



第4章 信道

4.1 无线信道

4.2 有线信道

4.3 信道的数学模型

4.4 信道特性对信号传输的影响

4.5 信道中的噪声

4.6 信道容量



博学笃行 明德日新

概述

※ 狭义信道：—传输媒质

- 有线信道

——明线、电缆、光纤

- 无线信道

——自由空间或大气层

无线信道举例：

地波传播、短波电离层反射、
超短波或微波视距中继、卫星
中继、散射及移动无线电信道

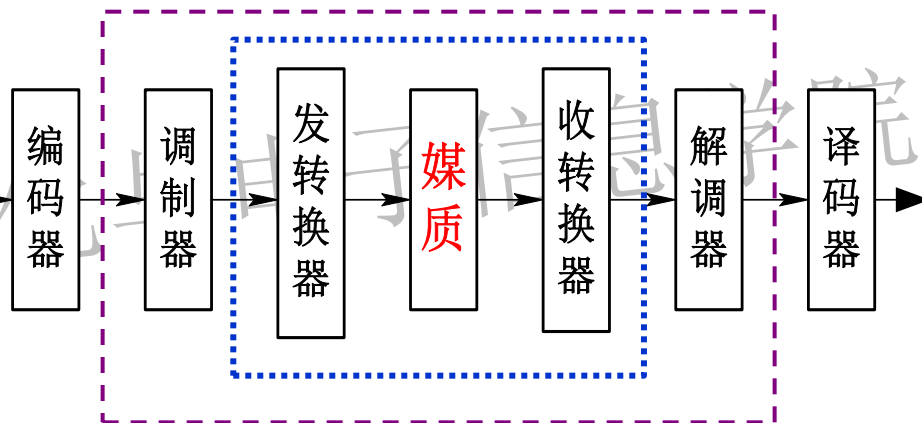
※ 广义信道：

- 调制信道

——研究调制/解调问题

- 编码信道

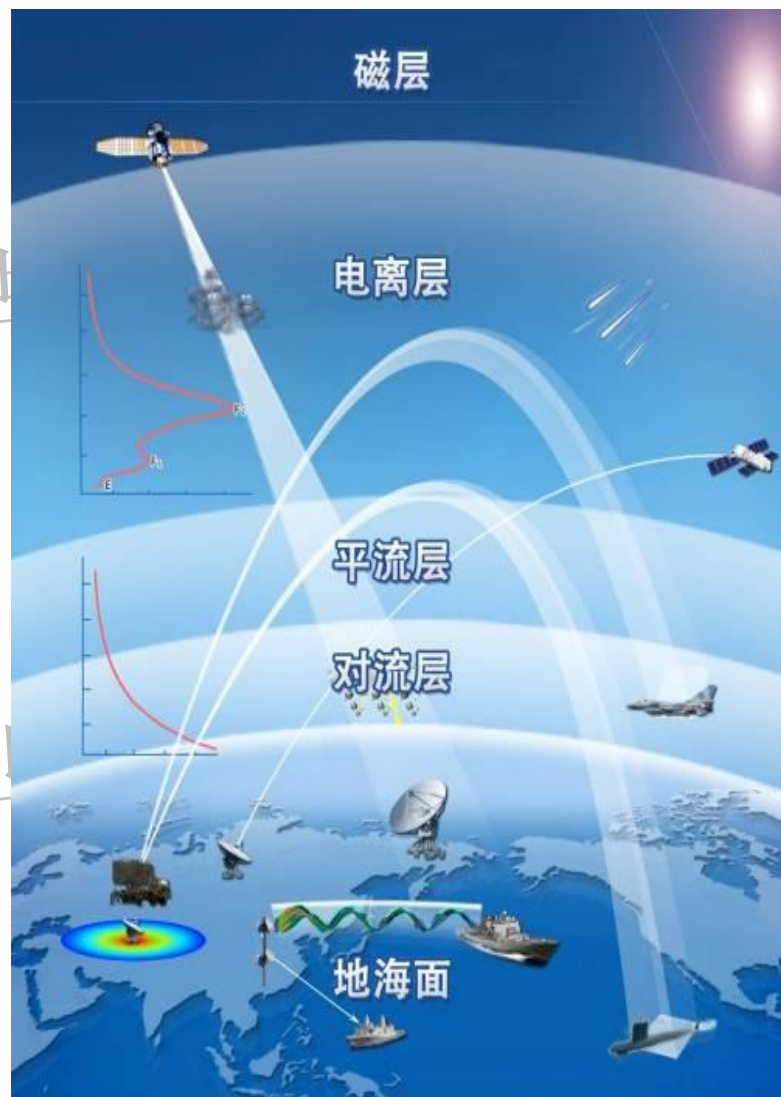
——研究编码/译码问题



§ 4.1 无线信道

● 地球大气层的结构

- 对流层：0~10km
- 平流层：10~60km
- 电离层：60~1000km



§ 4.1 无线信道

- 电磁波的传播方式

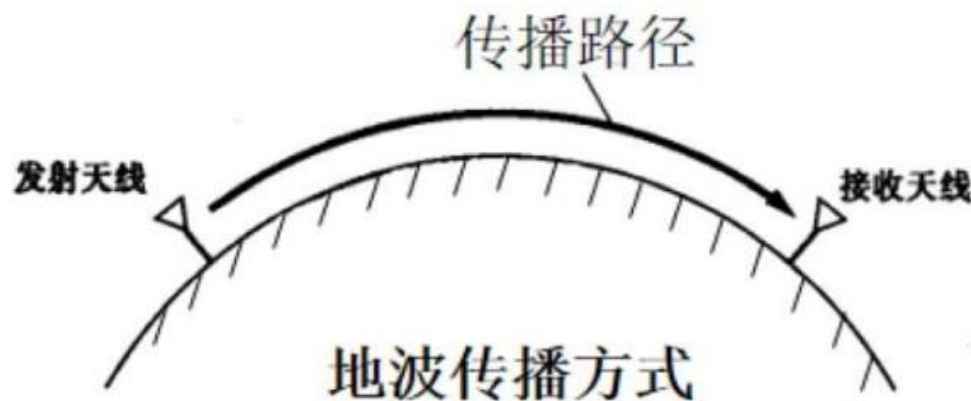
- ※ 地波 ground-wave

频率：小于2MHz

特性：有绕射能力

距离：数百到数千公里

用于：AM广播



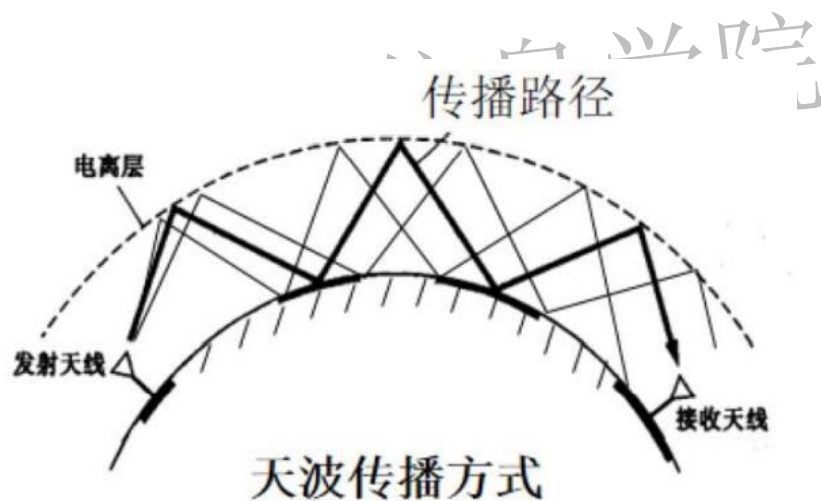
- ※ 天波 sky-wave

频率：2~30MHz

特性：被电离层反射

距离：数百到数千公里（一跳可达4000km）

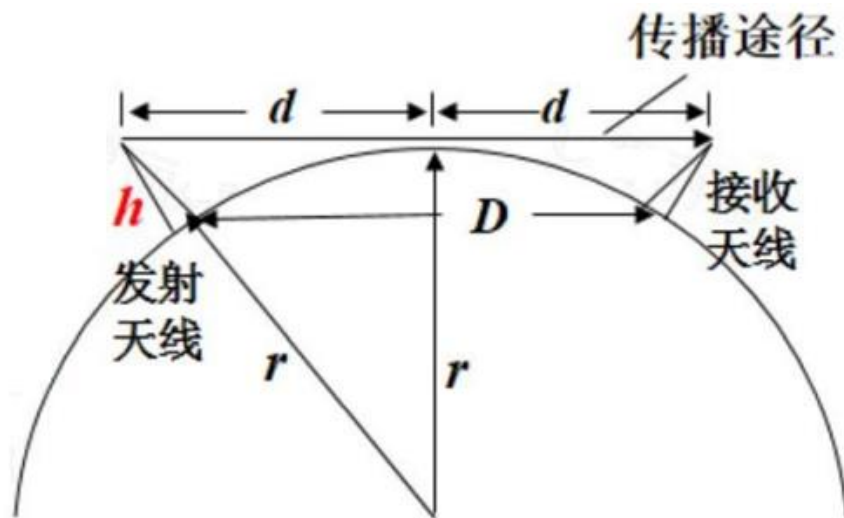
用于：远程短波通信



§ 4.1 无线信道

※ 视线传播 line-of-sight

- 频率：大于30MHz
- 特性：直线传播，穿透电离层传播
- 用于：超短波及微波通信卫星和外太空通信
- 距离：与天线高度有关



视线传播方式

$$h = \frac{D^2}{8r} \approx \frac{D^2}{50} (m)$$

D 为收发天线间距离(km)

例如

设收发天线的架设高度均为40 m，则最远通信距离为：

$$D = 44.7 \text{ km}$$

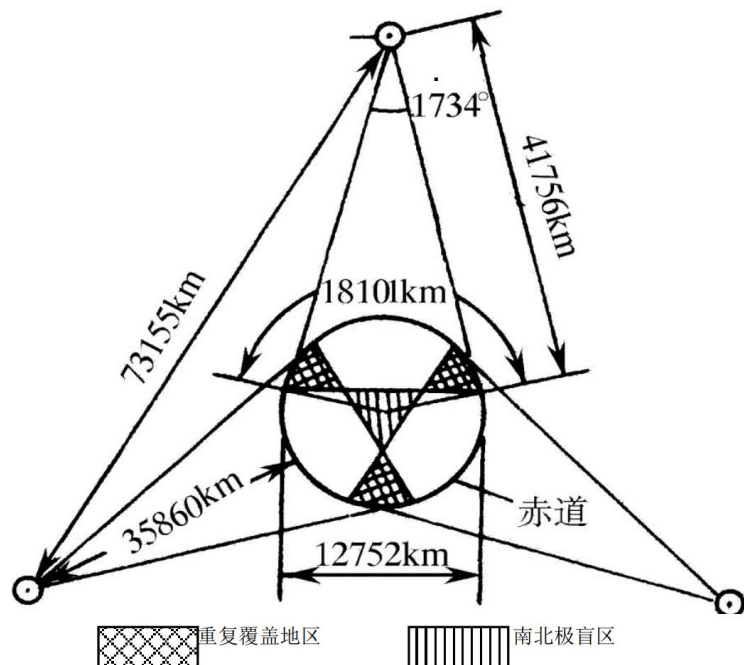
§ 4.1 无线信道

增大视线传播距离的主要途径：

- 微波中继通信
- 卫星中继（静止卫星、移动卫星）



- 平流层通信(平流层平台研究中)



- 特点：两点传输距离20-50km，远距离通信需要建很多站
- 优点：容量大、投资少、维护方便、质量稳定
- 应用：远距离传输话音和电视信号
- 优点：容量大、传输质量稳定、传输距离远、覆盖范围广
- 缺点：传输时延大，信号衰减大，造价高

§ 4.1 无线信道

散射通信

□ 电离层散射

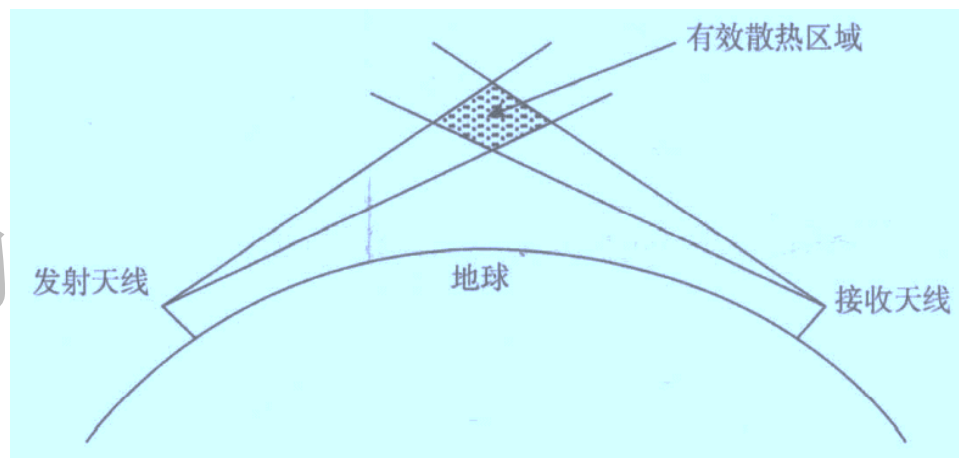
频率: 30~60MHz

距离: 大于1000km

□ 对流层散射

频率: 100~4000MHz

距离: 小于600km



□ 流星余迹散射

特性: 高度 80~120km,

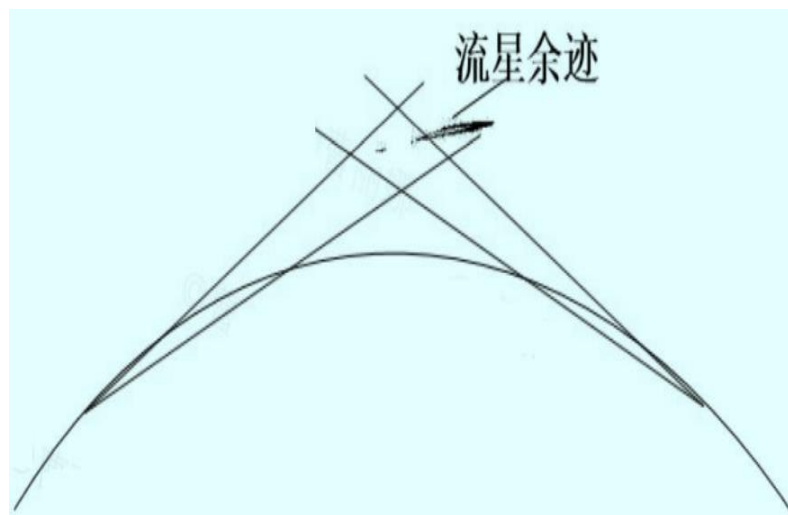
长度 15~40km

存留时间: 小于1秒至几分钟

频率: 30~100MHz

距离: 大于1000km

用途: 低速存储、高速突发、断续传输





第4章 信道

湘潭大学自动化与电子信息学院

4.1 无线信道

4.2 有线信道

4.3 信道的数学模型

4.4 信道特性对信号传输的影响

4.5 信道中的噪声

4.6 信道容量

湘潭大学自动化与电子信息学院

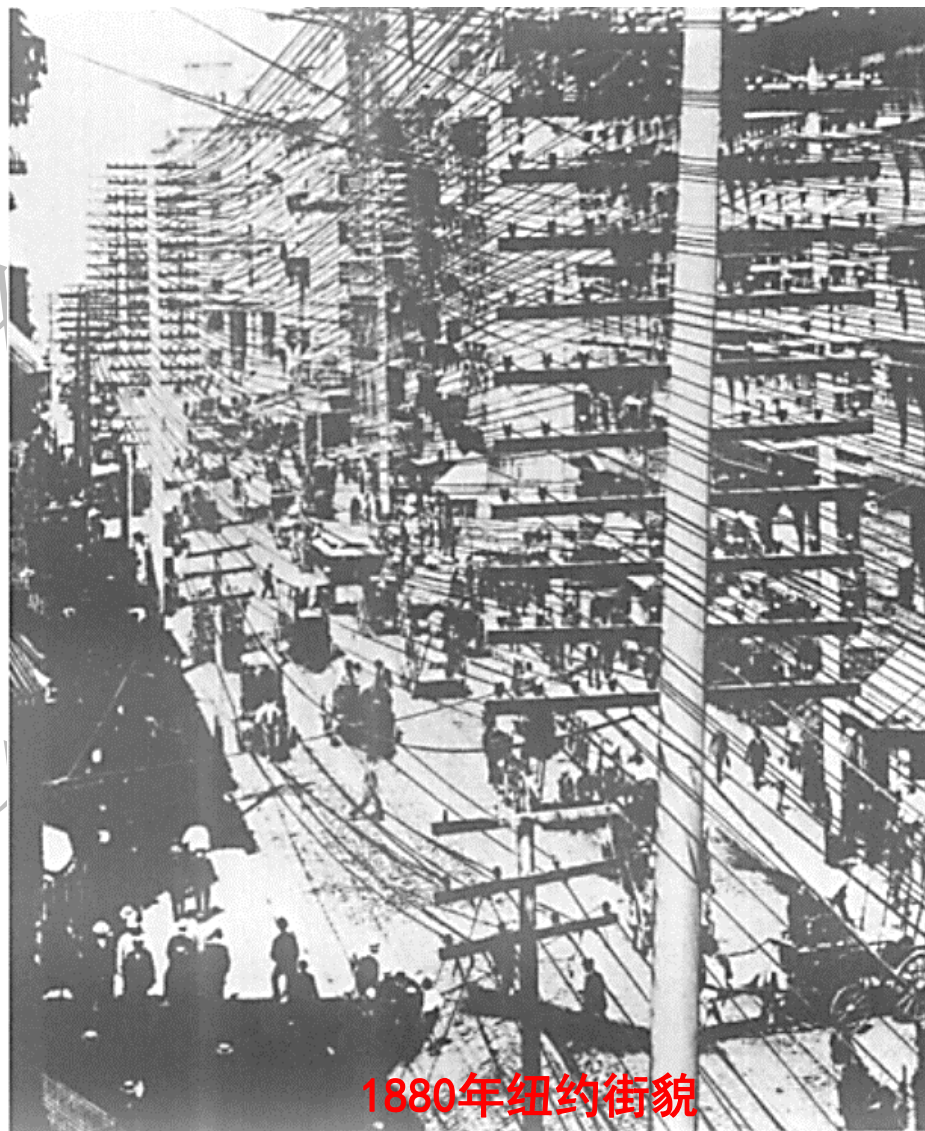


博学笃行 明德日新

§ 4.2 有线信道

一、明线

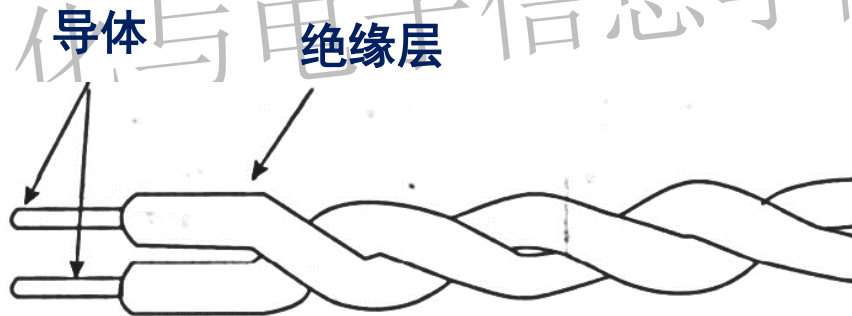
- 是指平行而相互绝缘的架空裸线线路；
- 与电缆相比，它的优点是传输损耗低；
- 但易受气候和天气的影响，并且对外界噪声干扰比较敏感，已逐渐被电缆代替。



§ 4.2 有线信道

二、对称电缆

在同一保护套内由许多对相互绝缘的绞扭双导线做成的传输介质。

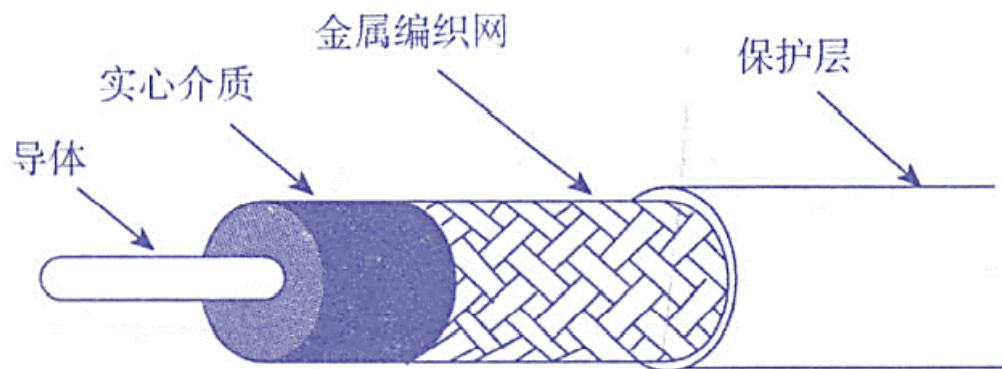


双绞线

- 特点：每对呈扭绞状，以减少各线对的相互干扰；传输特性比较稳定
- 缺点：传输衰减大、距离短，邻道间有串话干扰；
- 应用：电话线路、局域网及综合布线工程中的传输介质。

§ 4.2 有线信道

三、同轴电缆



- 组成：由同轴的两个导体组成
内芯：金属导线
外导体：金属编织网（易弯曲）
两导体间为绝缘介质。



- 优点（相比于对称电缆）
抗电磁干扰能力强
带宽更宽，速率更高

- 缺点
成本较高
解决：用光缆代替

§ 4.2 有线信道

四、光纤

※ 结构

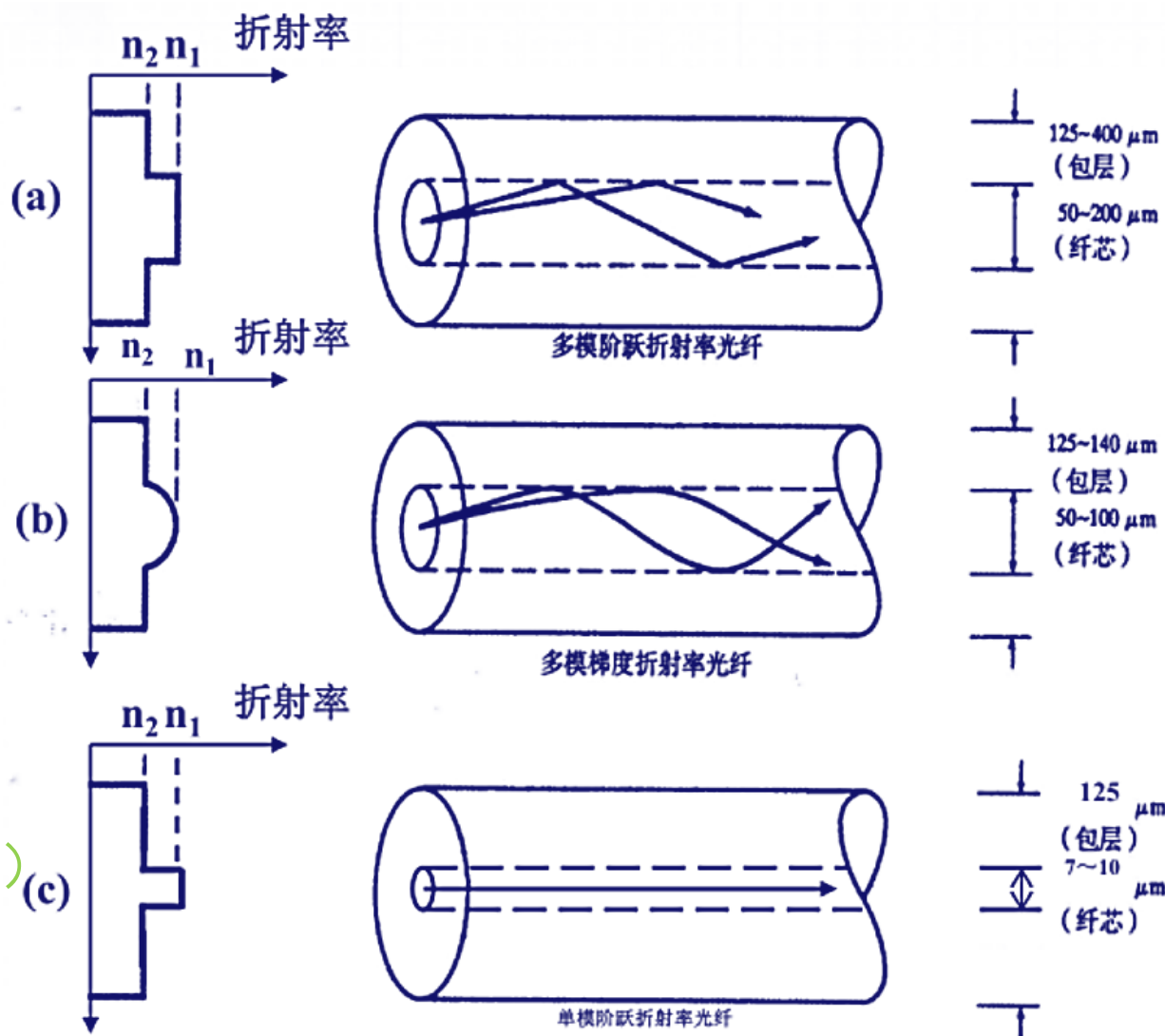
- 纤芯
- 包层

※ 按折射率分类

- 阶跃型
- 梯度型

※ 按模式分类

- 多模光纤（光有多条传播路径，带宽较窄）
- 单模光纤（带宽较宽，造价较高）



§ 4.2 有线信道

※ 优点

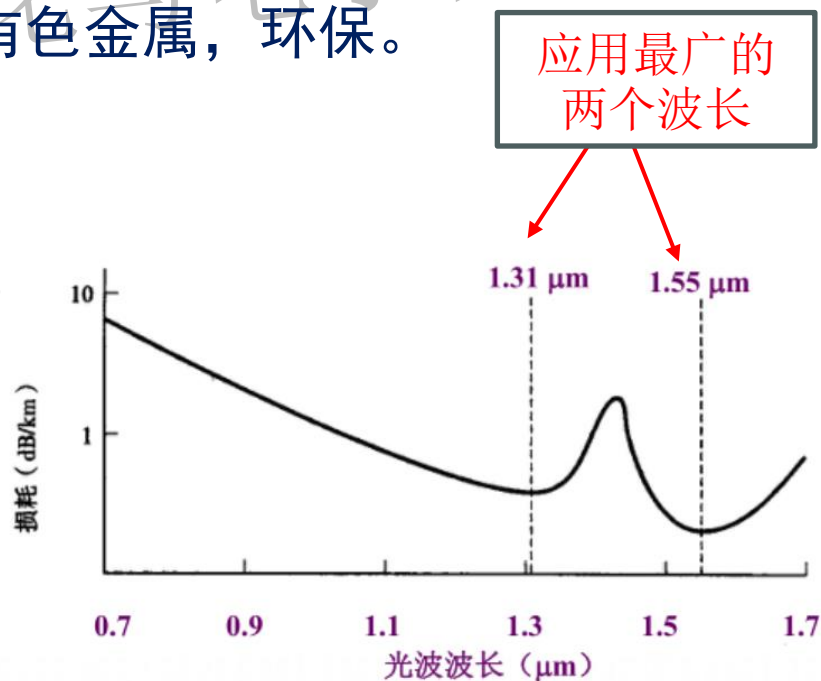
- 传输带宽宽，通信容量大；
- 传输衰减小，无中继传输距离远；
- 抗电磁干扰，传输质量好，防窃听，耐腐蚀；
- 体积小，重量轻、节省有色金属，环保。

※ 缺点

- 易碎，接口昂贵，安装和维护需要专门技能。

※ 应用

- 长途电话网、有线电视网等的主干线路。



光纤损耗与光波波长的关系



第4章 信道

湘潭大学自动化与电子信息学院

4.1 无线信道
4.2 有线信道

4.3 信道的数学模型

4.4 信道特性对信号传输的影响

4.5 信道中的噪声

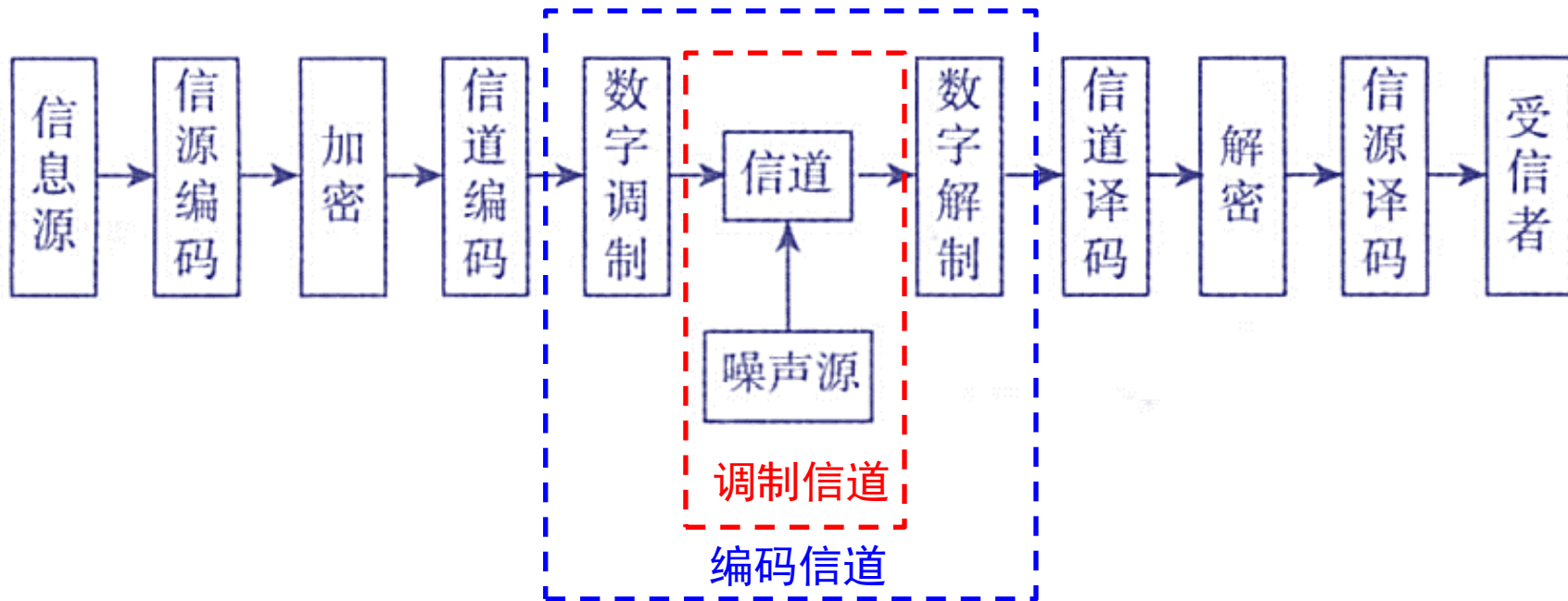
4.6 信道容量

湘潭大学自动化与电子信息学院



博学笃行 明德日新

§ 4.3 信道的数学模型



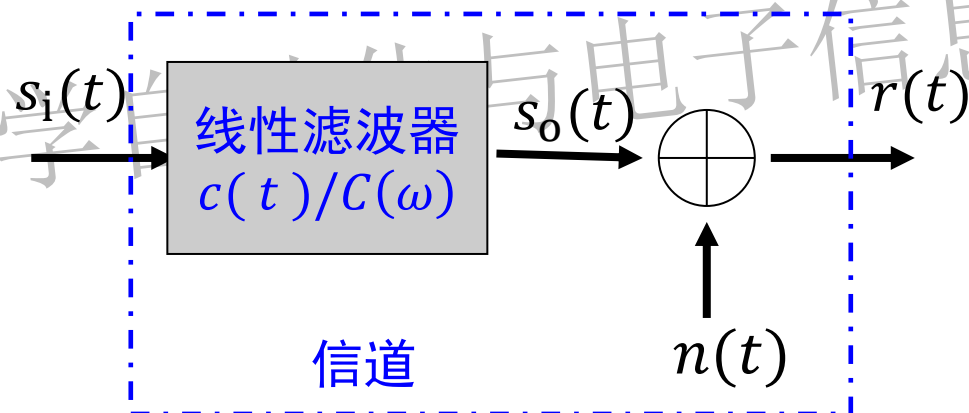
※ 狭义信道：—传输媒质

※ 广义信道

- 调制信道：包含发转换装置、媒质和收转换装置
- 编码信道：包括调制器、调制信道和解调器

§ 4.3.1 调制信道模型

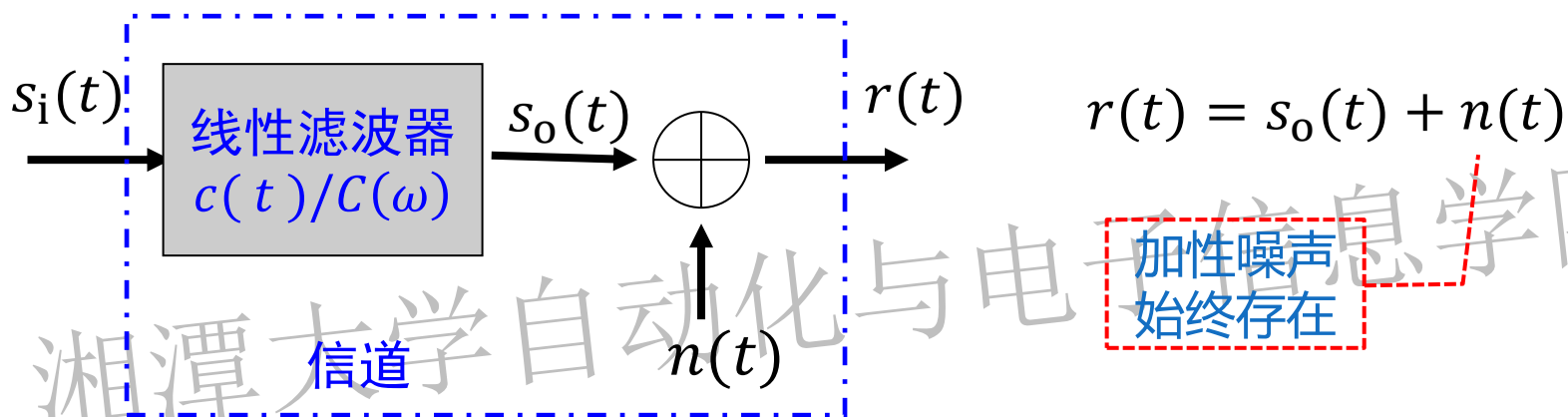
模型： 叠加有噪声的线性时变/时不变网络：



共性

- ※ 有一对（或多对）输入端和输出端
- ※ 大多数信道都满足线性叠加原理
- ※ 对信号有固定或时变的延迟和损耗
- ※ 无信号输入时，仍可能有输出（噪声）

§ 4.3.1 调制信道模型



$$s_o(t) = f[s_i(t)] = c(t) * s_i(t)$$

反映信道
本身特性

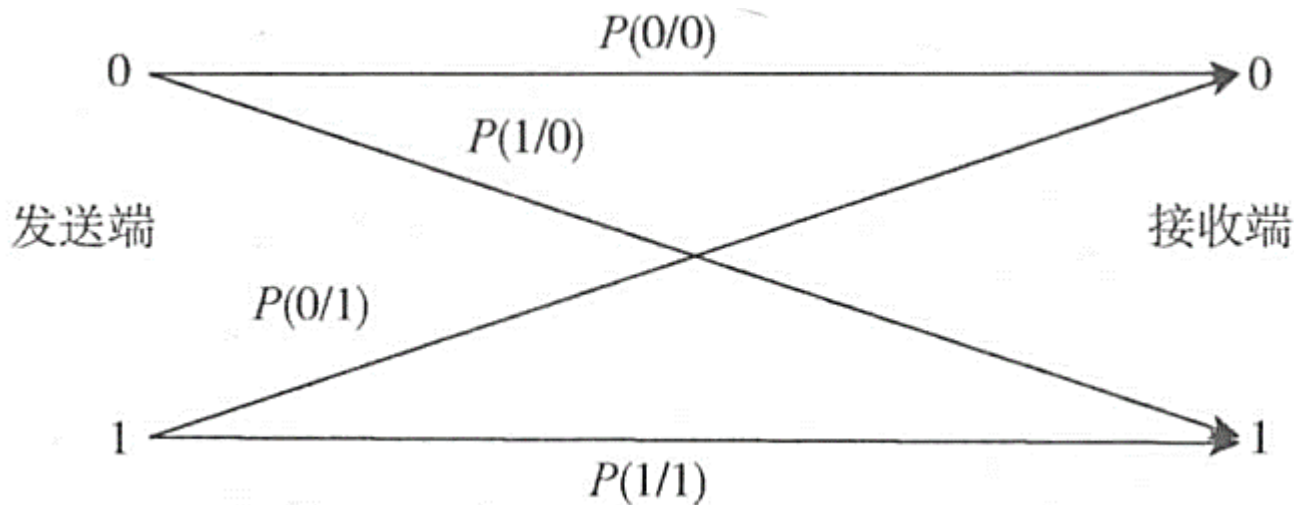
乘性干扰

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

调制信道对信号的影响程度取决于 $C(\omega)$ 和 $n(t)$ 的特性

§ 4.3.2 编码信道模型

模型：可用转移概率来描述



二进制无记忆编码信道模型

$$\begin{aligned} P(0|0) + P(1|0) &= 1 \\ P(1|1) + P(0|1) &= 1 \end{aligned}$$

正确

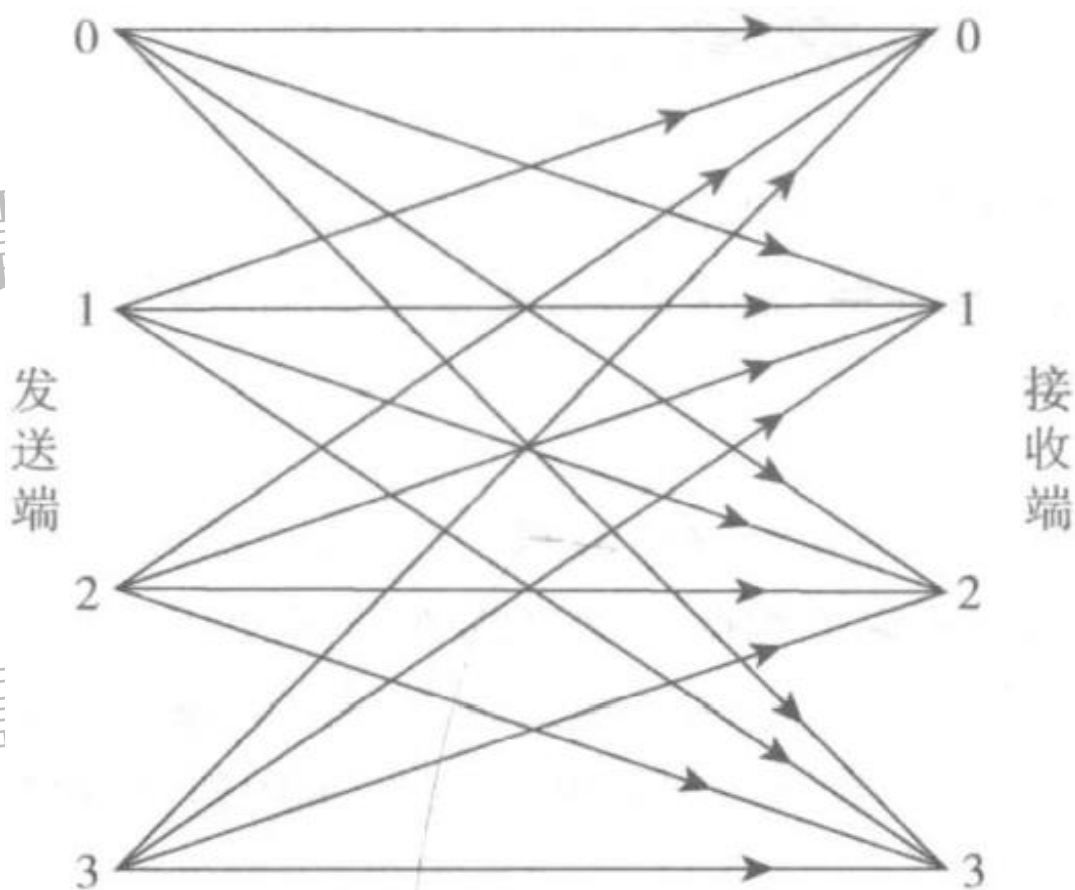
错误

注意：

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。

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

§ 4.3.2 编码信道模型



四进制无记忆编码信道模型



第4章 信道

湘潭大学自动化与电子信息学院

4.1 无线信道

4.2 有线信道

4.3 信道的数学模型

4.4 信道特性对信号传输的影响

4.5 信道中的噪声

4.6 信道容量

湘潭大学自动化与电子信息学院



博学笃行 明德日新

§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

根据信道传输函数 $C(\omega)$ 时变特性的不同，调制信道可分为：

※ 恒参信道：传输特性随时间缓变或不变

※ 随参信道：传输特性随时间随机快变

$$H(\omega) = |H(\omega)|e^{j\phi(\omega)}$$

幅频特性

相频特性

§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

一、恒参信道——线性时不变网络

例如：各种有线信道、卫星信道……

无失真传输的条件： $y(t) = \pm k_0 x(t - t_0)$

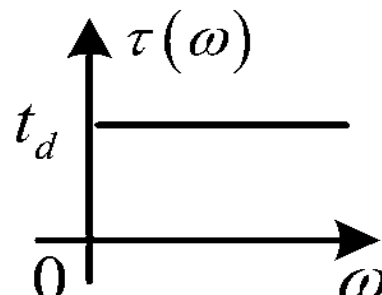
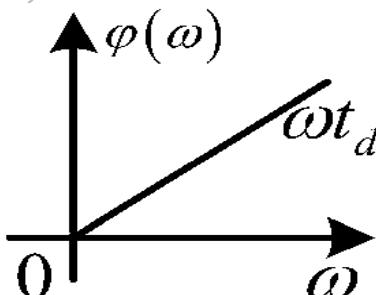
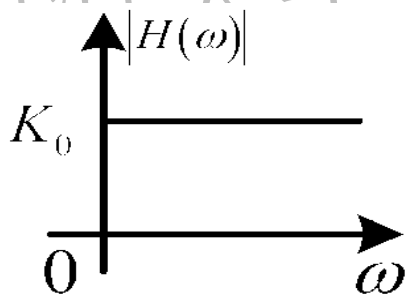
$$Y(\omega) = \pm k_0 X(\omega) e^{-j\omega t_d}$$

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

幅频特性： $|H(\omega)| = K_0$ 常数

相频特性： $\phi(\omega) = \omega t_d$ ω 的线性函数

群延迟特性： $\tau(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} = t_d$ 常数



§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

理想恒参信道的冲激响应

$$H(\omega) = K_0 e^{j\omega t_d} \longleftrightarrow h(t) = K_0 \delta(t - t_d)$$

若输入信号为 $s(t)$ ，输出为 $s_o(t)$ ，则

$$s_o(t) = K_0 s(t - t_d)$$

理想恒参信道对信号传输的影响：

- 幅度上产生固定的衰减
- 时间上产生固定的延迟

这种情况称为无失真传输

§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

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。

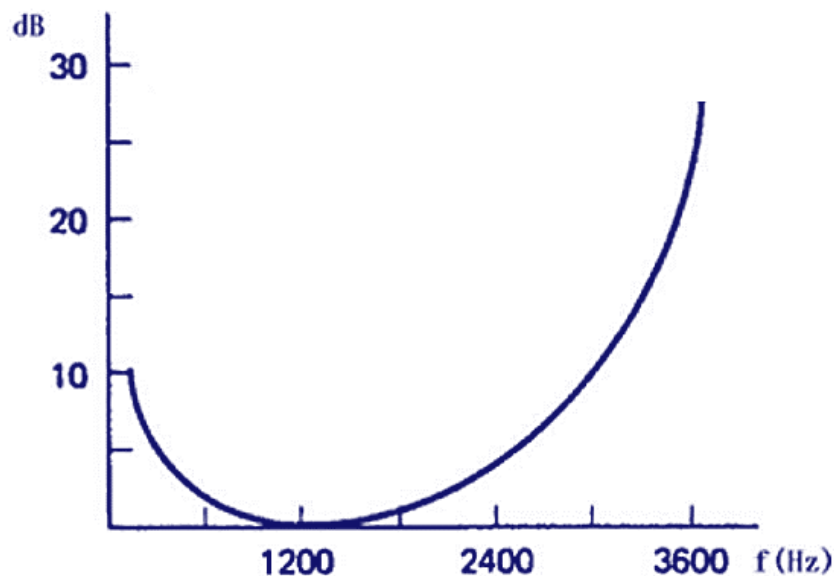
影响：

对模拟信号：

造成波形失真→信噪比下降

对数字信号：

产生码间串扰→误码率增大



典型音频电话信道的幅度衰减特性

§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

2. 相频失真

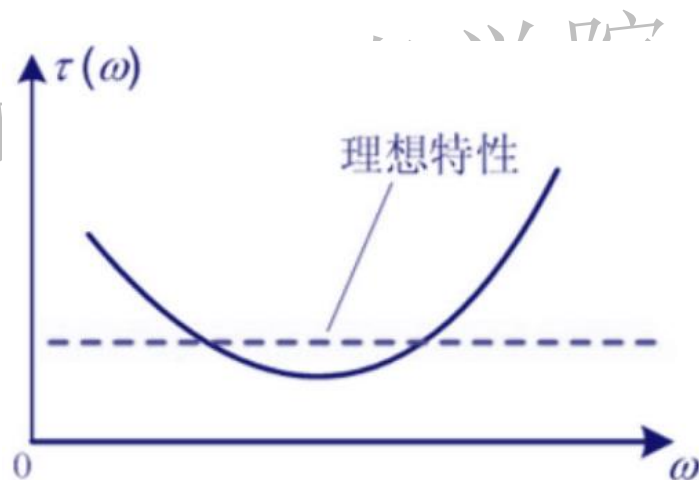
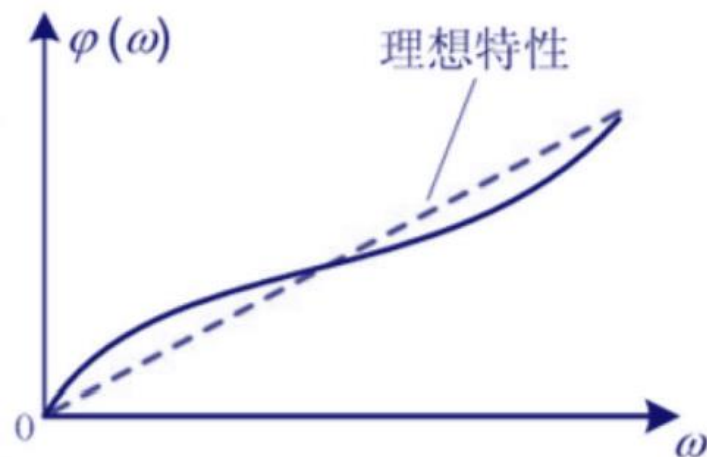
若在信号频带范围内 $\phi(\omega)$ 不是 ω 的线性函数，即信号中不同的频率分量分别受到不同的延迟，由此引起的信号波形失真

$$\phi(\omega) \neq \omega t_d \rightarrow \tau(\omega) \neq t_d$$

影响：

对语音信号影响不大，对视频信号影响大：

对数字信号：码间串扰→误码率增大

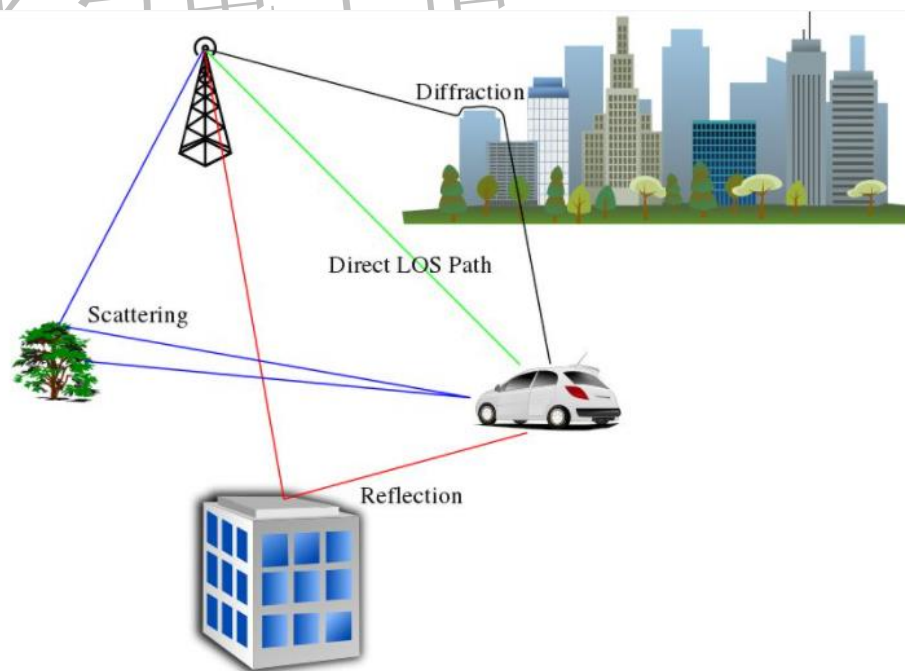


§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

二、随参信道

例如：

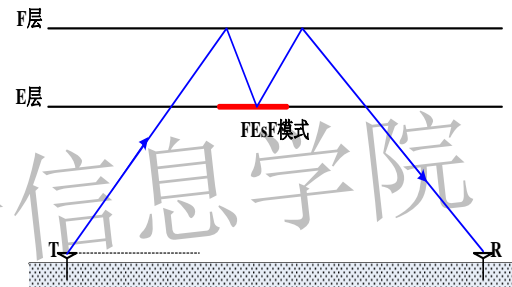
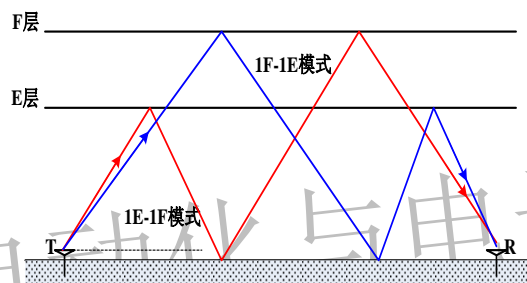
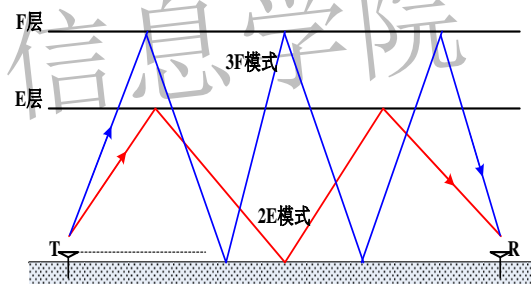
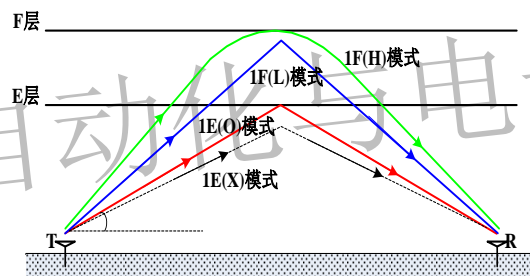
- 陆地移动信道
- 短波电离层反射信道
- 超短波流星余迹散射信道
- 超短波及微波对流层散射信道
- 超短波电离层散射信道
- 超短波超视距绕射



§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

随参信道的主要特性：

- 衰减随时间变化
- 时延随时间变化
- 多径传播



§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

多径效应的影响：

$$s(t) = A \cos \omega_c t \quad (\text{幅度恒定频率单一})$$

多径信道共有 n 条路径，各路径具有随时间变化的衰减和传输时延，各路径的信号相互独立，
则接收端接收到的合成波为：

$$\begin{aligned} r(t) &= a_1(t) \cos \omega_c [t - \tau_1(t)] + a_2(t) \cos \omega_c [t - \tau_2(t)] \\ &\quad + \cdots + a_n(t) \cos \omega_c [t - \tau_n(t)] \\ &= \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \omega_c [t - \tau_i(t)] \end{aligned}$$

传输时延可以转换为相位形式，即

$$\varphi_i(t) = -\omega_c \tau_i(t)$$

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

§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

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

$$r(t) = X(t) \cos \omega_c t + Y(t) \sin \omega_c t$$

根据中心极限定理

$X(t)$ 、 $Y(t)$ 都趋于正态分布

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

$$V(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)}$$

$$\varphi(t) = \tan^{-1} \frac{Y(t)}{X(t)}$$

$$\begin{aligned} X &\sim N(0, \sigma_x^2) \\ Y &\sim N(0, \sigma_y^2) \end{aligned}$$

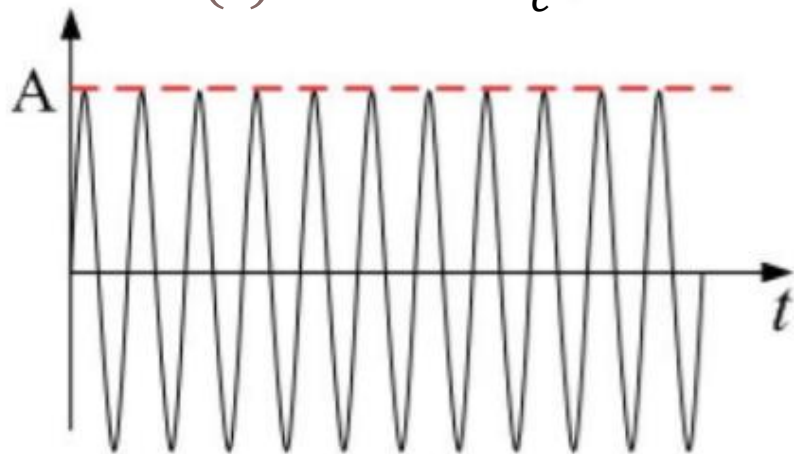
$$\sigma_x = \sigma_y$$

$V(t)$: 瑞利分布

$\varphi(t)$: 均匀分布

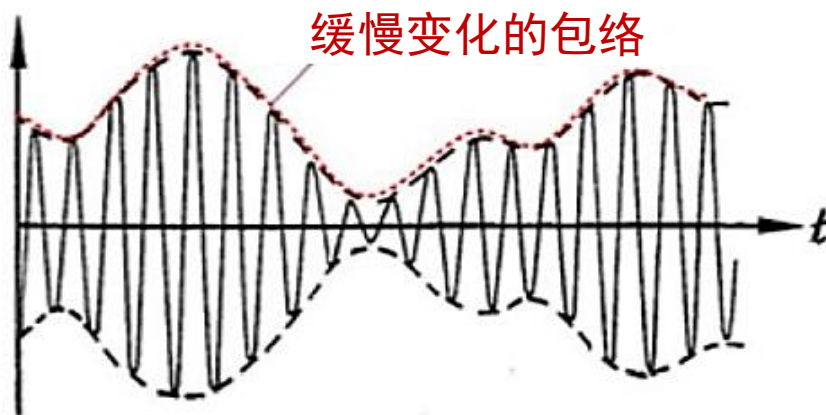
§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

$$s(t) = A \cos \omega_c t$$

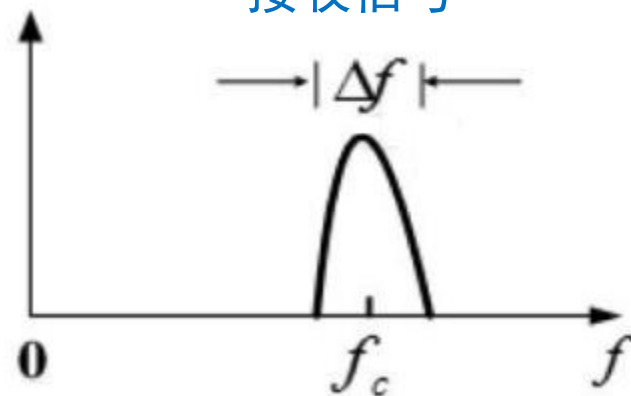
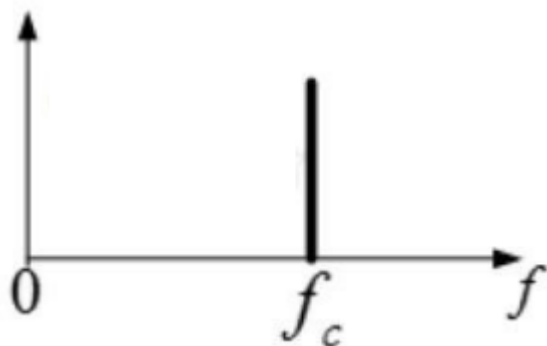


发射信号

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



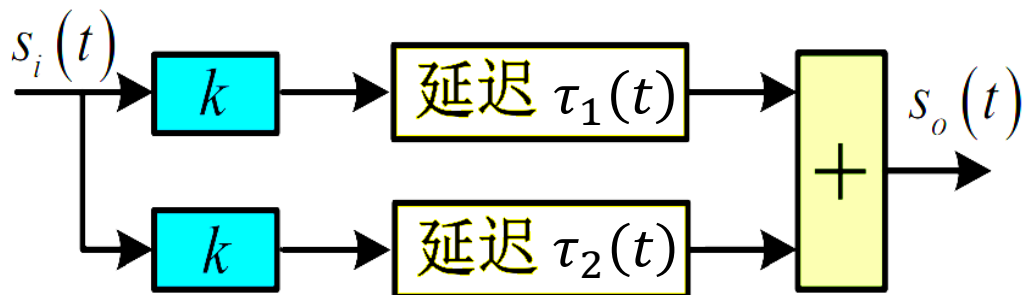
接收信号



- 多径
影响:
- 多径传播使信号产生瑞利型衰落
 - 多径传播引起频率弥散

§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

复杂信号的情形（两径情况）



$$S_o(t) = KS_i(t - \tau_1) + KS_i(t - \tau_2)$$

$$S_o(\omega) = KS_i(\omega)e^{-j\omega\tau_1} + KS_i(\omega)e^{-j\omega(\tau_1+\Delta\tau)}$$

信道传输函数:

$$H(\omega) = \frac{S_o(\omega)}{S_i(\omega)} = K e^{-j\omega\tau_1} (1 + e^{j\omega\Delta\tau})$$

常数衰减因子

确定的传输时延因子

与信号频率有关的复因子

§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

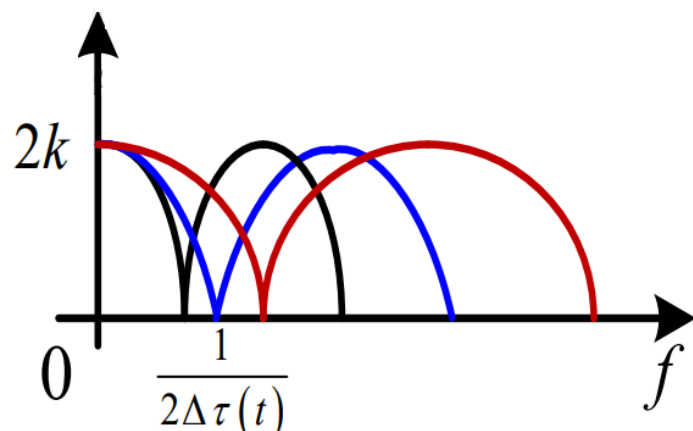
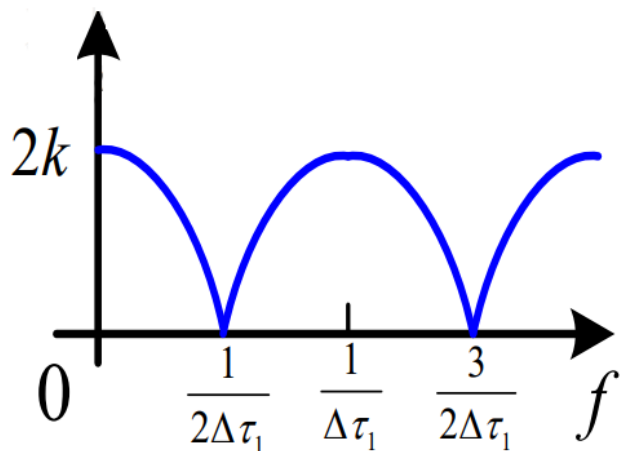
$$|H(\omega)| = k \left| 1 + \cos \omega \Delta \tau(t) - j \sin \omega \Delta \tau(t) \right| = 2k \left| \cos \frac{\omega \Delta \tau(t)}{2} \right|$$

$$\omega = \frac{2n\pi}{\Delta \tau(t)}$$

极点

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

零点



信道对信号不同的频率成分，将有不同衰落——频率选择性衰落

§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

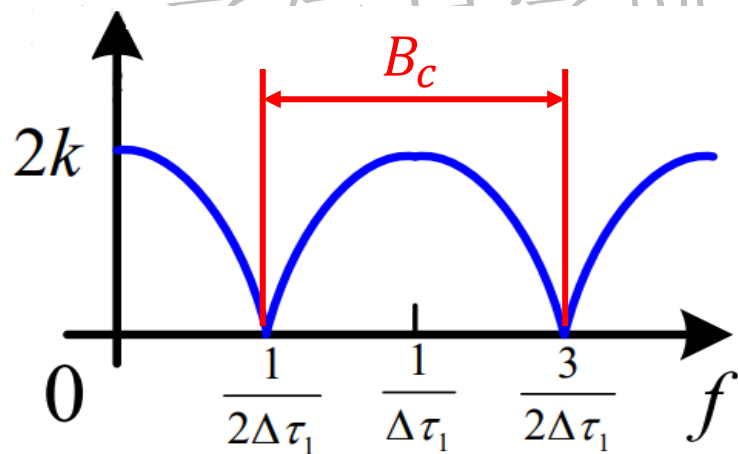
设信道的最大多径时延差为 τ_m ，则相关带宽为

$$B_c = 1/\Delta\tau_m$$

为相邻传输零点的频率间隔。
应使信号带宽

$$B \ll B_c$$

工程上的经验公式：



信号带宽：

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

数字信号的码元宽度： $T_s = (3 \sim 5) \Delta\tau_m$

§ 4.4 信道特性对信号传输的影响

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

湘潭大学自动化与电子信息学院



第4章 信道

湘潭大学自动化与电子信息学院

4.1 无线信道

4.2 有线信道

4.3 信道的数学模型

4.4 信道特性对信号传输的影响

4.5 信道中的噪声

4.6 信道容量

湘潭大学自动化与电子信息学院



博学笃行 明德日新

§ 4.5 信道中的噪声

调制信道：
$$r(t) = c(t) * s_i(t) + n(t)$$

乘性干扰

加性噪声

加性噪声：

- 信道中存在的不需要的电信号
- 独立于信号始终存在，又称加性干扰；
- 使信号失真，发生错码，限制传输速率。

按噪声来源

- 人为噪声
- 自然噪声
- 内部噪声

按噪声性质

- 脉冲噪声
- 窄带、单频噪声
- 起伏噪声

热噪声、散弹噪声、宇宙噪声

§ 4.5 信道中的噪声

热噪声：

- 来自一切电阻性元器件中电子的热运动
- 均匀分布在 $0 \sim 10^{12}$ Hz 频率范围
- 性质高斯白噪声

热噪声电压有效值

$$V = \sqrt{4kTRB} \quad (\text{V})$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ (J/K)}$$

T ：热力学温度 (K)

R ：电阻 (Ω)

B ：带宽 (Hz)

§ 4.5 信道中的噪声

信道加性噪声 $n(t)$:

代表: 起伏噪声 (热噪声等)

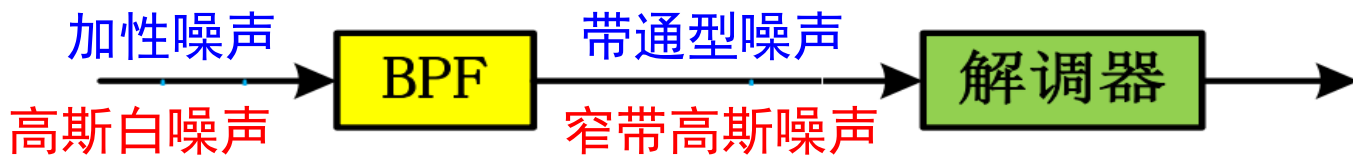
性质: 高斯白噪声

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

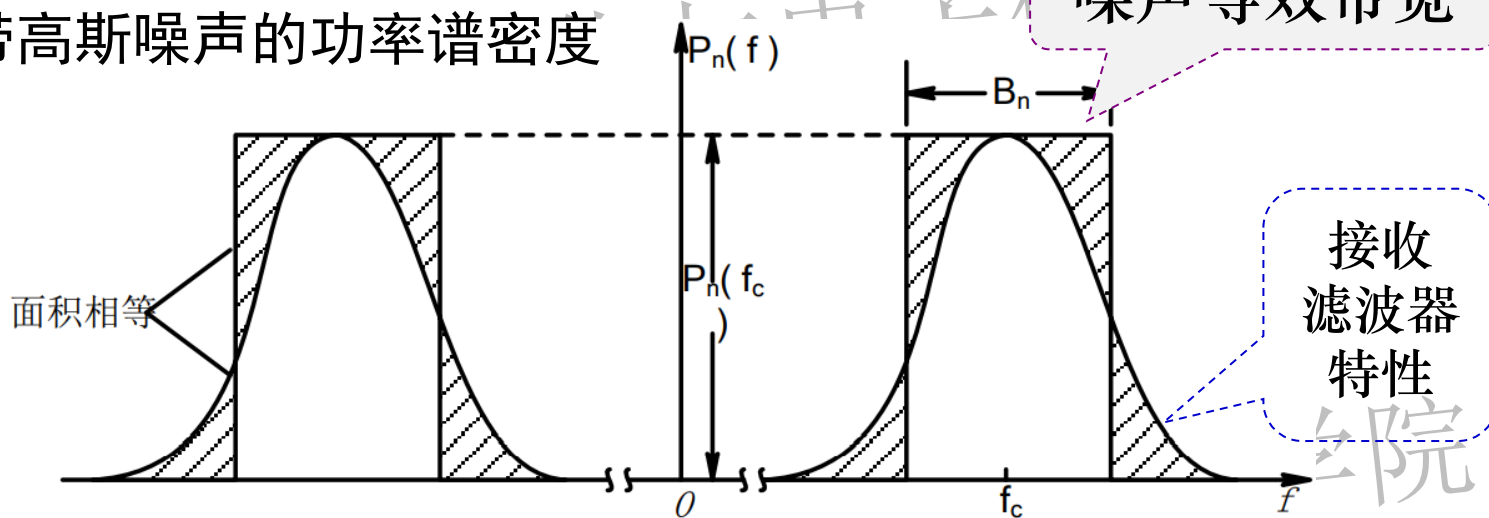
$$R_n(\tau) = \frac{n_0}{2} \delta(\tau)$$

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

§ 4.5 信道中的噪声



窄带高斯噪声的功率谱密度



等效噪声带宽:

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

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。



第4章 信道

湘潭大学自动化与电子信息学院

4.1 无线信道

4.2 有线信道

4.3 信道的数学模型

4.4 信道特性对信号传输的影响

4.5 信道中的噪声

4.6 信道容量

湘潭大学自动化与电子信息学院



博学笃行 明德日新

§ 4.6 信道容量

一、定义：

信道中信息无差错传输的最大速率

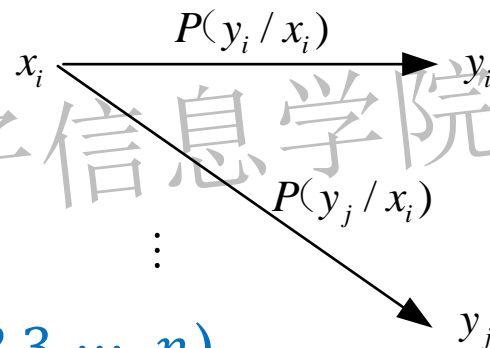
---极限传输能力

湘潭大学自动化与电子信息学院

§ 4.6.1 离散信道容量

(1) 信源发送的平均信息量（熵）

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



式中， $P(x_i)$ - 发送符号 x_i 的概率 ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

(2) 因信道噪声而损失的平均信息量

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

式中， $P(y_j)$ - 收到 y_j 的概率 ($j = 1, 2, 3, \dots, m$)；

$P(x_i / y_j)$ - 收到 y_j 后判断发送的是 x_i 的转移概率

§ 4.6.1 离散信道容量

(3) 信息传输速率 R —— 信道每秒传输的平均信息量

$$R = r[H(x) - H(x/y)] \quad (\text{b/s})$$

r — 信道每秒传输的符号数为 (符号速率)

$[H(x) - H(x/y)]$ — 是接收端得到的平均信息量

(4) 信道容量 C_t

— 最大信息传输速率：对一切可能的信源概率分布，求 R 的最大值：

$$C_t = \max_{P(x)} \{R\} = \max_{P(x)} \{r[H(x) - H(x/y)]\} \quad (\text{b/s})$$

等价式：

$$C = \max_{P(x)} [H(x) - H(x/y)] \quad (\text{b/符号})$$

含义：每个符号能够传输的最大平均信息量

§ 4.6.2 连续信道容量

由香农信息论可证，白噪声背景下的连续信道容量为：

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

S — 信号平均功率 (W) ; B — 带宽 (Hz)

n_0 — 噪声单边功率谱密度; $N = n_0 B$ — 噪声功率 (W)

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**

§ 4.6.2 连续信道容量

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

含义:

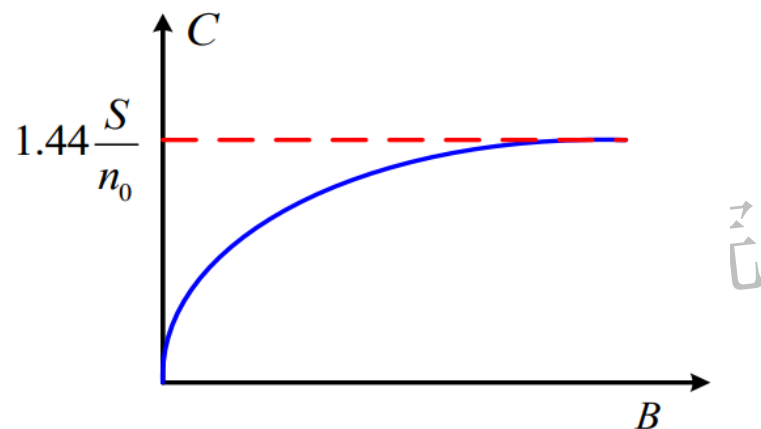
当信号和信道噪声的平均功率给定时，在具有一定频带宽度的信道上，理论上单位时间内可能传输的信息量的极限数值。

意义:

若 $R_b \leq C$ ，则总能找到一种信道编码方式，实现无差错传输；若传输速率大于信道容量，则不可能实现无差错传输。

§ 4.6.2 连续信道容量

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



结论:

- 信道容量 C 依赖于 B 、 S 和 n_0
- 增大 S 可增加 C ，若 $S \rightarrow \infty$ ，则 $C \rightarrow \infty$ ；
- 减小 n_0 可增加 C ，若 $n_0 \rightarrow 0$ ，则 $C \rightarrow \infty$ ；
- 增大 B 可增加 C ，但不能使 C 无限制增大。当 $B \rightarrow \infty$ 时， C 将趋向一个定值：

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \approx 1.44 \frac{S}{n_0}$$

§ 4.6.2 连续信道容量

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

应用:

- C 一定时, 信道带宽 B 、信噪比 S/N 、传输时间 t 三者之间可以互相转换。

- 增加 B , 可以换取 S/N 的降低; 反之亦然。

- 若 S/N 不变, 增加 B , 可以换取 t 的减少。

【例如】

$$C = 12 \times 10^3 \text{ b/s}$$

互换前: 若 $B_1 = 3 \text{ KHz}$, 则 $\frac{S_1}{N_1} = 15$

互换后: 若 $B_2 = 4 \text{ KHz}$, 则 $\frac{S_2}{N_2} = 7$

小结

- ※ 了解信道的定义、分类和模型
- ※ 掌握恒参信道和随参信道的信道特征及其对信号传输的影响
- ※ 熟悉信道容量和香农公式，并能正确计算信息及其度量

湘潭大学自动化与电子信息学院