

# 第4章 信道

- 信道分类:

- 无线信道 — 电磁波（含光波）
- 有线信道 — 电线、光纤

- 信道中的干扰:

- 有源干扰 — 噪声
- 无源干扰 — 传输特性不良

- 本章重点:

介绍信道传输特性和噪声的特性，及其对于信号传输的影响。

## 第4章 信道

### 4.1 无线信道

### 4.2 有线信道

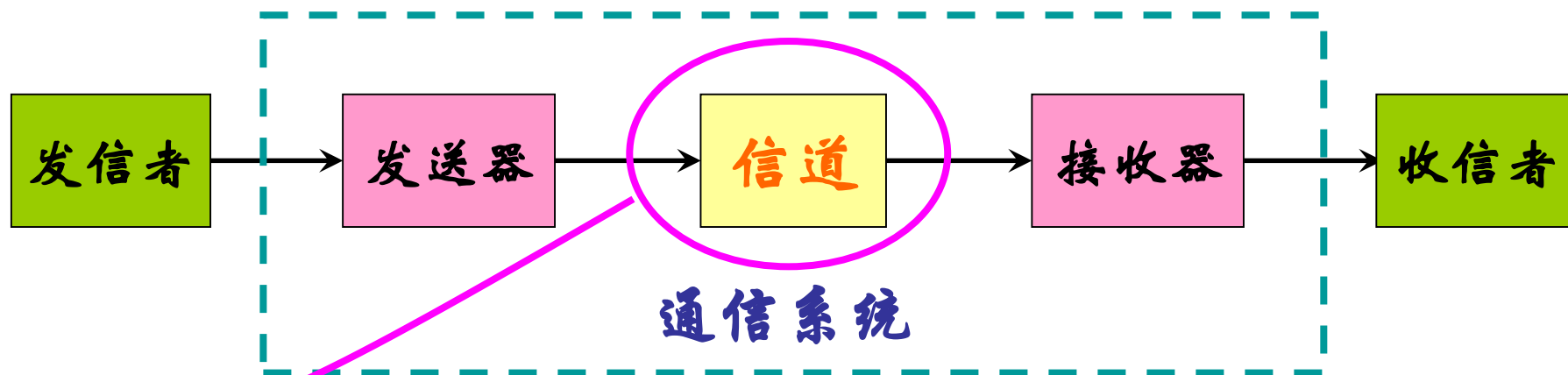
### 4.3 信道的数学模型

### 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

## 4.1 无线信道



**信道**—— 介于发信者与受信者之间，供消息信号经过的通道，是传输电、电磁波或光信号的物理媒质。

分为两大类：

- (1) **有线信道**：普通导线,电话线,电缆,波导与光纤。
- (2) **无线信道**：由射频电波传播的自由空间，如大气,真空与海水等。

## 4.1.1 频带的名称

**频带** — 某个频率范围。

**信道频带**：信道所能传送的信号频率范围

**信号频带**：信号所含的频率与所占的带宽



**确定信号**：由频谱分析得到

**随机信号**：由功率谱分析得到

频率与波长关系：

$$\lambda = c/f, \quad \text{其中光速 } c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

# 频带的位置、常用名称与典型的通信用途：

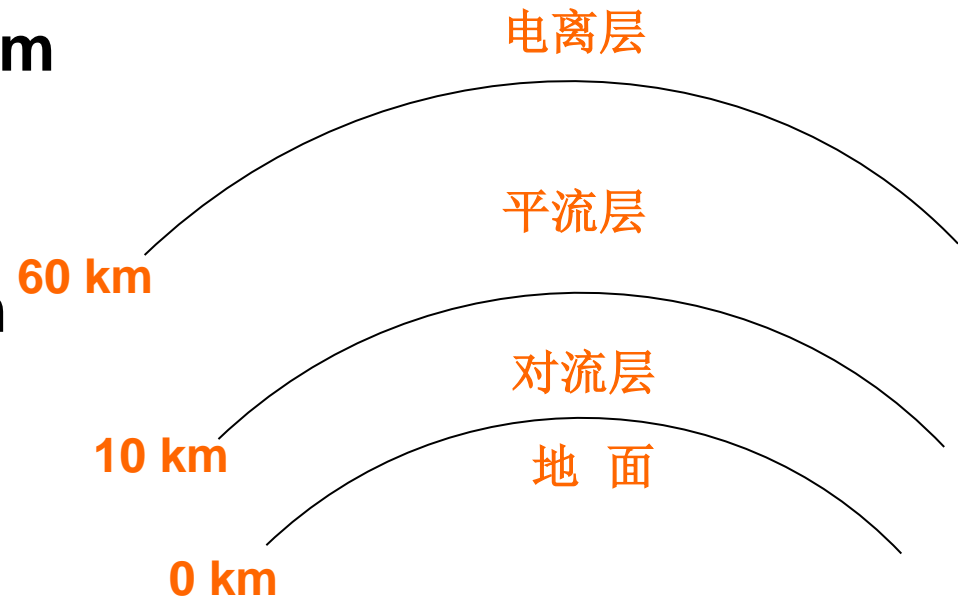
频段	频率	波长	主要用途
ELF(极低频)	30~300Hz	10000~1000km	工频（交流配电）信号低频遥测信号
VF(音频)	300~3000Hz	1000~100km	话音频带（信道）
VLF(甚低频)	3~30kHz	100~10km	人类听觉高端（音乐、声纳）政府或军事系统，如潜艇通信
LF(低频)	30~300kHz	10~1km	船舶与航空导航
MF(中频)	300~3000kHz	1~0.1km	商用AM无线广播
HF(高频)	3~30MHz	100~10m	短波广播、短波通信电台、业余无线电台
VHF(甚高频)	30~300MHz	10~1m	商业FM广播（88~108MHz） 商业电视（54~216MHz 2~13频道） 移动通信（集群）、船舶、航空通信
UHF(特高频)	300~3000MHz	1~0.1m	商业电视（14~83频道）、陆上移动、蜂窝电话、雷达、导航系统。微波及卫星无线电系统
SHF(超高频)	3~30GHz	10~1cm	微波及卫星无线电系统
EHF(极高频) 毫米波	30~300GHz	1~0.1cm	视距通信，波束方向集中，目前主要用于保密性要求高的军事领域。
亚毫米波	300~3000GHz	1~0.1mm	光纤通信

## 4.1.2 无线电波的传播

– 无线信道电磁波的频率 – 受天线尺寸限制

– 地球大气层的结构

- 对流层：地面上 0 ~ 10 km
- 平流层：约10 ~ 60 km
- 电离层：约60 ~ 400 km



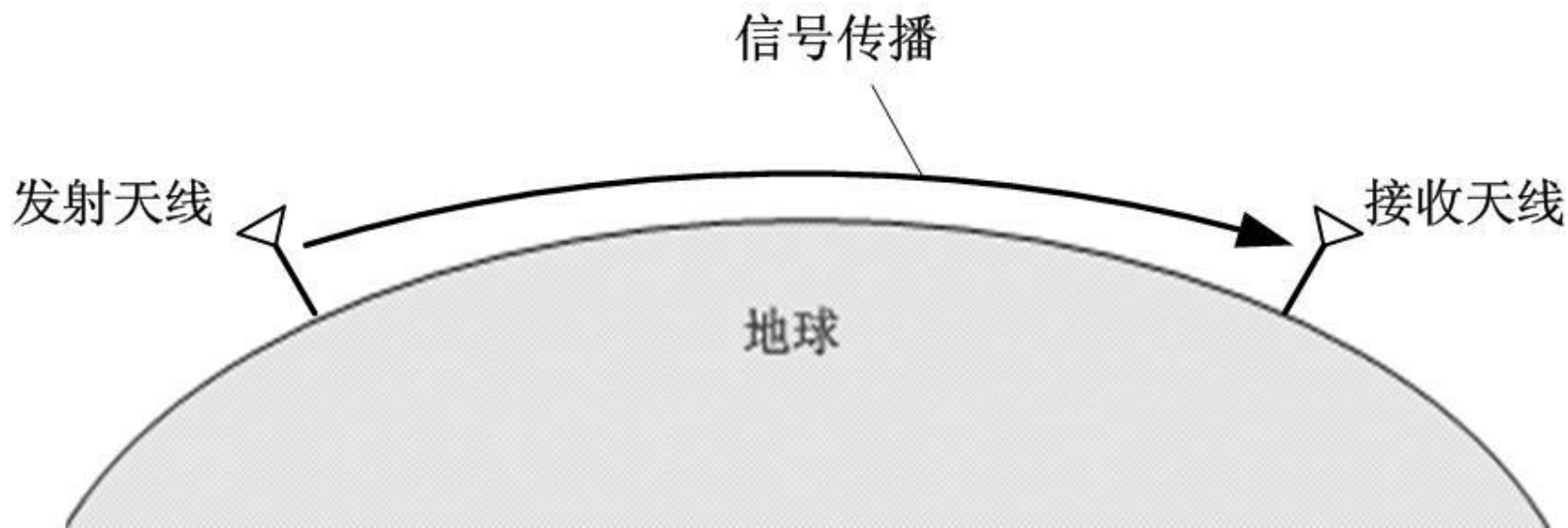
– 大气层对于传播的影响

- 散射
- 吸收
- 反射

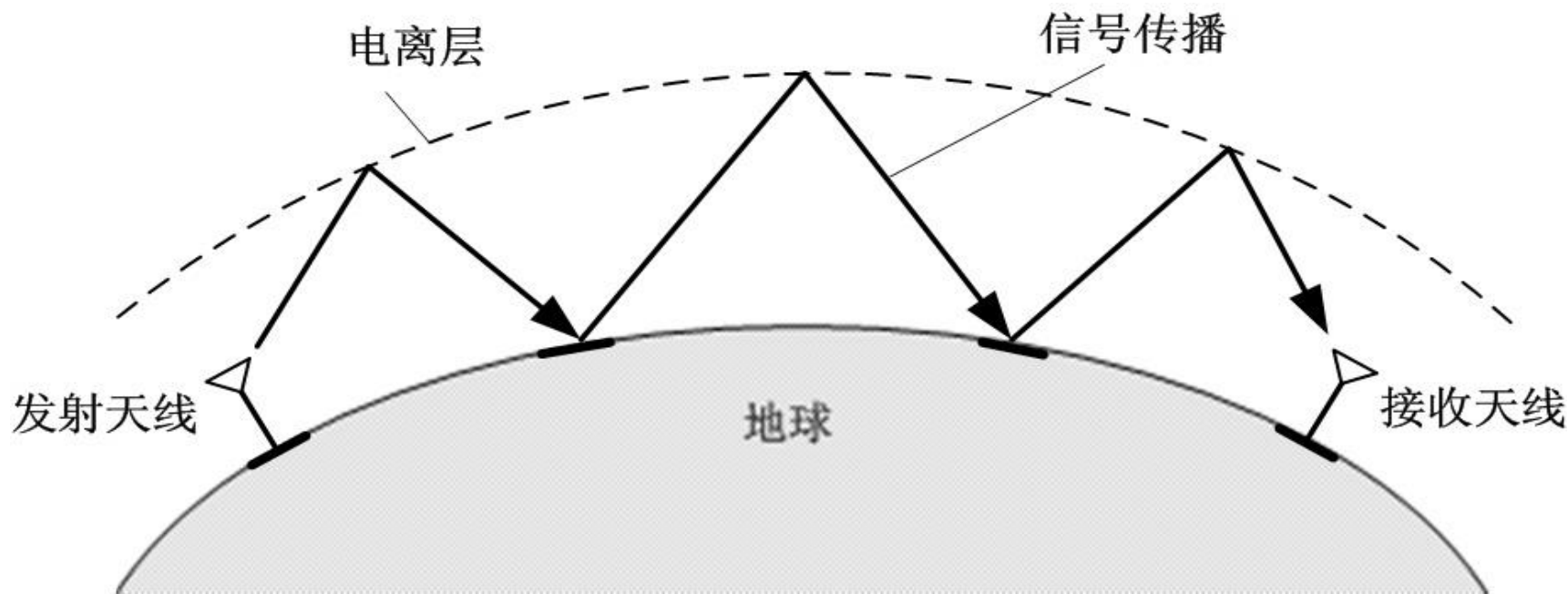
电波传播的主要模式：

地波传播、天波传播、视线传播。

**1. 地波模式**——电波沿地表面弯曲传播的方式。  
较低频率（**2 MHz以下**）电波  
的主要传播方式。  
如，MF的调幅(AM)广播。



**2. 天波模式**——电波经天空中的电离层反射而折回地面的传播方式。HF (2~30MHz)  
电波主要以天波模式传播。

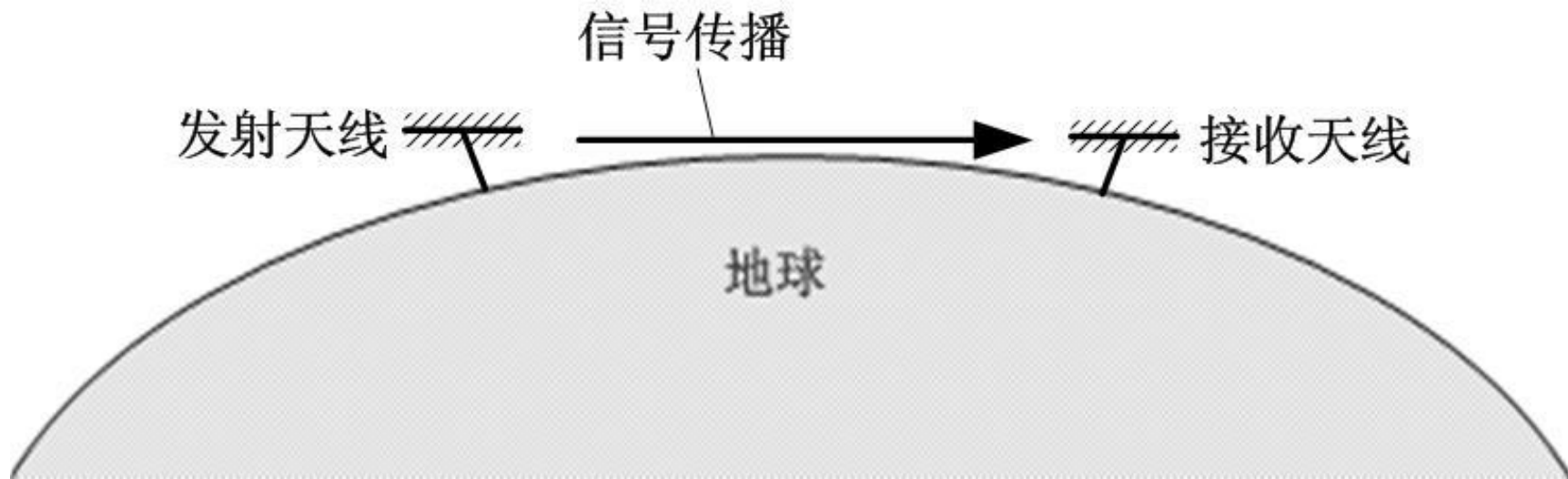


常见问题是多径传播，造成频率选择性。

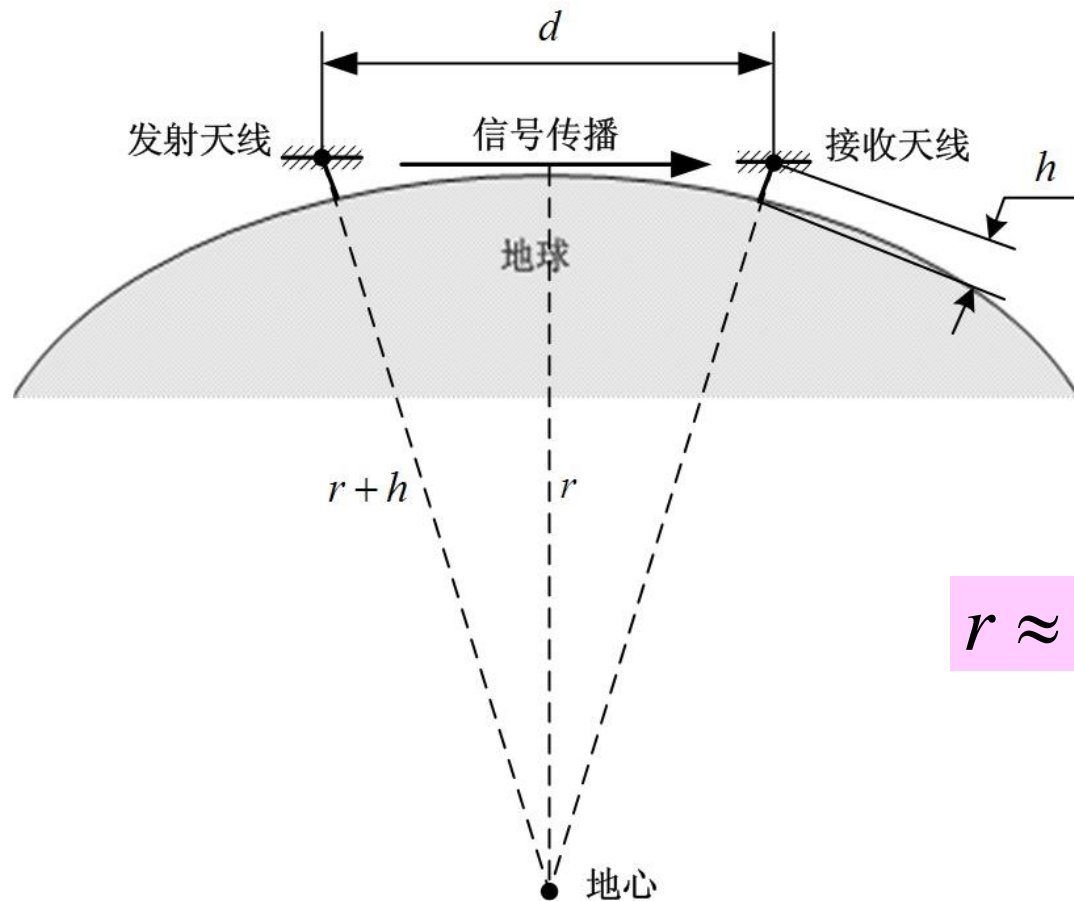
**—多径效应：**信号经过几条路径到达接收端，而且每条路径的长度（时延）和衰减都随时间而变，即存在多径传播现象。



**3. 视线传播模式**——电波像光波作直线传播的方式，是VHF及更高的频率（30MHz以上）电波的主要工作模式。可用于卫星和外太空通信。



在地面应用时，地球表面的弯曲限制了传播的距离。



$$r \approx 6370km$$

$$(d/2)^2 + r^2 = (h + r)^2 \quad \longrightarrow \quad d \approx \sqrt{8hr}$$

例如：  $h=50m$  时，最大视距  $d \approx 50km$

## 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

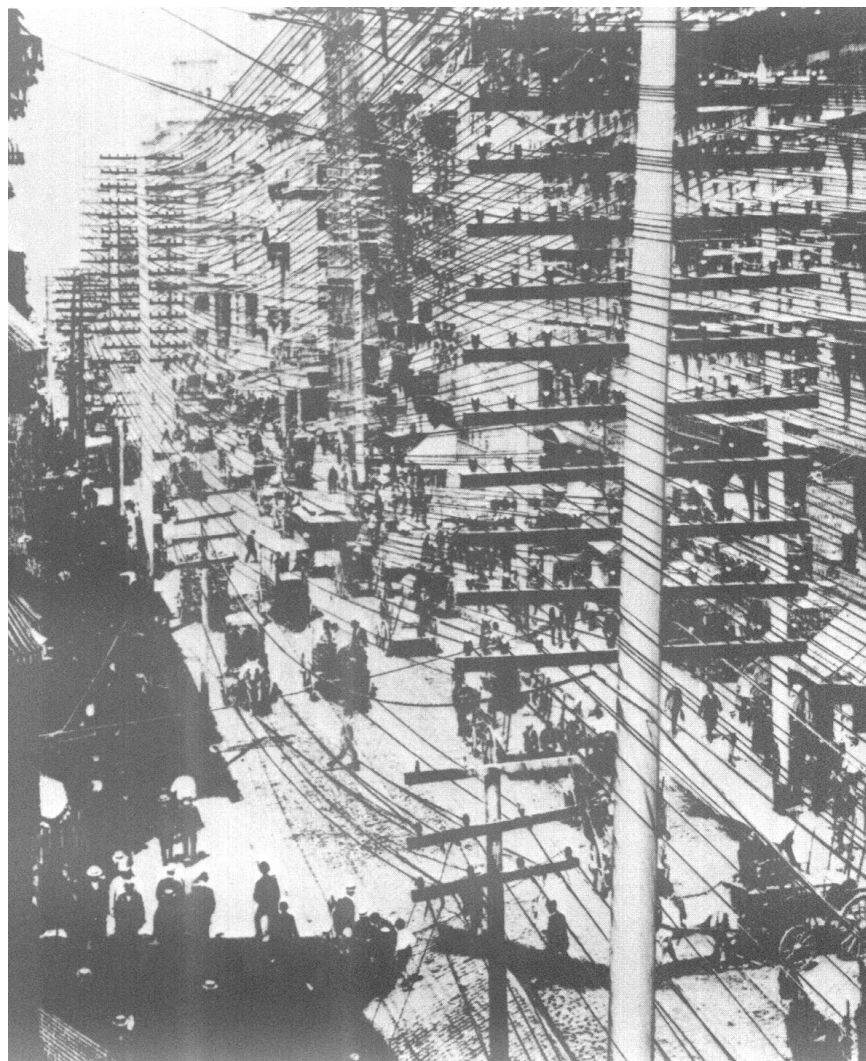
4.5 信道中的噪声

4.6 信道容量

## 4.2 有线信道

### 0.明线

平行架设在  
电线杆上的  
架空线路。



## 1. 双绞线 (Twisted pairwire)

双绞线由两根互相绝缘的导线绞合而成。分为非屏蔽 (UTP) 的与屏蔽的 (STP)。

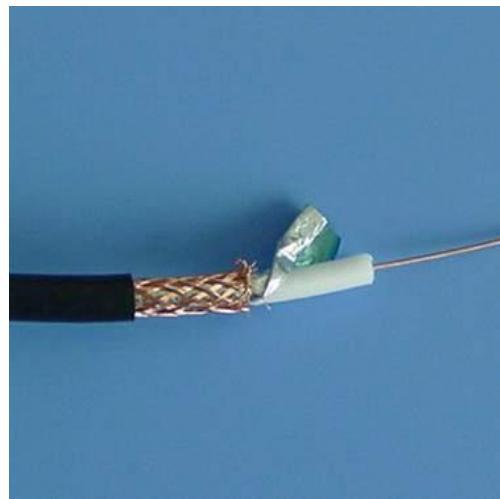
易受电磁干扰，传输带宽通常在几十 kHz~100MHz。价格较低廉，常用于传输话音信号与近距离的数字信号。应用包括本地环路、局域网、用户分配系统以及综合布线工程。



## 2. 同轴电缆 (Coaxial cable)

同轴电缆由同轴心的内层导线、绝缘层、外层导体与保护套组成。特征阻抗通常为  $50$  或  $75\Omega$ 。

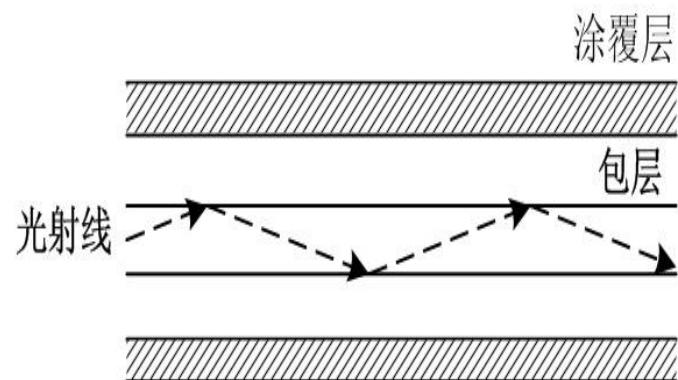
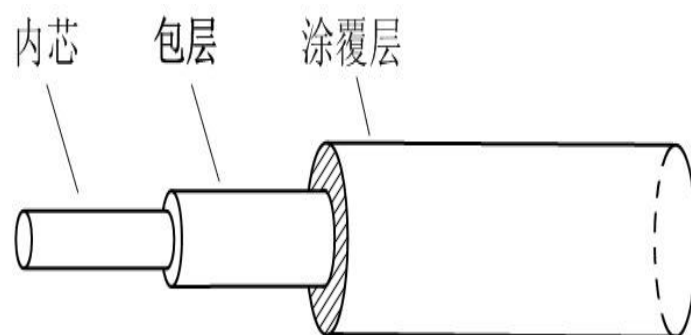
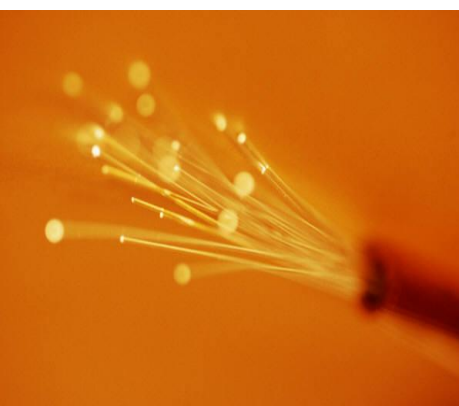
电磁场封闭在内外导体之间，故辐射损耗小，受外界干扰影响小。具有更宽的带宽，直接传输距离仍较近，而且成本较高。例如，有线电视网络。





### 3. 光纤 (Optical fiber)

光纤——能传输光信号的玻璃或塑胶纤维。结构与同轴电缆类似。光波在内外层间不断反射，束缚在内芯中传输。



光纤有以下的一些独特的优点：

- (1) 频带宽，容量大：潜在带宽可达  $2 \times 10^{13}$  Hz。
- (2) 传输损耗低：无中继传输几百公里。
- (3) 光信号不受电磁干扰，抗噪声好、保密性强。
- (4) 体积小、质量轻、易于使用；材料丰富、价格低廉。

长途电话网与互联网中常用光纤作为其传输媒质。

## 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



## 4.3 信道的数学模型

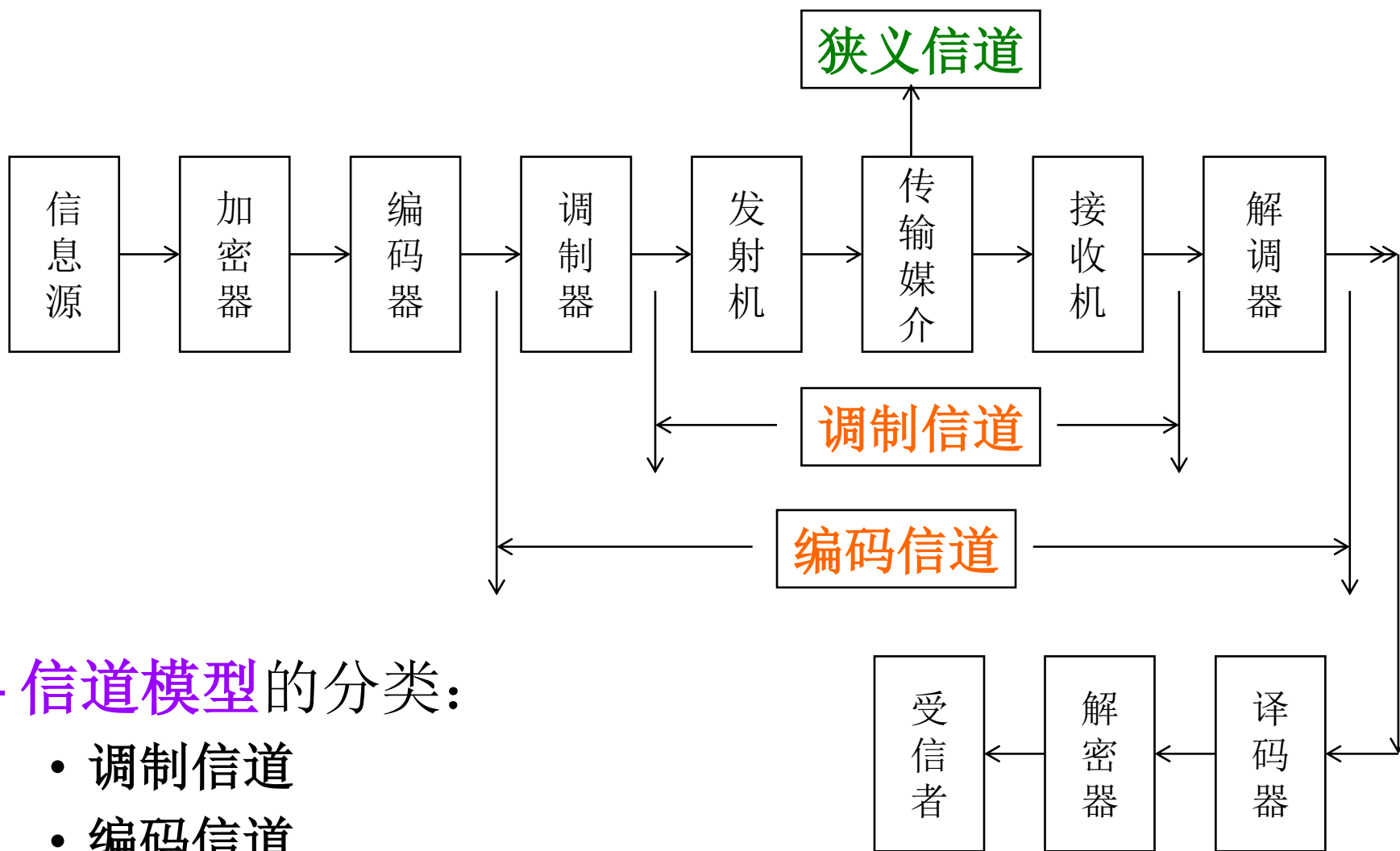
1. **狭义信道**：仅指传输媒质。分为：

- 有线信道
- 无线信道

2. **广义信道**：除了传输媒质外，还包括有关的转换设备，如发送设备、接收设备、馈线与天线、调制器、解调器等等。这种范围扩大了的信道称为广义信道。分为：

- **调制信道**      研究调制和解调的角度定义
- **编码信道**      研究编码和解码的角度定义

## ☆ 狭义信道和广义信道



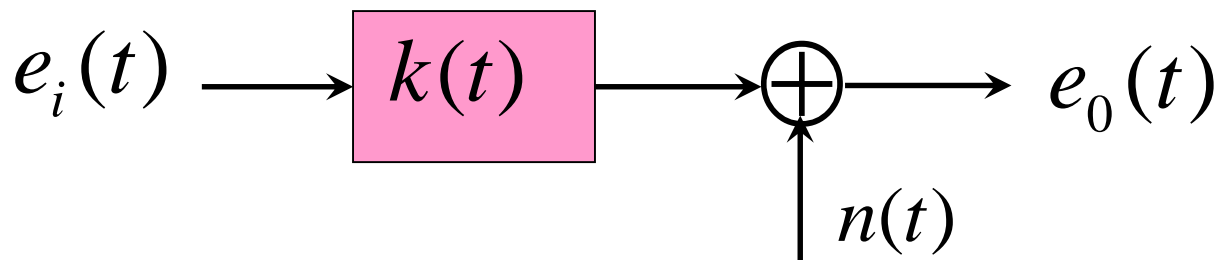
### — 信道模型分类:

- 调制信道
- 编码信道

### 4.3.1 调制信道模型

调制信道有一对输入端和输出端，关系表示为：

$$e_o(t) = k(t)e_i(t) + n(t) \quad \text{— 信道数学模型}$$



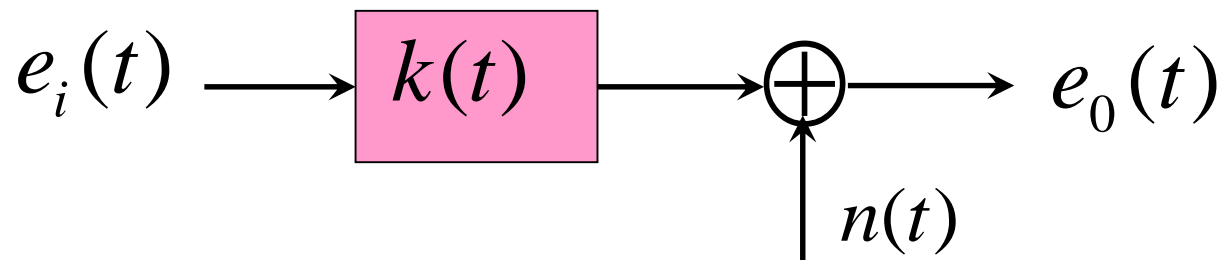
式中：

$e_i(t)$  — 信道输入端信号电压；

$e_o(t)$  — 信道输出端的信号电压；

$n(t)$  — 噪声电压。

$$e_0(t) = k(t)e_i(t) + n(t) \quad \text{— 信道数学模型}$$



$K(t)$ 为信道参数—由它的取值，调制信道可分为：

● **恒参信道**：即  $k(t)$  随时间缓变或不变；

● **随参信道**：即  $k(t)$  随机快变化。

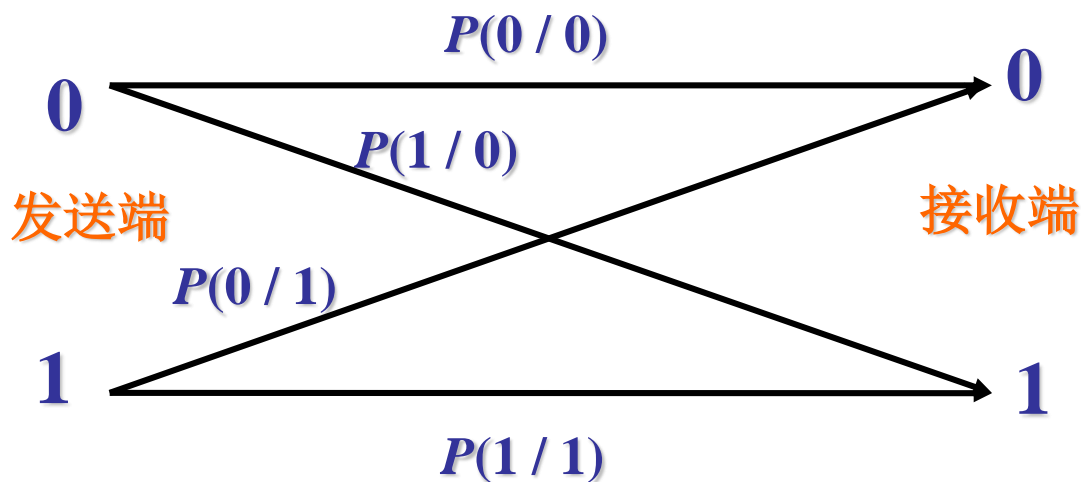
• 因  $k(t)$  与  $e_i(t)$  相乘，故称其为**乘性干扰**。

• 乘性干扰特点：当没有信号时，没有乘性干扰。

## 4.3.2 编码信道模型

编码信道的特性可用信道转移概率来描述。

- 无记忆二进制编码信道



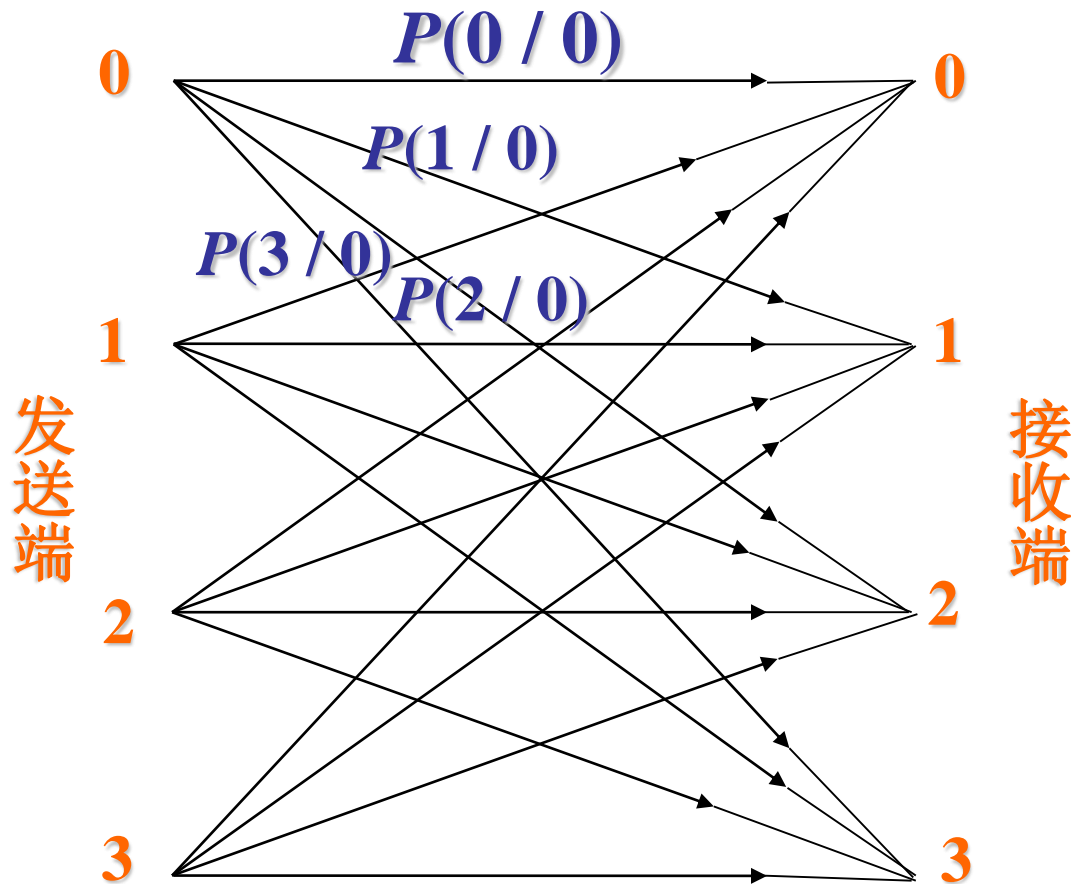
$P(\text{收符号} / \text{发符号})$  —— 转移概率

$P(0 / 0)$  和  $P(1 / 1)$  —— 正确转移概率

$P(1 / 0)$  和  $P(0 / 1)$  —— 错误转移概率

$$P(0 / 0) = 1 - P(1 / 0) \quad P(1 / 1) = 1 - P(0 / 1)$$

# 四进制编码信道模型



编码信道中转移概率的大小，以及产生错码的原因：

调制信道的不理想！

## 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

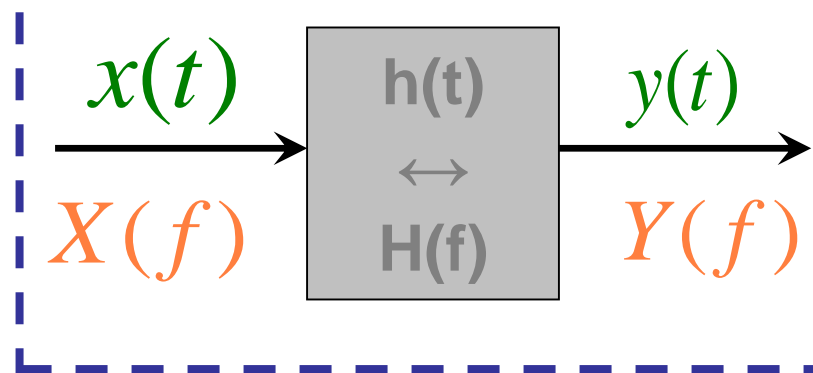
4.6 信道容量

## 4.4 信道特性对信号传输的影响

系统的传输函数

$$H(f) = |H(f)| e^{j\theta(f)}$$

时域



信道输出是输入的时延与缩放，即

$$y(t) = kx(t - \tau)$$

式中：

$k$  --- 信道增益

$\tau$  --- 信道时延

无失真传输条件为： $k$  和  $\tau$  为常数。



频 域

$$y(t) = kx(t - \tau)$$

傅氏变换

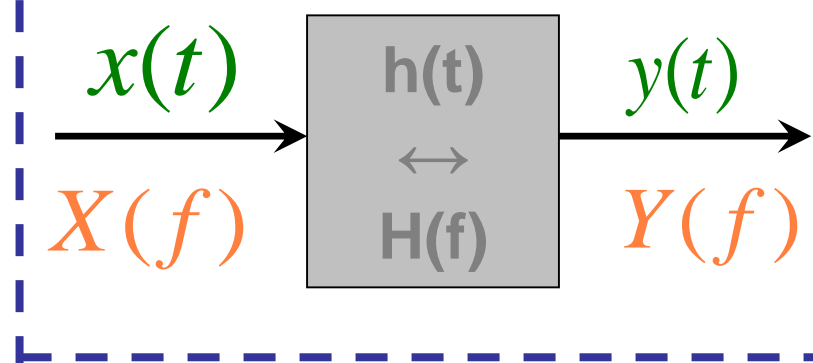
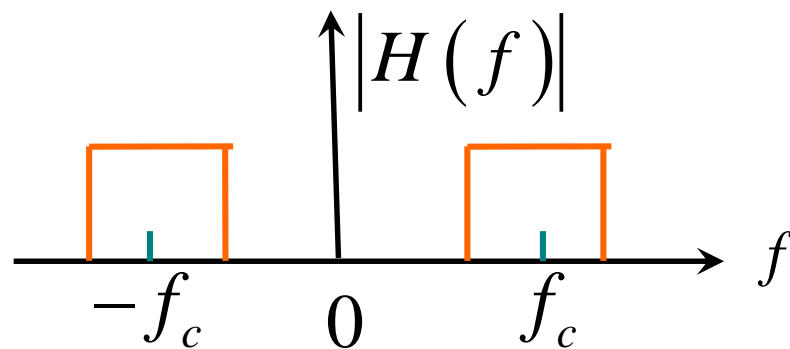
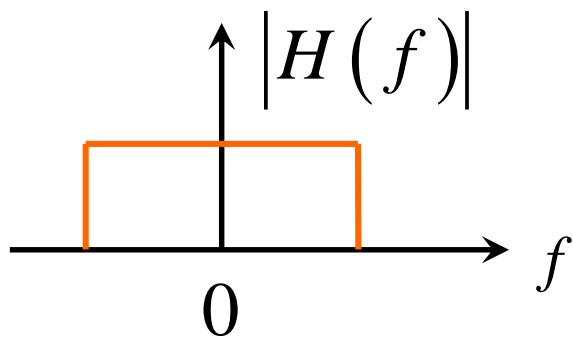
$$Y(f) = kX(f)e^{-j2\pi f\tau}$$

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} = ke^{-j2\pi f\tau}$$

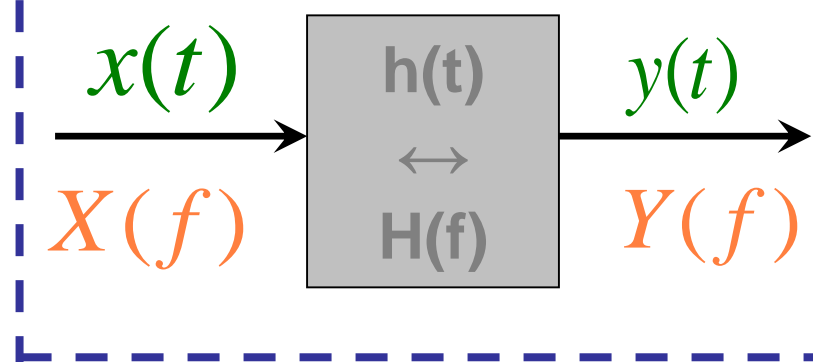
无失真传输条件为：

(1) 幅度响应为实常数

$$|H(f)| = k$$

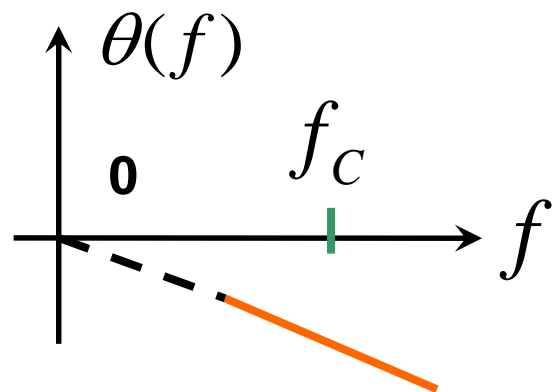
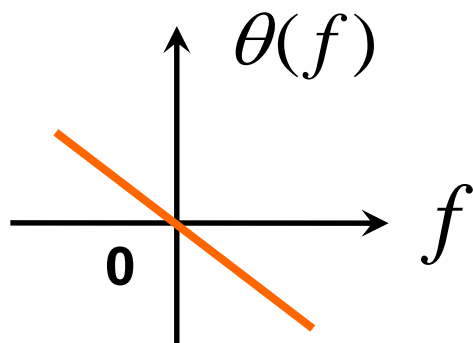


频 域



(2) 相位响应是频率的线性函数

$$\theta(f) = -2\pi f \tau$$



## 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

## 4.5 信道中的噪声

### 1. 噪声性质

- 信道中存在的不需要的电信号。
- 叠加在信号之上，又称加性干扰。

### 2. 噪声分类

#### — 按噪声来源分类

- 人为噪声 — 例：开关火花、电台辐射
- 自然噪声 — 例：闪电、大气噪声、宇宙噪声、  
热噪声

# 热噪声

- **来源**：来自一切电阻性元器件中电子的热运动。
- **频率范围**：均匀分布在大约  $0 \sim 10^{12}$  Hz。
- 热噪声 **电压有效值**：

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

式中：

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  (J/K) — 波兹曼常数；

$T$  — 热力学温度 (°K) ；

$R$  — 阻值 ( $\Omega$ ) ；

$B$  — 带宽 (Hz) 。

- **性质**：高斯白噪声

## — 按噪声性质分类

- **脉冲噪声**：幅度很大，突发性产生，其持续时间比间隔时间短得多。其频谱较宽。如电火花。
- **窄带噪声**：来自相邻电子设备，其频谱通常确知。可看作是连续的已调正弦波。
- **起伏噪声**：包括热噪声、电子管内产生的散弹噪声和宇宙噪声等。

讨论噪声对于通信系统的影响时，主要是考虑 **起伏噪声**，特别是**热噪声**的影响。

## — 按噪声表现分类

**滋滋声**或**沙沙声**：放大器电路元器件产生的固有噪声，轻微且稳定，不会随着音量调节而变化。

**嗡声**：即通常说的“交流声”，由于器材工艺设计的不合理、连接线缆的屏蔽能力等产生的。或者供电电压过低。

**噼啪声**：所谓的放电声，由于器材内部积累灰尘过多产生的，或元器件超过使用寿命而失效时。

**流水声**：一种高频自激的现象，是电路设计不良造成的，属于质量问题。

**啸叫声**、**汽船声**：典型的高频、低频自激，应该马上关闭系统电源，检查器材之间的连接是否有误。

偶尔的**滋滋声**：交流供电线路的串扰。当交流电的供电质量非常糟糕的时候，也会产生这种现象。

**噗噗声**：内部元器件出现故障的现象。

**广播声**：电路设计不良，非线性失真严重，就会产生这种现象。会引发高频自激，导致喇叭或者耳机烧毁。

## 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



## 4.6 信道容量（针对数字通信系统）

**信道容量：**信道的最高信息传输速率，定义为：

$$C = R_{b\max}$$

**性质：**

信道容量指该信道能够传送的最大信息量，其值决定于信道自身的性质，与其输入信号的特性无关。

**问题：**有没有可能设计一种数字通信系统，在信道存在干扰时，输出端的比特错误为零？

**结论：**若信道容量为 $C$ ，信源产生消息的速率为 $R$ ，只要  $C \geq R$ ，则可能以接近零的误码率实现可靠通信；若  $C < R$ ，则不可能实现无误传输。

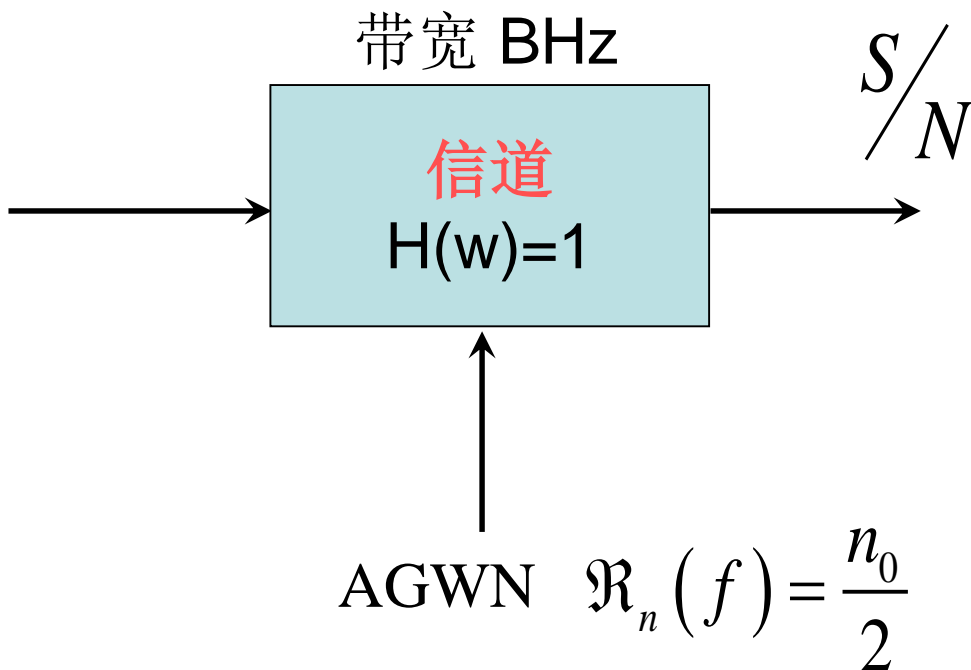
加性高斯信道容量：

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



香农公式

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



$$S = E_b / T_b$$

$E_b$  : 比特能量

$T_b$  : 比特宽度

$$N = n_0 B$$

N: 信号带宽内的噪声功率

讨论：

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

\*  $S / N \uparrow \rightarrow C \uparrow$

\* 当  $N \rightarrow 0$ ,  $C \rightarrow \infty$

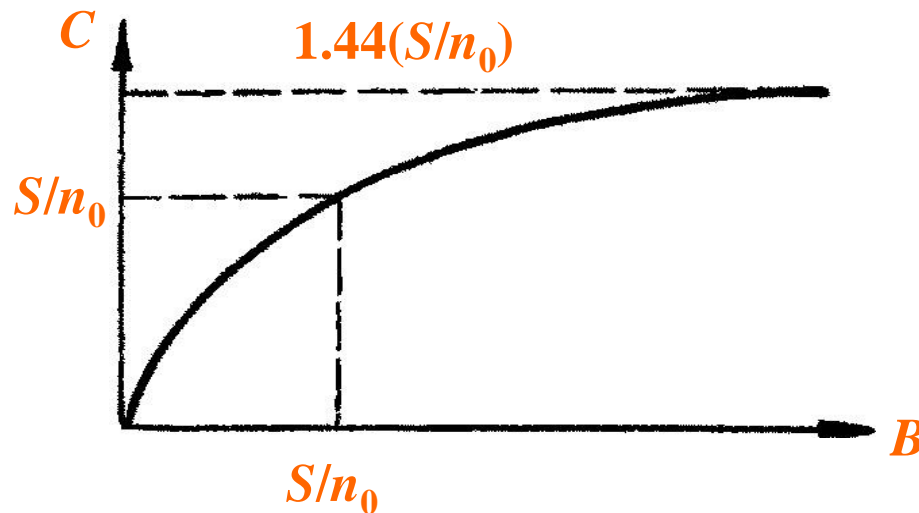
\* 即使  $B \rightarrow \infty$ ,  $C$  仍然有限。

$$\begin{aligned} \lim_{B \rightarrow \infty} C &= \lim_{B \rightarrow \infty} B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \\ &= \frac{S}{n_0} \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{n_0 B}{S} \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right) = \frac{S}{n_0} \log_2 e \\ &= 1.44 \frac{S}{n_0} \end{aligned}$$

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

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = 1.44 \frac{S}{n_0}$$

信道容量**C**和带宽**B**的关系曲线：



- 当  $C$  为常数， $B$  和  $S/N$  可 **互换**。

例

假设数字电视卫星系统近似为AGWN信道，带宽为24MHz，信噪比为16dB，计算该信道的容量，并说明数据率为40Mbps时是否可能进行可靠通信。

解：

信噪比：

$$S / N = 10^{16/10} = 39.81(\text{倍})$$

信道容量：

$$\begin{aligned} C &= 24 \log_2 (1 + 39.81) \\ &= 128.42(\text{Mbps}) \end{aligned}$$

当数据率为40Mbps时，可能进行可靠通信。

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

# 信道

## 分类

狭义信道      有线信道、无线信道  
广义信道      调制信道、编码信道

## 信道噪声

人为噪声、自然噪声 (包含高斯白噪声)  
脉冲噪声、窄带噪声、起伏噪声

## 信道容量

离散信道容量  
连续信道容量      香农公式

## 信道特性对信号传输的影响

恒参信道  
幅频特性  
相频特性

随参信道  
信号的传输损耗随时间而变  
信号的传输时延随时间而变  
多径传播      瑞利型衰落、频率扩展、频率选择性衰落