



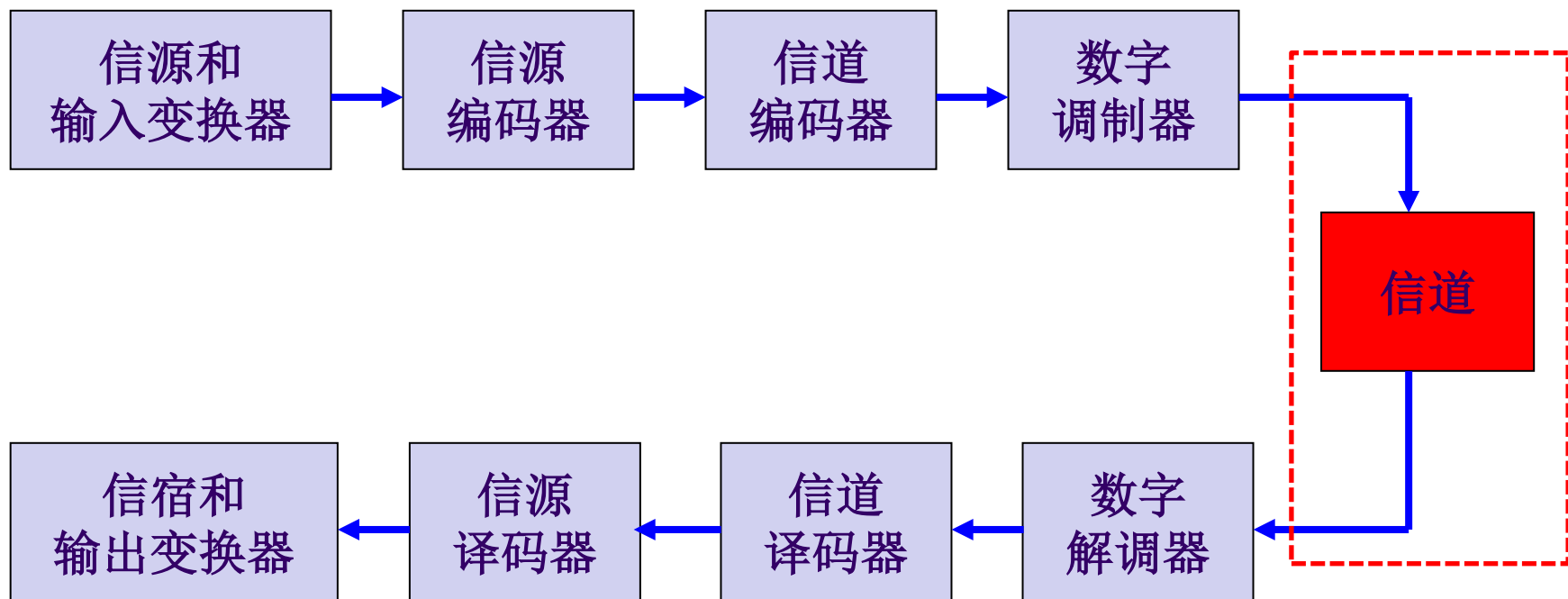
FUNDAMENTALS OF INFORMATION SCIENCE

PART 4 INFORMATION TRANSMISSION III

—— CHANNEL

Shandong University
2025 Spring

数字信息传输系统 —— Channel



- 信道**分类**
- 信道**模型**
- **恒参/随参**信道**特性**对信号传输的**影响**
- 信道**噪声**
- 信道**容量**

定义·分类

模型·特性

影响·措施

信道噪声
信道容量

概述

信道的定义与分类

■ 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

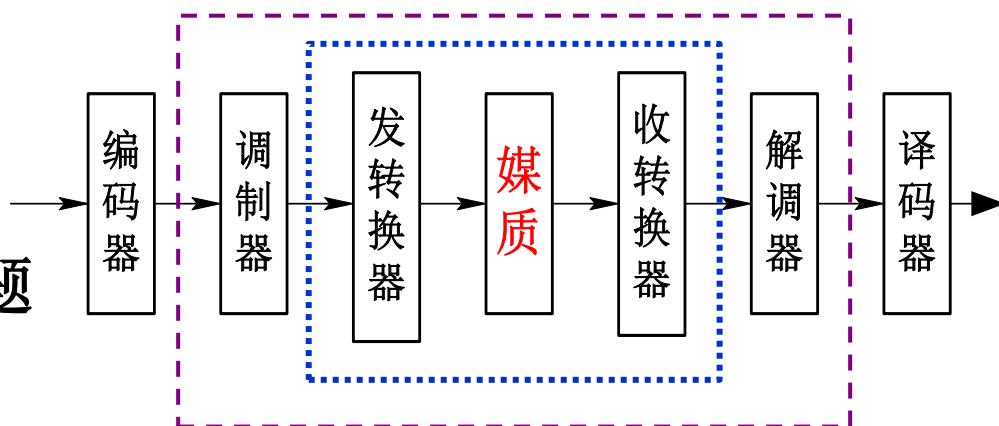
■ 广义信道：

- **调制信道**

——研究调制/解调问题

- **编码信道**

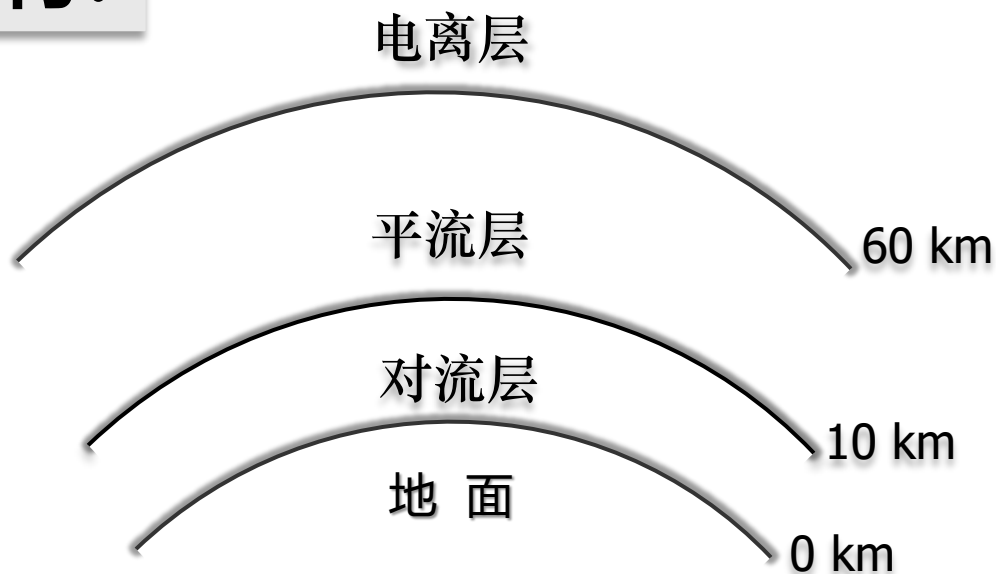
——研究编码/译码问题



§ 17.1

无线信道

■ 地球大气层的结构：



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

■ 电磁波的传播方式:

无线信道

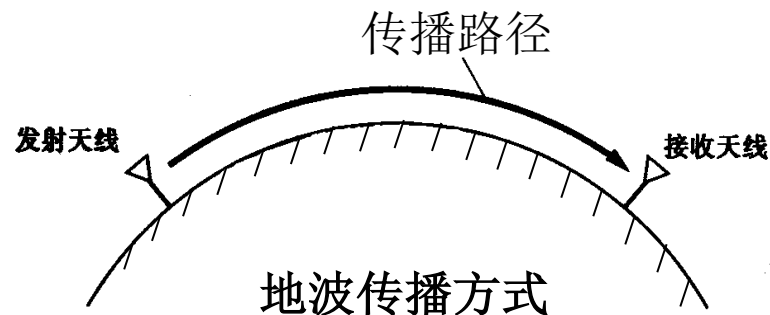
□ 地波 ground-wave

频率: $< 2\text{ MHz}$

特性: 有绕射能力

距离: 数百或数千米

用于: AM广播



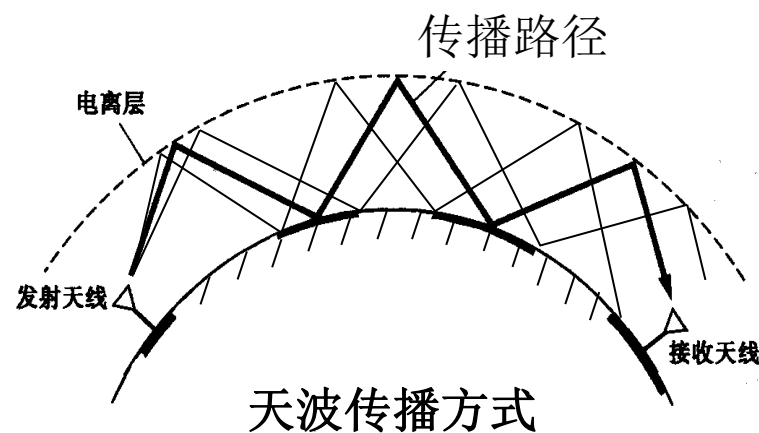
□ 天波 sky-wave

频率: $2\sim 30\text{ MHz}$

特性: 被电离层反射

距离: $< 4000\text{ km}$ (一跳)

用于: 远程、短波通信



□ 视线传播 line-of-sight

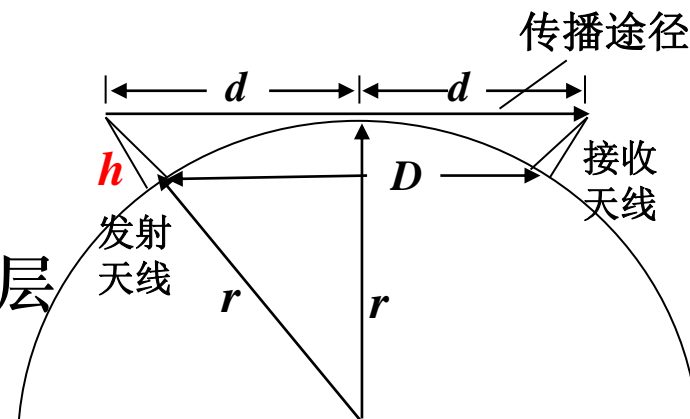
频率： > 30 MHz

特性： 直线传播、穿透电离层

用途： 卫星和外太空通信

超短波及微波通信

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：

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

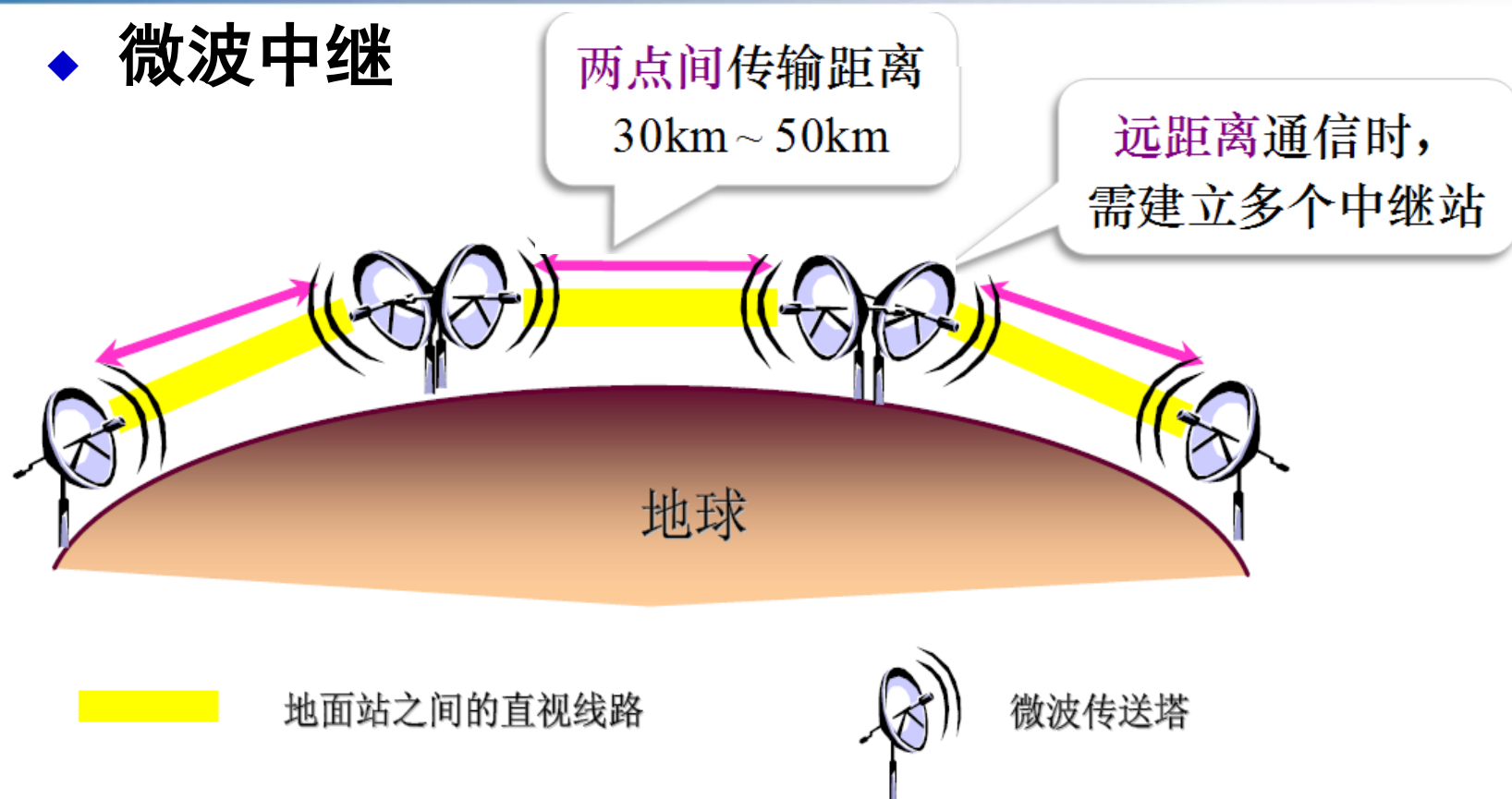


Q&A

增大视线传播距离的其他途径？

- ◆ 微波中继（微波接力）
- ◆ 卫星中继（静止卫星、移动卫星）
- ◆ 平流层通信

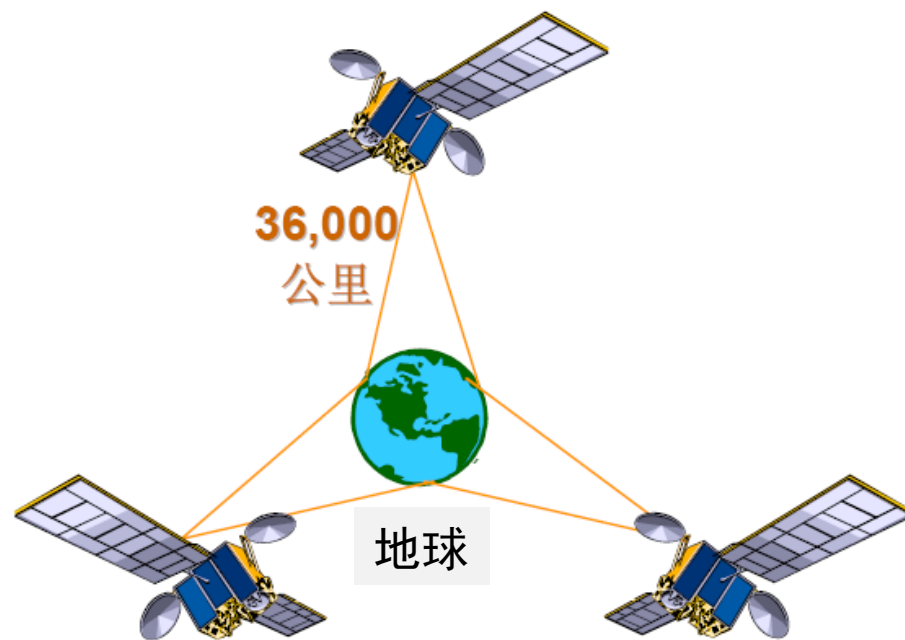
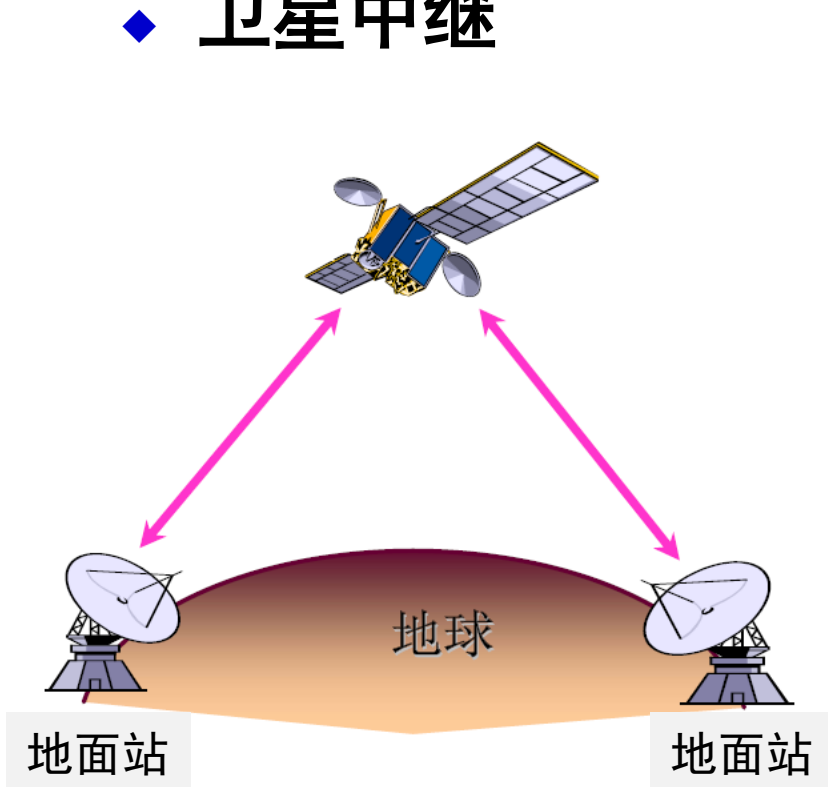
◆ 微波中继



优点： 容量大、投资少、维护方便、传输质量稳定。

应用： 远距离传输话音和电视信号。

◆ 卫星中继



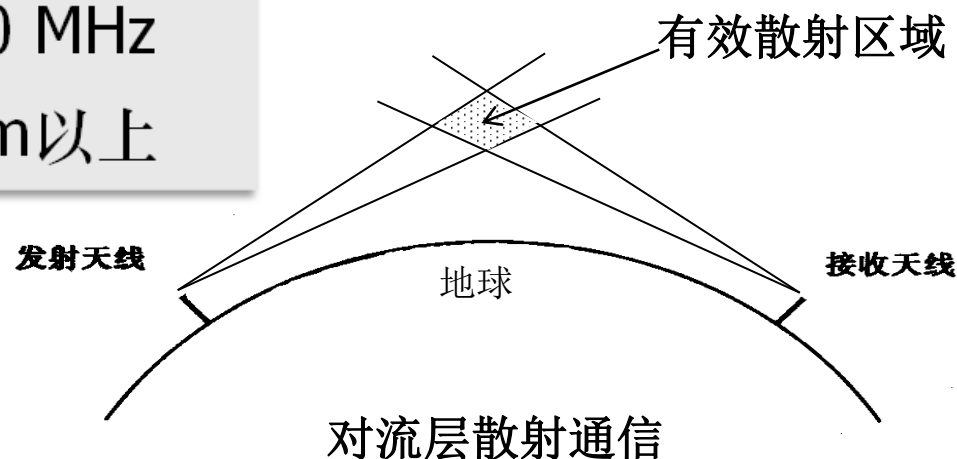
优点： 通信容量大，传输质量稳定，传输距离远，覆盖区域广。
缺点： 传输时延大，信号衰减大，造价高。

□ 散射通信

电离层散射

频率：30 ~ 60 MHz

距离：1000 km以上

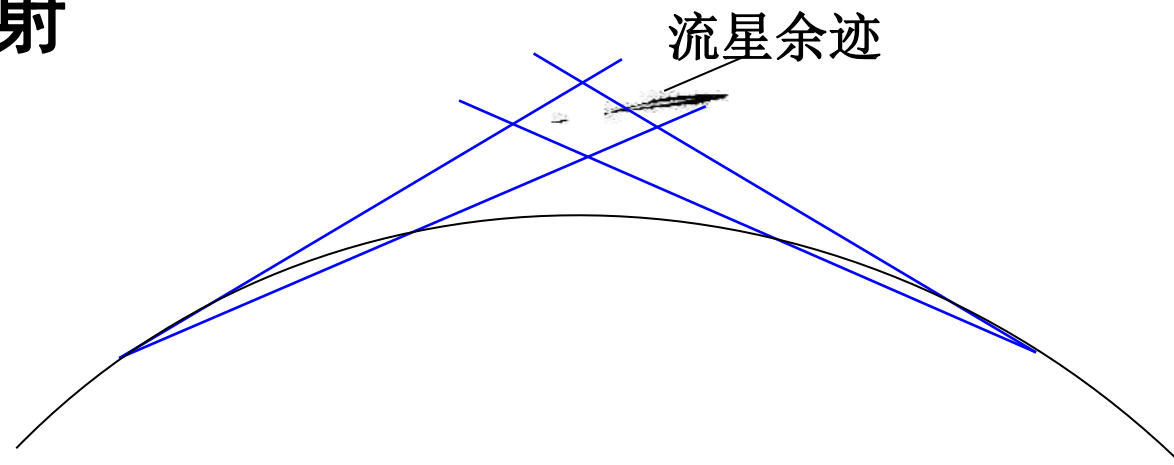


对流层散射

频率：100 ~ 4000 MHz

距离：< 600 km

□ 流星余迹散射



特性: 高度80 ~ 120 km, 长度15 ~ 40 km

存留时间: 小于1秒至几分钟

频率: 30 ~ 100 MHz

距离: 1000 km以上

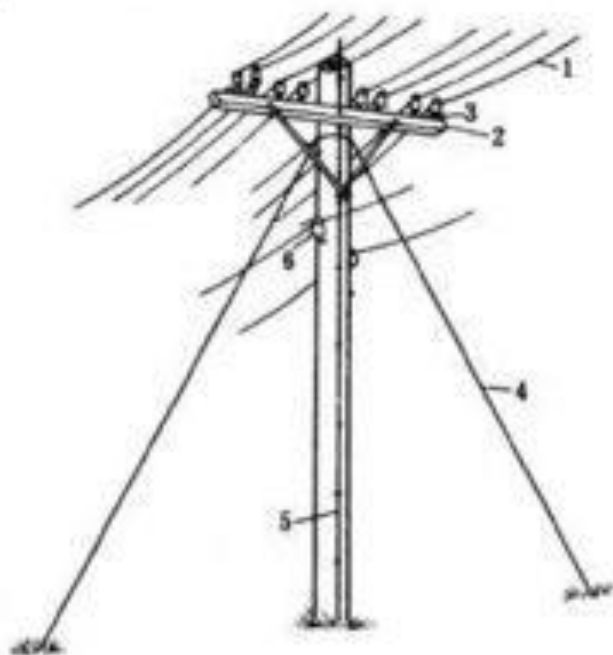
用途: 低速存储、高速突发、断续传输

§ 17.2

有线信道

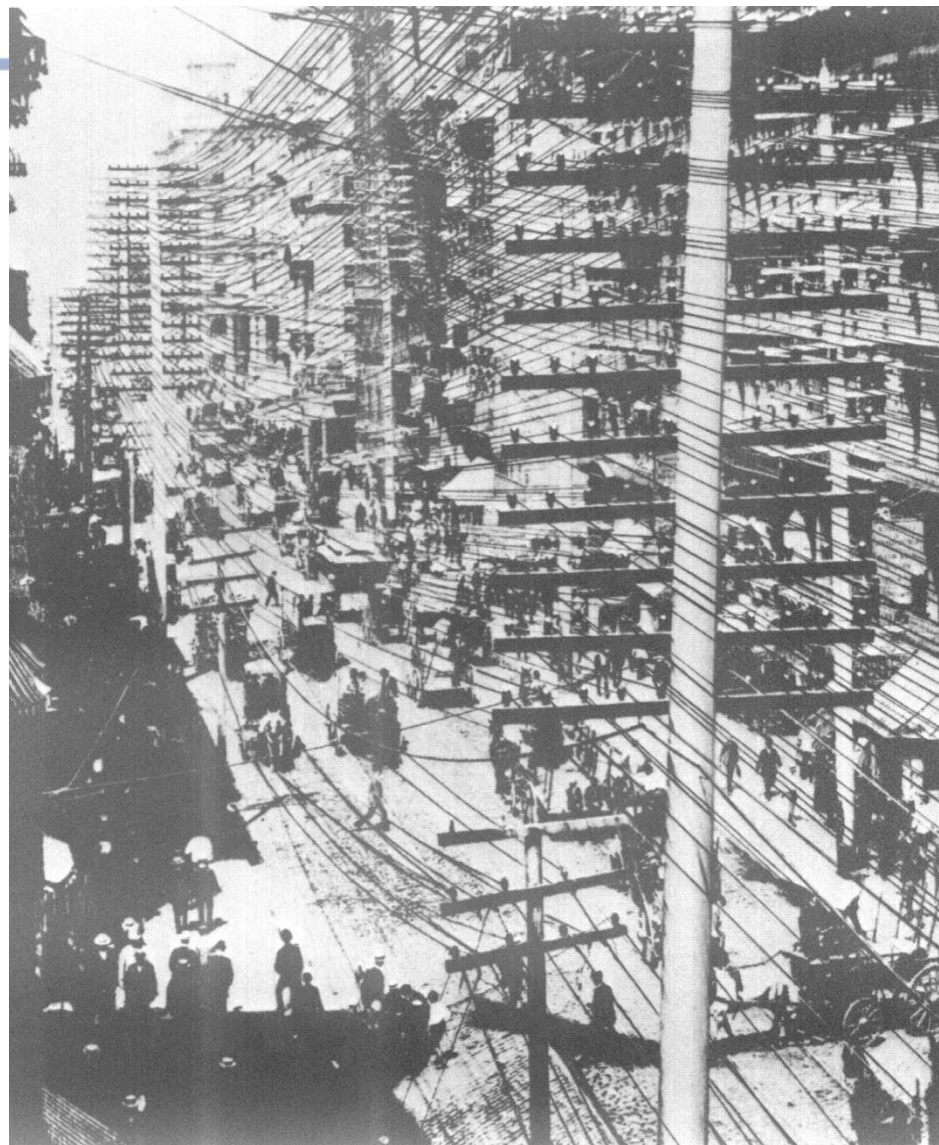
明线 对称电缆 同轴电缆 光纤

■ 明线



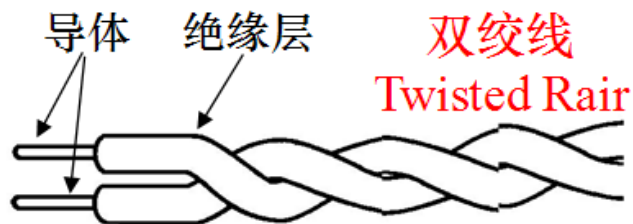
明线线路图

- 1 导线 2 横担 3 直螺脚
4 拉线 5 避雷线 6 弯螺脚隔电子



1880年纽约街貌

■ 对称电缆



特点

每对呈扭绞状，以减小各线对的相互干扰。

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



非屏蔽双绞线 (UTP)
(便宜、易弯曲、易安装)

屏蔽双绞线 (STP)
(可减少噪声干扰)

■ 同轴电缆

有线信道

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

优点（相比双绞线）

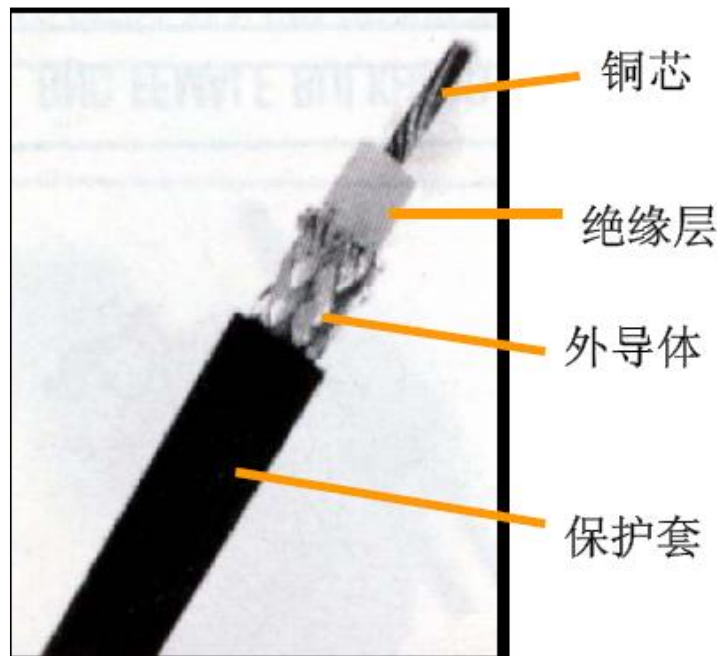
抗电磁干扰能力强

带宽更宽、速率更高

缺点

成本较高；

解决：用光缆代替（干线）



基带同轴电缆:

- **50 Ω** , 多用于数字基带传输
- 速率可达10Mb/s
- 传输距离<几千米

宽带（射频）同轴电缆:

- **75 Ω** , 用于传输模拟信号
- 多用于有线电视（CATV）系统
- 传输距离可达几十千米

■ 光纤

有线信道

结构：

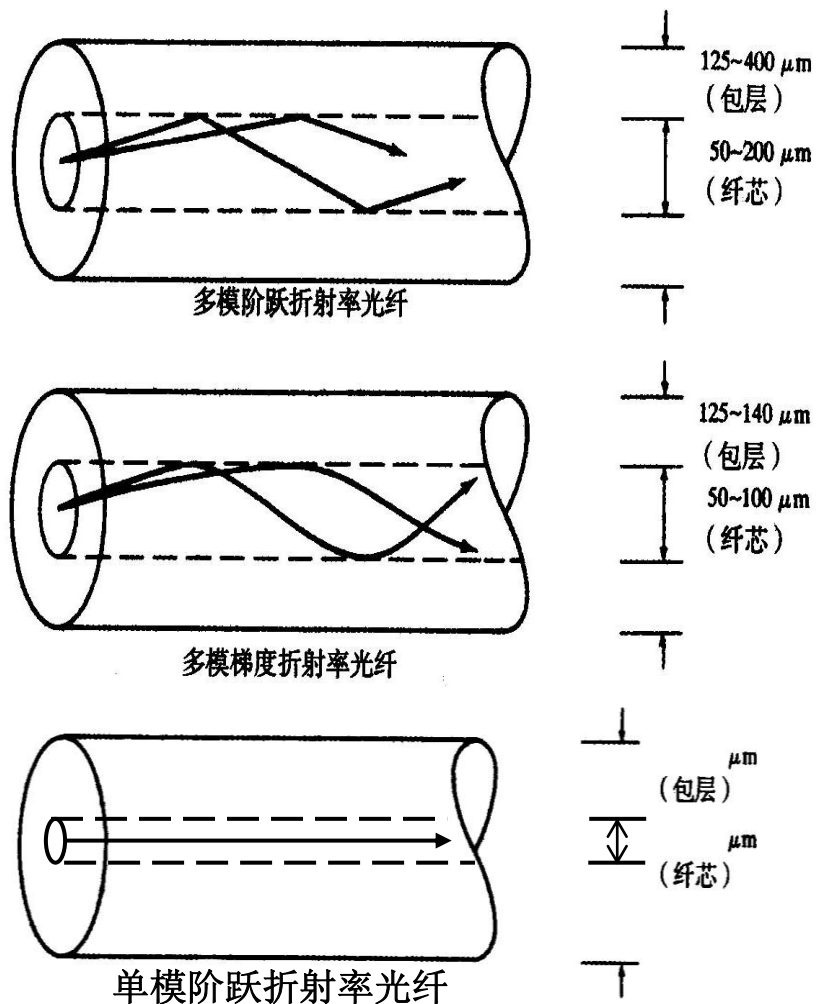
- 纤芯
- 包层

按折射率分类：

- 阶跃型
- 梯度型

按模式分类：

- 多模光纤
- 单模光纤



光纤结构示意图

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；
($< 0.2\text{dB/km}$) (几百公里)
- 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

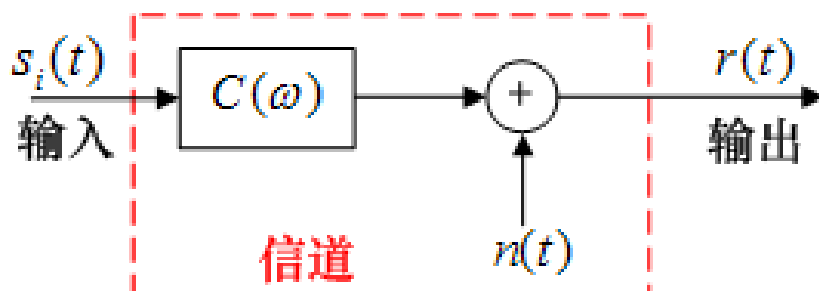
长途电话网、有线电视网等的主干线路中。

§ 17.3

信道数学模型

§ 17.3.1 调制信道模型

- **模型：** 叠加有噪声的线性时变/时不变网络：



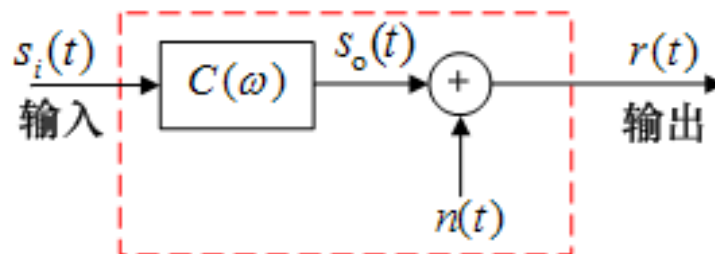
- **共性：**

- 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）

■ 入出关系:

加性噪声
始终存在

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



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

反映信道
本身特性

乘性干扰
(共存共失)

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

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

- ◆ 不同的物理信道具有不同的特性 $C(\omega) = \text{常数}$ （可取**1**）

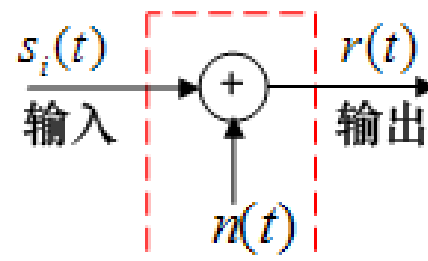
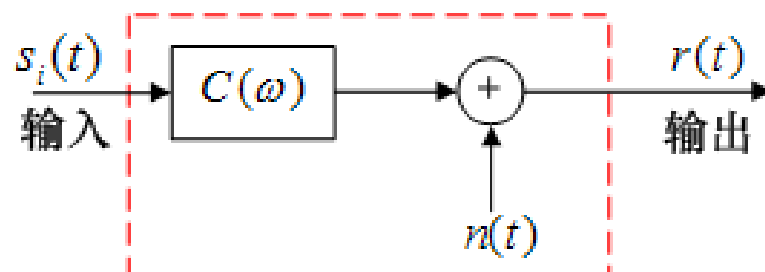
调制信道分为：
（根据信道的时变特性）

- **恒参信道**

——特性基本不随时间变化

- **随参信道**

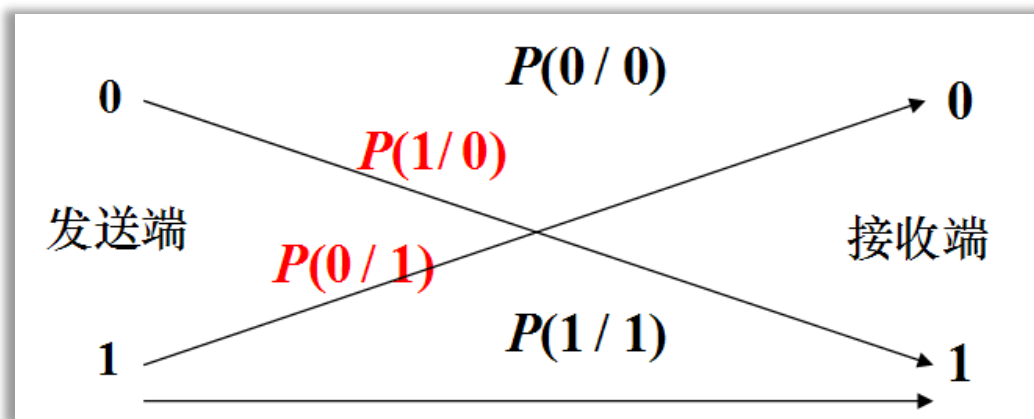
——特性随时间随机快变化



加性高斯白噪声信道模型

§ 17.3.2 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

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

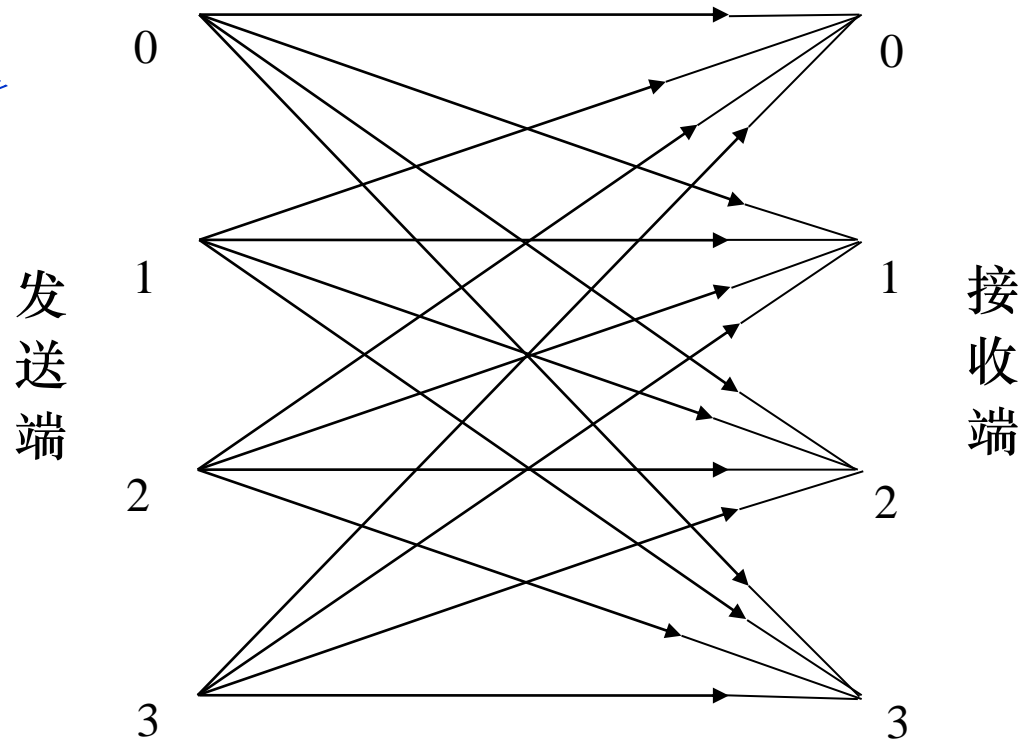
$$P(1/1) + P(0/1) = 1$$

正确

错误

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

四进制
无记忆
编码信道



§ 17.4

恒参/随参信道特性 对信号传输的影响

■ 恒参信道特性及其对信号传输的影响

线性时不变系统

- 特点：传输特性随时间缓变或不变。
- 举例：各种有线信道、卫星信道…

1. 传输特性

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

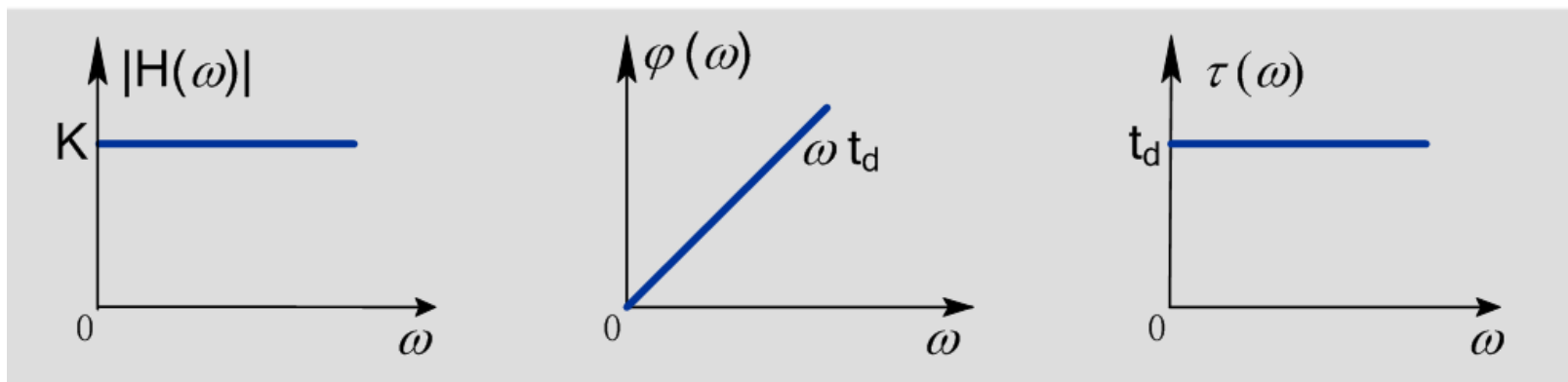
$$\begin{cases} |H(\omega)| \sim \omega & \text{幅频特性} \\ \phi(\omega) \sim \omega & \text{相频特性} \end{cases}$$

2. 无失真传输

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

$$\begin{cases} |H(\omega)| = K \\ \varphi(\omega) = \omega t_d \end{cases}$$

◆ 无失真传输（理想恒参信道）特性曲线：



$$|H(\omega)| = K$$

幅频特性

$$\varphi(\omega) = \omega t_d$$

相频特性



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

群延迟特性

◆ 理想恒参信道的冲激响应：

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

若输入信号为 $\mathbf{s}(t)$ ，则理想恒参信道的输出：

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

固定的迟延

固定的衰减

—— 这种情况称为无失真传输

3. 失真 影响 措施

- ◆ 幅频失真: $|H(\omega)| \neq K$

影响 { 对模拟信号: 造成波形失真 \rightarrow 信噪比下降
对数字信号: 产生码间串扰 \rightarrow 误码率增大

- ◆ 相频失真: $\phi(\omega) \neq \omega t_d$

群延迟失真: $\tau(\omega) \neq t_d$

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 \rightarrow 误码率增大

■ 随参信道特性及其对信号传输的影响

→ 指传输特性随时间随机快变的信道。

1. 随参信道举例

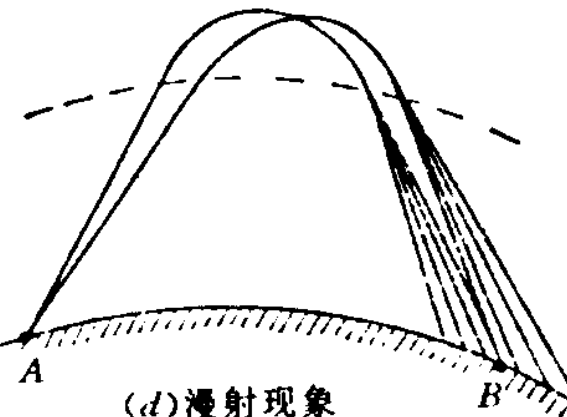
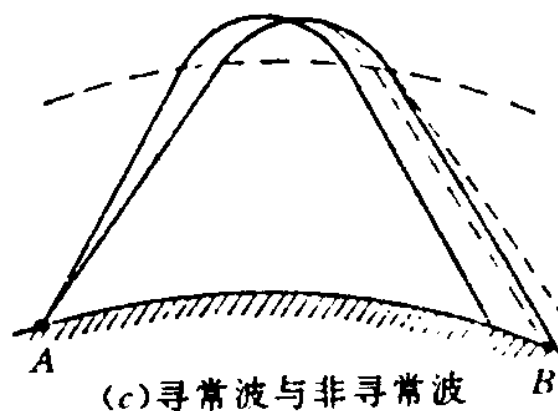
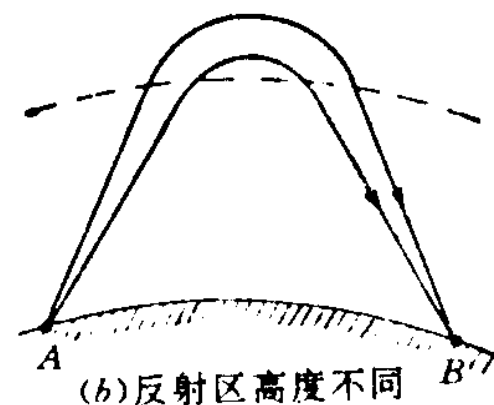
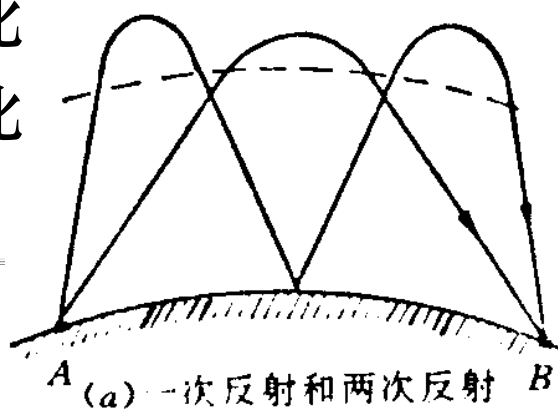
- 陆地移动信道
- 短波电离层反射信道
- 超短波流星余迹散射信道
- 超短波及微波对流层散射信道
- 超短波电离层散射
- 超短波超视距绕射

...

2. 随参信道特性

- 衰减随时间变化
- 时延随时间变化
- 多径传播

多径传播
示意图：



3. 多径效应

— 多经传播的影响

设发送信号为

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

幅度恒定
频率单一

经过 n 条路径传播（各路径有时变的衰落和时延）

则接收信号为

$$r(t) = a_1(t) \cos \omega_c [t - \tau_1(t)] + a_2(t) \cos \omega_c [t - \tau_2(t)] \\ \cdots + a_n(t) \cos \omega_c [t - \tau_n(t)]$$

第 i 条路径
接收信号振幅

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

传输时延

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

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

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

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

同相 ~ 正交形式

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

包络 ~ 相位形式

包络
相位
随机
缓变
的
窄带
信号

瑞利
分布

均匀
分布

$$X(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \varphi_i$$

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \sin \varphi_i$$

根据概率论中心极限定理：当 n 足够大时， $x(t)$ 和 $y(t)$ 趋于正态分布。

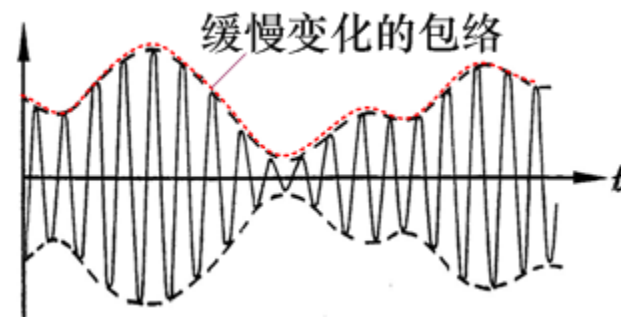
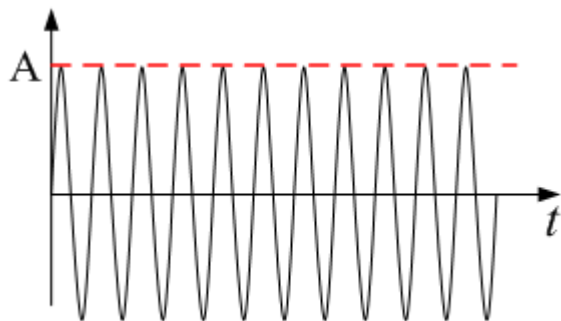
发送信号

接收信号

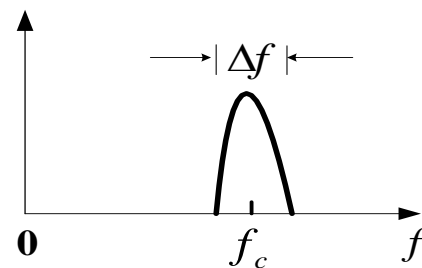
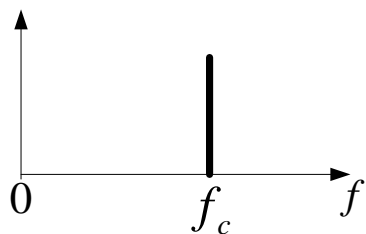
$$s(t) = A \cos \omega_c t$$

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

波形



频谱



结论

- 多径传播使信号产生瑞利型衰落；
- 多径传播引起频率弥散。

我们更关心的问题：

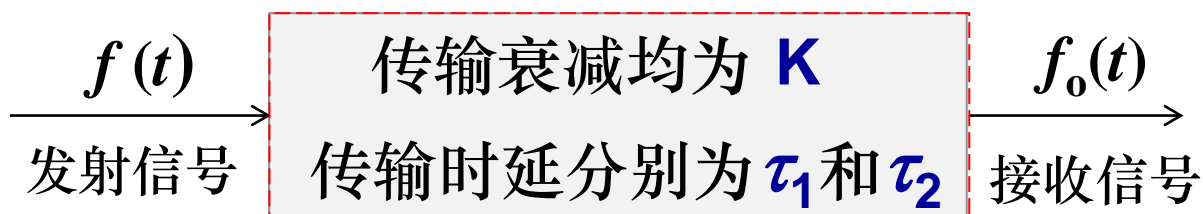
多径传播

对于一个复杂信号 $f(t)$ （实际情况）

的影响如何呢？



设两条路径的信道为



则接收信号为

$$f_o(t) = K f(t - \tau_1) + K f(t - \tau_2)$$

$\tau = \tau_2 - \tau_1$
相对时延差

$$F_o(\omega) = K F(\omega) e^{-j\omega\tau_1} + K F(\omega) e^{-j\omega(\tau_1 + \tau)}$$

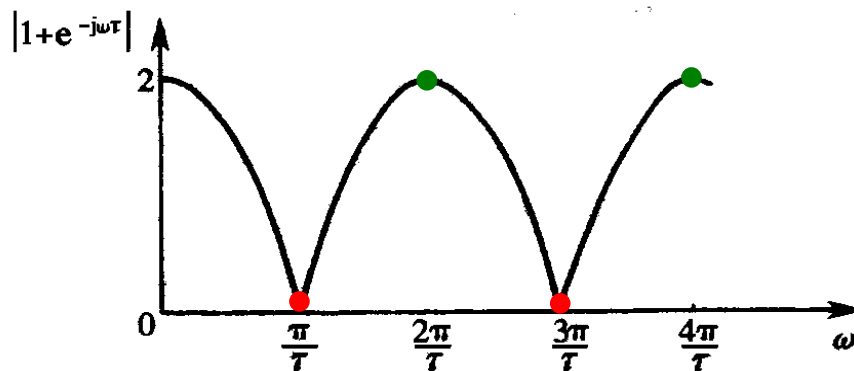
信道传输函数

$$H(\omega) = \frac{F_o(\omega)}{F(\omega)} = K e^{-j\omega\tau_1} (1 + e^{-j\omega\tau})$$

常数衰减因子 确定的传输时延因子 与信号频率 ω 有关的复因子

信道幅频特性

$$|H(\omega)| = |1 + e^{-j\omega\tau}| = 2 \left| \cos \frac{\omega\tau}{2} \right|$$



- ◆ 信道对信号不同的频率成分，将有不同的衰减。

——频率选择性衰落

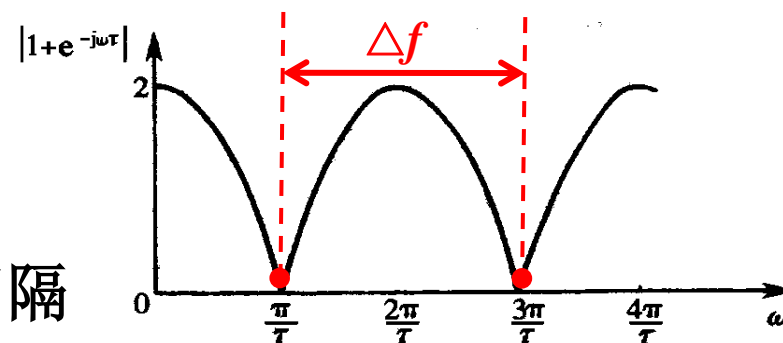
如何减小？

4. 减小频率选择性衰落的措施

- ◆ 信道相关带宽:

$$\Delta f = 1/\tau_m$$

定义为相邻传输零点的频率间隔



- ◆ 应使信号带宽 $B_s < \Delta f$, 工程经验公式:

$$B_s = (1/3 \sim 1/5) \Delta f$$

- ◆ 数字信号的码元宽度:

$$T_s = (3 \sim 5) \tau_m \rightarrow R_B \downarrow$$

归纳

■ 随参信道特性

- 衰减随时间变化
- 时延随时间变化
- 多径传播

■ 多径效应

- 瑞利型衰落
- 频率弥散
- 频率选择型衰落

■ 减小衰落的措施

$$B_s = (1/3 \sim 1/5) \Delta f$$

- 分集接收
- 扩频技术
- OFDM等

§ 17.5

信道噪声

1. 何谓噪声

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

2. 噪声类型

■ 按噪声来源

- 人为噪声
- 自然噪声
- 内部噪声
(如热噪声)

■ 按噪声性质

- 脉冲噪声
- 窄带/单频噪声
- 起伏噪声
(热噪声、散弹噪声和宇宙噪声)

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 **0~10¹² Hz** 频率范围。
- 性质：**高斯白噪声**

热噪声电压有效值：

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

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 (Ω)

B — 带宽 (Hz)

归纳

■ 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

$$P_n(f) = \frac{n_0}{2} \text{ (W/Hz)} \quad R_n(\tau) = \frac{n_0}{2} \delta(\tau)$$

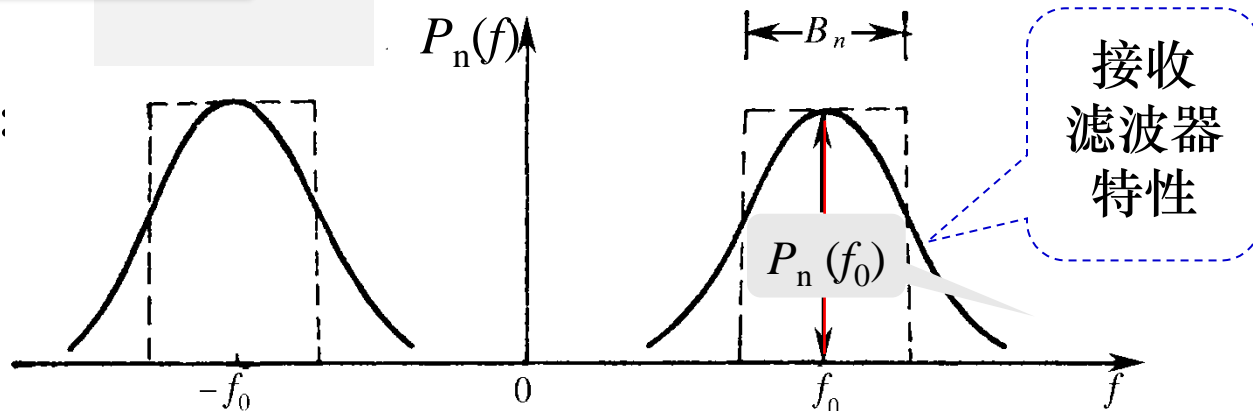
$$f_n(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma_n^2}\right)$$

- $n(t) \rightsquigarrow \text{BPF} \rightsquigarrow \text{窄带高斯噪声}$

噪声等效带宽

■ 窄带高斯噪声：

- 功率谱：



- 噪声等效带宽：

$$B_n = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P_n(f) df}{2P_n(f_0)} = \frac{\int_0^{\infty} P_n(f) df}{P_n(f_0)}$$

物理
意义

通过宽度为 B_n 的矩形滤波器的噪声功率
= 通过实际接收滤波器的噪声功率。

- 平均功率：

$$N = \int_{-\infty}^{\infty} P_n(f) df$$

§ 17.6

信道容量

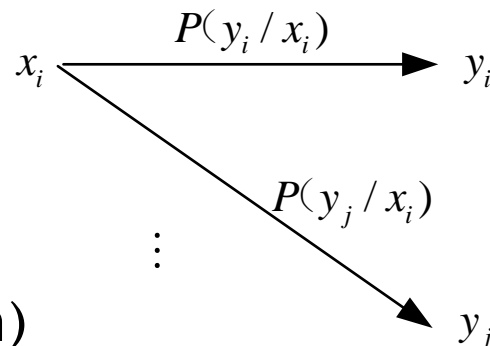
——指信道能够无差错传输时的最大平均信息速率

§ 17.6.1 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

(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

§ 17.6.2 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：

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

等价式：

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

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)

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

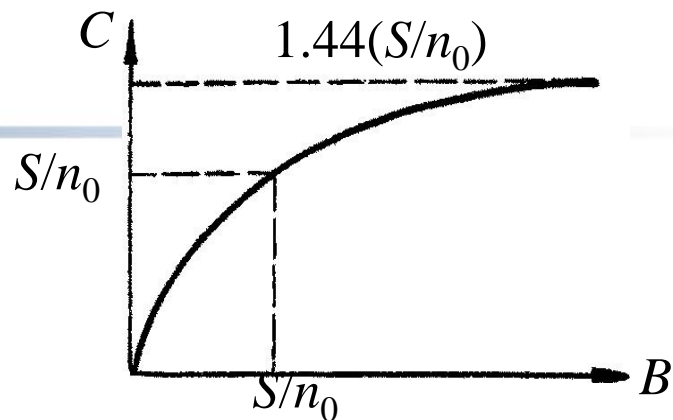
含义:

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。

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



信道容量和带宽关系

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：

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

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

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】

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{互换前：若 } B_1 = 3 \text{ KHz, 则 } \frac{S_1}{N_1} = 15 \\ \text{互换后：若 } B_2 = 4 \text{ KHz, 则 } \frac{S_2}{N_2} = 7 \end{array} \right.$$

例

图片传输。每幅含 2.25×10^6 个像素，每个像素有 12 个亮度电平，它们等概独立出现。线路传输条件为：
 $B=3\text{KHz}$ ， $S/N=30\text{dB}$ ，求传输图片所需的最小时间。

解：

每个像素的信息量

$$I_i = \log_2 \frac{1}{P(x_i)} = \log_2 12 = 3.58 \text{ bit}$$

一幅图片的信息量

$$I_{\text{图片}} = 2.25 \times 10^6 \times I_i = 8.055 \text{ Mbit}$$

$$t_{\min} = \frac{I_{\text{total}}}{C} = 269.4 \text{ s}$$

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right) = 3 \times 10^3 \times \log_2 (1 + 10^3) = 29902 \text{ b/s}$$

30dB

谢谢！