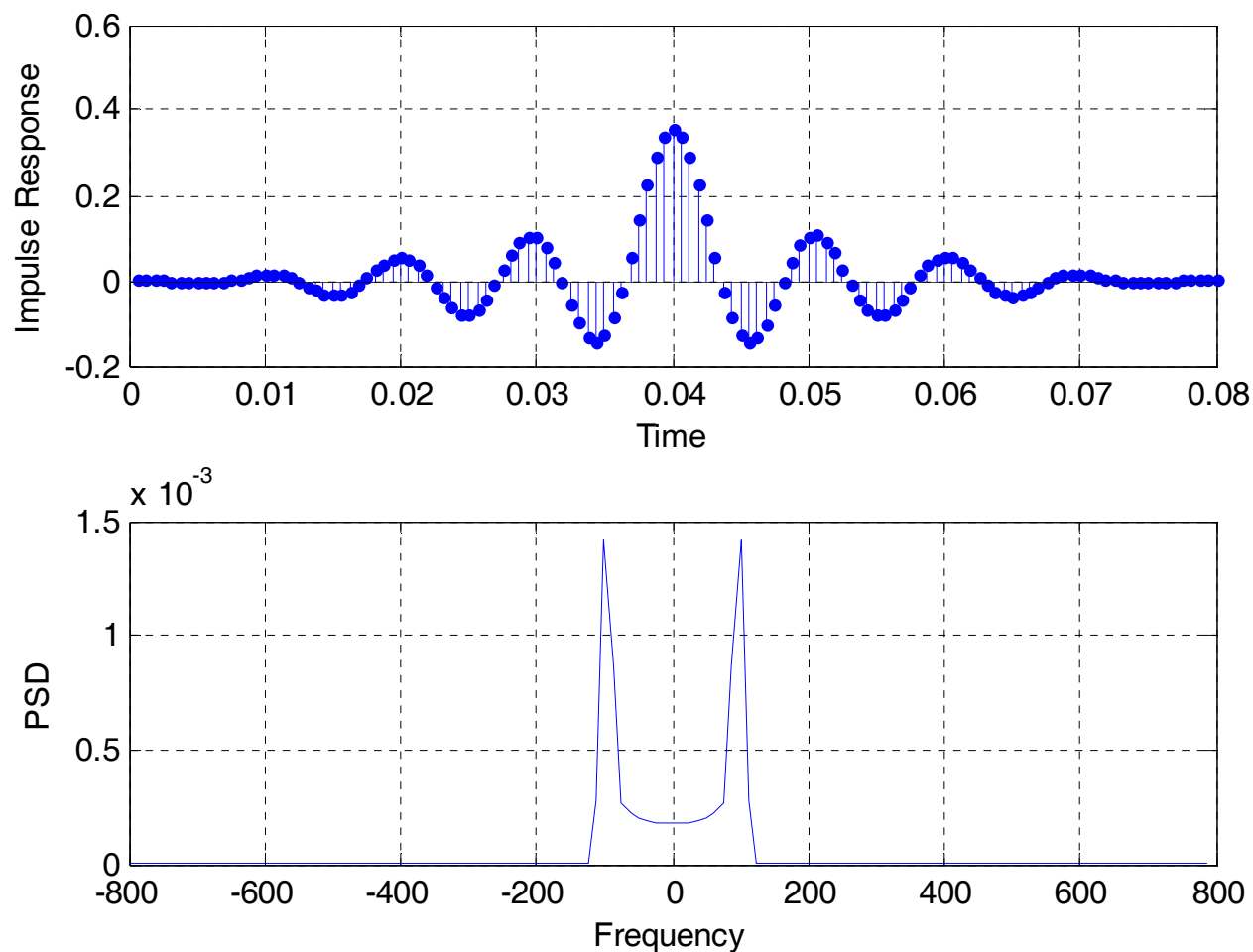
## 3.3 散射多径衰落信道的仿真

```
subplot(2,1,1)
stem(time,impw,'.'): grid
xlabel('Time'); ylabel('Impulse Response')
%
% Square the fft and check the power transfer function.
%
[h f] = linear_fft(impw,128,ts);    % generate H(f) for filter
subplot(2,1,2)
plot(f,abs(h.*h)): grid;
xlabel('Frequency'); ylabel('PSD')
```

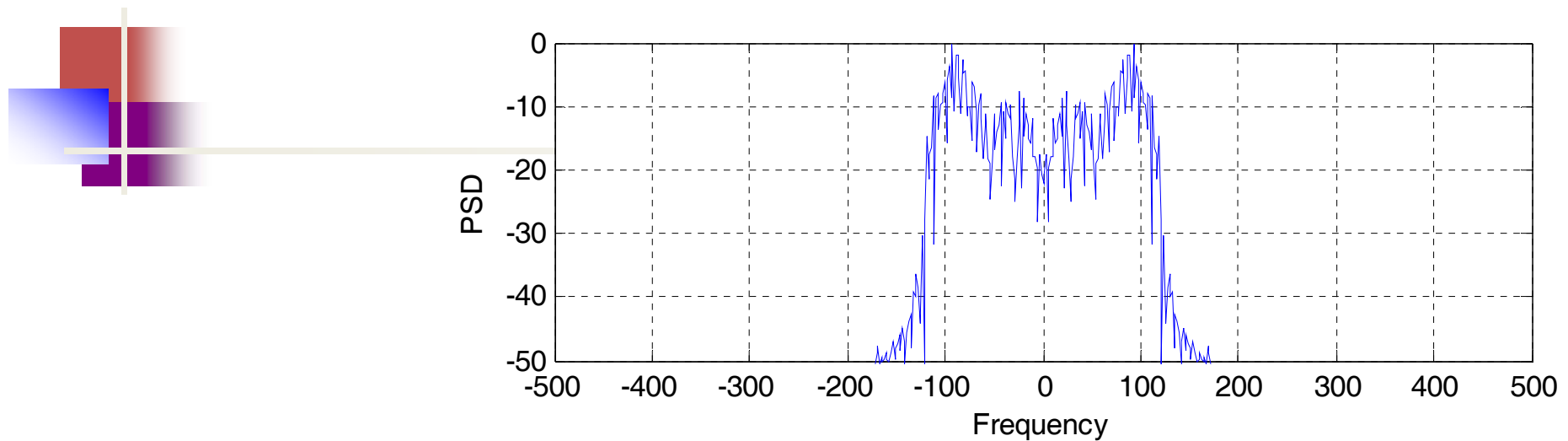
产生滤波器的冲激响应，并画出其冲激响应和传递函数的PSD

(代码见c604.m)

### 3.3 散射多径衰落信道的仿真



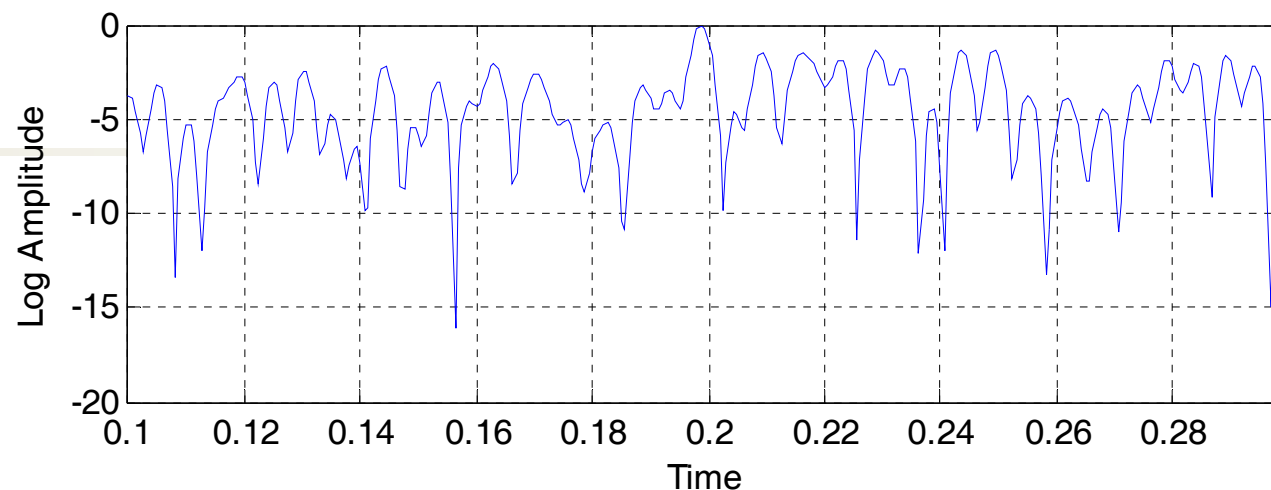
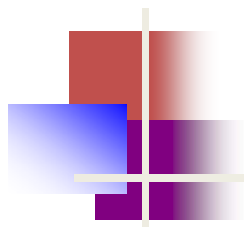
产生滤波器的冲激响应，并画出其冲激响应和传递函数的PSD



产生高斯噪声通过滤波器，并画出滤波器输出端的PSD

```
% Put Gaussian noise through and check the output psd.  
%  
x = randn(1,1024); % generate Gaussian input  
y = filter(impw,1,x); % filter Gaussian input  
[output_psd ff] = log_psd(y,1024,ts); % log of PSD  
figure;  
subplot(2,1,1)  
plot(ff,output_psd); grid;  
axis([-500 500 -50 0])  
xlabel('Frequency'); ylabel('PSD')  
--
```

(代码见c604.m)



观察复高斯过程通过滤波器后包络幅度，对应系统中  
衰减包络

```
% Filter complex noise and look at the envelope fading.
%
z = randn(1,1024)+i*randn(1,1024); % generate complex noise
zz = filter(impw,1,z); % filter complex noise
time = (0.0:ts:1024*ts); % new time axis
%
% Normalize output and plot envelope.
%
zz = zz/max(max(abs(zz))); % normalize to one
subplot(2,1,2)
plot(time(161:480),10*log10(abs(zz(161:480)))): grid
axis([0.1 0.3 -20 0])
xlabel('Time'); ylabel('Log Amplitude')
```

(代码见c604.m)

```

function [impw] = jakes_filter(fd)
% FIR implementation of the Jakes filter (128 points)
n = 512; nm = 2*n; % nm is FFT block size
fs = 0:fd/64:fd; % sampling frequency = 16*fd
H = zeros(1,n); % initialize H(f)
for k=1:(n/8+1) % psd for k=1:65
    jpsd(k)=1/((1-((fs(k))/fd)^2+eps)^0.5);
    if(jpsd(k))>1000
        jpsd(k)=1000;
    end
    H(k)=jpsd(k)^0.5; % first 65 points of H
end
for k=1:n % generate negative frequencies
    H(n+k) = H(n+1-k);
end
[inv,time] = linear_fft(H,nm,fd/64); % inverse FFT
imp = real(inv(450:577)); % middle 128 points
impw = imp.*hanning(128)'; % apply hanning window
energy = sum(impw.^2); % compute energy
impw = impw/(energy^0.5); % normalize
% End of function file.

```

$$S(f) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1-(f/f_d)^2}}, & |f| < f_d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \longrightarrow \quad H(f) = \begin{cases} [1 - (f/f_d)^2]^{-1/4}, & |f| < f_d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$





## 3.4 离散多径衰落信道的仿真

离散多径信道的输入—输出关系由下式给出

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \tilde{a}_k(t) \tilde{x}(t - \tau_k(t))$$

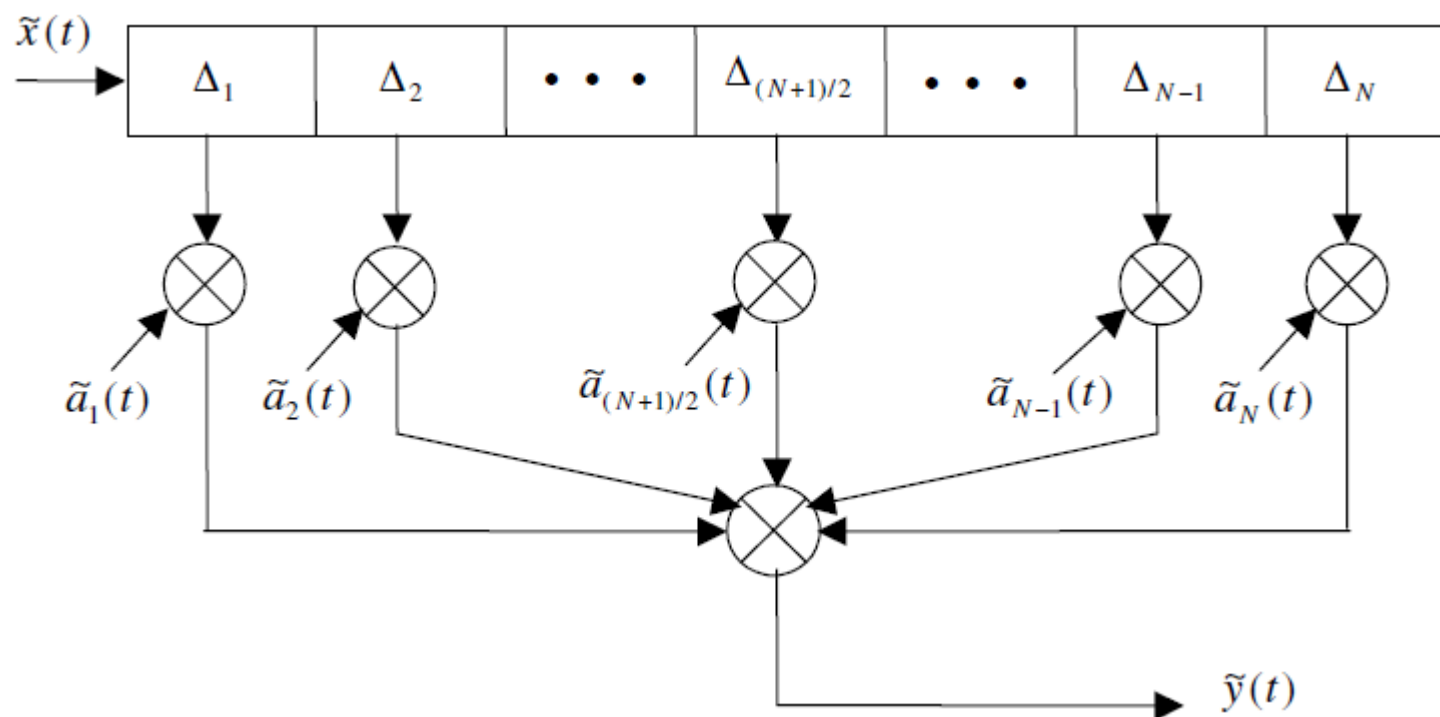
其中  $\tilde{a}_k(t)$  复路径衰减。在上式中，可以假设多径分量的数量和延迟结构的变化比  $\tilde{a}_k(t)$  的变化要缓慢。因此，在仿真期间延迟  $\tau_k(t)$  可以视为常数，于是上式就可以写为

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \tilde{a}_k(t) \tilde{x}(t - \tau_k)$$

---

### 3.4 离散多径衰落信道的仿真

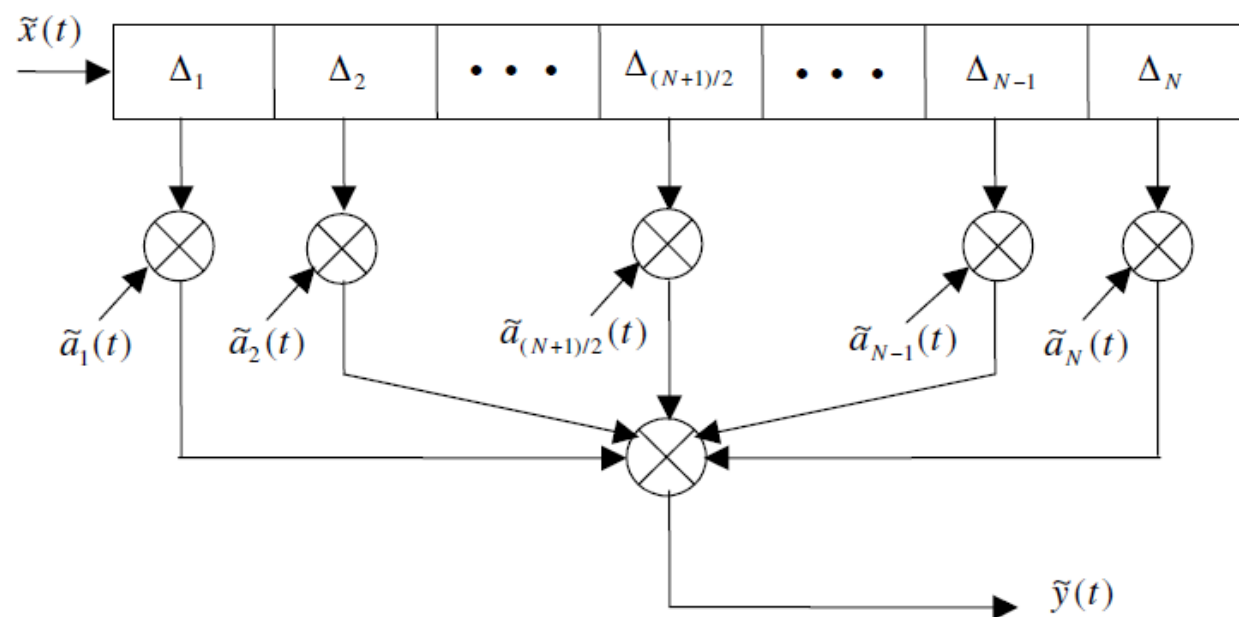
$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} \tilde{a}_k(t) \tilde{x}(t - \tau_k)$$



离散多径信道的可变延迟抽头延迟线(TDL)模型

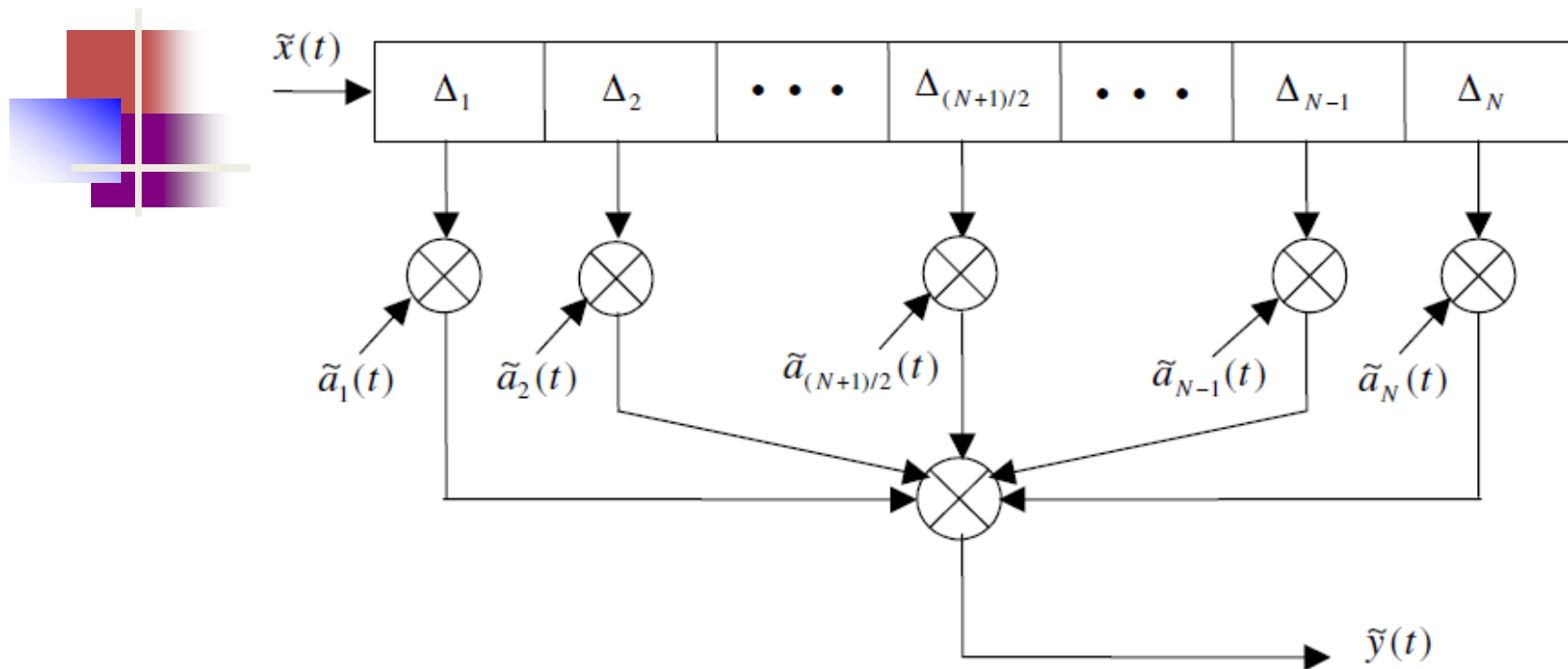
### 3.4 离散多径衰落信道的仿真

产生一个随机数 $N$ 作为延时的个数；根据延迟值的分布产生 $N$ 个随机数；基于延迟值产生 $N$ 个衰减值。这 $3N$ 个随机数的集合代表了信道的一个瞬时值，其实现方式如框图所示。



初始延迟是  $\Delta_1 = \tau_1$ ，其余的延时是延迟差，定义为

$$\Delta_n = \tau_n - \tau_{n-1}, \quad 2 \leq n \leq N$$



实现框图简单，但当延迟之间只有很小的时间偏移时会出问题。由于所有信号都得经过采样，在仿真时抽样间隔(即延迟差)必须表示为采样周期的整数倍。因此，采样周期必须非常小，比最小的延迟差还要小，这可能会导致过高的采样率和无法承受的计算负担。

所以仿照仿真散射多径信道所用的方法，建立均匀抽样间隔的TDL模型来避免出现这个问题。



## 3.4 离散多径衰落信道的仿真

用于离散多径信道的均匀间隔TDL模型

一个均匀间隔TDL模型的抽头增益

$$\tilde{g}_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{c}(\tau, t) \left\{ \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right\} d\tau$$

在上式中代入离散多径信道的冲激响应

$$\tilde{c}(\tau, t) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \delta(\tau - \tau_k)$$

得到抽头增益为

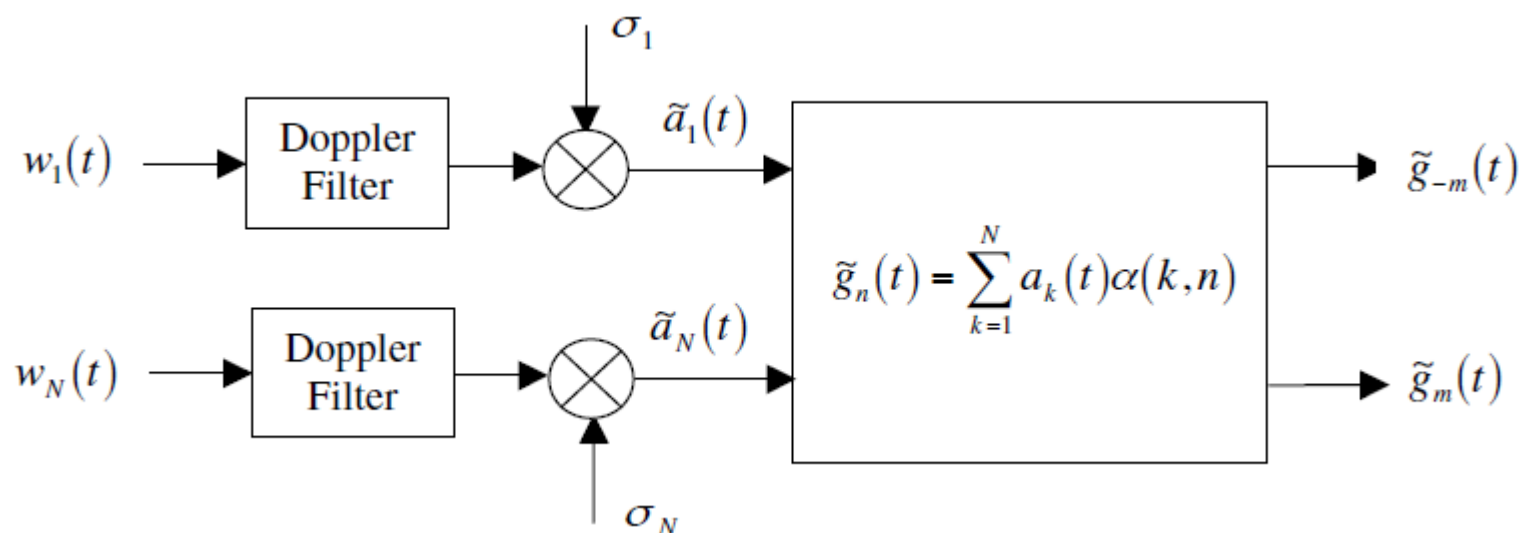
$$\tilde{g}_n(t) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \operatorname{sinc}\left(\frac{\tau_k}{T} - n\right) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \alpha(k, n)$$

---

$$\alpha(k, n) = \operatorname{sinc}\left(\frac{\tau_k}{T} - n\right)$$

### 3.4 离散多径衰落信道的仿真

$$\tilde{g}_n(t) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \operatorname{sinc} \left( \frac{\tau_k}{T} - n \right) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \alpha(k, n)$$



抽头增益的产生如图所示(图中为 $N$ 条路径中的2条)。输入一组 $N$ 个独立的、零均值复高斯白噪声过程，滤波来产生合适的多普勒频谱。然后按比例缩放，产生所需的功率曲线。最后按上式作变换后，产生抽头增益过程。

### 3.4 离散多径衰落信道的仿真

$$\tilde{g}_n(t) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \operatorname{sinc} \left( \frac{\tau_k}{T} - n \right) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \alpha(k, n)$$

假设  $\Delta\tau = \frac{\tau_2 - \tau_1}{T} = 0.5$

$$\begin{bmatrix} \tilde{g}_{-4}(t) \\ \tilde{g}_{-3}(t) \\ \tilde{g}_{-2}(t) \\ \tilde{g}_{-1}(t) \\ \tilde{g}_0(t) \\ \tilde{g}_1(t) \\ \tilde{g}_2(t) \\ \tilde{g}_3(t) \\ \tilde{g}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{sinc}(0.0 + 4) & \operatorname{sinc}(0.5 + 3) \\ \operatorname{sinc}(0.0 + 3) & \operatorname{sinc}(0.5 + 3) \\ \operatorname{sinc}(0.0 + 2) & \operatorname{sinc}(0.5 + 2) \\ \operatorname{sinc}(0.0 + 1) & \operatorname{sinc}(0.5 + 1) \\ \operatorname{sinc}(0.0) & \operatorname{sinc}(0.5) \\ \operatorname{sinc}(0.0 - 1) & \operatorname{sinc}(0.5 - 1) \\ \operatorname{sinc}(0.0 - 2) & \operatorname{sinc}(0.5 - 2) \\ \operatorname{sinc}(0.0 - 3) & \operatorname{sinc}(0.5 - 3) \\ \operatorname{sinc}(0.0 - 4) & \operatorname{sinc}(0.5 - 4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{a}_1(t) \\ \tilde{a}_2(t) \end{bmatrix}$$

### 3.4 离散多径衰落信道的仿真

$$\tilde{g}_n(t) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \operatorname{sinc} \left( \frac{\tau_k}{T} - n \right) = \sum_{k=1}^N \tilde{a}_k(t) \alpha(k, n)$$

假设  $\Delta\tau = \frac{\tau_2 - \tau_1}{T} = 0.5$

$$\alpha(k, n) = \operatorname{sinc} \left( \frac{\tau_k}{T} - n \right)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{g}_{-4}(t) \\ \tilde{g}_{-3}(t) \\ \tilde{g}_{-2}(t) \\ \tilde{g}_{-1}(t) \\ \tilde{g}_0(t) \\ \tilde{g}_1(t) \\ \tilde{g}_2(t) \\ \tilde{g}_3(t) \\ \tilde{g}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0707 \\ 0.0 & -0.0910 \\ 0.0 & 0.1273 \\ 0.0 & -0.2122 \\ 1.0 & 0.6366 \\ 0.0 & 0.6366 \\ 0.0 & -0.2122 \\ 0.0 & 0.1273 \\ 0.0 & -0.0909 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{a}_1(t) \\ \tilde{a}_2(t) \end{bmatrix}$$

注意当  $|n|$  增加时的包络在减小，对更高阶次的抽头增益可以忽略不计，直接省略掉。于是TDL模型就被截短为9个抽头。



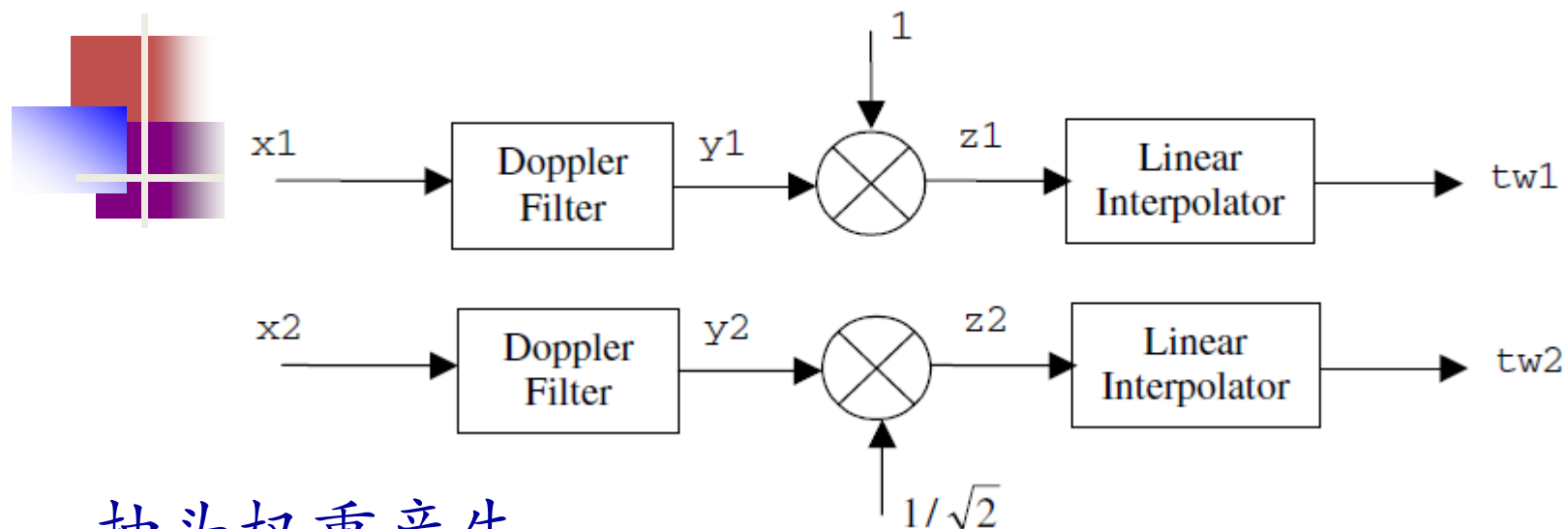
### 3.4 离散多径衰落信道的仿真 例7

例7：考虑由于多普勒原因引起的衰落对在离散多径信道上传输的QPSK信号的影响。系统方框图和抽头权重的产生如图所示。使用Jakes模型来实现多普勒滤波器，其中 $k=1$ 和 $f_d=100\text{Hz}$ 。抽头增益过程是非相关的高斯过程，抽头间隔基于 $20\text{ kHz}$ 的RF带宽(低通等效带宽为 $10\text{ kHz}$ )，分别用 $tw1$ 和 $tw2$ 来表示抽头权重。将复信号与复抽头权重相乘，复QPSK信号和复载波都被用来作为输入。

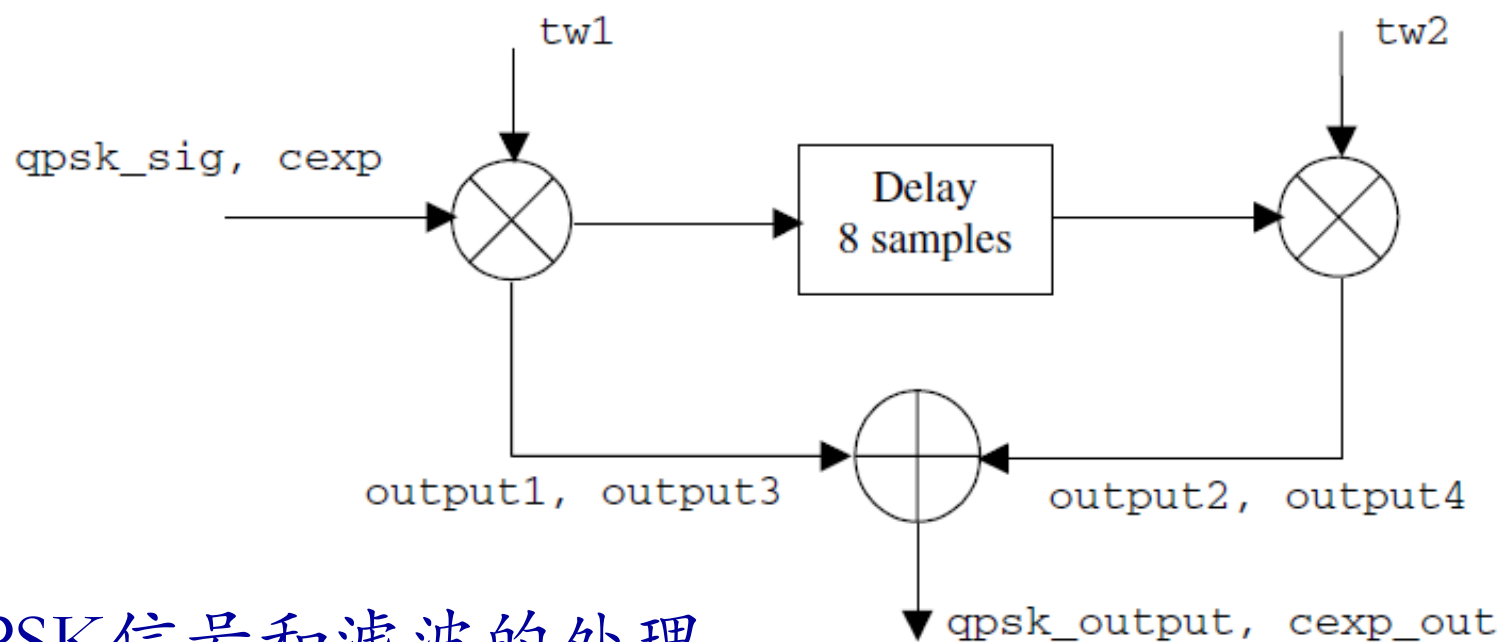
Jakes模型来实现多普勒滤波器：

$$S_d(f) = S_{\tilde{g}_n \tilde{g}_n}(f) = \frac{K}{\sqrt{1 - (f/f_d)^2}}, \quad -f_d \leq f \leq f_d$$

载波定义为：  $c(t) = \exp[j2\pi(1000)t]$



抽头权重产生



QPSK信号和滤波的处理

## 3.4 离散多径衰落信道的仿真

```
% Generate tapweights.
```

```
%
```

```
fd = 100; impw = jakes_filter(fd);
```

```
%
```

```
% Generate tap input processes and Run through doppler filter.
```

```
%
```

```
x1 = randn(1,256)+i*randn(1,256); y1 = filter(impw,1,x1);
```

```
x2 = randn(1,256)+i*randn(1,256); y2 = filter(impw,1,x2);
```

```
%
```

```
% Discard the first 128 points since the FIR filter transient.
```

```
% Scale them for power and Interpolate weight values.
```

```
% Interpolation factor=100 for the QPSK sampling rate of 160000/sec.
```

```
%
```

```
z1(1:128) = y1(129:256); z2(1:128) = y2(129:256);
```

```
z2 = sqrt(0.5)*z2; m = 100;
```

```
tw1 = linear_interp(z1,m); tw2 = linear_interp(z2,m);
```

由对大多普勒频移产生多  
普勒滤波器冲激响应

白噪声过多普勒  
滤波器冲激响应

按题目框图产生  
抽头系数，通过  
内插提高采样率

(代码见c605.m)

## 3.4 离散多径衰落信道的仿真

产生QPSK信号

```
% Generate QPSK signal and filter it.
%
nbits = 512; nsamples = 16; ntotal = 8192;
qpsk_sig = random_binary(nbits,nsamples)+i*random_binary(nbits,nsamples);
%
% Genrate output of tap1 (size the vectors first).
%
input1 = qpsk_sig(1:8184); output1 = tw1(1:8184).*input1;
%
% Delay the input by eight samples (this is the delay specified
% in term of number of samples at the sampling rate of
% 16,000 samples/sec and genrate the output of tap 2.
%
input2 = qpsk_sig(9:8192); output2 = tw2(9:8192).*input2;
%
% Add the two outptus and genrate overall output.
%
qpsk_output = output1+output2;
```

(代码见c605.m)



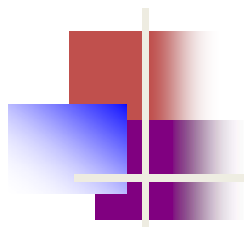
## 3.4 离散多径衰落信道的仿真

### 载波通过多普勒滤波器

```
ts = 1/160000; time = (ts:ts:8200*ts);  
cexp = exp(2*pi*i*1000*time);  
input1 = cexp(1:8184); output3 = tw1(1:8184).*input1;  
input2 = cexp(9:8192); output4 = tw2(9:8192).*input2;  
%  
% Add the two outputs and generate overall output.  
%  
cexp_out = output3+output4;  
[psdcexp,freq,ptotal,pmax] = linear_psd(cexp(1:8184),8184,ts);  
[psdcexp_out,freq,ptotal,pmax] = linear_psd(cexp_out(1:8184),8184,ts);
```

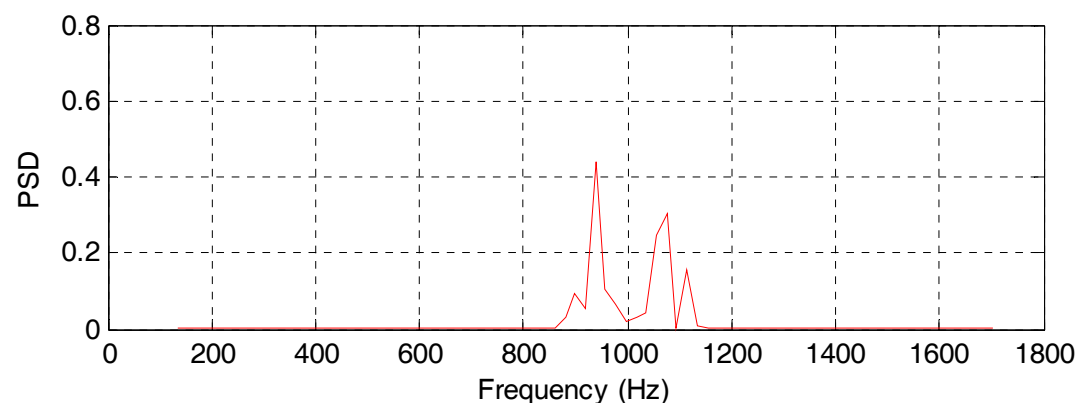
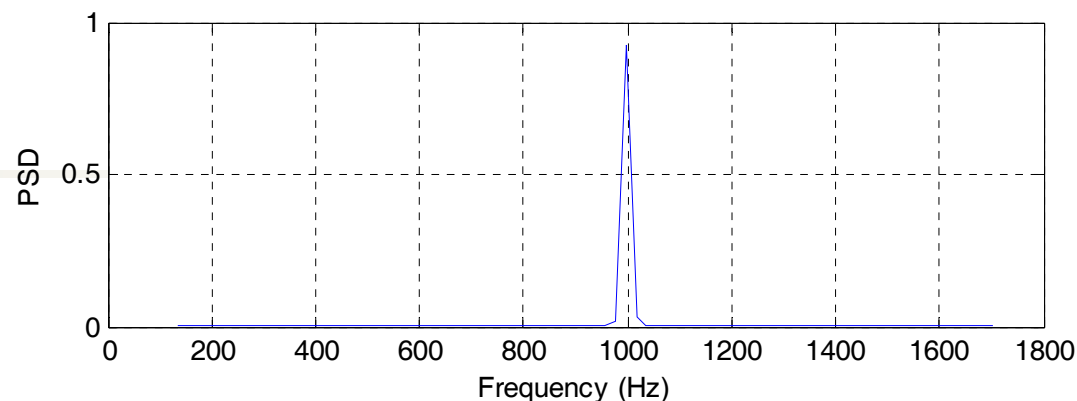
---

(代码见c605.m)



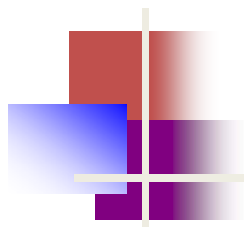
$$c(t) = \exp[j2\pi(1000)t]$$

载波通过滤波器后前后的PSD，频谱扩展



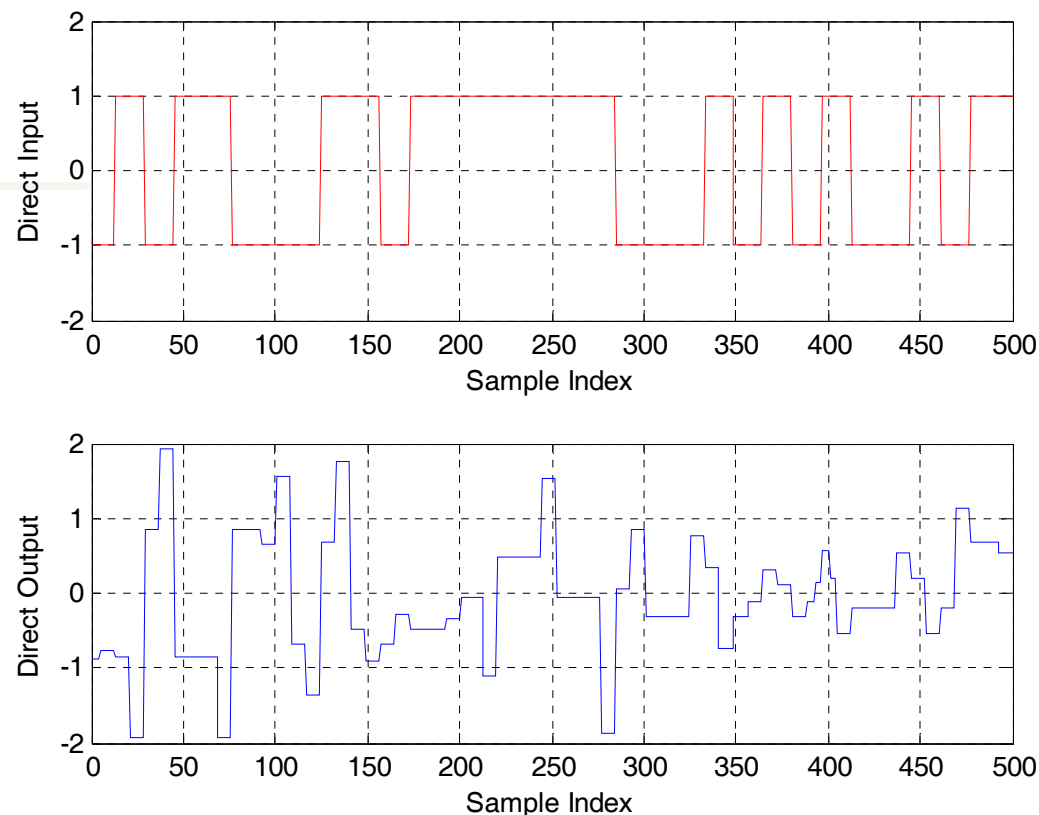
```
subplot(2,1,1)
plot(freq(4100:4180), psdcexp(4100:4180)); grid;
xlabel('Frequency (Hz)'); ylabel('PSD')
subplot(2,1,2)
plot(freq(4100:4180), psdcexp_out(4100:4180),'r'); grid;
xlabel('Frequency (Hz)'); ylabel('PSD')
figure; subplot(2,1,1)
plot(real(qpsk_sig(501:1000)),'r'); grid;
xlabel('Sample Index'); ylabel('Direct Input');
axis([0 500 -2 2])
```

(代码见c605.m)



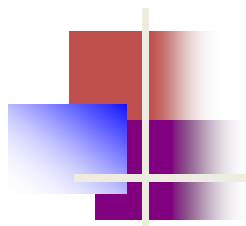
QPSK信号同相信道的  
输入和输出。

输入信号具有两个电平，  
输出信号由于码间干扰，  
产生多个电平



```
figure; subplot(2,1,1)
plot(real(qpsk_sig(501:1000)), 'r'); grid;
xlabel('Sample Index'); ylabel('Direct Input');
axis([0 500 -2 2])
subplot(2,1,2)
plot(real(qpsk_output(501:1000))); grid;
xlabel('Sample Index'); ylabel('Direct Output');
figure;
plot(abs(output3(3000:6000))); grid;
xlabel('Sample Index'); ylabel('Envelope Magnitude')
```

(代码见c605.m)



习题3：扩展例题5给出的仿真到6路模型，在如下的功率曲线下运行BER仿真（假设为平坦衰落）

- (1) 6路的功率平均
- (2) 6个抽头具有指数下降的功率曲线，其中最后一个抽头比第一个抽头低10dB。

习题4：对下面三种信道情况：

情况一：有积分—清除接收机的AWGN信道；

情况二：瑞利衰落信道加AWGN信道，无时延；

情况三：例题7中由于多普勒原因引起的衰落信道；

对比三种信道情况下QPSK系统，进行BER对 $E_b/N_0$ 的性能比较。