

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

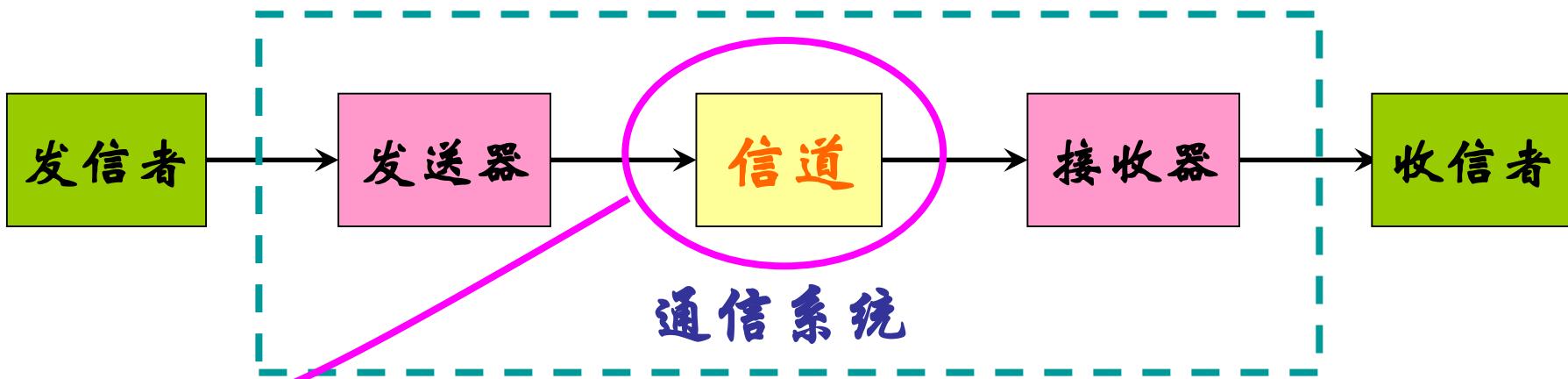
4.3 信道的数学模型

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 —— 介于发信者与收信者之间，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:

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

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

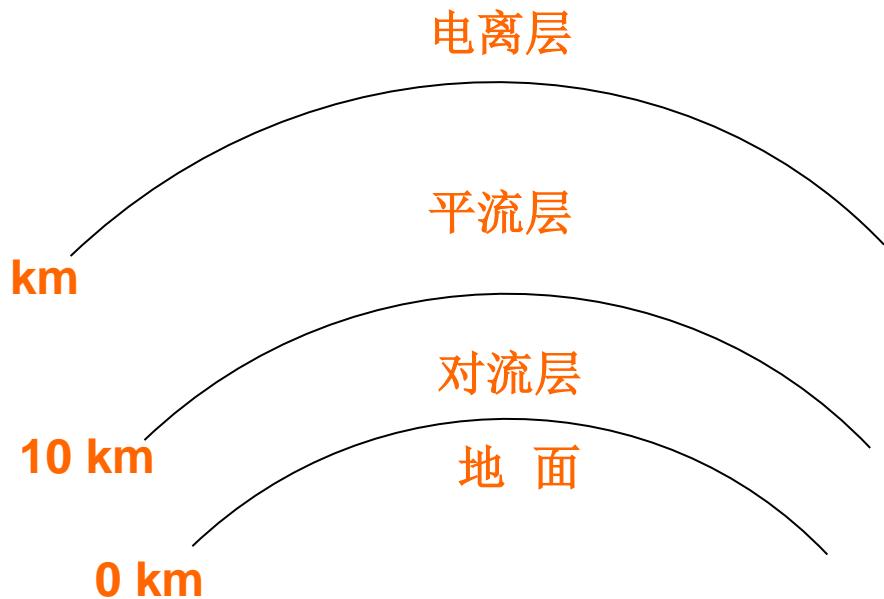
– 无线信道电磁波的频率 – 受天线尺寸限制

– 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



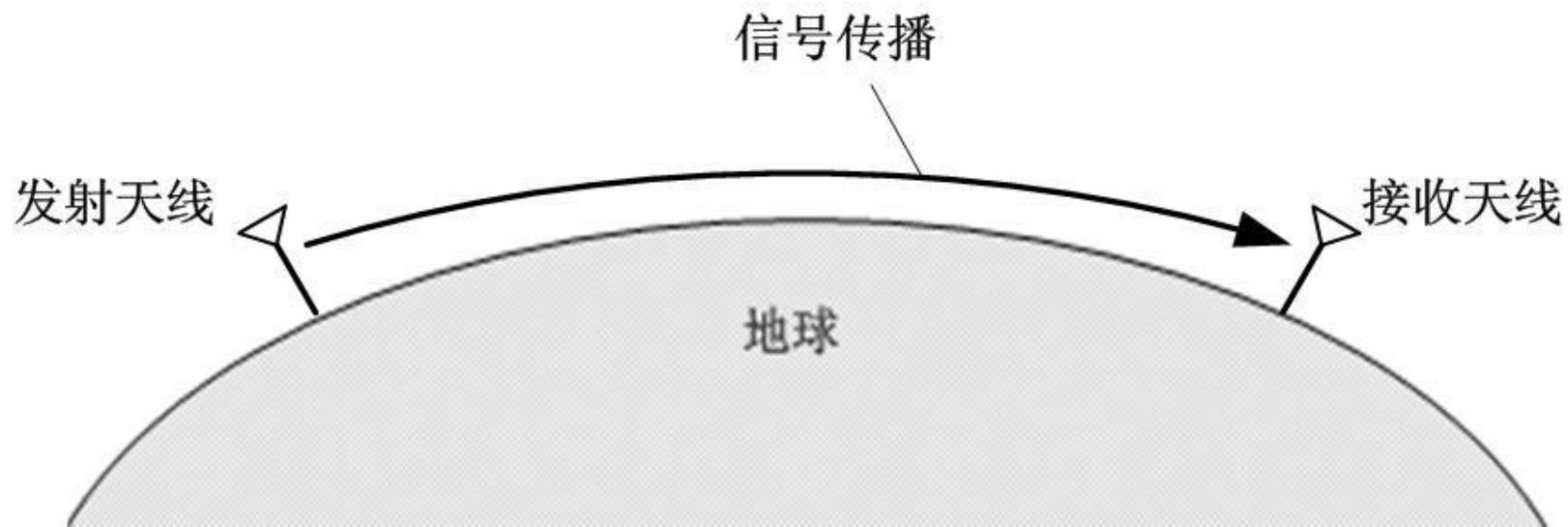
电波传播的主要模式：

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。

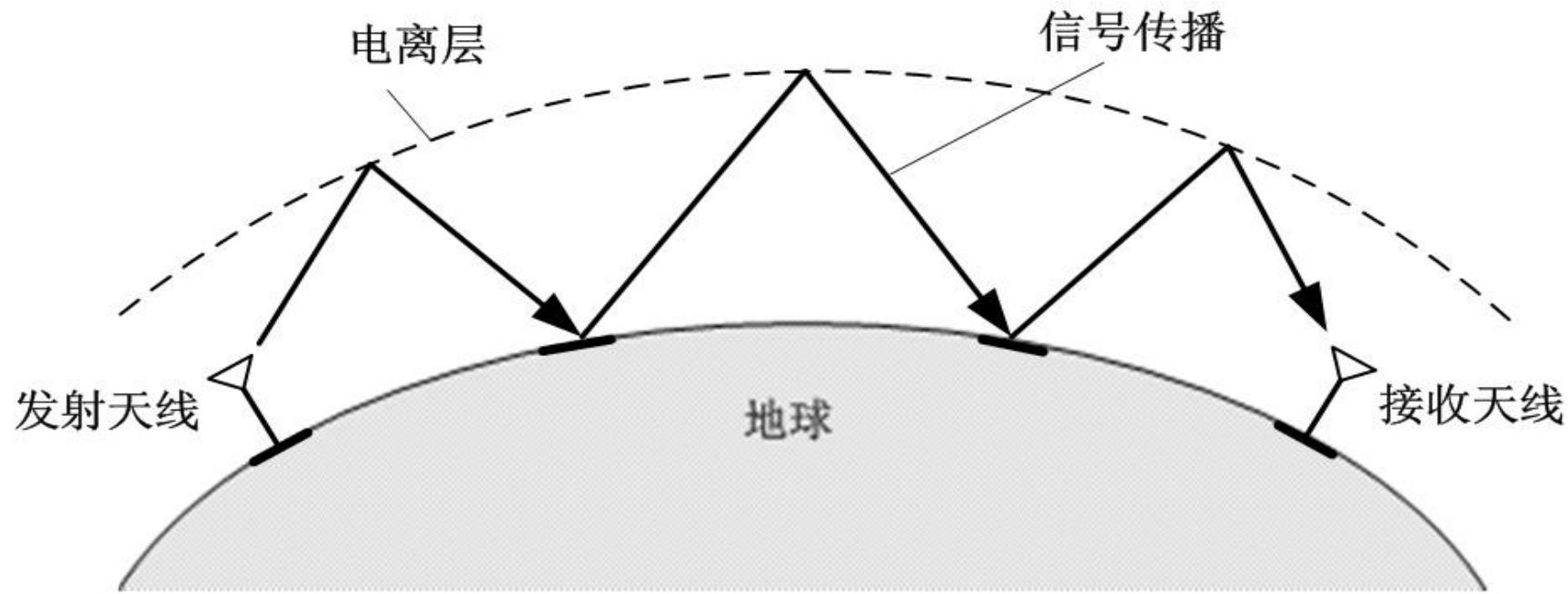
较低频率（**2 MHz**以下）电波的主要传播方式。

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上的传播方式。HF (2~30MHz)

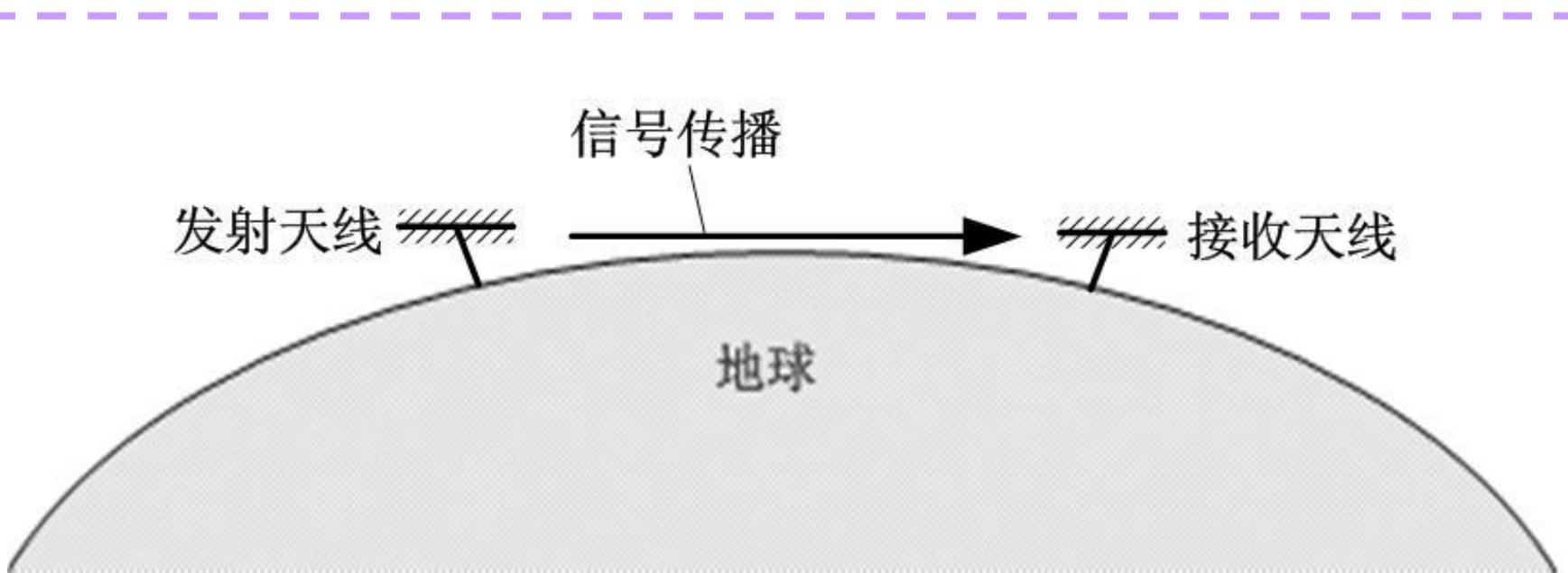
电波主要以天波模式传播。



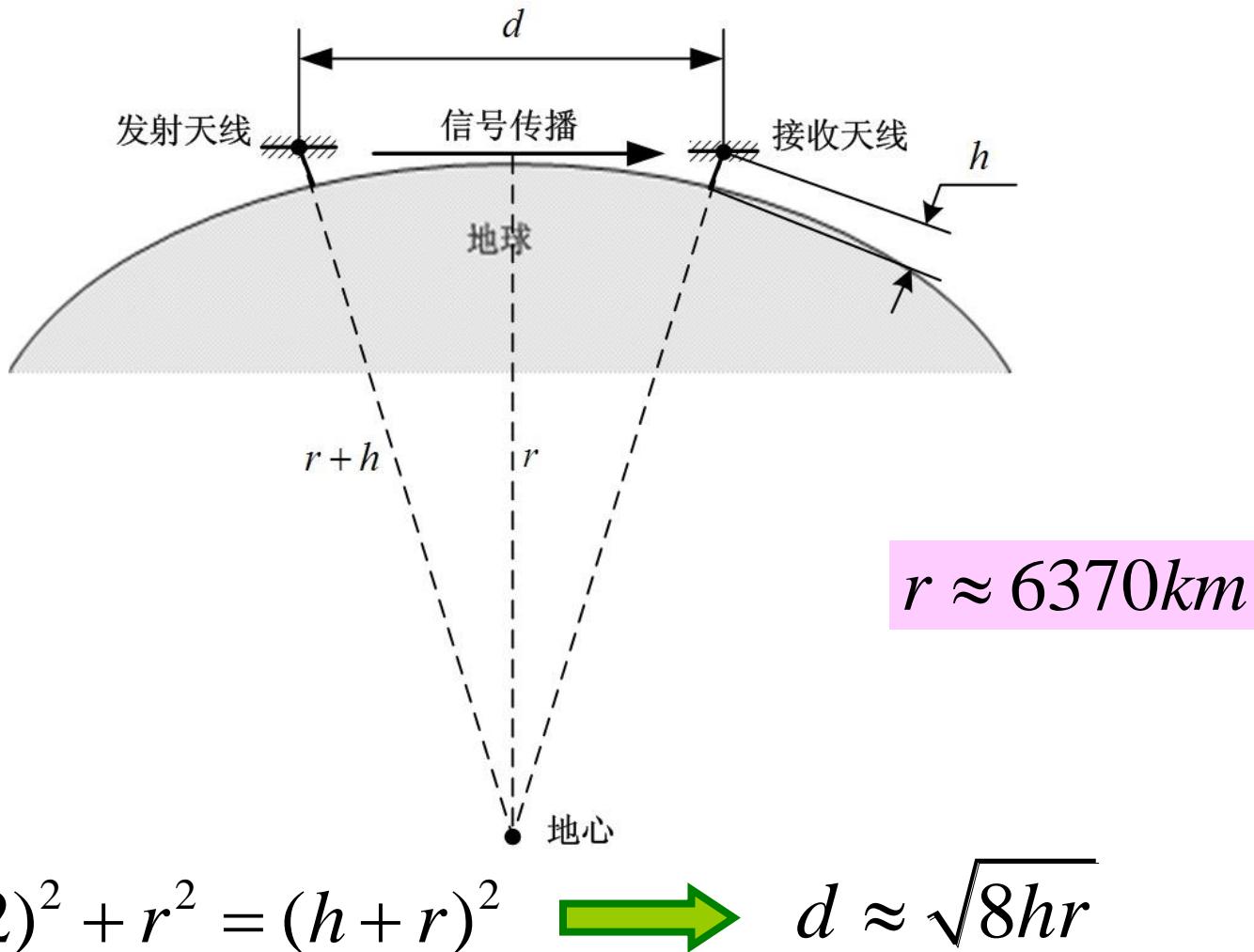
常见问题是多径传播，造成频率选择性。

-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。



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

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

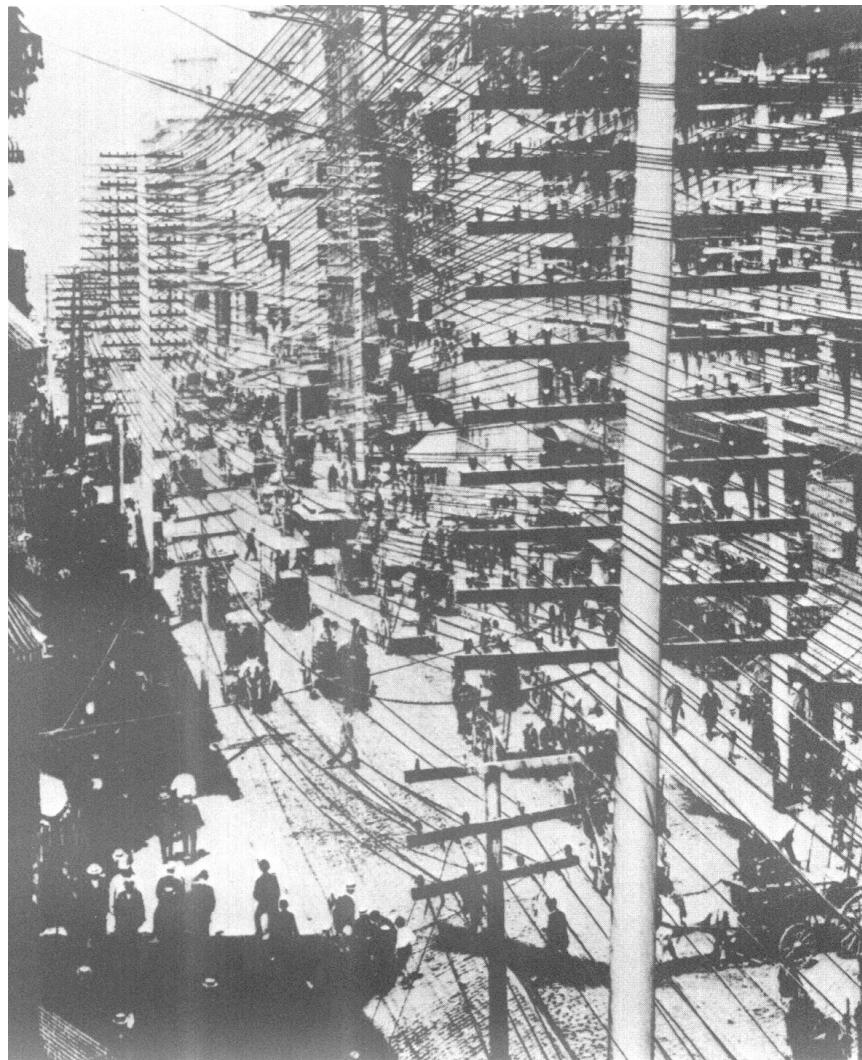
4.5 信道中的噪声

4.6 信道容量

4. 2 有线信道

0. 明线

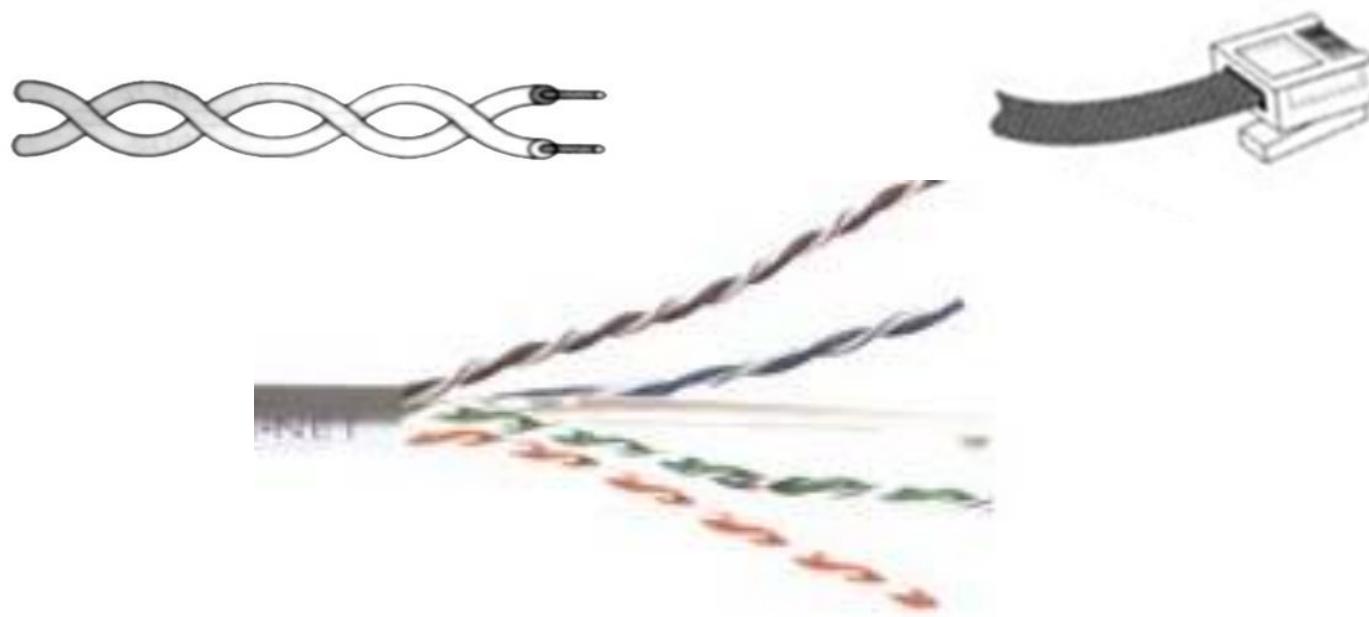
平行架设在
电线杆上的
架空线路。



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）。

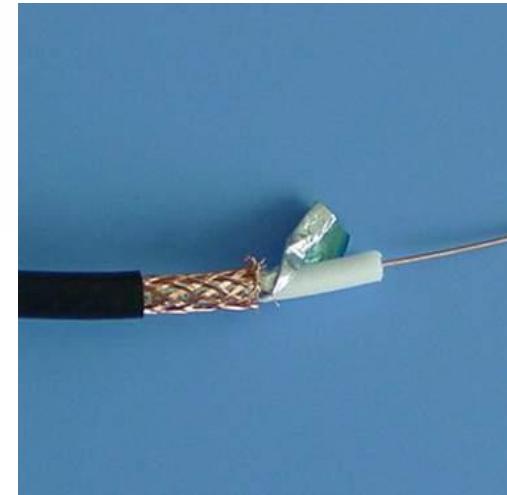
易受电磁干扰，传输带宽通常在几十 kHz~100MHz。价格较低廉，常用于传输话音信号与近距离的数字信号。应用包括本地环路、局域网、用户分配系统以及综合布线工程。



2. 同轴电缆 (Coaxial cable)

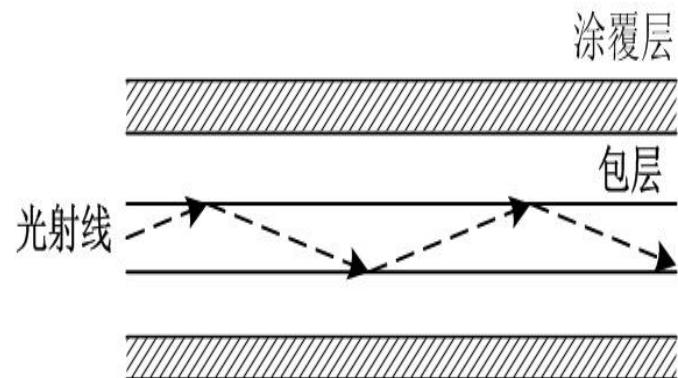
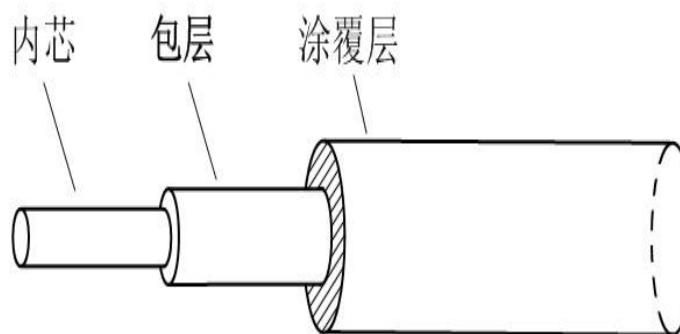
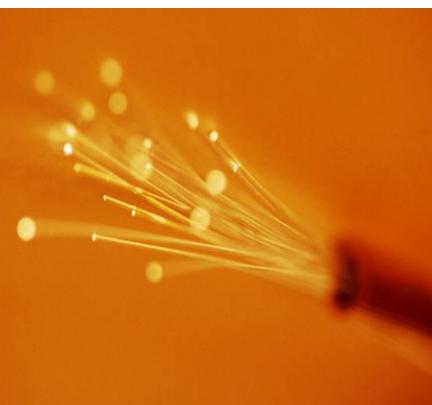
同轴电缆由同轴心的内层导线、绝缘层、外层导体与保护套组成。特征阻抗通常为 50 或 75Ω 。

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 2×10^{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

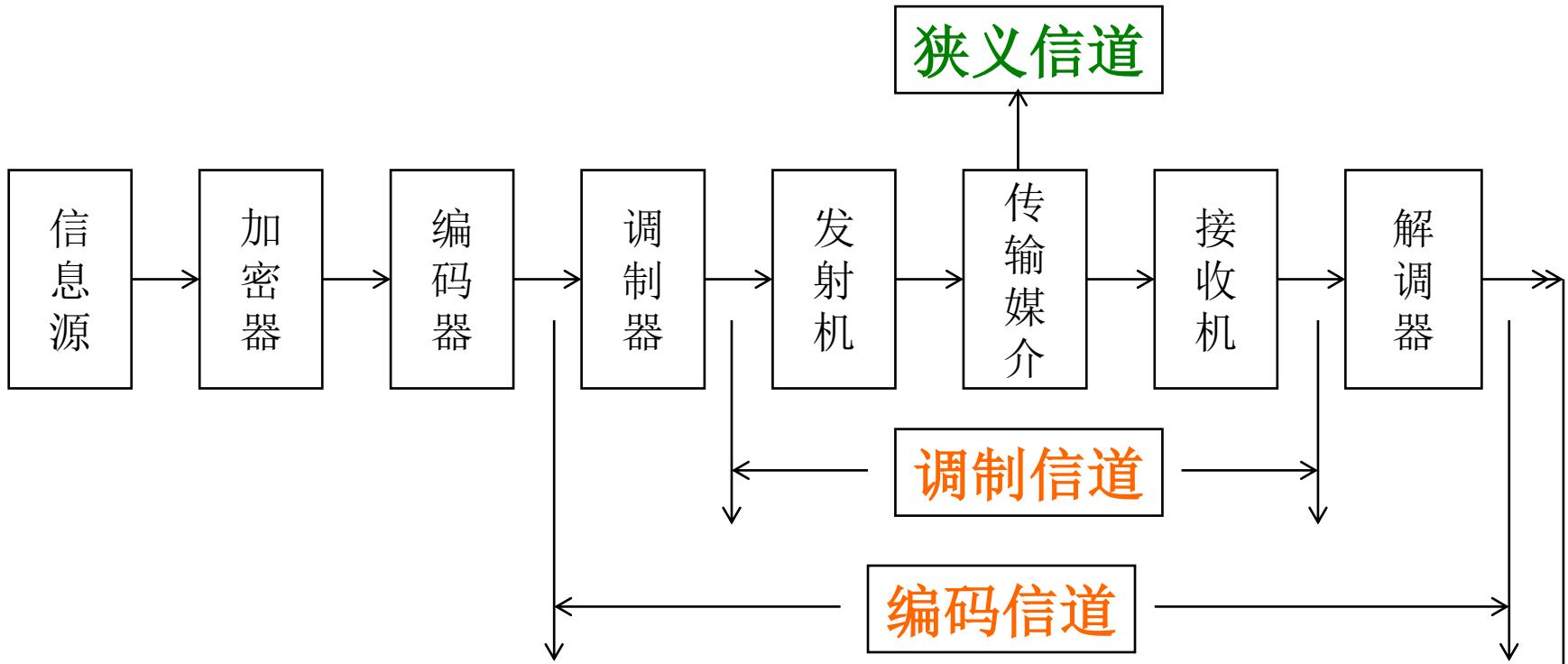
1. 狹义信道：仅指传输媒质。分为：

- 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：

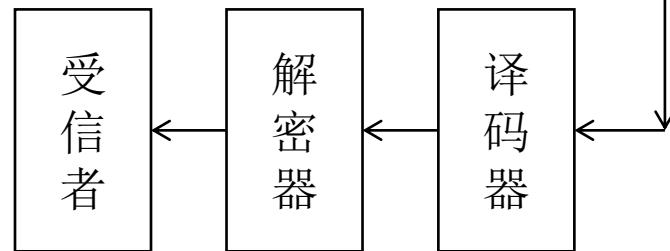
- 调制信道 研究调制和解调的角度定义
- 编码信道 研究编码和解码的角度定义

☆ 狹义信道和廣义信道



- 信道模型的分类:

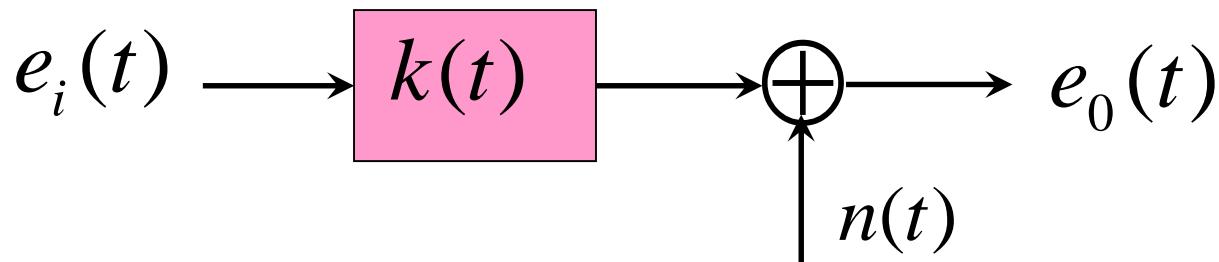
- 调制信道
- 编码信道



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：

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



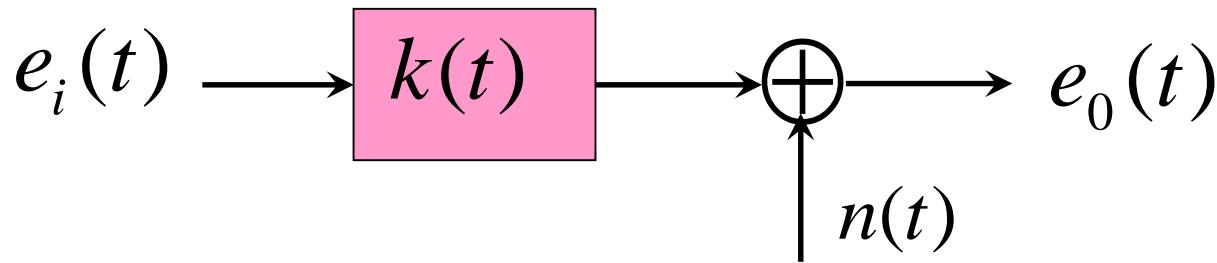
式中：

$e_i(t)$ — 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；

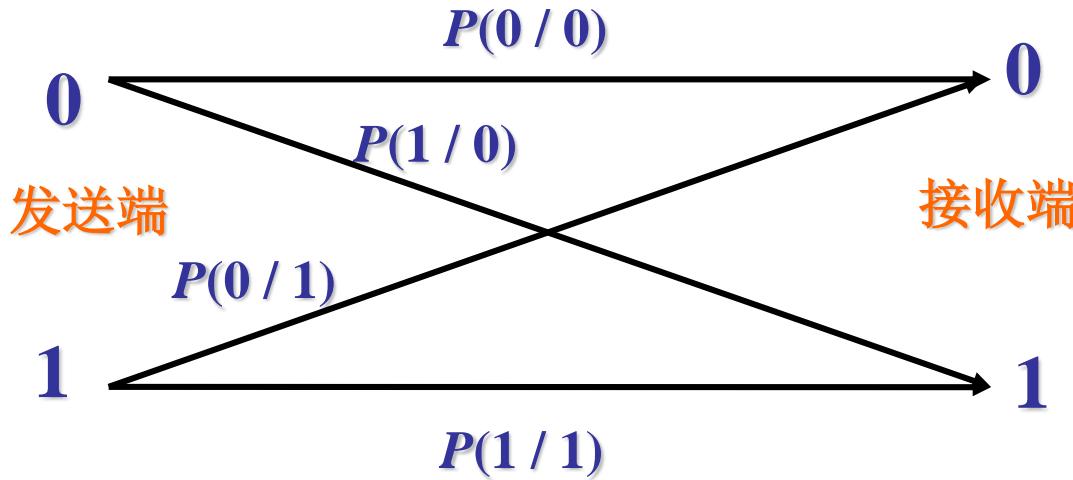
• **随参信道**：即 $k(t)$ 随机快变化。

- 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



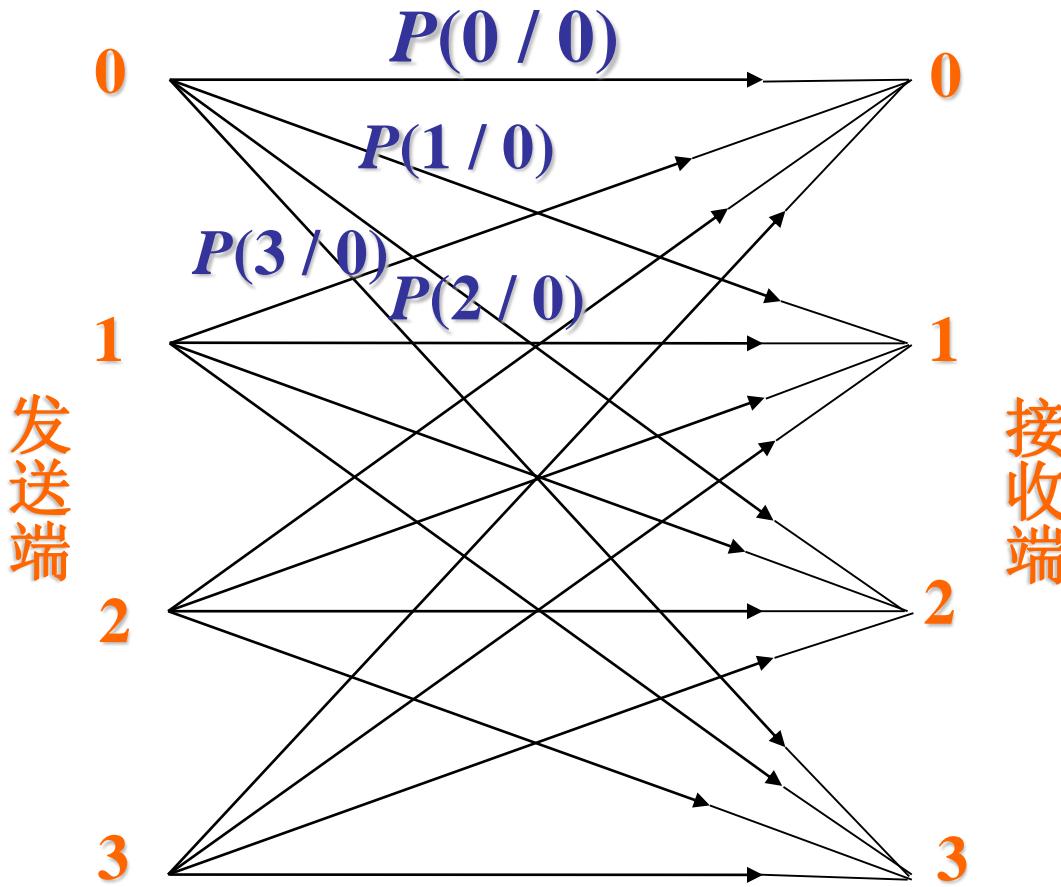
$P(\text{收符号} / \text{发符号})$ —— **转移概率**

$P(0 / 0)$ 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 >

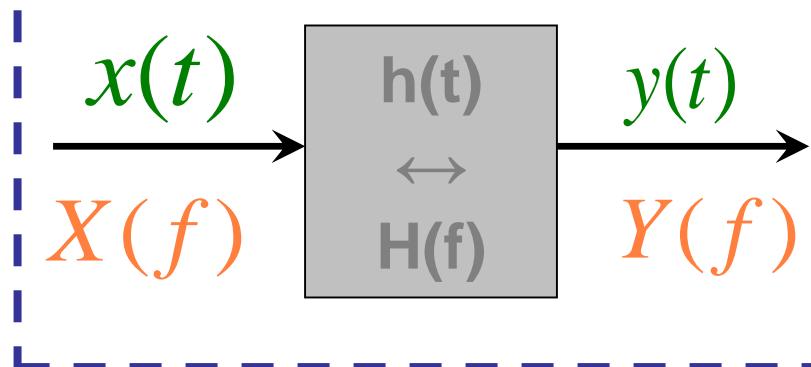
4.5 信道中的噪声

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 τ --- 信道时延

无失真传输条件为： k 和 τ 为常数。

频 域

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

傅氏  变换

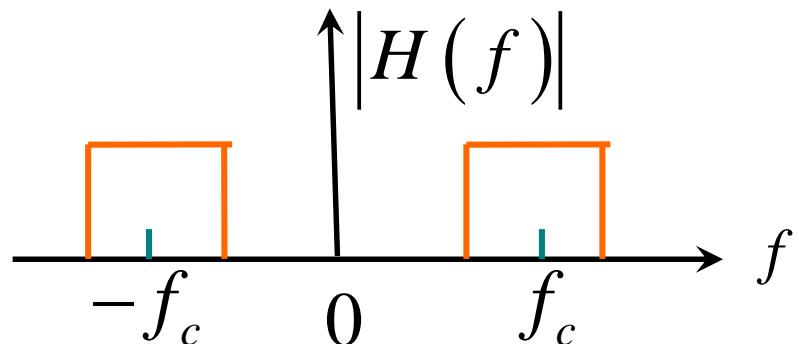
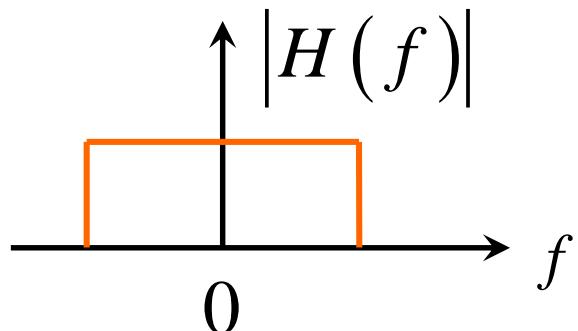
$$Y(f) = kX(f)e^{-j2\pi f \tau} \rightarrow$$

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

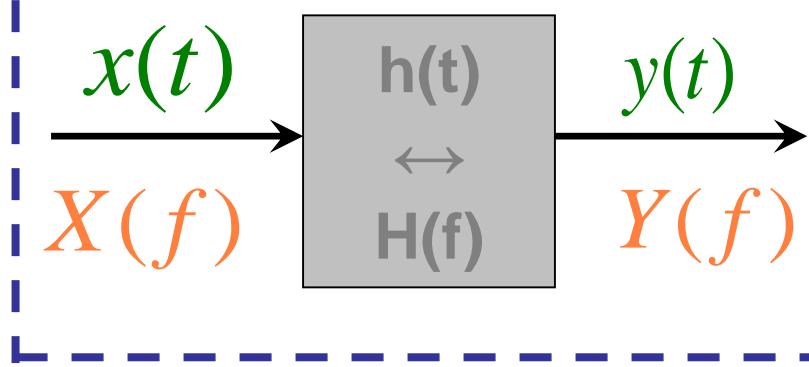
无失真传输条件为：

(1) 幅度响应为实常数

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

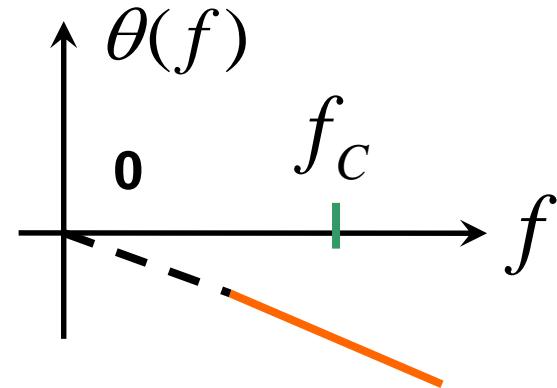
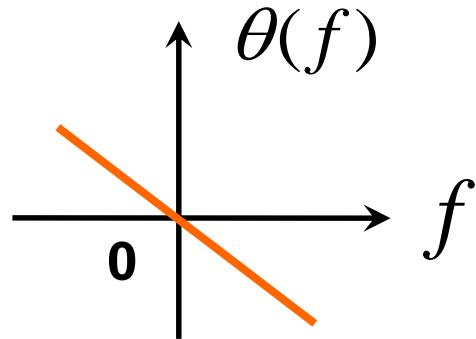


频 域



(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 $0 \sim 10^{12} \text{ Hz}$ 。
- 热噪声电压有效值：

$$V = \sqrt{4kT R B} \quad (\text{V})$$

式中：

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

T — 热力学温度 ($^{\circ}\text{K}$)；

R — 阻值 (Ω)；

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, 其频谱通常可知。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

咝咝声或沙沙声: 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。

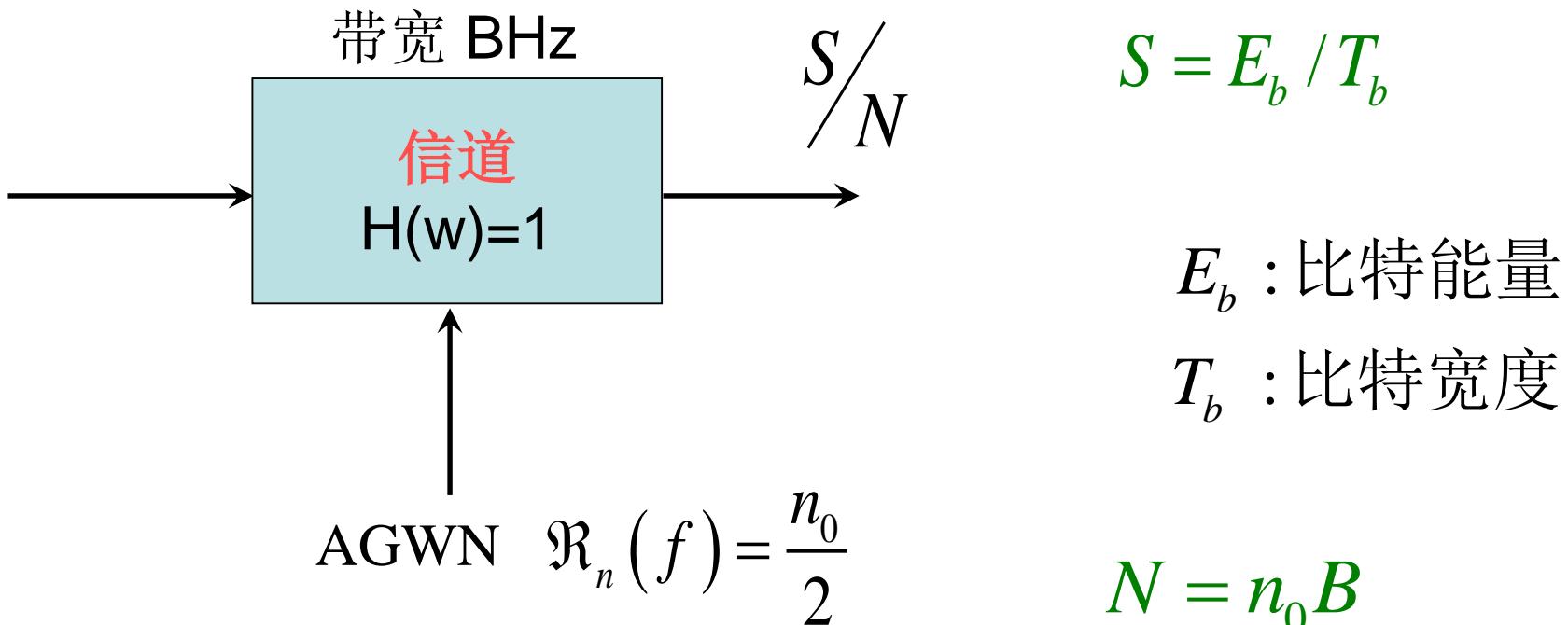
加性高斯信道容量：

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



香农公式

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



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。

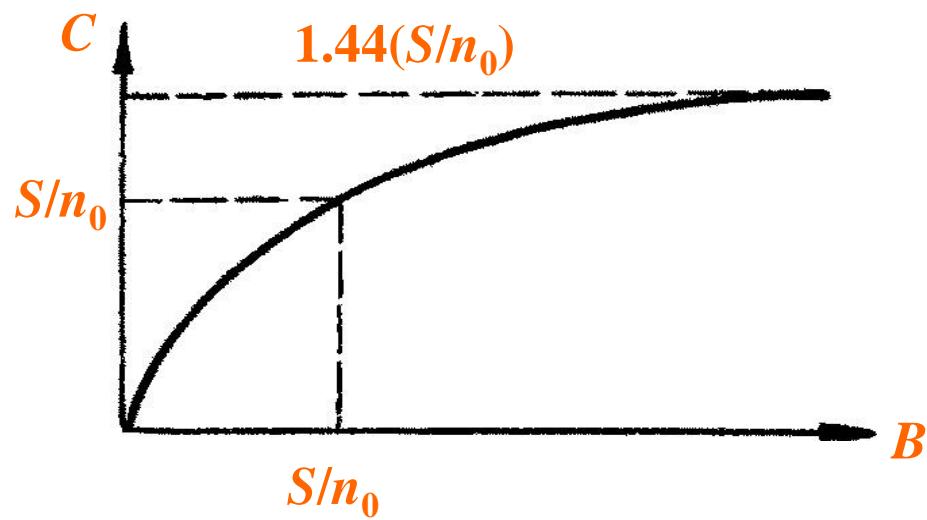
$$\begin{aligned} \lim_{B \rightarrow \infty} C &= \lim_{B \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \\ &= \frac{S}{n_0} \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{n_0 B}{S} \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) = \frac{S}{n_0} \log_2 e \end{aligned}$$

$$= 1.44 \frac{S}{n_0}$$

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

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

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：

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

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

信道容量：

$$C = 24 \log_2 (1 + 39.81)$$

$$= 128.42(Mbps)$$

当数据率为40Mbps时，可能进行可靠通信。

