

第三章 信道

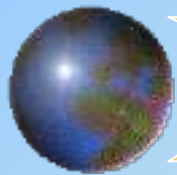
尹林子

物理科学与技术学院信息所



内 容

- ✚ 3.1 引言
- ✚ 3.2 信道数学模型
- ✚ 3.3 恒参信道特性及其对信号传输的影响
- ✚ 3.4 随参信道特性及其对信号传输的影响
- ✚ 3.5 随参信道特性的改善
- ✚ 3.6 信道的加性噪声
- ✚ 3.7 信道容量的概念

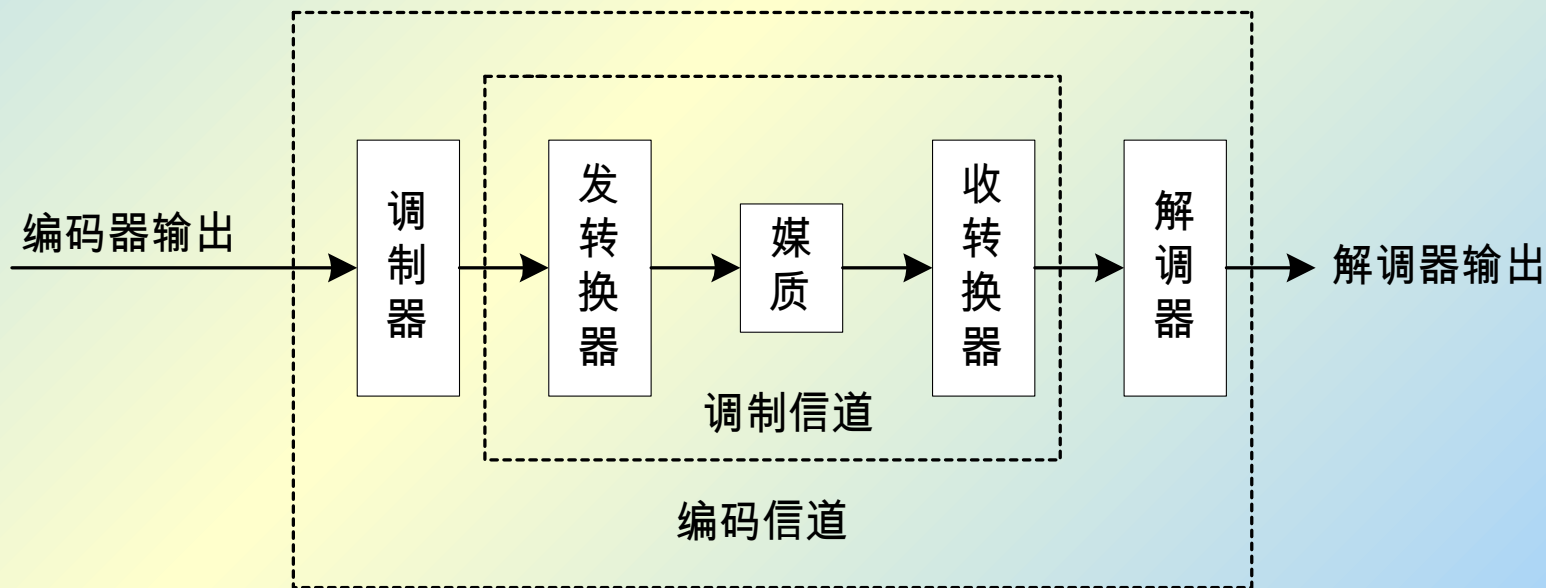


3.1 引言

信道：信号通道。

狭义信道：信号的传输媒质。有线、无线信道

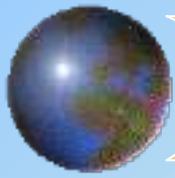
广义信道：媒质及有关变换装置。





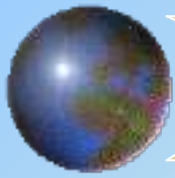
3.2 信道的数学模型

1 调制信道：传输已调信号，关心的是信号的失真情况及噪声对信号的影响。已调信号的瞬时值是连续变化的，故也称调制信道为连续信道，甚至称为信道。

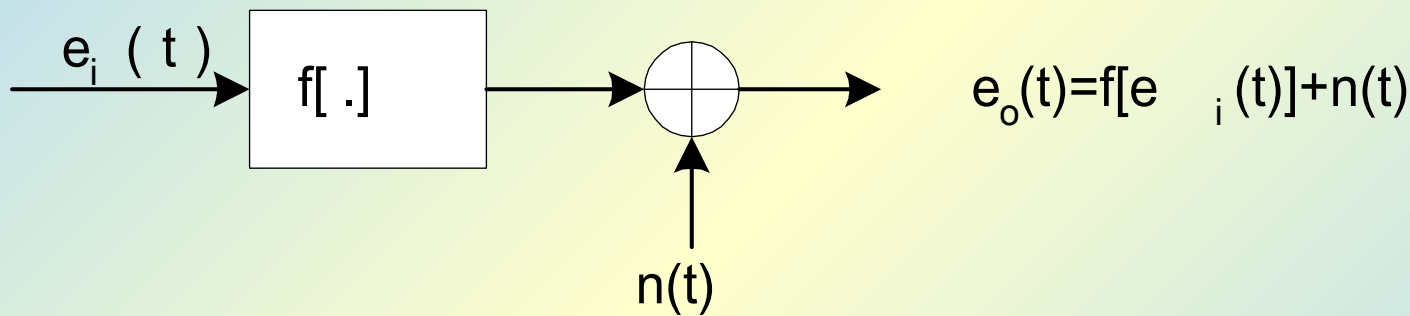
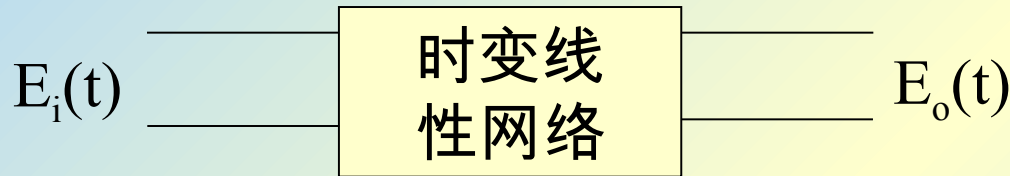


调制信道的共性

- ✦ 有一对（或多对）输入端和一对（或多对）输出端；
- ✦ 绝大多数的信道都是线性的；
- ✦ 信号通过信道具有一定的延迟，而且还会受到损耗；
- ✦ 即使没有信号输入，在信道的输出端仍有一定的功率输出；
- ✦ 所以，调制信道的模型为时变线性网络

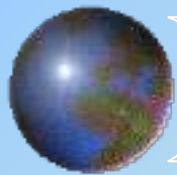


调制信道的模型



✦ **$N(t)$** 为加性干扰， **$f[.]$** 表示已调信号通过网络所发生的线性变换；上式常写为：

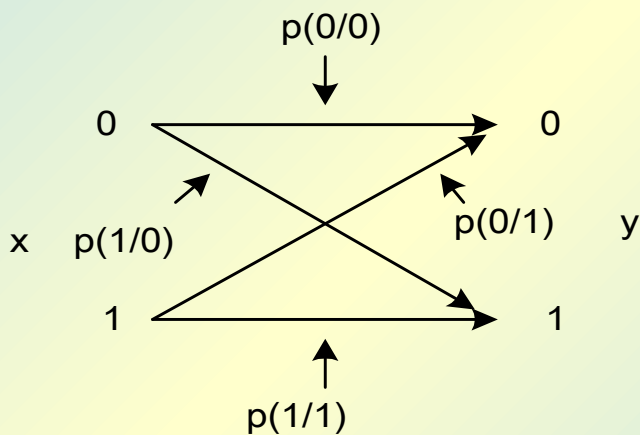
✦ **$E_o(t) = k(t) * e_i(t) + n(t)$**



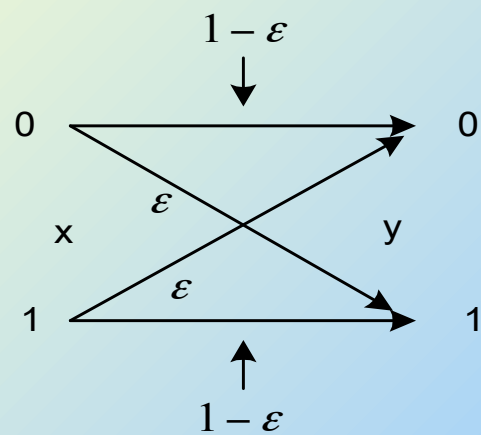
3.2 信道数学模型

2 编码信道：输入、输出都是数字信号，关心的是误码率而不是信号失真情况，但误码是由调制信道造成的，无调制解调器时，收、发滤波器设计不当，即 $n(t)$ 引起。一般用转移概率来描述

二进制无记忆信道



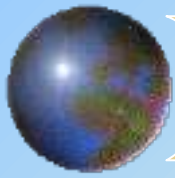
二进制无记忆对称信道





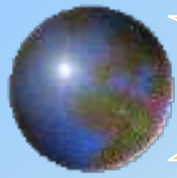
恒参信道举例

- ❖ **1**，三种有线信道：
- ❖ **明线**：平行而相互绝缘的架空裸线线路传输损耗低，但是对外界噪声干扰敏感
- ❖ **对称电缆**：传输损耗比明线大得多，但是传输特性比较稳定；
- ❖ **同轴电缆**：外界噪声很少进入其内部；



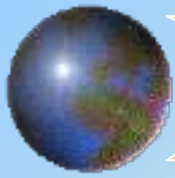
恒参信道举例

- ❖ **2**， 光纤信道：可提供极大的传输容量，具有损耗低，频带宽，线径细，重量轻，可弯曲半径小，不怕腐蚀，节省有色金属以及不受电磁干扰的特点。
- ❖ 是一个典型的数字信道。
- ❖ 直接中继器：光放大器（补偿光纤的传输损耗）；
- ❖ 间接中继器：将光信号转换为电信号，再生处理之后再调制到光载波上。



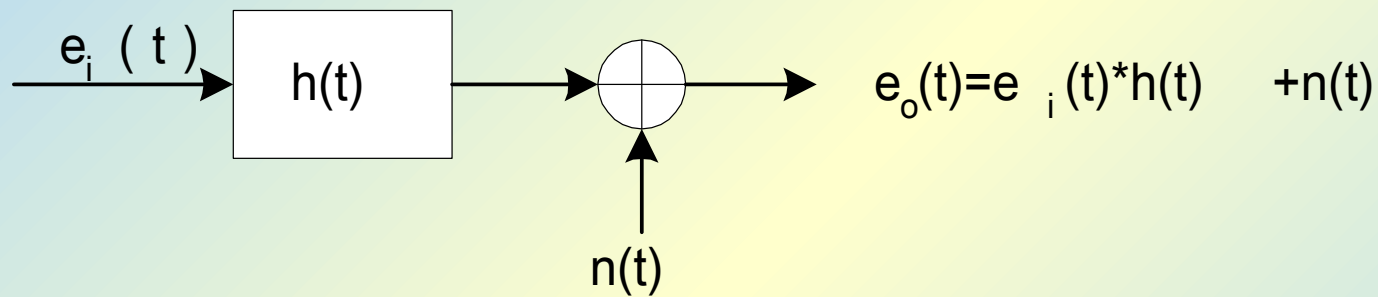
恒参信道举例

- ❖ **3**，无线电视距中继：传输容量大，发射功率小，通信稳定可靠；
- ❖ **4**，卫星中继信道：传输距离远，覆盖地域广，传播稳定可靠，传输容量大；由通信卫星，地球站，上行线路以及下行线路构成



3.3 恒参信道特性及其对信号传输的影响

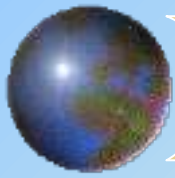
1 特性：一般为线性时不变系统。



$|H(\omega)| \neq k$ (常数)，产生幅频畸变。

$\Psi(\omega) \neq -\omega t_d$ ，产生相频畸变。

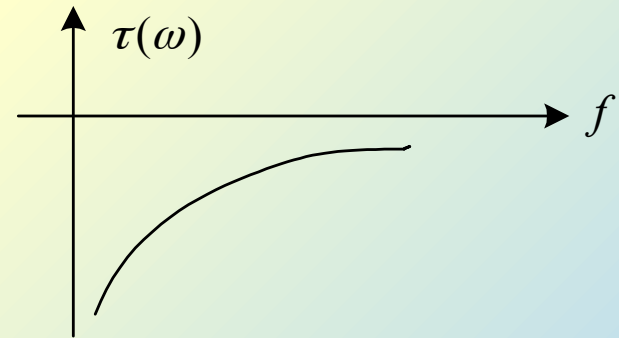
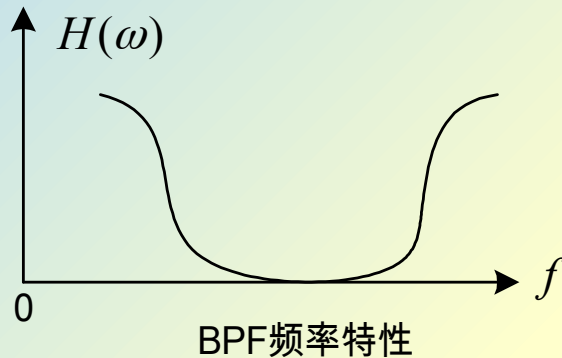
理想信道 $H(\omega) = k$ ，对 $e_i(t)$ 衰减、时延。



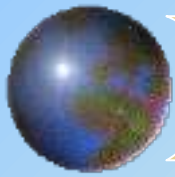
3.3 恒参信道特性及其对信号传输的影响

用群延迟频率特性来描述相频特性：

$\tau(\omega) = d\Psi(\omega)/d\omega$ ，当 $\tau(\omega) = -t_d$ 时，无相频畸变。



工程设计时，应使 $|H(\omega)|$ 畸变范围及 $\tau(\omega)$ 误差范围符合要求。通常采取均衡措施，即增加一个线性补偿网络。



3.3 恒参信道特性及其对信号传输的影响

2 对信号传输的影响。

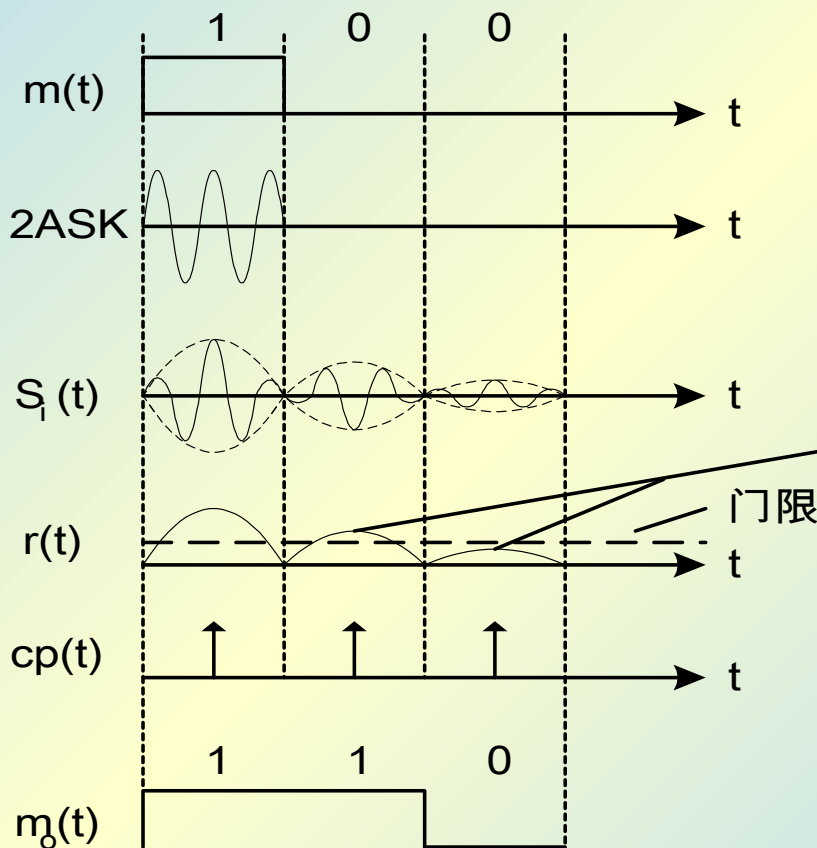
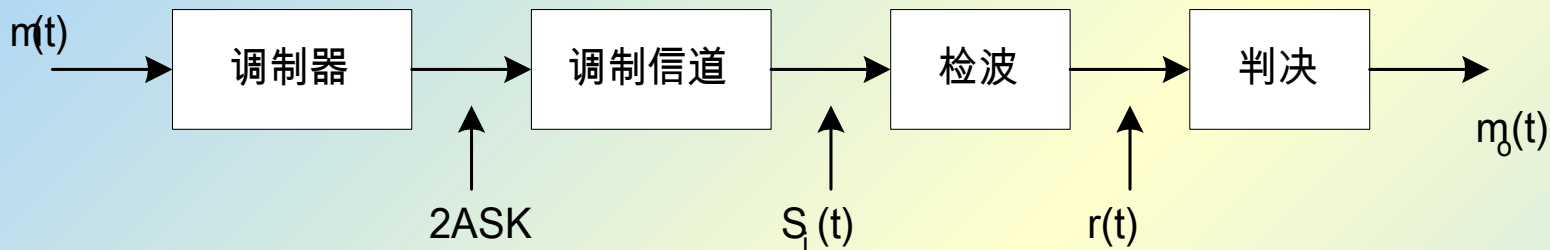
模拟信号： $|H(\omega)| \neq k$ ，使模拟信号失真，解调后基带信号失真。 $\tau(\omega) = -t_d$ ，对语音信号影响不大（耳朵对相位不敏感），仅对视频信号影响大。

数字信号： $H(\omega)$ 不理想，可能造成码间串扰、
误码。

例：2ASK 系统，设发滤波器带宽无限大，对信号传输无影响。



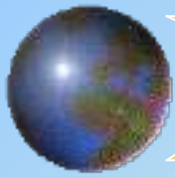
3.3 恒参信道特性及其对信号传输的影响



2ASK频谱范围无限，通过信道后失真

码间串扰

收、发滤波器合理设计，可使码间串扰为零。



3.3 恒参信道特性及其对信号传输的影响

3. 克服措施:

模拟通信： 频域均衡，使信道、均衡器联合频率特性在信号频率范围内无畸变。

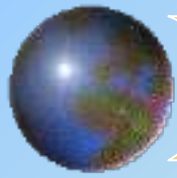
数字通信： (1) 合理设计收、发滤波器，消除信道产生的码间串扰。

(2) 信道特性缓慢变化时，用时域均衡器，使码间串扰降到最小且可自适应信道特性变化。



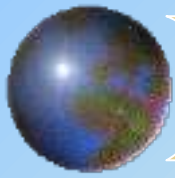
随参信道举例

- ❖ **1**，短波电离层反射信道：利用电离层来实现电波的反射；要求功率小，终端设备的成本较低；传播距离远；受地形限制较小；有适当的传输频带宽度；不易受到人为破坏；
- ❖ 但是可靠性差，需要经常更换工作频率，存在快衰落与多径时延失真，干扰电平高；
- ❖ 多径传播，临界频率等



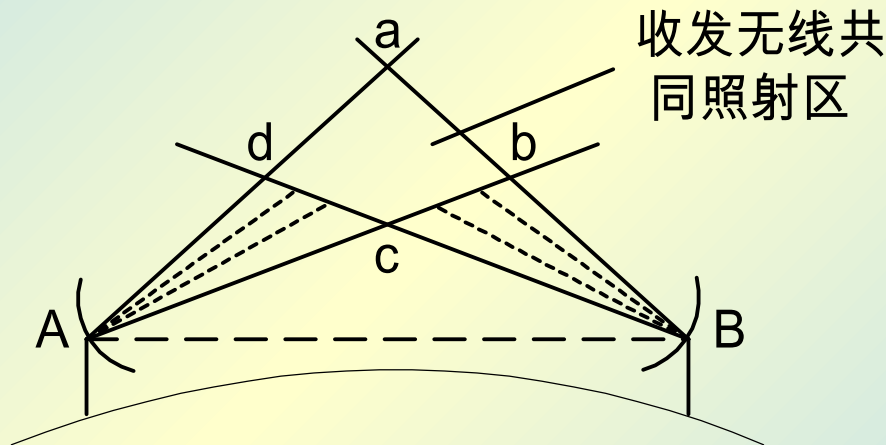
随参信道举例

- ❖ **2**， 对流层散射信道： 常用于干线信道，通常每隔 **300km** 左右建立一个中继站；以及点对点通信，譬如：海岛和陆地，边远地区和中心城市之间的通信；

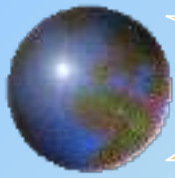


3.4 随参信道特性及其对信号传输的影响

1. 特性：以对流层散射信道为例：10km ~ 12km 大气层。特点：多径传输且每条路径的衰减及时延都是变化的。



a、b、c、d散射体，由小气团组成，每个小气团都是一个二次辐射源，它们组成一个散射体。



3.4 随参信道特性及其对信号传输的影响

2. 对信号传输的影响 (1) . 发射单频信号

$A\cos\omega t$, 瑞利衰落、频率弥散。

$$\begin{aligned} R(t) &= \sum u_i(t) \cos \omega_o [t - \tau_i(t)] \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ &= \sum u_i(t) \cos [\omega_o t + \psi_i(t)] \\ &= \sum u_i(t) \cos \psi_i(t) \cos \omega_o t - u_i(t) \sin \psi_i(t) \sin \omega_o t \\ &= X_c(t) \cos \omega_o t - X_s(t) \sin \omega_o t \\ &= V(t) \cos [\omega_o t + \psi(t)] \end{aligned}$$

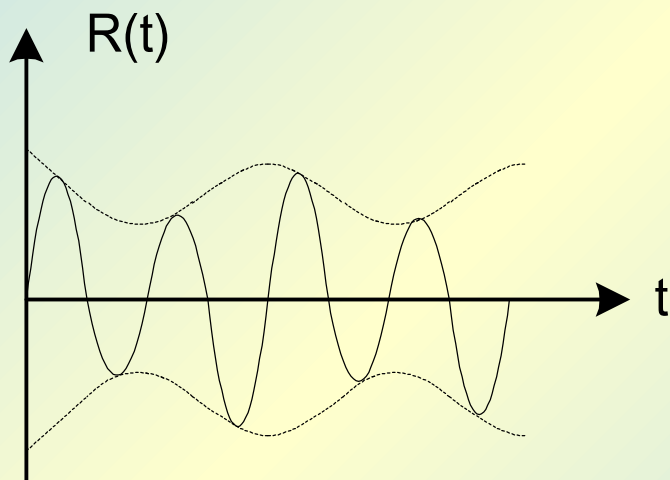
$$V(t) = \sqrt{X_c^2(t) + X_s^2(t)} \quad \psi(t) = \text{arctg}(X_s(t)/X_c(t))$$



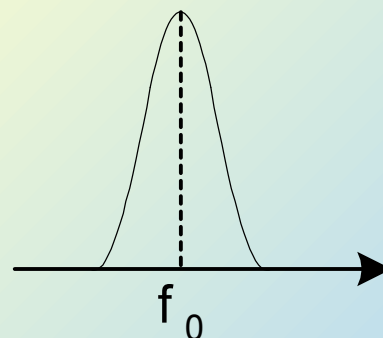
3.4 随参信道特性及其对信号传输的影响

$$f(v) = (v/\sigma^2) \exp(-v^2/2\sigma^2)$$

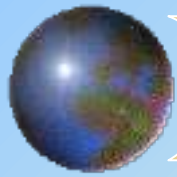
$$f(\psi) = 1/2\pi, \quad -\pi \leq \psi \leq \pi$$



时域：瑞利衰落（快衰落）

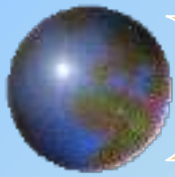


频域：频率弥散



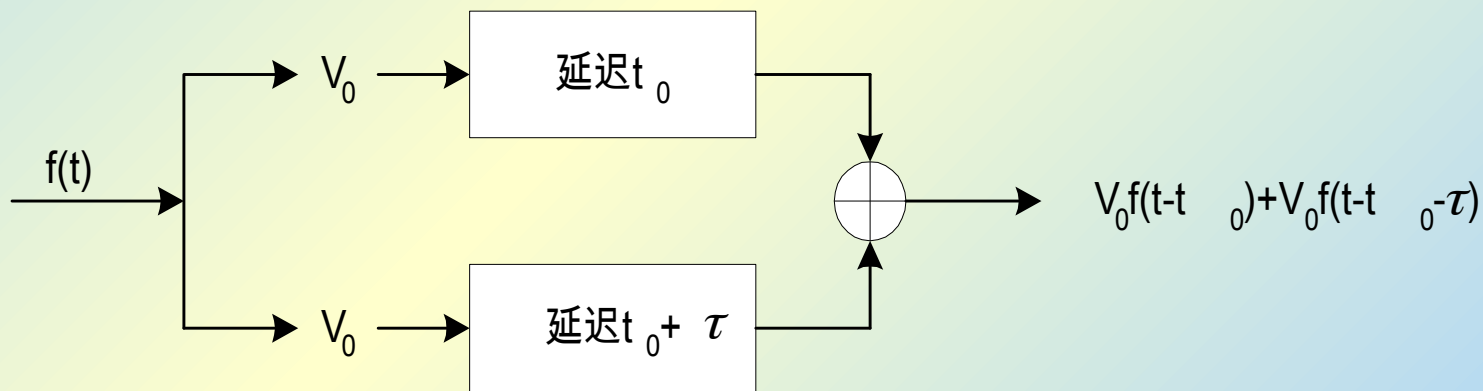
3.4 随参信道特性及其对信号传输的影响

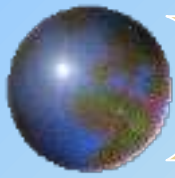
- ✦ 从波形上看，多径传播的结果使确定的载频信号变成了包络和相位都随机变化的窄带信号，这种信号称为**衰落信号**；
- ✦ 从频谱上看，多径传播引起了频率弥散（色散），即由单个频率变成了一个窄带频谱。



3.4 随参信道特性及其对信号传输的影响

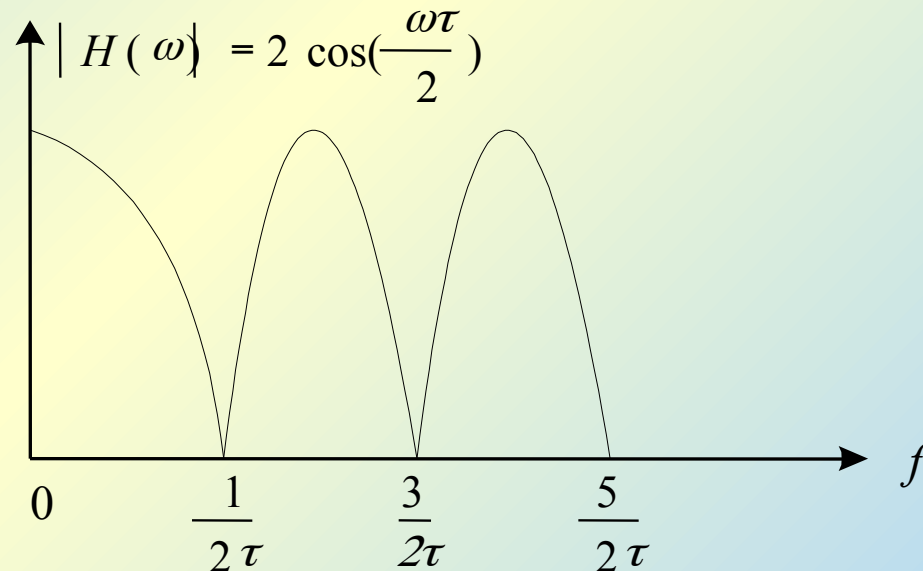
2. 对信号传输的影响 (2) . 发射频带信号 (频率选择性衰落) 。以两路径为例，且衰减是恒定的。即到达接受点的两路信号具有相同的强度和—个相对时延差。

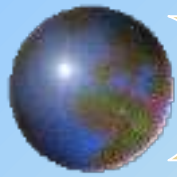




3.4 随参信道特性及其对信号传输的影响

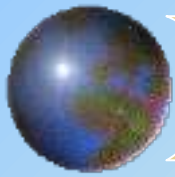
$$\begin{aligned} H(\omega) &= V_0 e^{-j\omega t_0} (1 + e^{-j\omega\tau}) \\ &= V_0 e^{-j\omega t_0} e^{-j\omega\frac{\tau}{2}} (e^{j\omega\frac{\tau}{2}} + e^{-j\omega\frac{\tau}{2}}) \\ &= V_0 e^{-j\omega t_0} e^{-j\omega\frac{\tau}{2}} \times 2 \cos\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \end{aligned}$$





最大多径时延差

- ❖ 可见，频率选择性依赖于相对时延差，通常用最大多径时延差 τ_m 来表示，并用它来估算传输零极点的位置。
- ❖ 定义 $\Delta f = 1/\tau_m$ 为多径传播媒质的相关带宽，为了不引起明显的选择性衰落，传输信号的频带必须小于多径传输媒质的相关带宽。
- ❖ 工程设计中，通常选择信号带宽为相关带宽的 **1/5 ~ 1/3**。例如 **3-10** 题



3.5 随参信道特性的改善

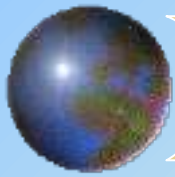
一. 分集接收技术

分别接收若干个独立的携带同一信息的信号，并将它们合并在一起，因这些信号不可能同时被衰减掉，因而可改善随参信道的传输特性。

分集方法：频率分集；空间分集；角度分集；极化分集

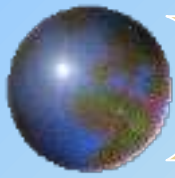
合并方法：最佳选择式、等增益相加、最大比相加。

二. 扩频技术



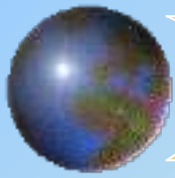
3.6 信道的加性噪声

- ✦ 根据来源不同可以分为：
- ✦ 人为噪声：无线电噪声（外台信号），工业噪声（力线、点火系统、电车、电源开关、电力铁道、高频电炉），荧光灯干扰等
- ✦ 自然噪声：闪电、大气中的磁暴、太阳黑子以及宇宙射线（天体辐射波）等
- ✦ 内部噪声：热噪声，散弹噪声
- ✦ 也可以分为确知噪声（如：电源哼声，自激振荡等）和随机噪声；



信道的加性噪声

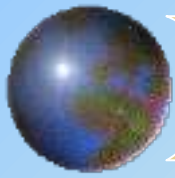
- ❖ 常见的随机噪声又分为几类：
- ❖ 单频噪声：可视为一个已调正弦信号。频带窄，在频率轴上的位置可以实测；主要指无线电干扰
- ❖ 脉冲噪声：在时间上无规则突发的短促噪声。脉冲幅度大，时间短，且相邻脉冲之间有较长的安静期，通常有较宽的频谱，但频率越高强度越小；包括工业干扰中的电火花，断续电流以及天电干扰中的闪电
- ❖ 起伏噪声：以热噪声和散弹噪声为代表，是普遍存在不可避免的。



热噪声

- ✦ 是在电阻一类导体中，自由电子布朗运动引起的噪声；服从高斯分配，在低于 **10^{12}HZ** 范围内，具有均匀的功率谱密度 **$2KTG$** ， **K** 为波尔兹曼常数， **T** 为绝对温度， **G** 为电导；
- ✦ 电阻热噪声的表示有两种：
- ✦ 并联表示以及戴文宁表示；

$$P_v(\omega) = R^2 P_i(\omega) = R^2 (2KTG) = 2KTR$$

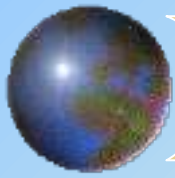


热噪声

- ❖ 设电路的频率范围为 **B** 赫，则噪声电流源实际提供的噪声功率为 **$2P_i(\omega)$** (**w**) **B**，而噪声电压源实际提供的噪声功率为 **$2P_v(\omega)$** (**w**) **B**；
- ❖ 电压电流的有效值分别为：

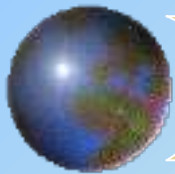
$$I_n = \sqrt{2P_i(\omega)B} = \sqrt{4KTGB}$$

$$V_n = \sqrt{2P_v(\omega)B} = \sqrt{4KTRB}$$

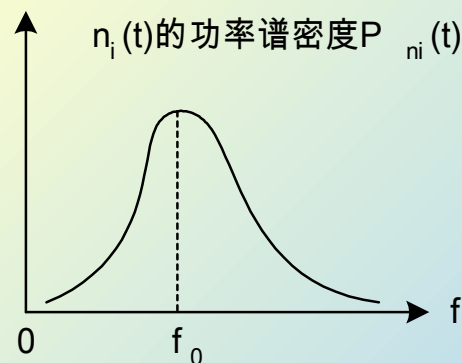
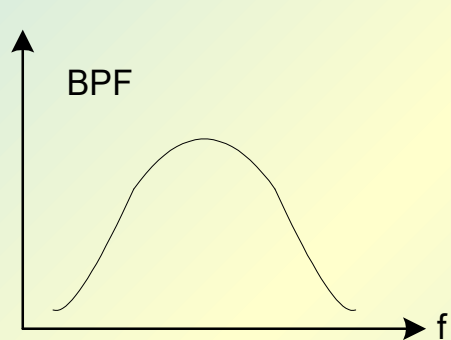
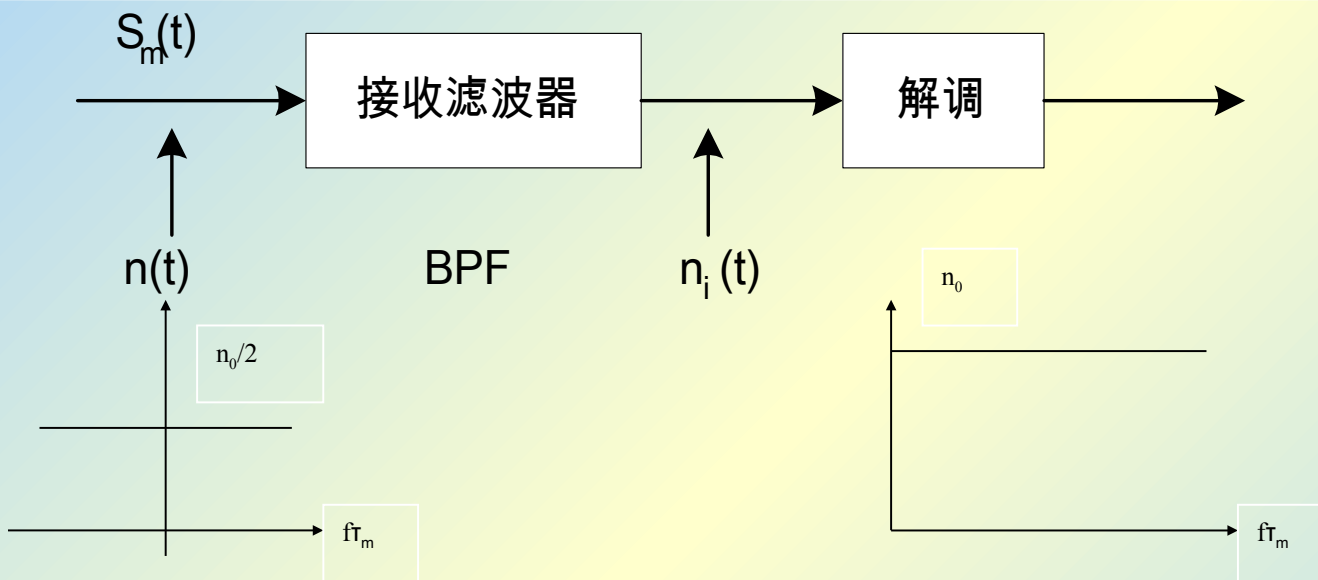


散弹噪声与宇宙噪声

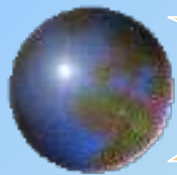
- ❖ 散弹噪声是由真空电子管和半导体器件中电子发射的不均匀引起的，服从高斯分配，其电流的功率谱密度等于 qI 。
- ❖ 宇宙噪声：天体辐射波对接收机形成的噪声；服从高斯分配；
- ❖ 结论：三种噪声都可以认为是一种高斯噪声；都在较宽范围内具有平坦的功率谱密度，因为接受机的原因，可以直接表述为窄带高斯噪声。



3.6 信道的加性噪声



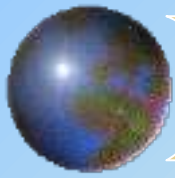
$$\text{噪声功率} = \int_{-\infty}^{\infty} p_n(f) df$$



噪声的等效带宽

- 噪声也同样有带宽， ω 。为高斯白噪声的数学期望

$$B_n = \frac{\int_0^{\infty} P_n(\omega) df}{P_n(\omega_0)}$$



3.7 信道容量的概念

一. 离散信道：输入输出信号为取值离散的。

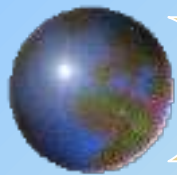
$x = \{x_i\}$; $i = 1, 2, 3 \dots L$

$y = \{y_j\}$; $j = 1, 2, 3 \dots M$ 一般应有 $L = M$

1 . 几个概率

- 先验概率 $P(x_i)$ x_i 的不确定性；
- 后验概率 $P(x_i/y_j)$ 收到 y_j 后 x_i 的不确定性；
- 转移概率 $P(y_j/x_i)$ x_i 经信道传输后变为 y_j 可能性；

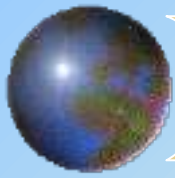
无记忆信道转移概率矩阵



3.7 信道容量的概念

$$P(y_i / x_j) = \begin{bmatrix} P(y_1 / x_1) & P(y_2 / x_1) & \cdots & P(y_m / x_1) \\ P(y_1 / x_2) & P(y_2 / x_2) & \cdots & P(y_m / x_2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P(y_1 / x_l) & P(y_2 / x_l) & \cdots & P(y_m / x_l) \end{bmatrix}$$

$$P(x_j / y_i) = \begin{bmatrix} P(x_1 / y_1) & P(x_2 / y_1) & \cdots & P(x_l / y_1) \\ P(x_1 / y_2) & P(x_2 / y_2) & \cdots & P(x_l / y_2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P(x_1 / y_m) & P(x_2 / y_m) & \cdots & P(x_l / y_m) \end{bmatrix}$$



3.7 信道容量的概念

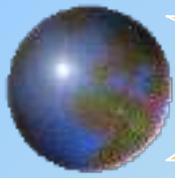
· 对称信道特点

转移概率矩阵的各行具有相同元素，各列也具有相同元素。

后验概率矩阵的各行具有相同元素，各列也具有相同元素。

例：二进制对称信道

$$\begin{aligned} P(y_j / x_i) &= \begin{bmatrix} P(1/1) & P(0/1) \\ P(1/0) & P(0/0) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 - \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 1 - \varepsilon \end{bmatrix} = P(x_i / y_j) \end{aligned}$$



3.7 信道容量的概念

2 . 有关信息量的定义和物理意义

- x_i 携带的信息量 : $I(x_i) = -\log_2 P(x_i)$ bit

- 信源熵—信源平均信息量 :

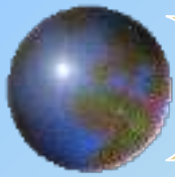
$$H(x) = -\sum_{i=1}^L P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad \text{bit/符号}$$

- 条件信息量—信道损失的信息量 :

$$I(x_i / y_j) = -\log_2 P(x_i / y_j) \text{bit}$$

- 互信息量 : 信道传输 x_i 时所传输的信息量。

$$I(x_i, y_j) = I(x_i) - I(x_i / y_j) = \log_2 \frac{P(x_i / y_j)}{P(x_i)} \quad (\text{bit})$$

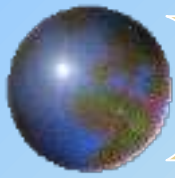


3.7 信道容量的概念

- **平均互信息量**：信道传输一个符号所传输的平均信息量。 $H(x,y) = H(x) - H(x/y)$ (bit/ 符号) ，对于对称信道有：

$$H(x / y) = - \sum_{i=1}^n P(x_i / y_j) \log_2 P(x_i / y_j)$$

3 信息传输速率：单位时间内信道所传输的信息量： $R = [H(x) - H(x/y)] \cdot r$ ， r 为码速率即 R_B 。当无噪声时 $H(x/y) = 0$ ， $R = H(x)r = R_B$ ；当噪声很大时 $H(x/y) = H(x)$ ， $R = 0$ ；信道确定后 $H(x/y)$ 为定值。



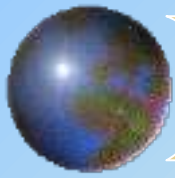
3.7 信道容量的概念

4 信道容量：对一切可能的信源概率分布，信道传输信息的速率 R 的最大值。

$C = \max(R) = \max[H(x) - H(x/y)]r$ (bit/s)，显然信源等概率分布时的 R 即为 C ，即 $C = [\log_2 L - H(x/y)]r = R_b - H(x/y)r$ ；实际信道多为对称信道

且 $L=M$ ，故有：

$$C = [\log_2 M - H(x/y)]r = R_b + r \sum_{j=1}^M P(y_j/x_i) \log_2 P(y_j/x_i)$$



3.7 信道容量的概念

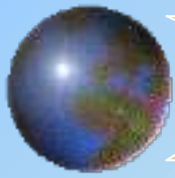
二. 连续信道

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

物理意义：

- S/N 增加，log 增加，故 C 增加。
- B 增加，C 增加，但有一极限值 $\lim_{B \rightarrow \infty} C = 1.44 \frac{S}{n_0}$
- 信号带宽 B 可与它的信噪比 S/N 互换，以保持 C 不变。
- 理论指导意义：

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{E_b R_b}{n_0 B} \right)$$



本章结束

习题：3-12 ， 3-15

