



西安电子科技大学

通信工程学院

# 通信原理

任光亮

[glren@mail.xidian.edu.cn](mailto:glren@mail.xidian.edu.cn)

本文件仅供西安电子科技大学通信原理课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

西安电子科技大学 通信工程学院  
2020年9月

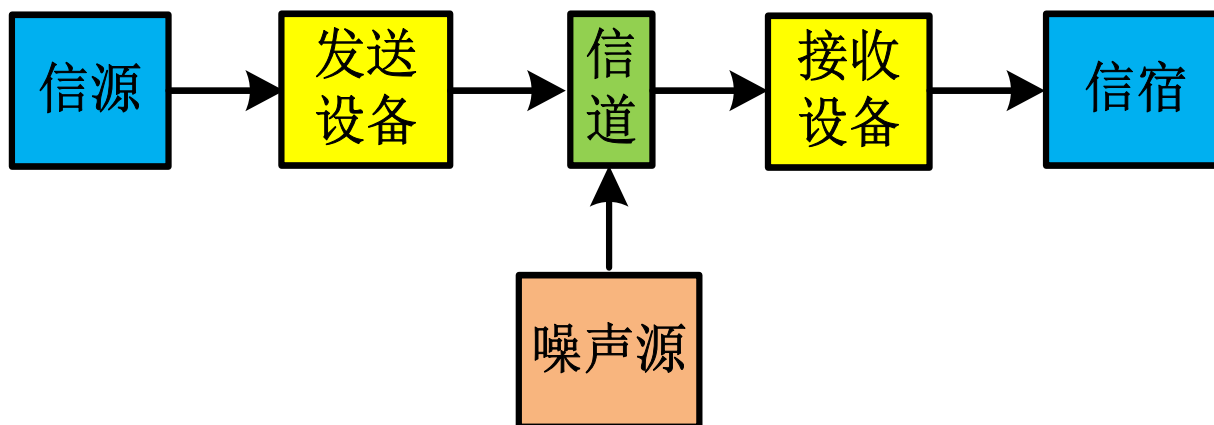
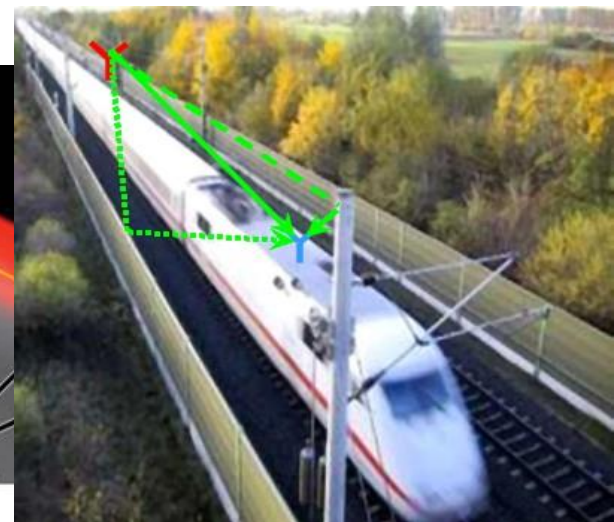
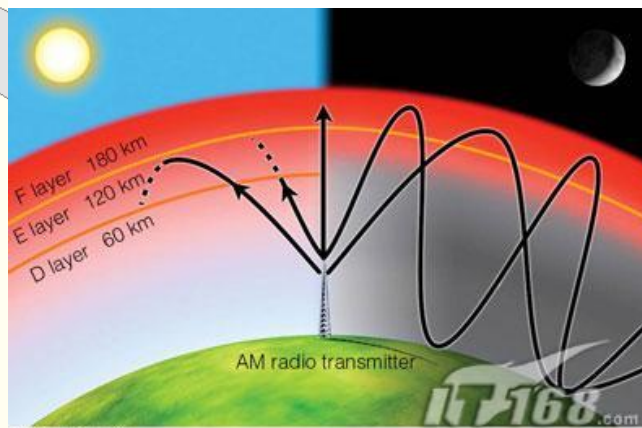
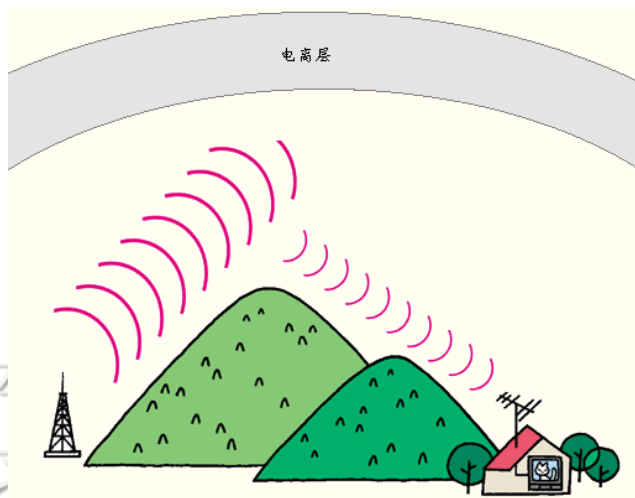




# 第3章 信道与噪声

西安电子科技大学

通信工程学院





# 第3章 信道与噪声

西安电子科技大学

通信工程学院

## 主要内容

- ★信道的定义、分类和数学模型
- ★恒参信道的特性、对信号传输的影响及改善方法
- ★随参信道的特性、对信号传输的影响及改善方法
- ★信道加性噪声的统计特性。
- ★信道容量

本章作业：1，2，4，6，12，13，16，19，20



# 3.1 信道定义与数学模型

西安电子科技大学

通信工程学院

## 一、信道的定义与分类

**信道：**以传输媒质为基础的信号通道。

### 1、狭义信道

有线信道

(架空明线、电缆及光纤等)

无线信道

(地波传播、短波电离层反射、卫星中继等)

### 2、广义信道

调制信道

调制器输出端 → 解调器输入端

编码信道

编码器输出端 → 译码器输入端

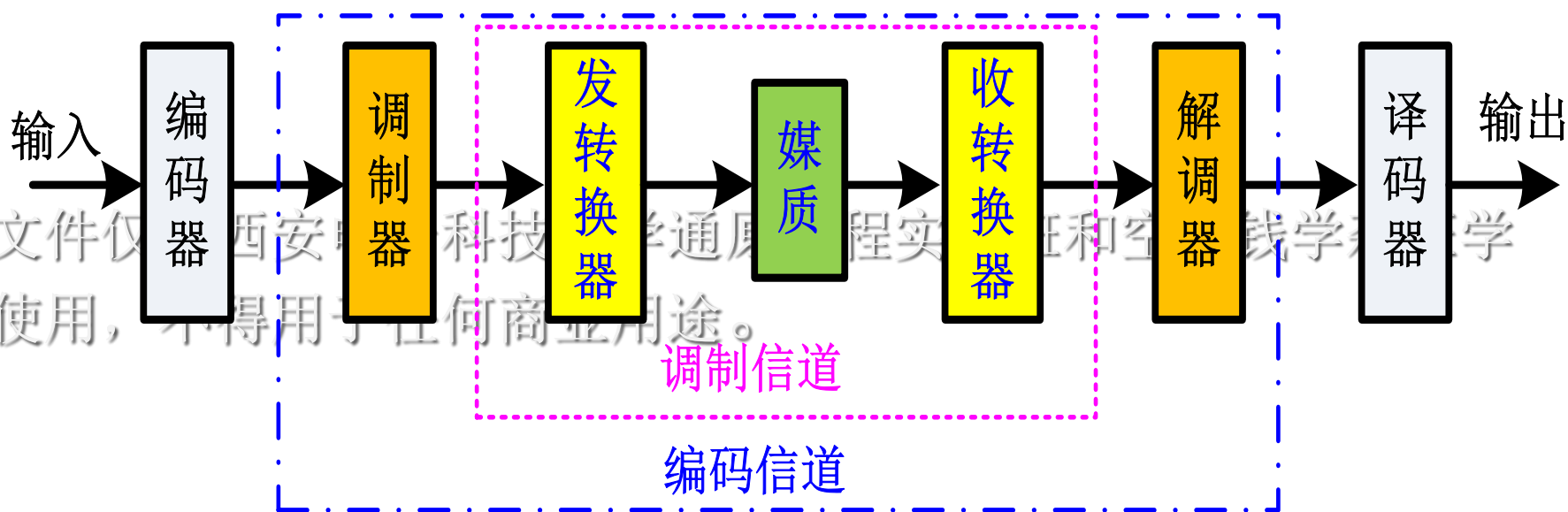


# 3.1 信道定义与数学模型

西安电子科技大学

通信工程学院

## 一、信道的定义与分类



**注：**根据研究内容的不同，可定义其它范畴的广义信道。



# 3.1 信道定义与数学模型

西安电子科技大学

通信工程学院

## 二、信道数学模型

### 1、调制信道模型



$$r(t) = f[s_i(t)] + n(t)$$

加性噪声

$$= s_o(t) + n(t)$$

$$s_o(t) = c(t) * s_i(t)$$

$$S_o(\omega) = C(\omega) S_i(\omega)$$



乘性干扰





# 3.1 信道定义与数学模型

西安电子科技大学

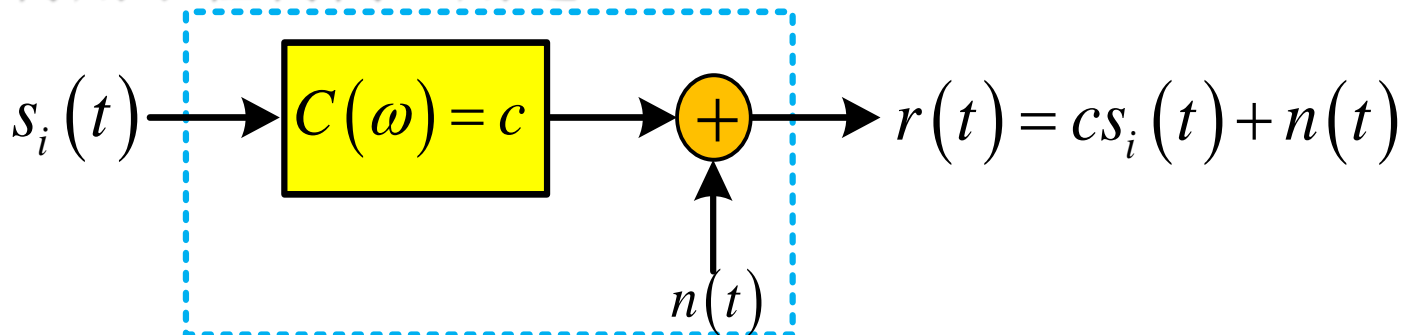
通信工程学院

根据信道传输函数 $C(\omega)$ 时变特性的不同:

调制信道 { 恒参信道  
              随参信道

在常用物理信道中, 有三种典型形式:

(1)  $C(\omega) = c$



加性噪声信道模型

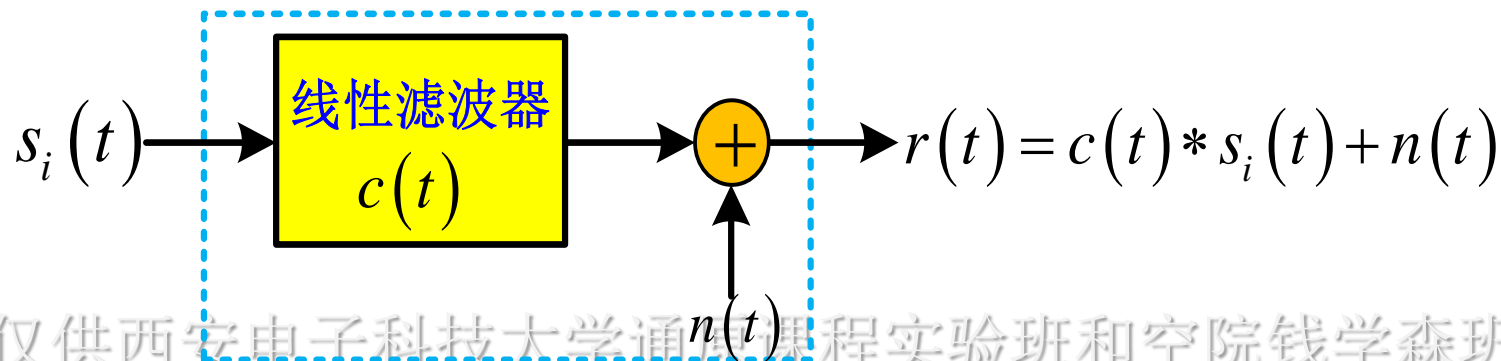


## 3.1 信道定义与数学模型

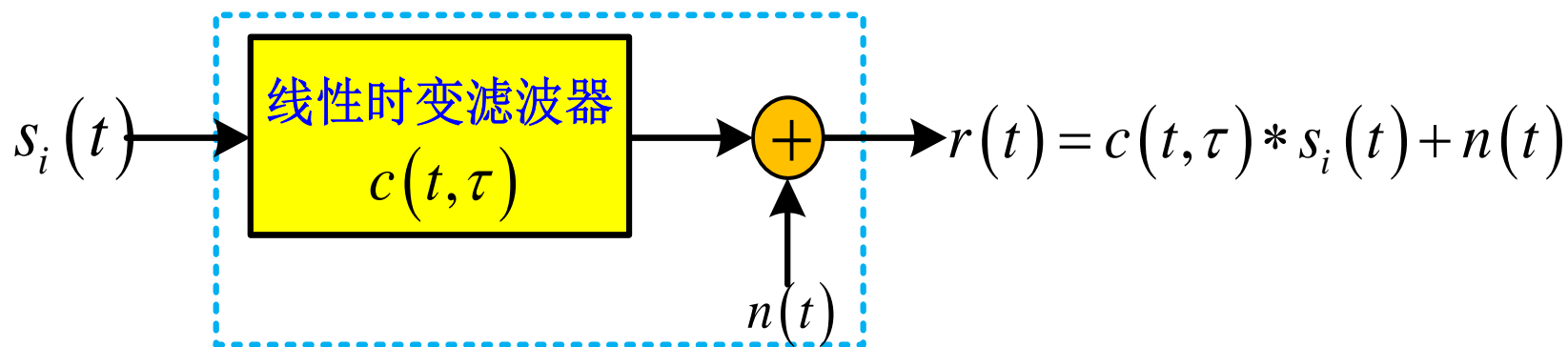
西安电子科技大学

通信工程学院

(2)  $C(\omega) \neq c$  , 但不随时间变化。



本文件仅供西安电子科技大学通信工程实验班和空院钱学森班学习使用，(3)  $C(\omega)$  是时变的用途。





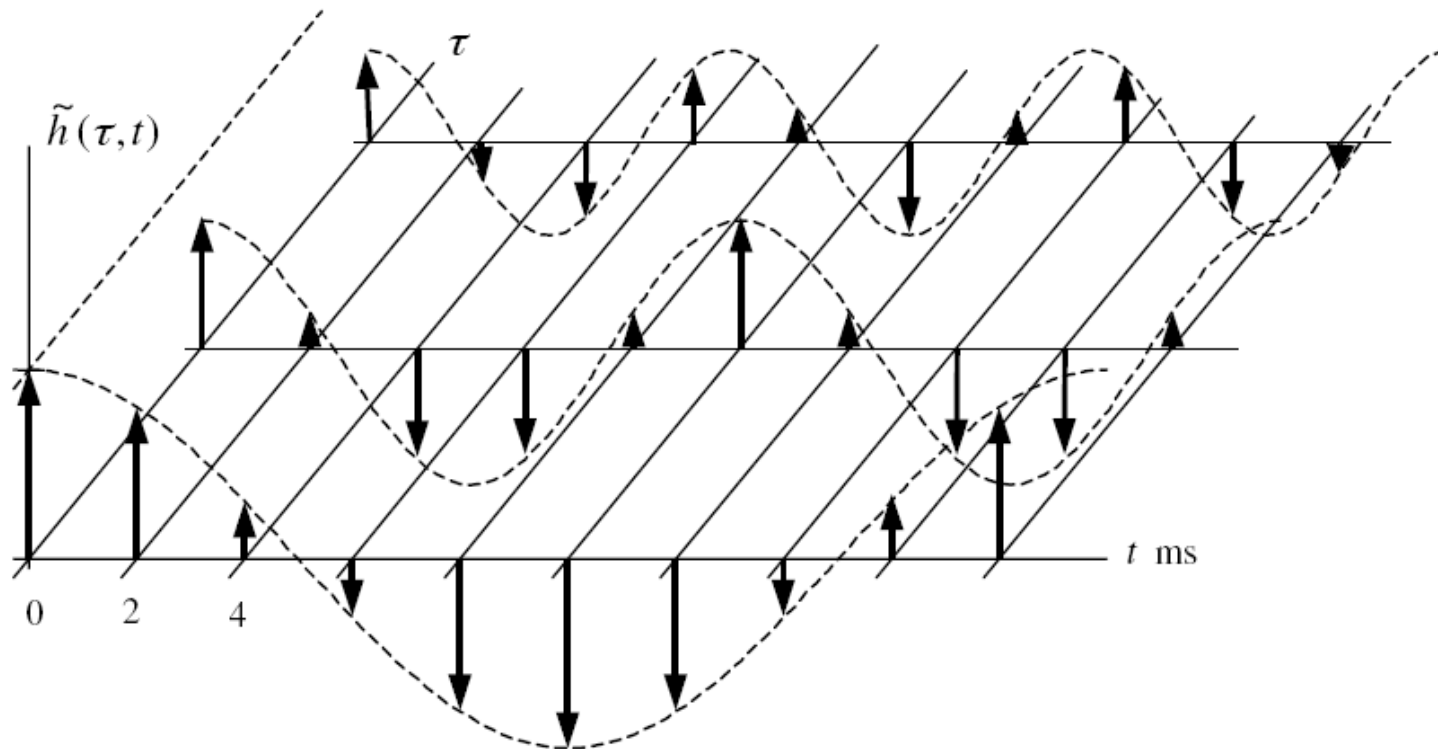


# 3.1 信道定义与数学模型

西安电子科技大学

通信工程学院

$$c(t, \tau) = \sum_{j=1}^n c_j(t) \delta(\tau - \tau_b)$$
$$r(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) s_i(t - \tau_b) + n(t)$$

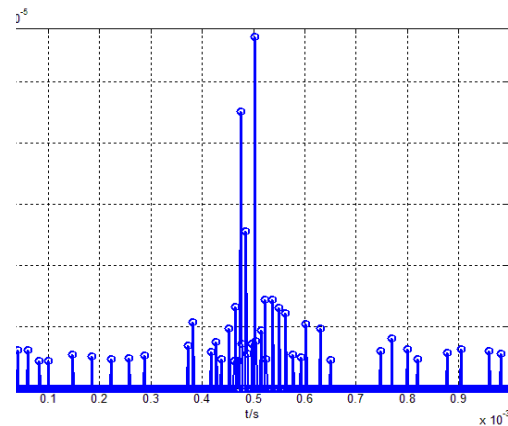
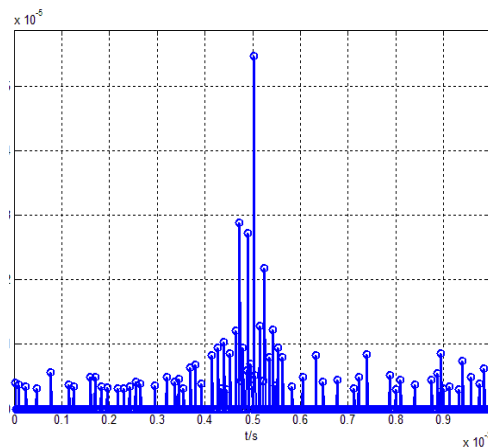
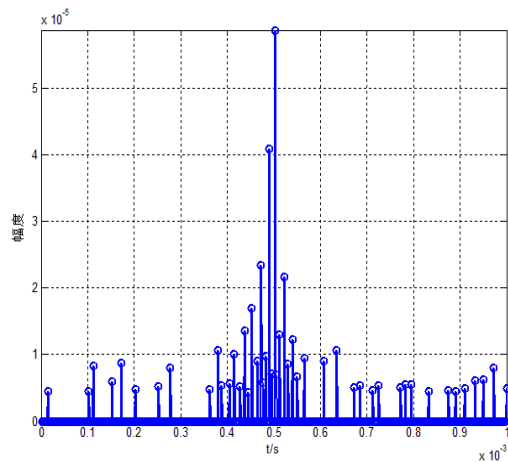




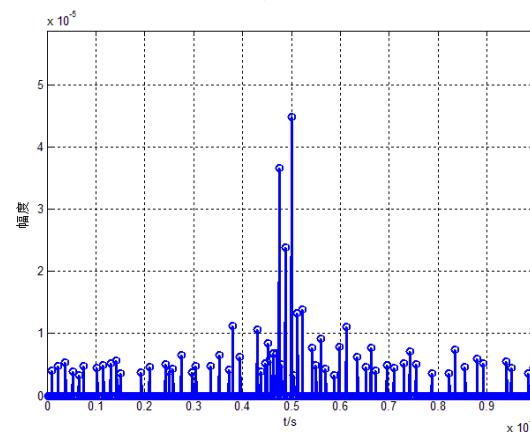
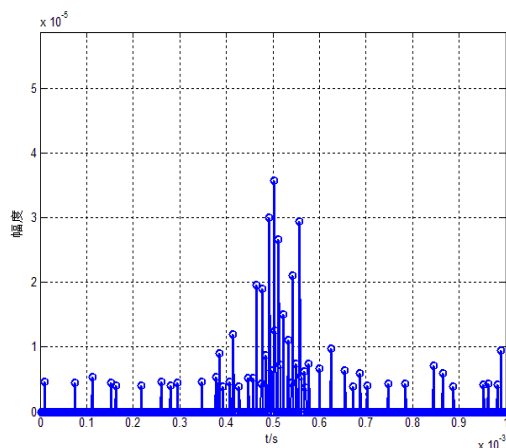
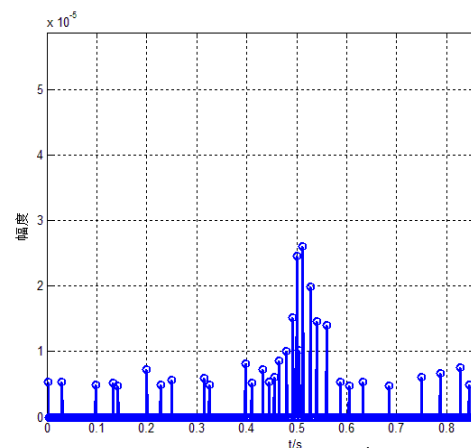
# 3.1 信道定义与数学模型

西安电子科技大学

通信工程学院



习使用，不得用



学





# 3.1 信道定义与数学模型

西安电子科技大学

通信工程学院



CIRs12号.wm

本文件仅供西安电子科技大学通晓课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



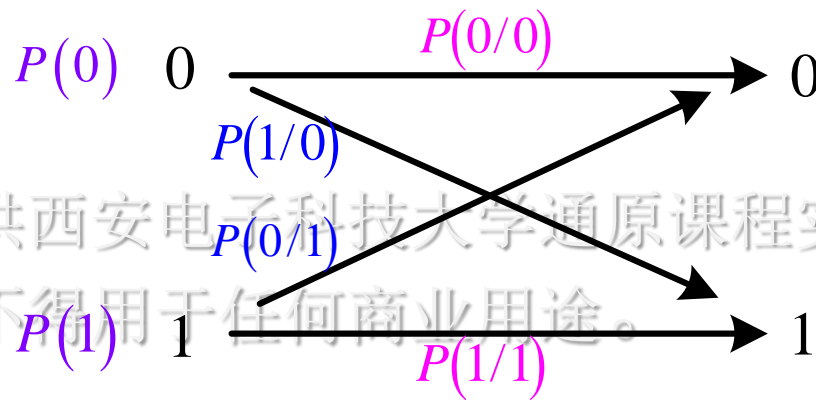
# 3.1 信道定义与数学模型

西安电子科技大学

通信工程学院

## 2、编码信道模型

二进制无记忆编码信道模型：



$$P_e = P(0)P(1/0) + P(1)P(0/1)$$

**注：**信道转移概率由编码信道的特性所决定，且需对实际信道做大量的统计分析才能得到。



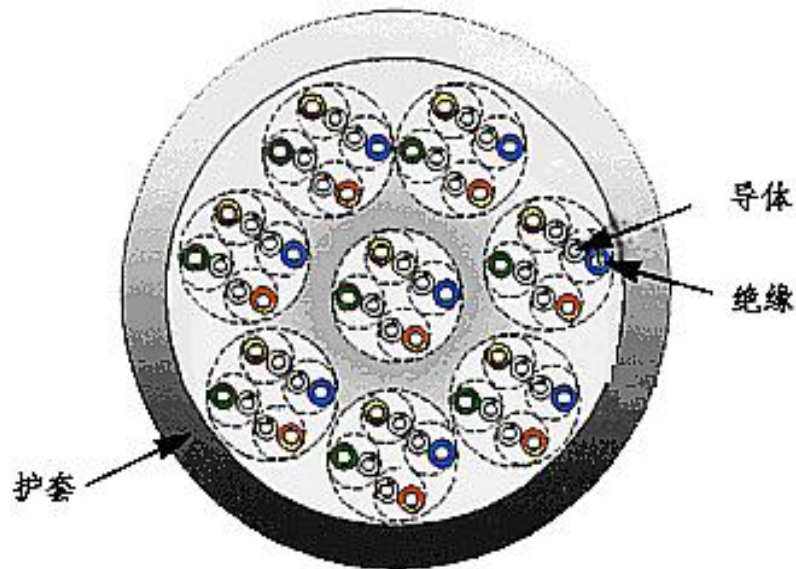
## 3.2 恒参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### 一、恒参信道举例

#### 1、对称电缆



本文件仅供西安电子科技大学  
习使用，不得用于任何商业用

优点：传输特性稳定，价格便宜。

缺点：传输损耗大。

应用：市话中继线，用户线



## 3.2 恒参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### 2、同轴电缆



**优点：**抗干扰性能好，传输损耗小。

**应用：**有线电视网

本文件仅供西安电子科技大学  
习使用，不得用于任何

学森班学



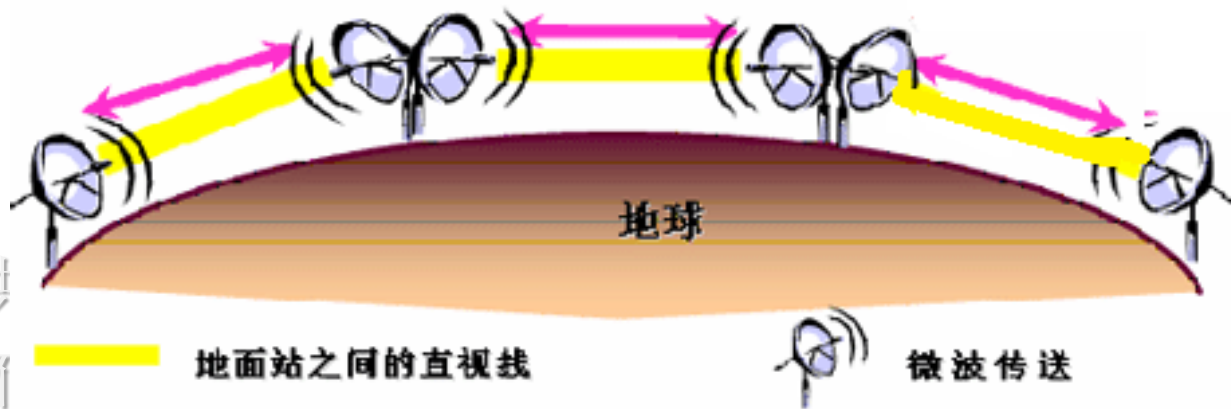


## 3.2 恒参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### 3、微波中继信道



**优点：**传输容量大，节省有色金属，长途传输质量稳定。

**应用：**多路电视、电话

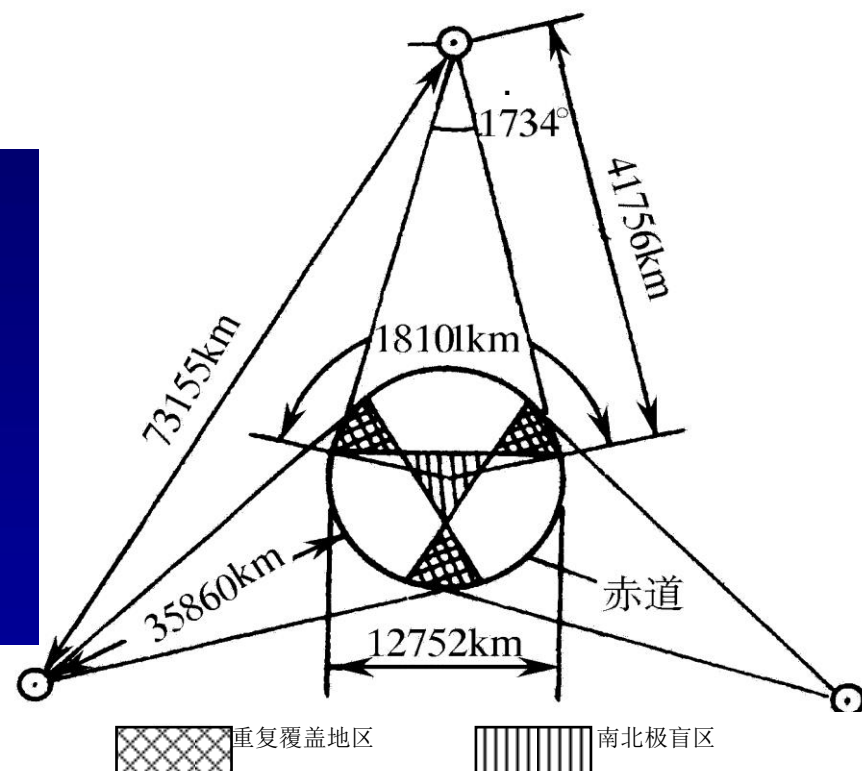
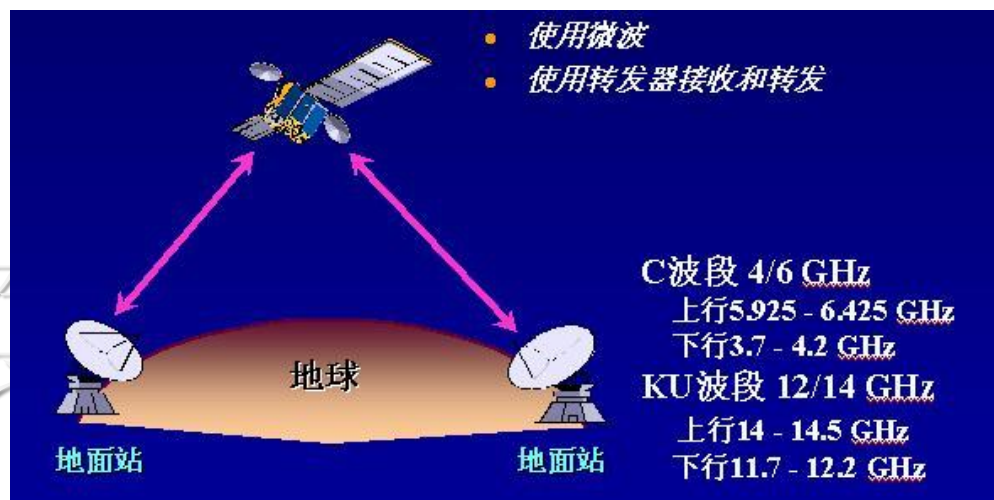


## 3.2 恒参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### 4、卫星中继信道



优点：通信距离远，覆盖范围大，传输质量稳定。

应用：多路电话、电视、数据



## 3.2 恒参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### 二、恒参信道特性

恒参信道  $\longrightarrow$  线性时不变网络

#### 1、理想恒参信道（无失真传输信道）

$$H(\omega) = K_0 e^{-j\omega t_d} = K_0 e^{-j\varphi(\omega)}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途

$$\left\{ \begin{array}{l} |H(\omega)| = K_0 \end{array} \right. \quad \text{常数}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(\omega) = \omega t_d \end{array} \right. \quad \omega \text{ 的线性函数}$$

群迟延频率特性：

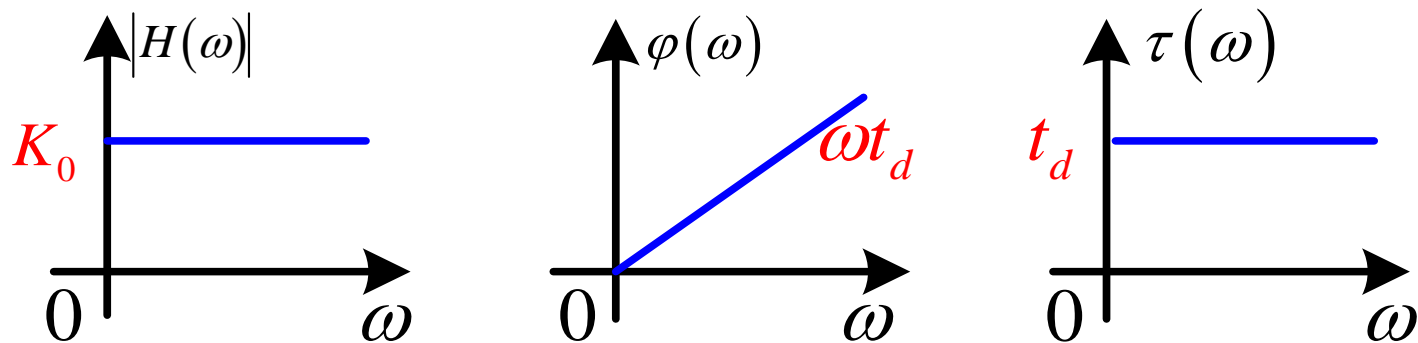
$$\tau(\omega) = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = t_d \quad \text{常数}$$



## 3.2 恒参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院



理想恒参信道的冲激响应：  
$$h(t) = K_0 \delta(t - t_d)$$

若输入信号为  $s_i(t)$ ，则输出为  $s_o(t) = K_0 s_i(t - t_d)$

理想恒参信道对信号传输的影响：

- (1) 幅度上产生固定的衰减。
- (2) 时间上产生固定的延迟。



## 3.2 恒参信道及其传输特性

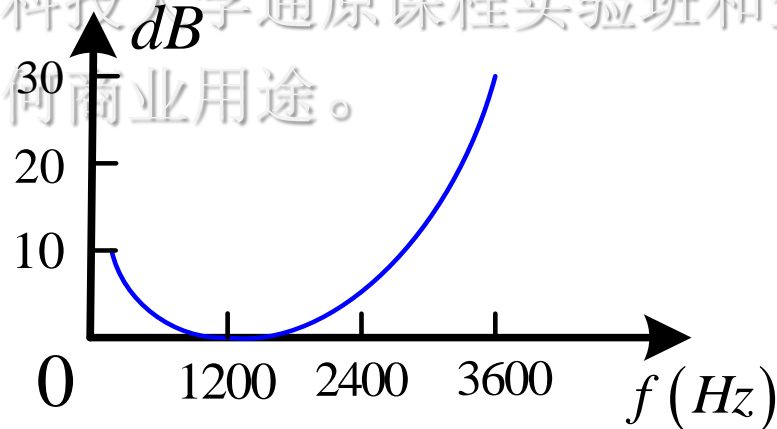
西安电子科技大学

通信工程学院

### 2、实际信道特性对信号传输的影响

#### (1)幅频失真

在信号频带范围内，若  $|H(\omega)| \neq c$ ，使信号中不同频率分量受到不同的衰减，从而引起信号波形失真。



典型音频电话信道的幅度衰减特性



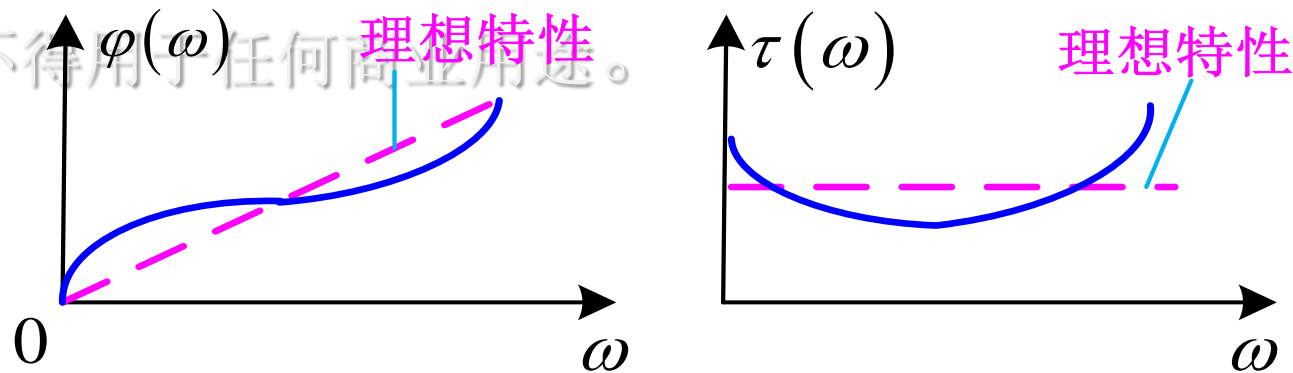
## 3.2 恒参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### (2)相频失真

若  $\varphi(\omega)$  在信号频带范围内不是  $\omega$  的线性函数，即信号中不同的频率分量分别受到不同的延迟，由此引起的信号波形失真。



典型电话信道相频特性和群迟延频率特性





## 3.2 恒参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### 3、实际信道特性的改善

幅频失真 } 线性失真 → 均衡技术来补偿  
相频失真 }

**注：**①幅频和相频失真是影响信号传输的重要因素，不同的信道可能存在其中一种或两种失真。

②非线性失真、频率偏移、相位抖动等采用均衡无法消除。



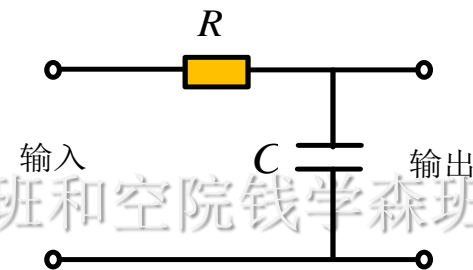
## 3.2 恒参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

**【例】** 某恒参信道可用图示二端口网络来等效，说明信号通过该信道传输会产生哪些失真？

解： 
$$H(\omega) = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega C}{1 + j\omega RC}$$



$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

存在幅频失真

$$\varphi(\omega) = \arctg \omega RC$$

存在相频失真

本文件仅供西安电子科技大学通信课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



## 3.2 恒参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

**【例】** 某信道传输特性： $H(\omega) = e^{-j\omega t_0} (1 + e^{-j\omega\tau})$ ，分析信号通过该信道传输会产生什么影响？如何克服？

**解：**  $H(\omega) = e^{-j\omega t_0} (1 + \cos \omega\tau - j \sin \omega\tau) = 2 \cos \frac{\omega\tau}{2} e^{-j\omega \left( t_0 + \frac{\tau}{2} \right)}$

$|H(\omega)| = 2 \left| \cos \frac{\omega\tau}{2} \right| \neq \text{const}$

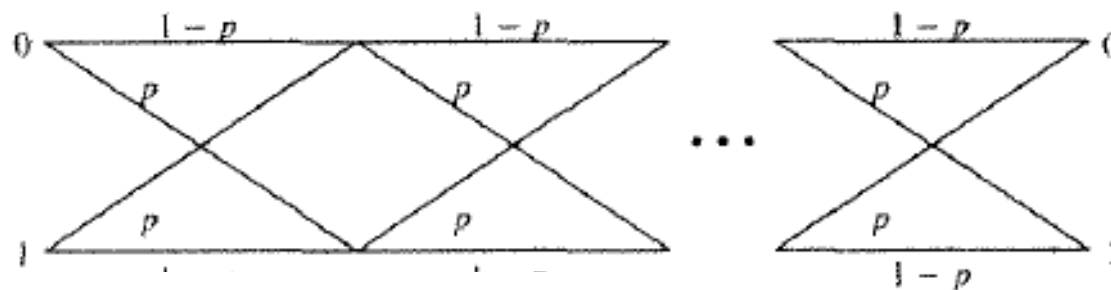
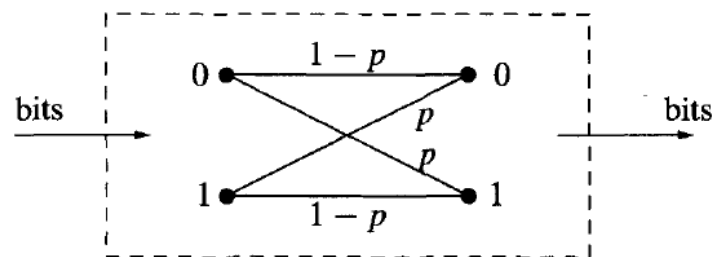
有幅频失真

$\varphi(\omega) = \omega \left( t_0 + \frac{\tau}{2} \right)$

无相频失真

克服方法：均衡或减小信号带宽。

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



院钱学森班学

$$P_n(e) = \frac{1}{2} [1 - (1 - 2p)^n].$$

$$P_{n+1}(e) = (1 - p)P_n(e) + p(1 - P_n(e))$$

本文作  
习使用



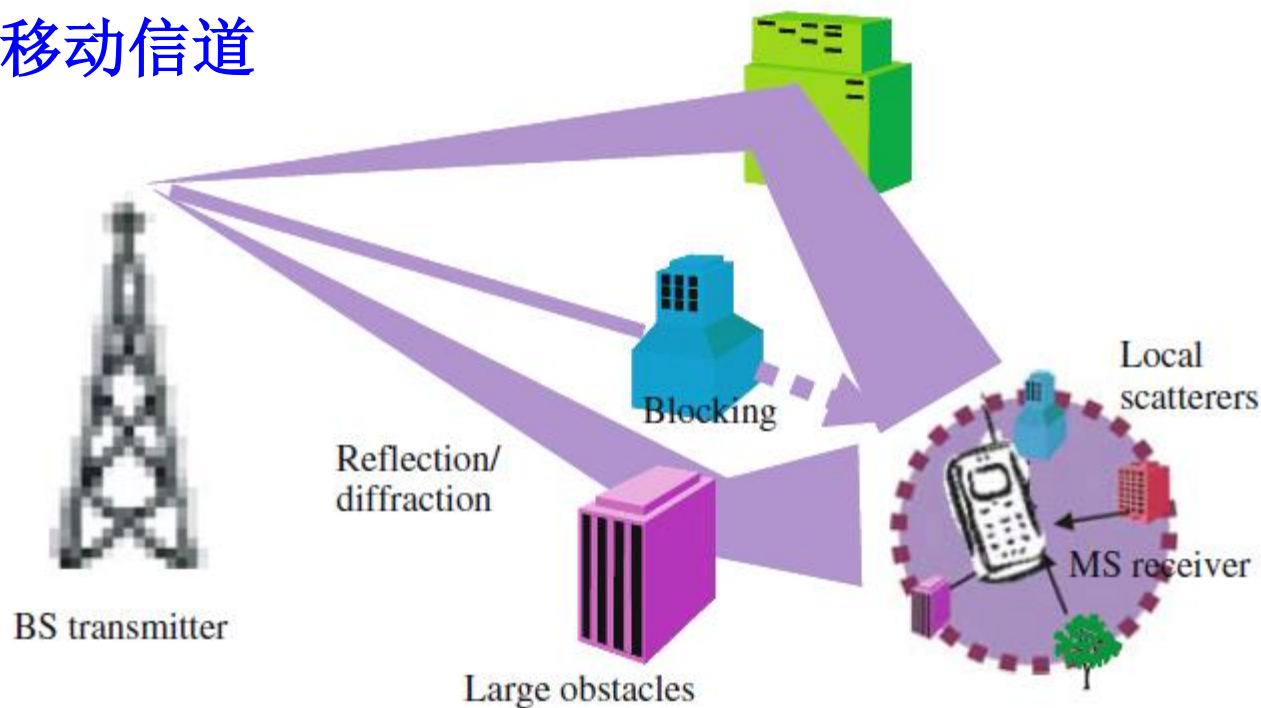
# 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

## 一、举例

### 1、陆地移动信道



学

本文件仅供  
习使用，不



## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### 一、举例

#### 1、陆地移动信道

$$P_R = P_T G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，自由空间传播损耗：  $L_{fs} = \frac{P_T}{P_R} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{G_T G_R}$

$$\begin{aligned} \text{或 } [L_{fs}](dB) &= 20\lg \frac{4\pi d}{\lambda} - 10\lg G_T - 10\lg G_R \\ &= 32.44 + 20\lg d + 20\lg f - 10\lg G_T - 10\lg G_R \\ &\quad \text{km} \quad \text{MHz} \end{aligned}$$





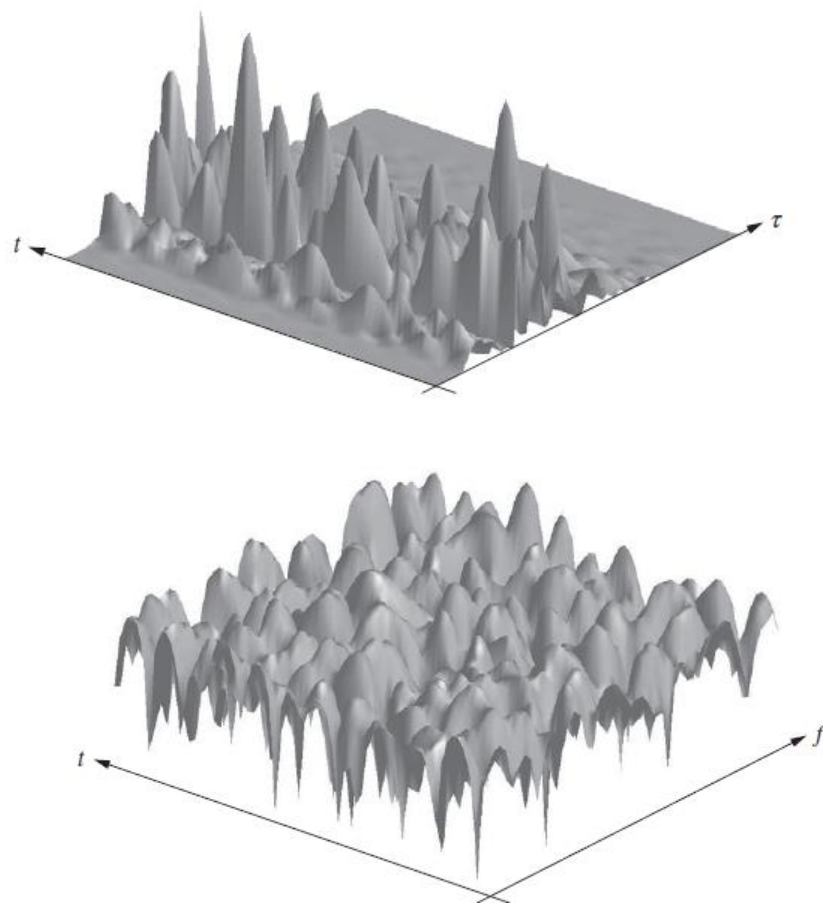
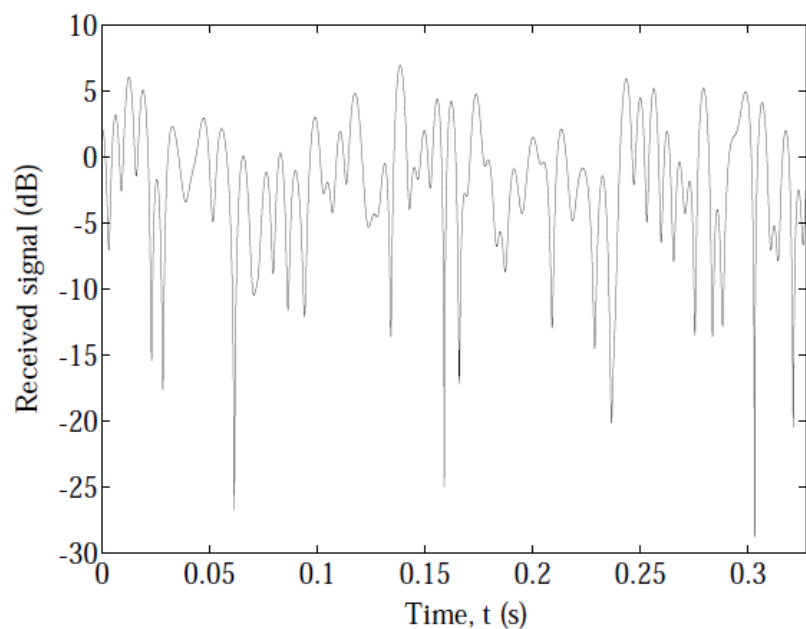
# 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

## 一、举例

### 1、陆地移动信道





## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### 2、短波电离层反射信道

**短波:波长为  $100\text{ m} \sim 10\text{ m}$ ;**

**频率:  $3\text{ MHz} \sim 30\text{ MHz}$**

天波传播, 可经电离层一次或数次反射, 最远可传上万公里, 广泛用于语音、电报和数据传输。多年来一直被广泛地用于政府、外交、气象、商业等各个部门, 用以传送语言、文字、图像、数据等信息; 同时, 它也是高空飞行和海上航行的必备通信方式; 尤其在军事部门, 它始终是军事指挥的重要手段之一。



## 3.3 随参信道及其传输特性

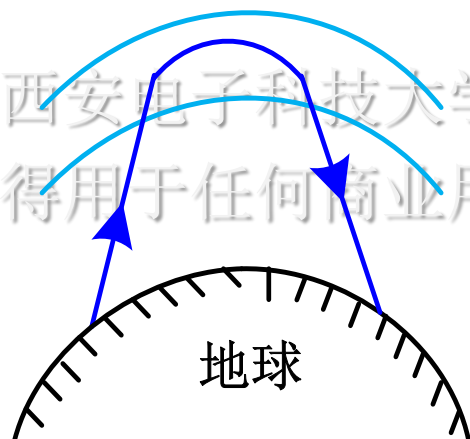
西安电子科技大学

通信工程学院

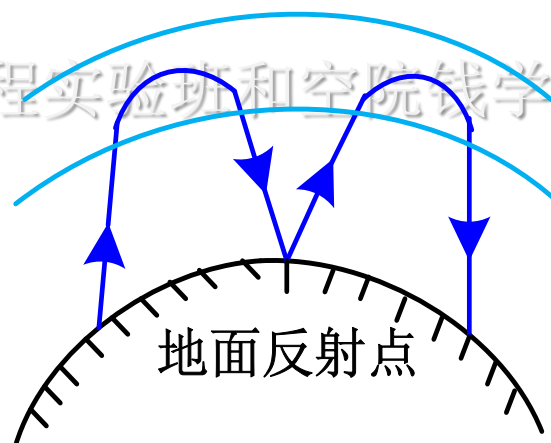
### 2、短波电离层反射信道

电离层：离地面60-600km的大气层，共4层

反射层： $F_2$  层



$$d_{\max} = 4000km$$



$$d_{\max} = 8000km$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

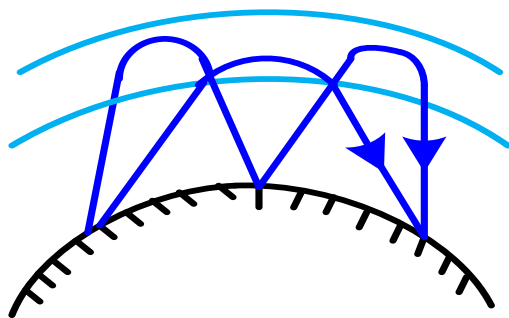


# 3.3 随参信道及其传输特性

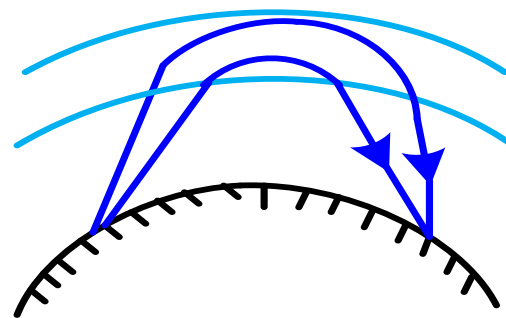
西安电子科技大学

通信工程学院

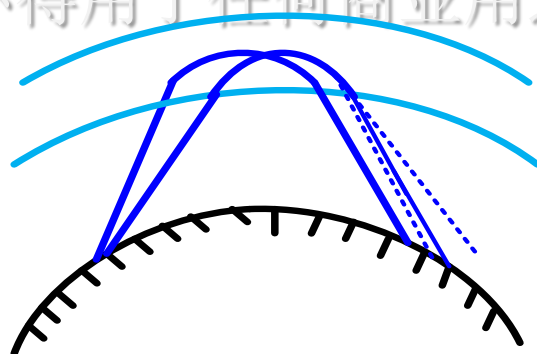
多径产生的四种形式：



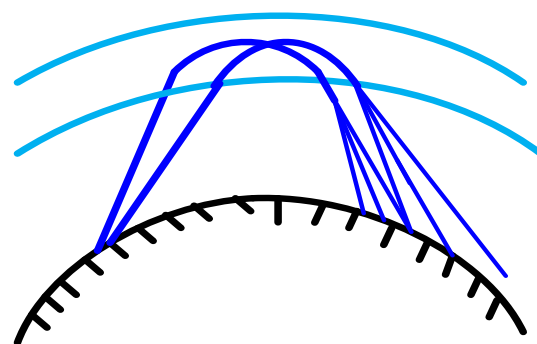
一次反射和两次反射



反射区高度不同



波束分裂



漫射

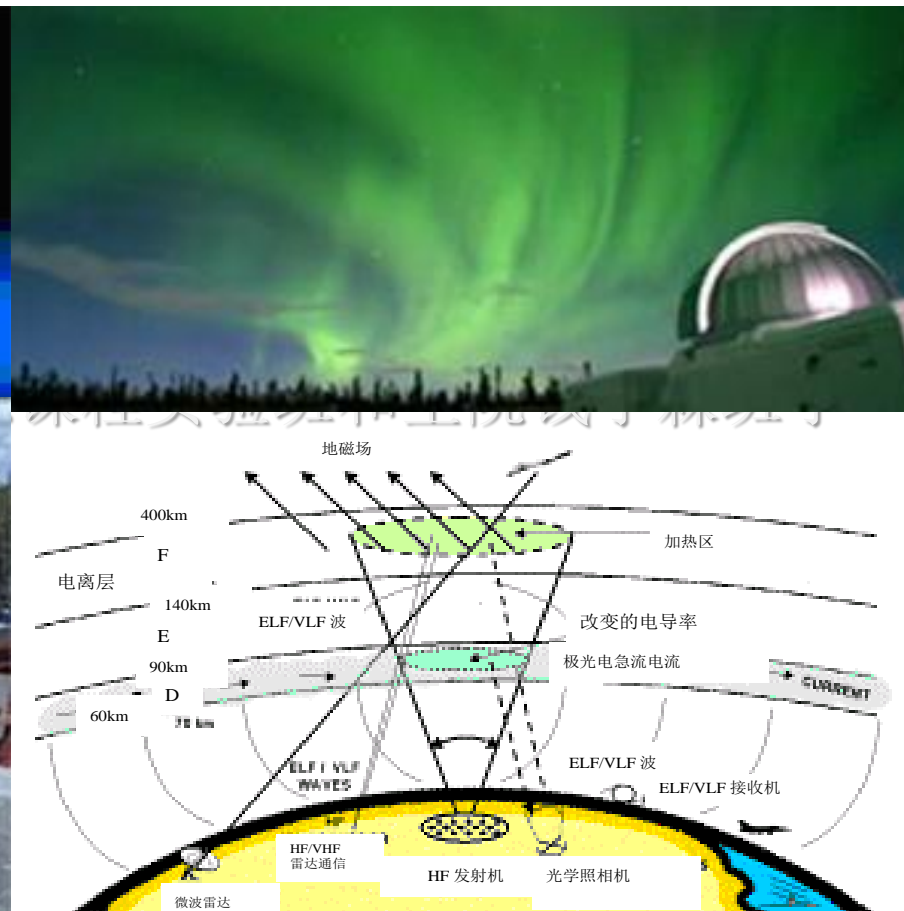
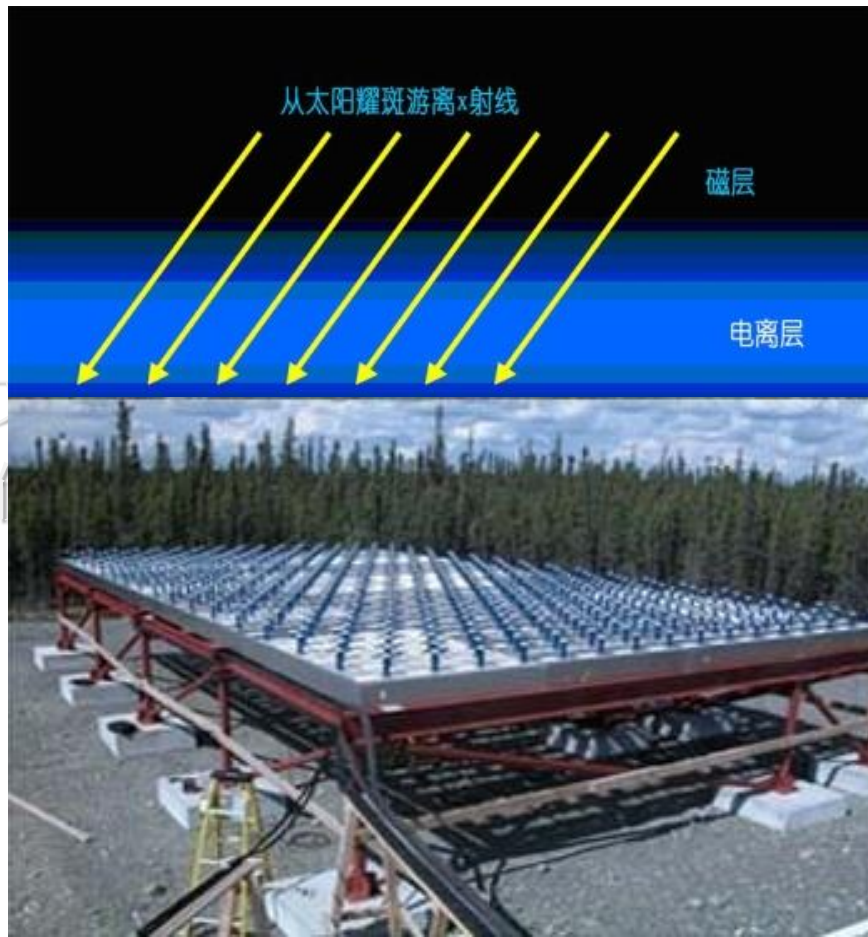
本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



# 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

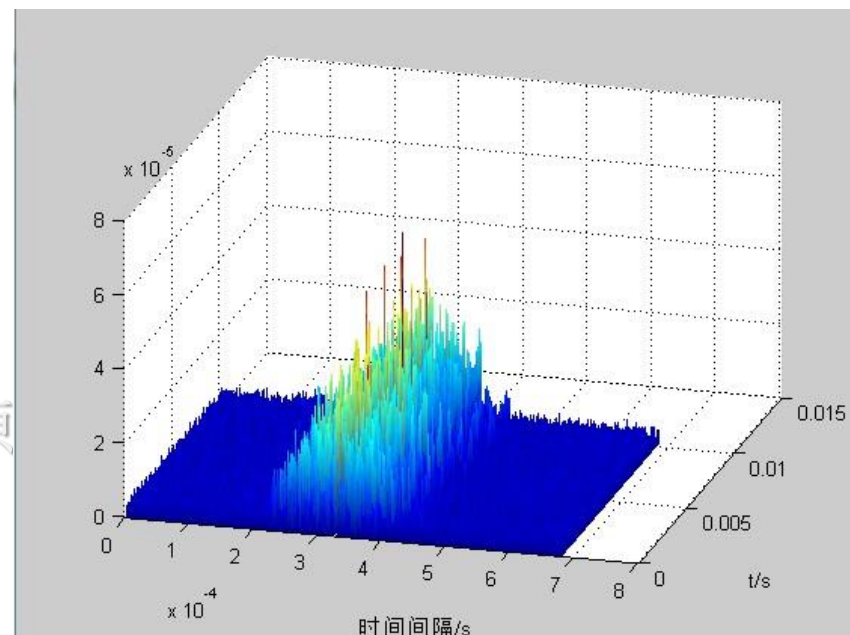
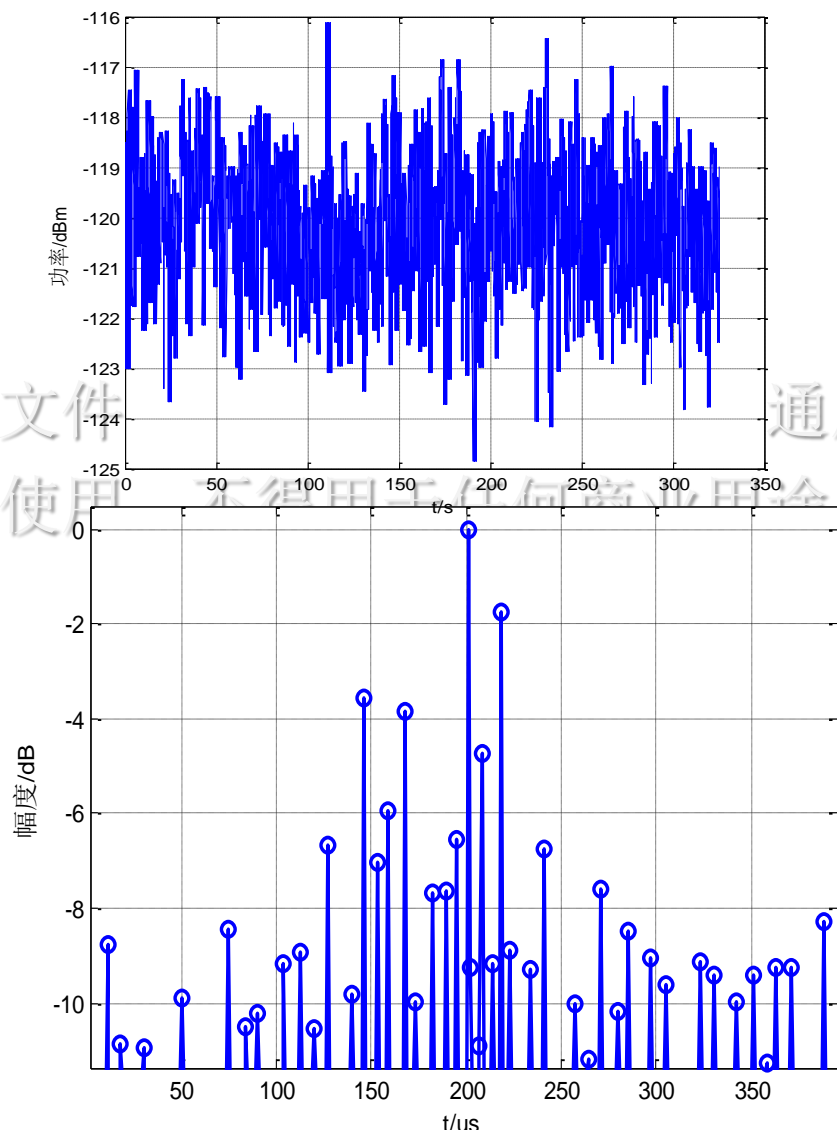




# 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院







# 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

## 二、随参信道的特性

### 1、传输媒质的三个特点

(1) 对信号的衰减是时变的;

(2) 对信号的时延是时变的;

(3) 多径传播。

### 2、对信号传输的影响

(1) 多径衰落和频率弥散

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

$$\text{发: } s(t) = A \cos \omega_c t$$

$$\text{收: } r(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \omega_c [t - \tau_i(t)]$$

$$= \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos [\omega_c t + \varphi_i(t)] \quad \varphi_i(t) = -\omega_c \tau_i(t)$$

$$r(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \varphi_i(t) \cos \omega_c t - \sum_{i=1}^n a_i(t) \sin \varphi_i(t) \sin \omega_c t$$

$$= X(t) \cos \omega_c t - Y(t) \sin \omega_c t$$

$$= V(t) \cos [\omega_c t + \varphi(t)]$$

$$\text{一般} \quad X \sim N(0, \sigma_x^2) \quad Y \sim N(0, \sigma_y^2) \quad \sigma_x = \sigma_y$$



## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

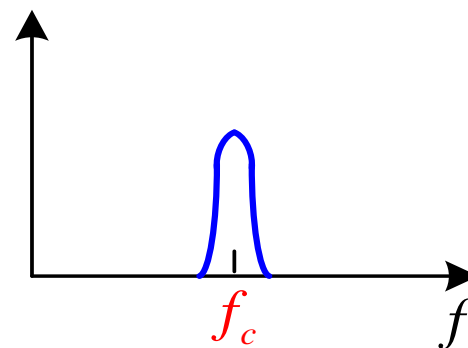
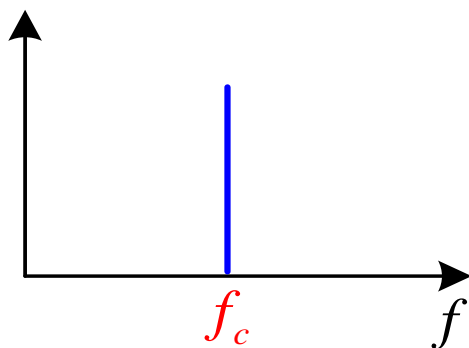
$\therefore V(t)$  : 瑞利分布

$$f(v) = \frac{v}{\sigma_v^2} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}\right), \quad v \geq 0 \quad \sigma_v = \sigma_x = \sigma_y$$

$\therefore \varphi(t)$  : 均匀分布

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

频域:



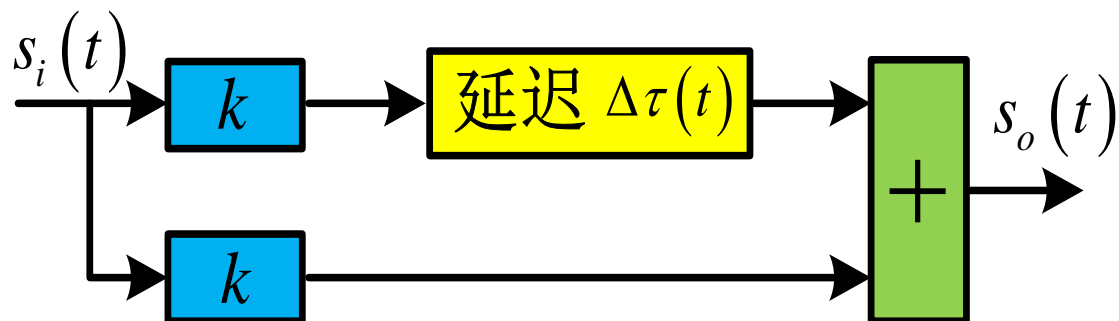


## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### (2) 频率选择性衰落



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$H(\omega) = \frac{s_o(\omega)}{s_i(\omega)} = k \left[ 1 + e^{-j\omega\Delta\tau(t)} \right]$$

$$\begin{aligned} |H(\omega)| &= k \left| 1 + \cos \omega\Delta\tau(t) - j \sin \omega\Delta\tau(t) \right| \\ &= 2k \left| \cos \frac{\omega\Delta\tau(t)}{2} \right| \end{aligned}$$



# 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

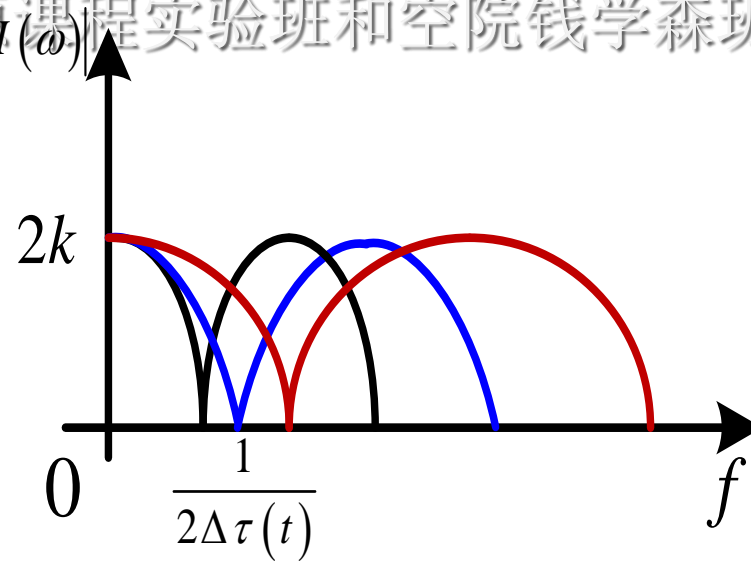
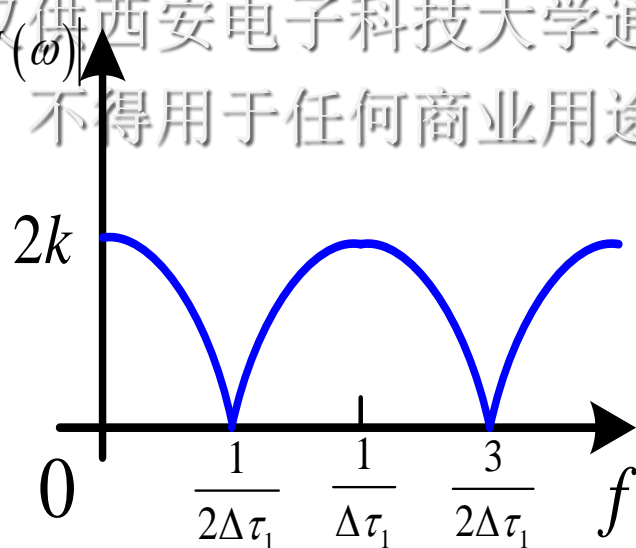
通信工程学院

$$\text{当 } \omega = \frac{2n\pi}{\Delta\tau(t)}$$
$$\omega = \frac{(2n+1)\pi}{\Delta\tau(t)}$$

极点

零点

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。





## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

设信道的最大多径时延差为 $\Delta\tau_m$ ，则相关带宽为

要求：
$$B_c = \frac{1}{\Delta\tau_m}$$
$$B \ll B_c$$

工程上的经验公式：

$$B = \left( \frac{1}{5} \sim \frac{1}{3} \right) B_c$$

$$T_s = (3 \sim 5) \Delta\tau_m$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

随参信道对信号传输的影响：

- ①多径衰落
- ②频率弥散
- ③频率选择性衰落



## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

1.某电离层反射信道的最大多径时延差为 $2\text{ ms}$ ,为避免频率选择性衰落,工程上认为在该信道上传输数字信号的码元速率不应超过波特。

本文档仅供西安电子科技大学通信工程学院和空院钱学森班学习使用,不得用于任何商业用途。

2.简述随参信道的传输媒质的特点,随参信道对宽带信号的传输有什么影响?有什么技术可在不降低系统信息传输速率的基础上,有效提高系统性能?





## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### 三、随参信道特性的改善

抗衰落措施

抗衰落性能好的调制解调技术

扩频技术

功率控制技术

分集接收技术

#### 1、分集接收原理

双重含义

分散接收

集中处理

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



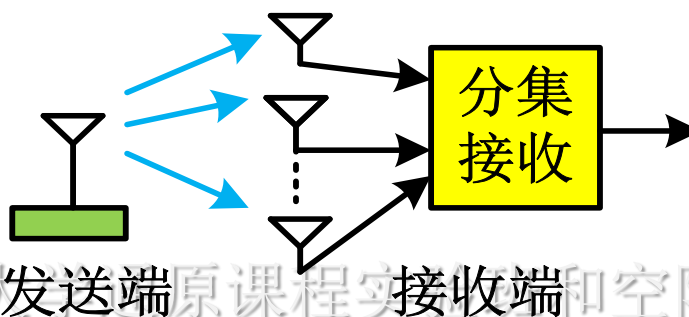
## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### (1) 分集方式

#### ① 空间分集



#### ② 频率分集

要求:  $\Delta f \geq B_c = \frac{1}{\Delta \tau_m}$

#### ③ 时间分集

要求:  $\Delta t \geq \frac{1}{2f_m} = \frac{1}{2(v/\lambda)}$

本文件仅供西安电子科技大学原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

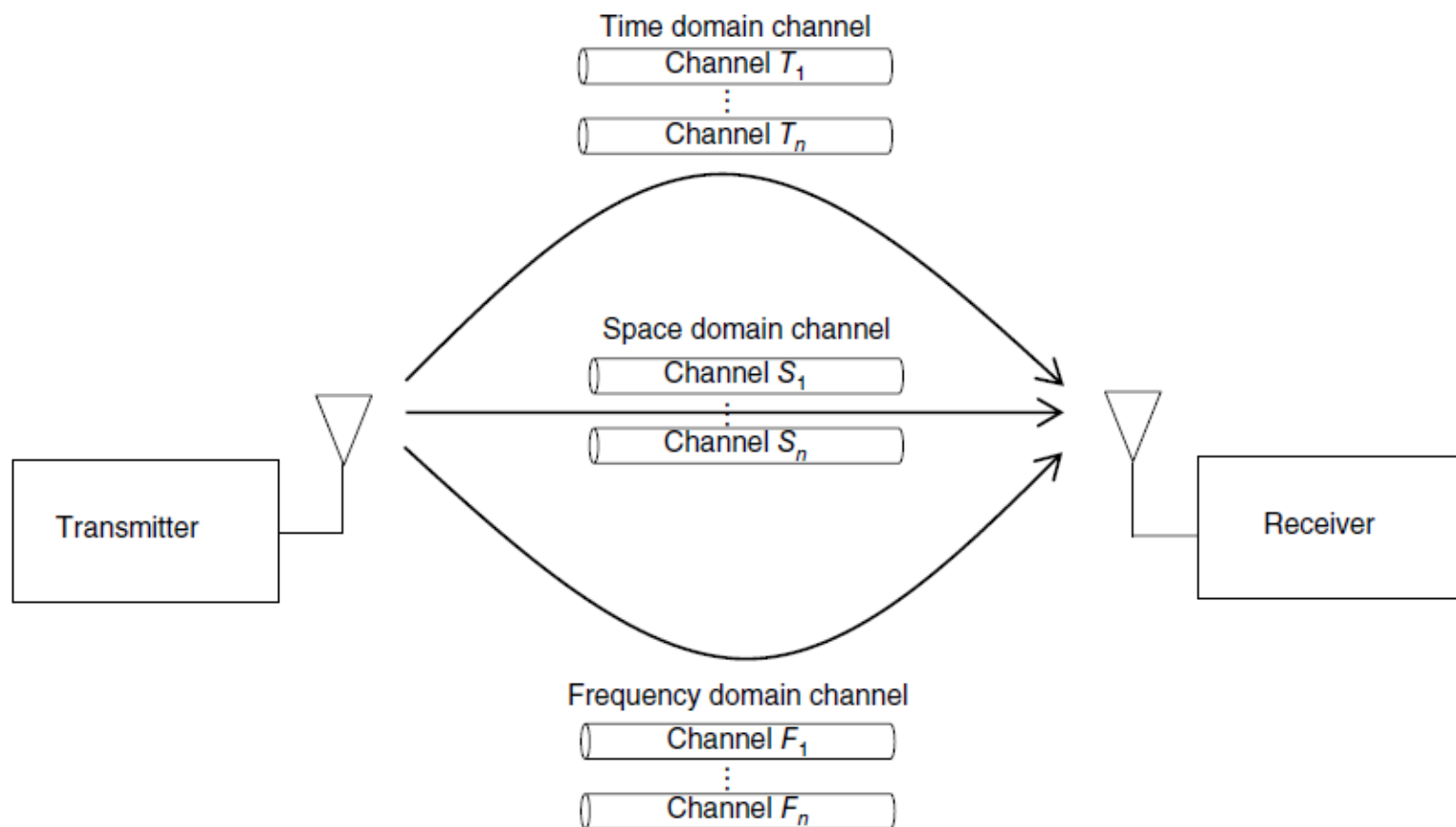


# 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

## (1)分集方式



学

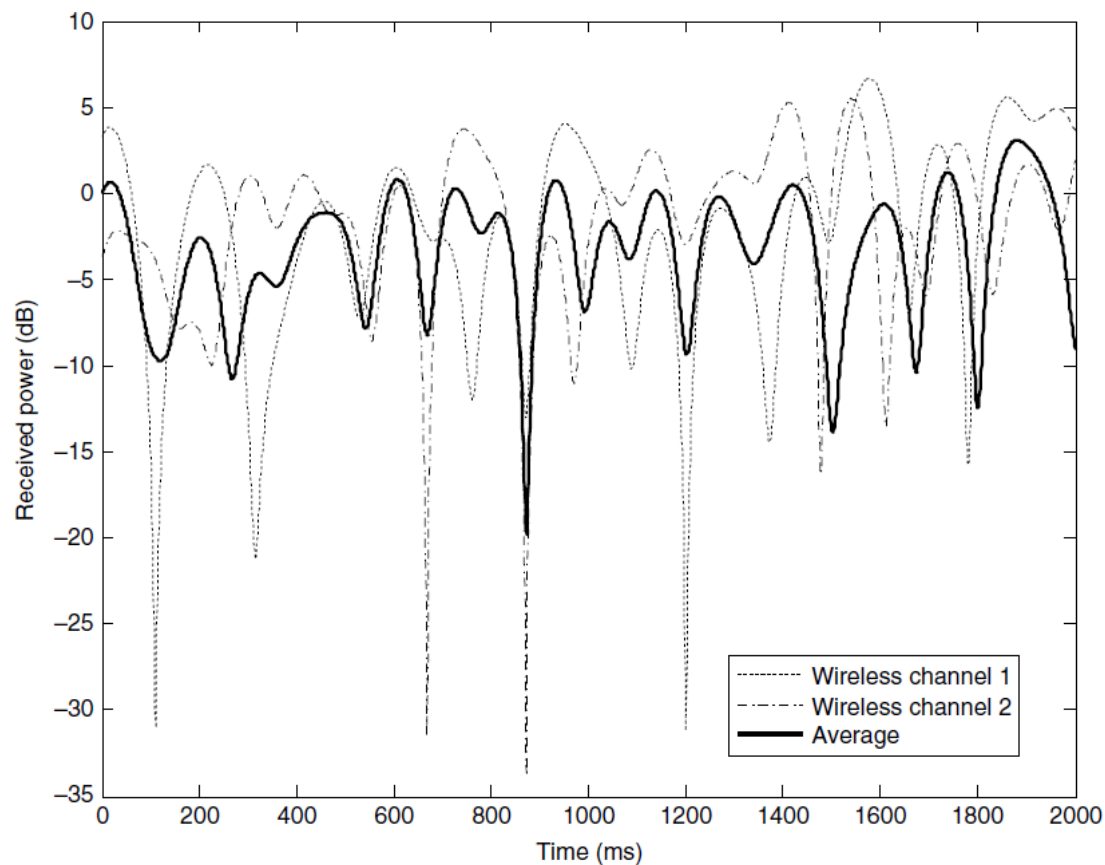
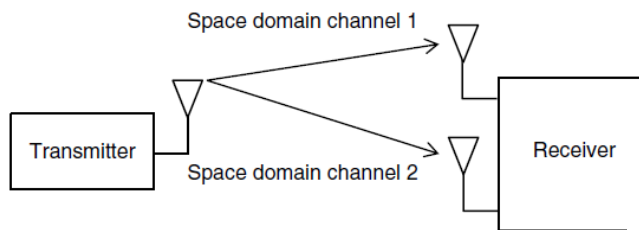
本文  
习使



# 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院



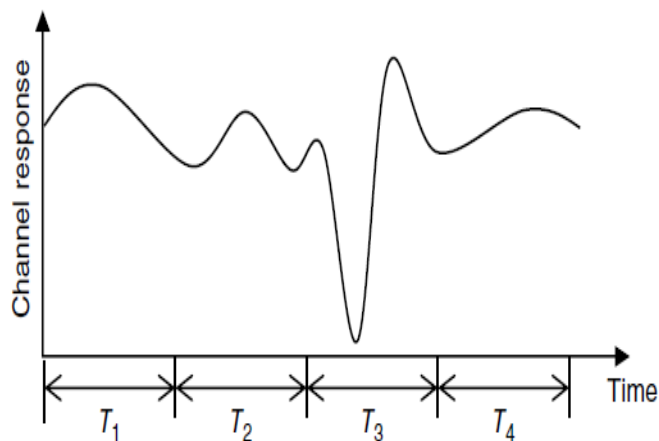
本文件仅供西安电子科技大学  
习使用，不得用于任何



# 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院



Codeword

aaaa

bbbb

~~cccc~~

dddd

Codeword  
after interleaving

abcd

abcd

~~abcd~~

abcd

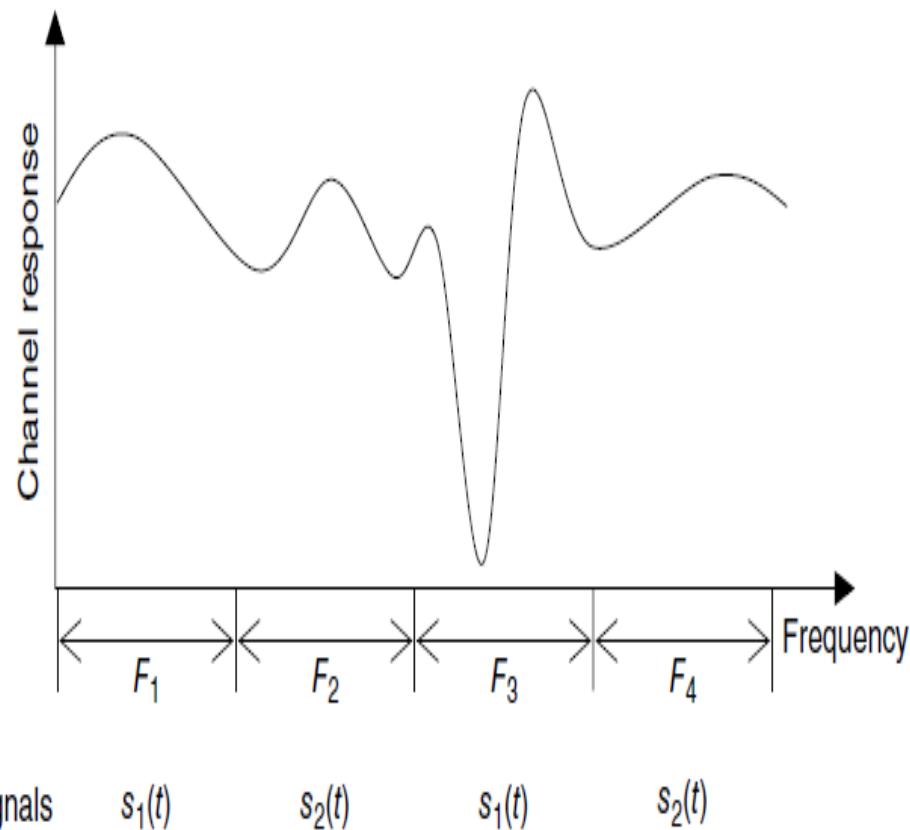
Codeword  
after de-interleaving

~~aa~~a

~~bb~~b

~~cc~~c

~~dd~~d





## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

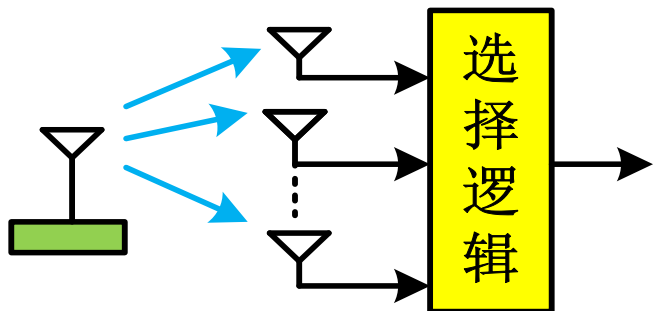
通信工程学院

### (2) 合并方式

假设 $N$ 个独立衰落信号分别为 $r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t)$ , 则合并器输出为

$$r(t) = a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t) + \dots + a_N r_N(t) = \sum_{i=1}^N a_i r_i(t)$$

#### ① 选择式合并



$$\bar{r}_N = \bar{r}_0 \sum_{k=1}^N \frac{1}{k}$$

合并增益为:

$$G_N = \frac{\bar{r}_N}{\bar{r}_0} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{k}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

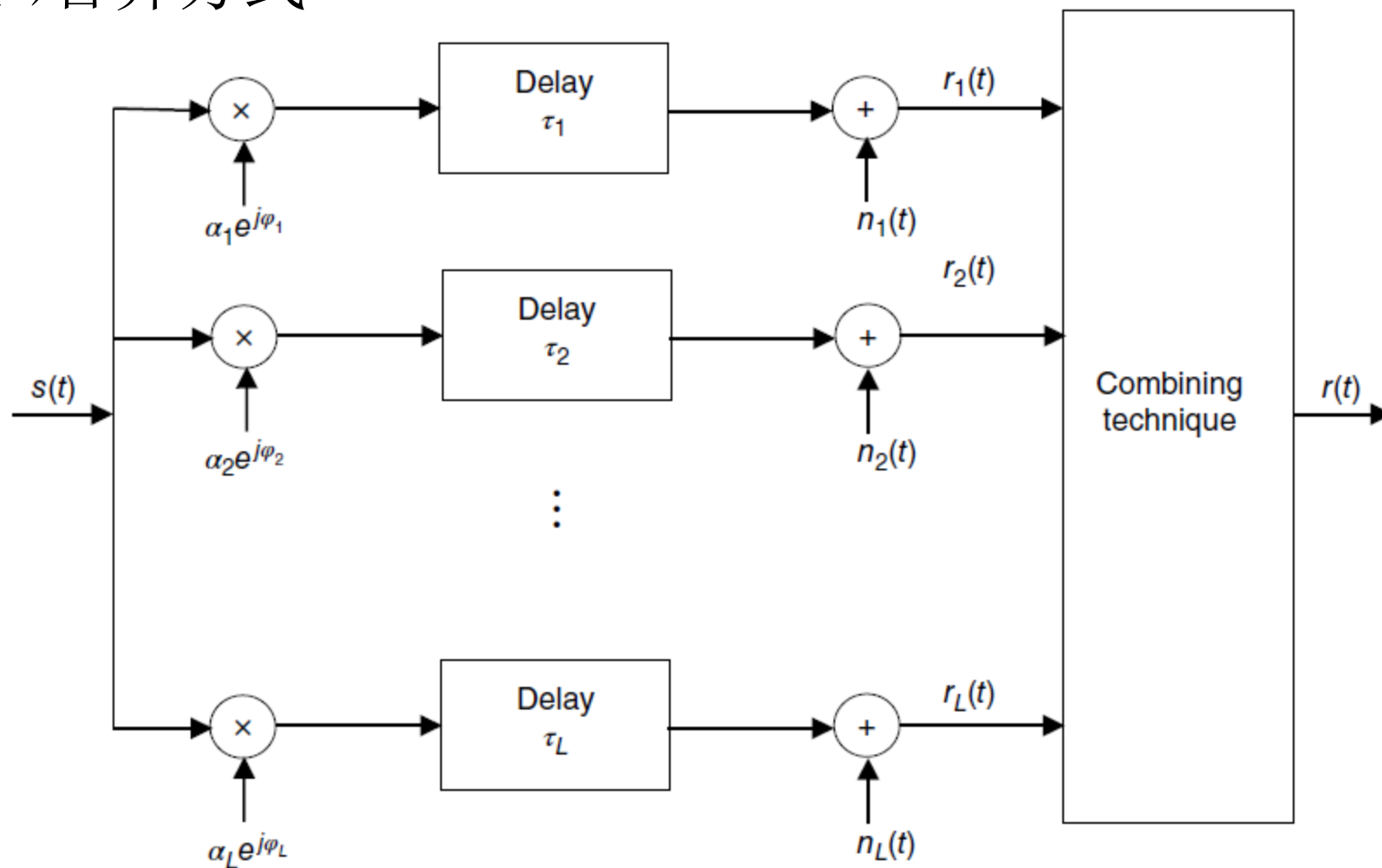


# 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

## (2)合并方式



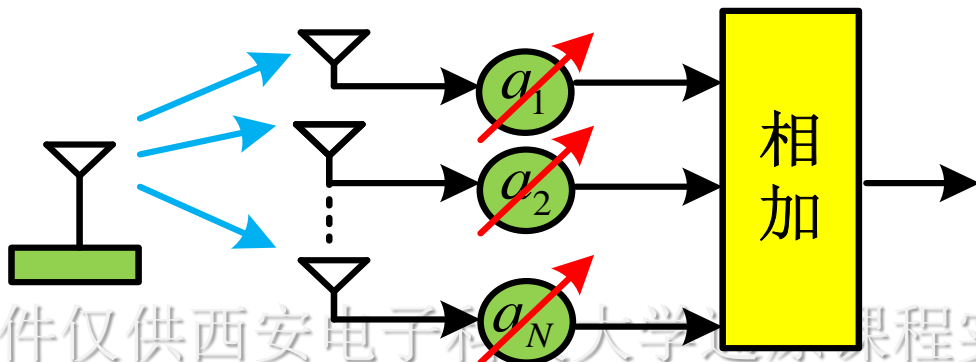


## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### ②最大比值合并



$$\bar{r}_N = N\bar{r}_0$$

$$G_N = \frac{\bar{r}_N}{\bar{r}_0} = N$$

### ③等增益合并

$$\text{即 } a_1 = a_2 = \cdots = a_N$$

$$\bar{r}_N = \bar{r}_0 \left[ 1 + (N-1) \frac{\pi}{4} \right]$$

$$G_N = \frac{\bar{r}_N}{\bar{r}_0} = 1 + (N-1) \frac{\pi}{4}$$

本文件仅供西安电子科技大学通信工程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。



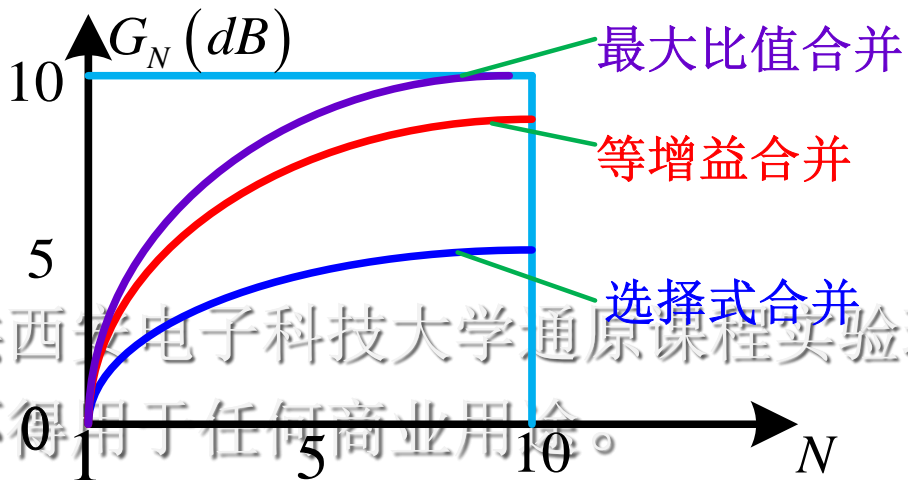


## 3.3 随参信道及其传输特性

西安电子科技大学

通信工程学院

### 2、分集合并性能比较



注：①  $N \uparrow \rightarrow G_N \uparrow$ , 但增长速度 $\downarrow$ 。

②  $N$ 相同:  $G_{N\text{最}} > G_{N\text{等}} > G_{N\text{选}}$ 。

③  $N$ 较小时:  $G_{N\text{最}} \approx G_{N\text{等}}$ 。



## 3.4 信道的加性噪声

西安电子科技大学

通信工程学院

调制信道：
$$r(t) = c(t) * s_i(t) + n(t)$$

$\downarrow$                        $\downarrow$

乘性干扰              加性噪声

### 一、噪声的分类

1、按来源分

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

- (1) 内部噪声
  - (2) 自然噪声
    - 大气噪声
    - 太阳噪声
    - 银河噪声
  - (3) 人为噪声
    - 工业噪声
    - 无线电噪声
- 宇宙噪声



## 3.4 信道的加性噪声

西安电子科技大学

通信工程学院

### 2、按性质分

(1)单频噪声

(2)脉冲噪声

(3)起伏噪声

热噪声

散弹噪声

宇宙噪声

**注：**起伏噪声无论是在时域，还是在频域，都始终存在，不可避免，所以是影响通信质量的主要因素



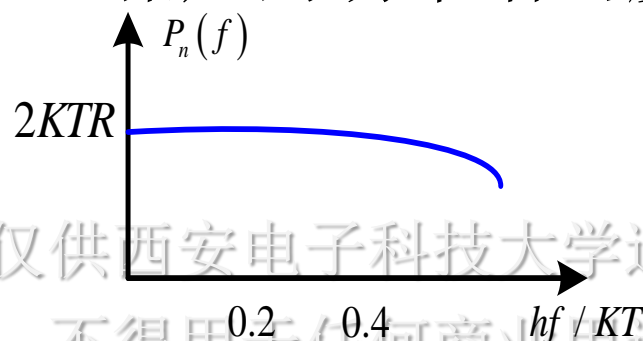
## 3.4 信道的加性噪声

西安电子科技大学

通信工程学院

### 二、起伏噪声的特性

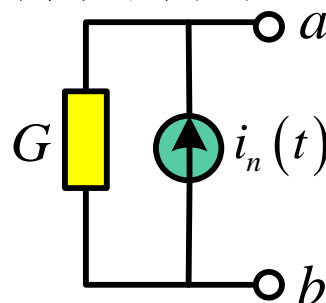
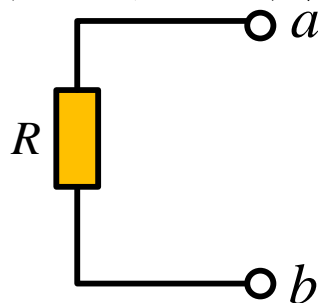
热噪声的功率谱密度:



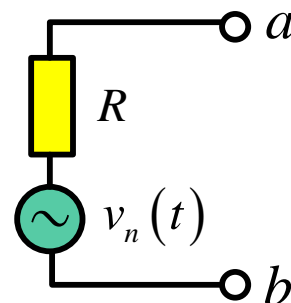
在室温条件下  $f < 1000\text{GHz}$

时, 基本平坦。

电阻的热噪声有两种表示方法:



$$P_i(f) = 2KTG$$



$$P_v(f) = 2KTR$$



## 3.4 信道的加性噪声

西安电子科技大学

通信工程学院

**结论：**起伏噪声可近似看作高斯白噪声。

$$P_n(\omega) = \frac{n_0}{2} (W / Hz)$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$R_n(\tau) = \frac{n_0}{2} \delta(\tau)$$

$$f_n(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma_n^2}\right)$$



## 三、通信系统中的加性噪声



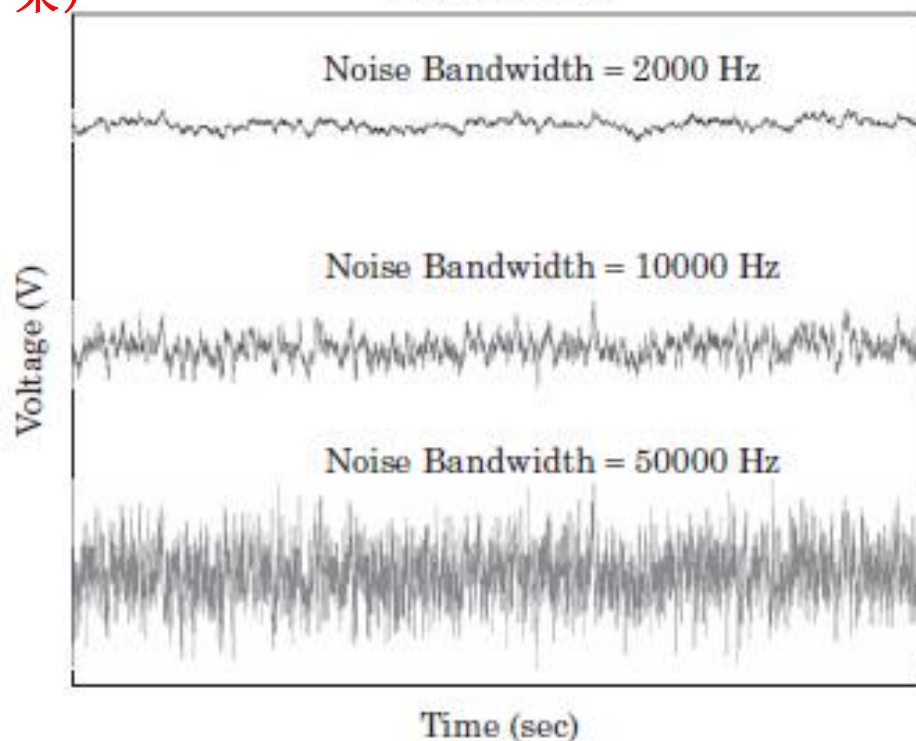
加性噪声

带通型噪声

高斯白噪声

窄带高斯噪声

Filtered Noise



本文件仅供西安电子科技大学  
习使用，不得用于任何商业月



## 3.4 信道的加性噪声

西安电子科技大学

通信工程学院

### 三、通信系统中的加性噪声



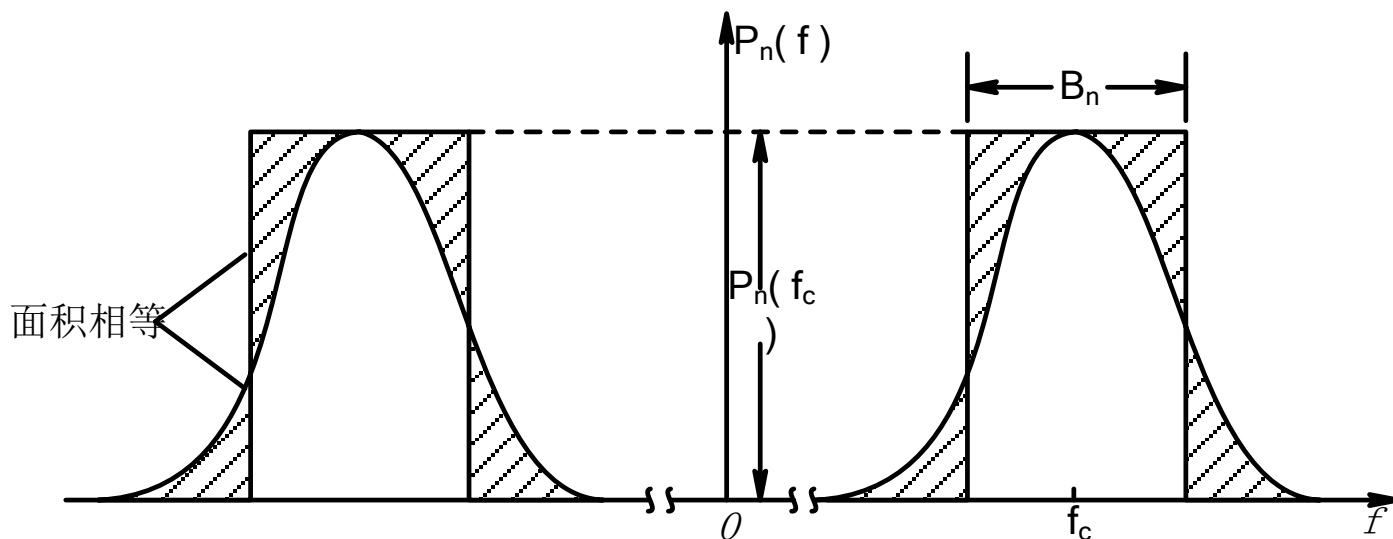
加性噪声

带通型噪声

高斯白噪声

窄带高斯噪声

窄带高斯噪声的功率谱密度:





## 3.4 信道的加性噪声

西安电子科技大学

通信工程学院

等效噪声带宽:

$$B_n = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P_n(f) df}{2P_n(f_c)} = \frac{\int_0^{\infty} P_n(f) df}{P_n(f_c)}$$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

**物理意义：**高为  $P_n(f_c)$ ，宽为  $B_n$  的噪声功率与功率谱密度为  $P_n(f)$  的带通型噪声功率相等。





## 3.4 信道的加性噪声

西安电子科技大学

通信工程学院

1. 均值为 0，方差为  $\sigma^2$  的两个相互独立的高斯随机变量  $n_1, n_2$ ，通过一个线性变换后得到两个随机变量， $x_1 = n_1 + n_2$ ， $x_2 = n_1 - n_2$ ，则  $x_1$  和  $x_2$  的联合概率密度为\_\_\_\_\_。

本文件仅供西安电子科技大学内部教学使用，不得用于任何商业用途。



## 3.5 信道容量

西安电子科技大学

通信工程学院

### 一、定义

**信道容量：**信道中信息无差错传输的最大速率。

—— 极限传输能力

### 二、连续信道的信道容量

#### 1、香农公式

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right) (b/s)$$

该公式给出了在受到加性高斯白噪声干扰的调制信道中，信息无差错传输速率的极限。



## 3.5 信道容量

西安电子科技大学

通信工程学院

讨论:

$$(1) S \uparrow \Rightarrow C \uparrow, \lim_{S \rightarrow \infty} C \rightarrow \infty$$

无法实现

$$(2) n_0 \downarrow \Rightarrow C \uparrow, \lim_{n_0 \rightarrow 0} C \rightarrow \infty$$

无噪信道容量无穷大

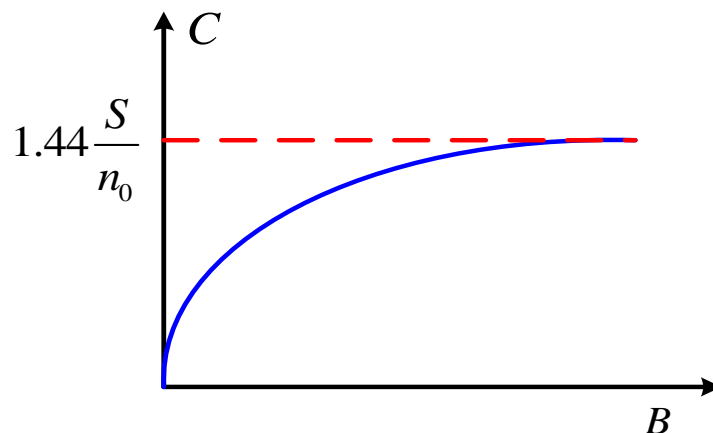
$$(3) B \uparrow \Rightarrow C \uparrow \text{ 有限}$$

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right)$$

$$= \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{S}{n_0} \frac{n_0 B}{S} \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right)$$

$$= \frac{S}{n_0} \log_2 e \approx 1.44 \frac{S}{n_0}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \log_2 (1+x) = \log_2 e$$





## 3.5 信道容量

西安电子科技大学

通信工程学院

### 2、香农公式的应用

(1) 根据所需的  $R_b$  , 计算  $\left(\frac{S}{N}\right)_{\min}$  或  $B_{\min}$  。

Example: Telephone channel with  $B = 3$  kHz and  $S/N = 30$  dB

$$\tilde{C} = 3000\text{Hz} \cdot \log_2(1 + 10^{30/10}) \approx 29,9\text{ kbit/s}$$

In both directions

(2)  $B$  与  $\frac{S}{N}$ 、 $t$  之间可以互换。

$$\left. \begin{array}{l} \text{如 } \frac{S}{N} \text{ 一定: } B \uparrow \Rightarrow C \uparrow \Rightarrow R_b \uparrow \\ t = \frac{I}{R_b} \end{array} \right\} \Rightarrow t \downarrow$$

$$\text{如 } C \text{ 一定: } B \uparrow \Rightarrow \frac{S}{N} \downarrow$$



## 3.5 信道容量

西安电子科技大学

通信工程学院

如  $C$  一定:  $B \uparrow \Rightarrow \frac{S}{N} \downarrow$

本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。

$$C = 1 \times 10^4 \text{ b/s}, \quad B_1 = 3 \text{ KHz}, \quad \frac{S_1}{N_1} = 15$$
$$B_2 = 4 \text{ KHz}, \quad \frac{S_2}{N_2} = 7$$



## 3.5 信道容量

西安电子科技大学

通信工程学院

【例】电视图像由300000个小像素组成，每个像素取10个亮度电平，且等概出现，每秒传30帧，要求  $S/N = 30dB$ ，计算所需的最小信道带宽。

解：  $R_b = R_B \cdot H = 300000 \times 30 \times \log_2 10 = 9.96 \times 10^5 b/s$

$$\therefore C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \geq R_b$$

$$\therefore B_{\min} = \frac{R_b}{\log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)} = \frac{9.96 \times 10^5}{\log_2 (1 + 1000)} = 3.02 \times 10^6 Hz$$



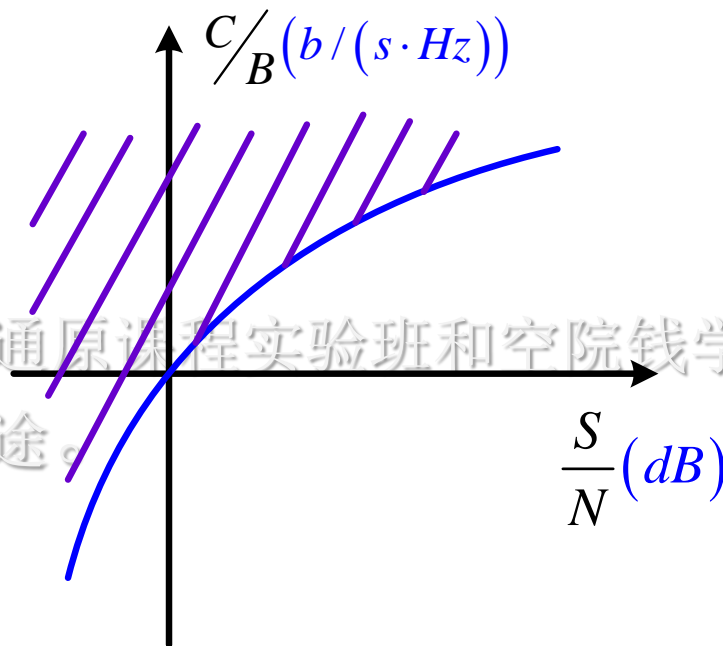
## 3.5 信道容量

西安电子科技大学

通信工程学院

### 3、归一化信道容量

$$C/B = \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$



本文件仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。





## 3.5 信道容量

西安电子科技大学

通信工程学院

- Capacity of 1-D AWGN channel

$$C = \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left( 1 + 2 \frac{E_s}{N_0} \right) = \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left( 1 + 2R_c \frac{E_b}{N_0} \right)$$

- $R_c = C \rightarrow$  implicit equation

$$C = \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left( 1 + 2C \frac{E_b}{N_0} \right)$$

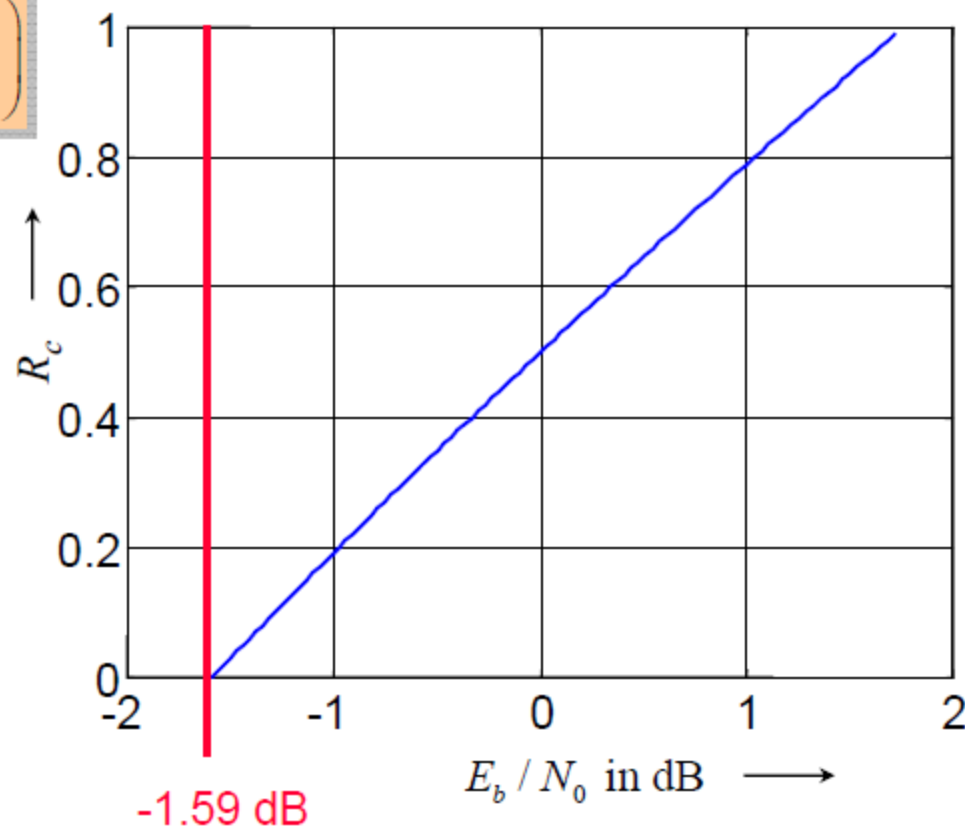
- SNR required to achieve  $C$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{2C} - 1}{2C}$$

- Minimum SNR for information bits

$$\lim_{C \rightarrow 0} \frac{E_b}{N_0} = \ln(2) \approx -1.59 \text{ dB}$$

- ◆ No error free communication possible for  $E_b/N_0 < -1.59 \text{ dB}$





## 3.5 信道容量

西安电子科技大学

通信工程学院

写出信道容量的公式，分析各参数对信道容量的影响？在实际频带或功率受限的系统中，如何有效提高系统容量？

本文档仅供西安电子科技大学通原课程实验班和空院钱学森班学习使用，不得用于任何商业用途。