

课程名称——通信系统原理

# Communication Systems Concepts

信息科学技术学院通信工程教研室

李勤

# 开场白

**通信系统原理**是一门介绍信息传输基本原理（理论和技术）的课程。

它的研究对象是通信系统。

通信网中涉及传输（**Transmission**）、复用（**Multiplexing**）、交换（**Switching**）、网络（**Network**）四大技术。

通信系统原理重点介绍传输和复用。

## 一、本课的重要性：

- 1、 入专业之门。
- 2、 垫专业之底。
- 3、 领专业之路。

## 二、目的要求：

- 1、 明白原理。
- 2、 学会计算。
- 3、 联系实际。

## 三、学习要领：

- 1、 求真知。
- 2、 常复习。
- 3、 重自学。

# 教材及参考书

教材——《通信原理》 马海武等 北京邮电大学出版社

参考书:

- ❖ 《通信原理（第5版）》 樊昌信等 国防工业出版社
- ❖ 《通信原理教程》 达新宇等 北京邮电大学出版社
- ❖ 《现代通信原理》 曹志刚、钱亚生 清华大学出版社
- ❖ 《通信系统（第四版）》 英文版 [加] Simon Haykin  
电子工业出版社
- ❖ 《Digital and Analog Communication Systems》（第五版）  
Leon W. Couch II 清华大学出版社（影印版）
- ❖ 《通信原理—学习与考研指导》 沙济彰等 科学出版社
- ❖ 《通信原理考研指导》 信息通信专业考研指导丛书  
郝建军、尹长川 北京邮电大学出版社
- ❖ 《通信原理习题集》 杨鸿文、桑林 北京邮电大学出版社

# 第1章 绪论

## 本章教学要求

- 1、了解通信系统组成、分类和通信方式。
- 2、熟悉通信基本概念（模拟通信与数字通信）。
- 3、理解信道的定义和模型，掌握恒参信道和随参信道特性及其对信号的影响。
- 4、掌握信息量和通信系统主要性能指标的计算。

# 主要外语词汇

通信 (Communication) 电信 (Telecommunication)

消息 (Message) 信号 (Signal) 信息 (Information)

模拟通信 (Analog Communication)

数字通信 (Digital Communication)

信息量 (Amount of Information)

信道 (Channels) 信道容量 (Channel Capacity)

信噪比 (Signal-to-noise ratio, 简写 SNR)

噪声 (Noise) 信息熵 (Information Entropy)

# 作业

P14 : 1.1, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8

# 本章主要内容

## 1.1 通信的基本概念

## 1.2 模拟通信系统与数字通信系统

## 1.3 信息及其量度

## 1.4 通信系统的主要性能指标

## 1.5 通信技术发展概况

## 1.6 信道

### 1.6.1 信道的分类和有关概念

### 1.6.2 恒参信道特性及其对信号传输的影响

### 1.6.3 随参信道特性及其对信号传输的影响



## § 1.1 通信的基本概念

### 一、通信的定义

- **通信 (communication)** ——

指从一个地方向另一个地方进行消息的有效传递与交换。

- **电信 (Telecommunication)** ——

利用电子等技术手段，借助电信号（含光信号）实现从一地到另一地进行消息的有效传递与交换。

## 二、现代通信的业务

- 1、电报 ( telegram )
- 2、电话 ( telephony )
- 3、传真  
( telephotography )
- 4、广播 ( broadcasting )
- 5、电视 ( television )
- 6、因特网 ( internet )

### 三、通信系统的基本组成

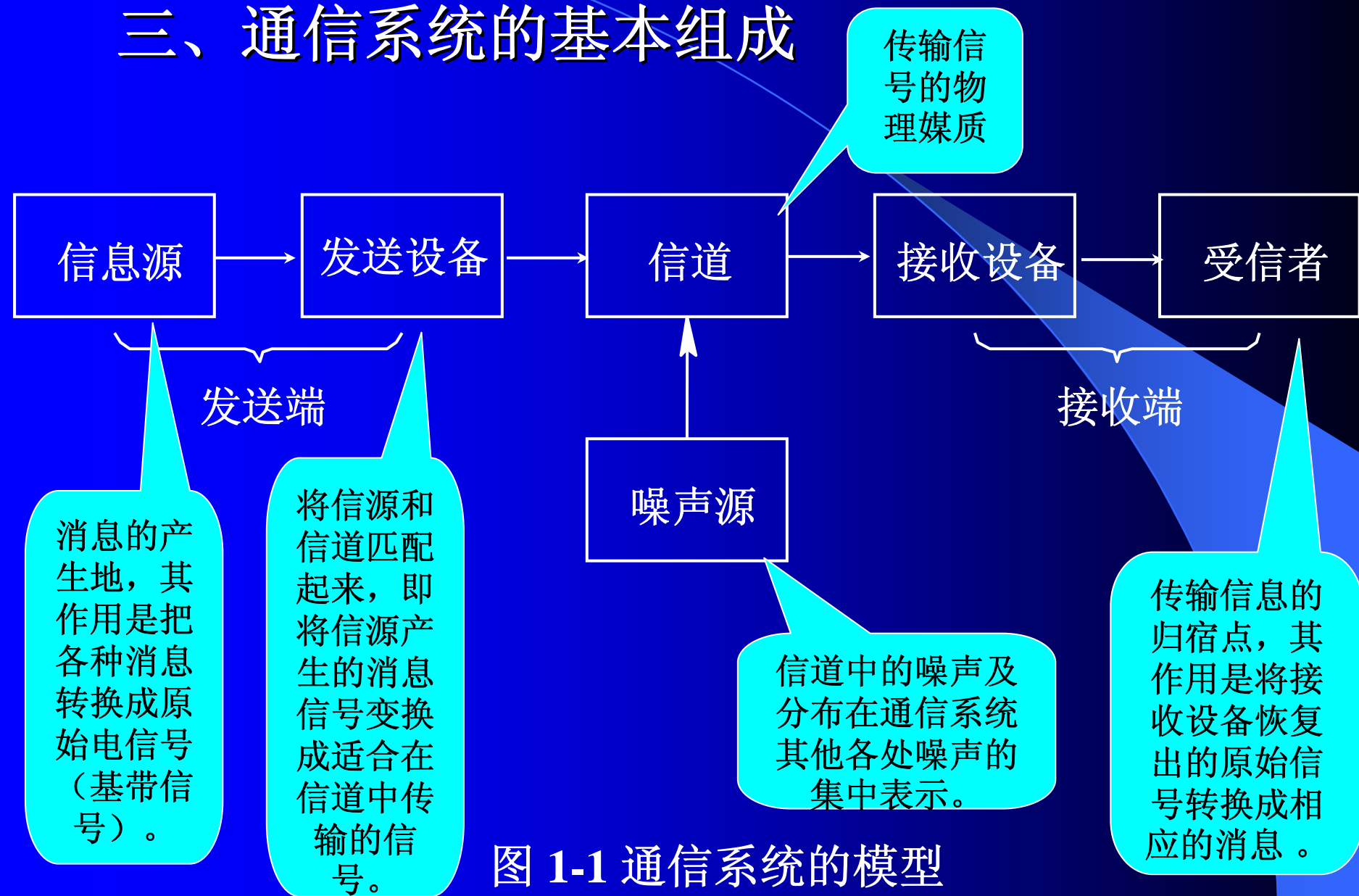


图 1-1 通信系统的模型

## 四、通信的分类

- 1、按传输媒介分： 有线通信和无线通信
- 2、按信道中传输的信号分： 模拟通信和数字通信
- 3、按通信业务分： 电报、电话、传真、数据传输、  
可视电话、无线寻呼等
- 4、按调制方式分： 基带传输和频带传输
- 5、按复用方式分： 频分复用、时分复用、码分复用
- 6、按工作频段分： 长波通信、中波通信、短波通信  
和微波通信
- 7、按受信者是否运动分： 移动通信和固定通信

# 五、通信方式

## 1. 按消息传送的方向与时间分

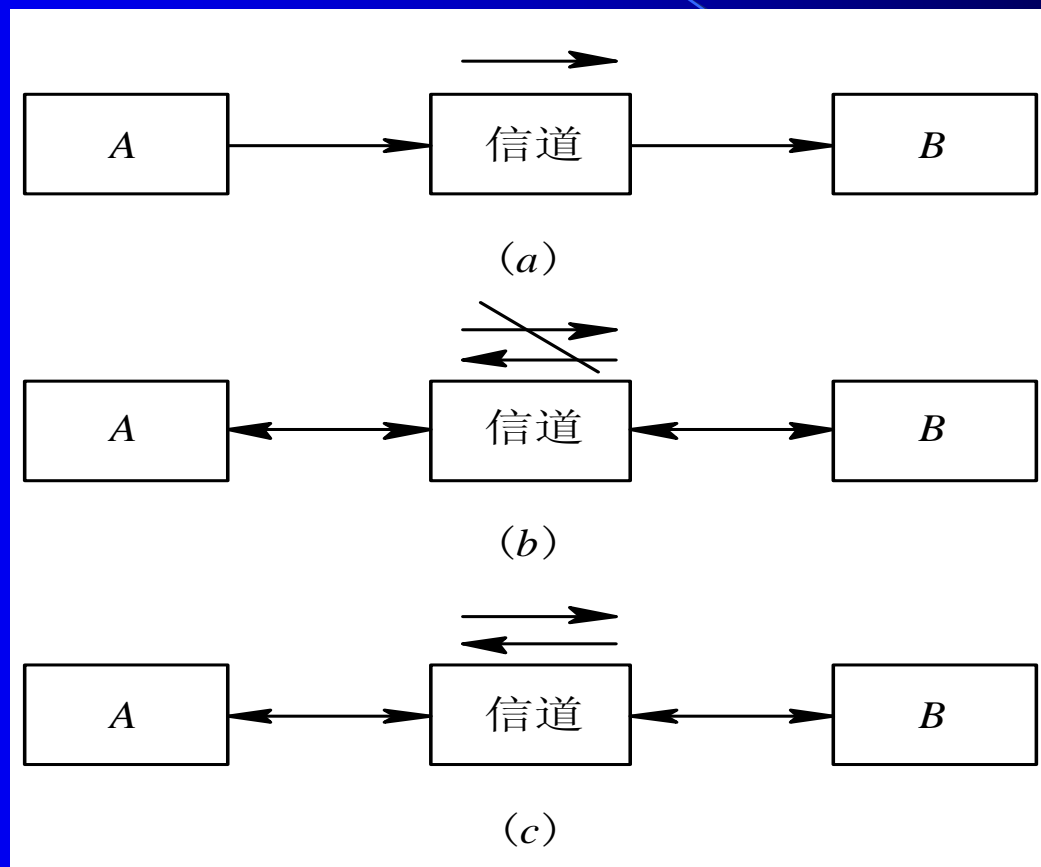


图 1-2 按消息传送的方向和时间划分的通信方式  
(a) 单工方式； (b) 半双工方式； (c) 全双工方式

## 2. 按数字信号排序分

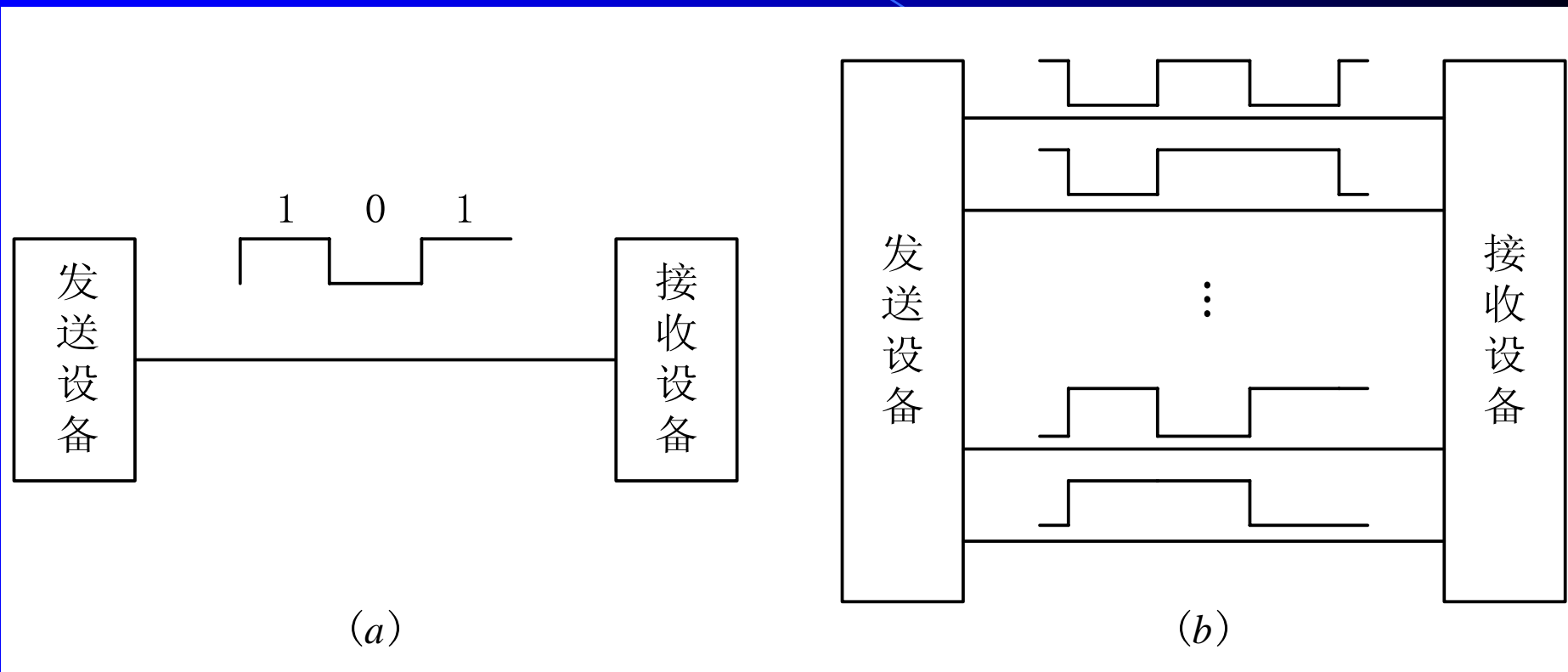


图 1-3 按数字信号排序划分的通信方式  
(a) 串行传输方式； (b) 并行传输方式

### 3. 按通信网络形式分

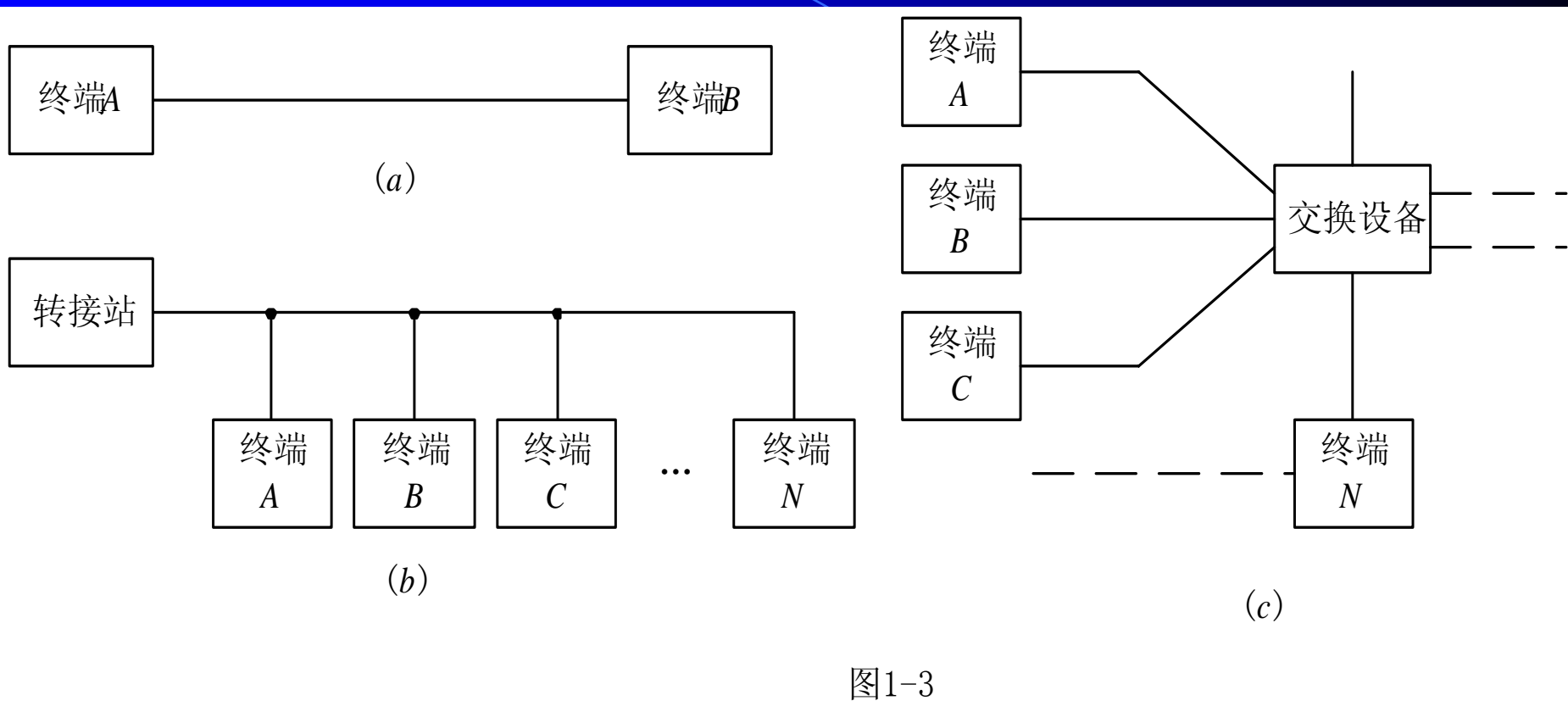


图1-3

图 1-4 按网络形式划分的通信方式  
(a) 两点间直通方式； (b) 广播方式； (c) 交换方式



## § 1.2 模拟通信系统与数字通信系统

### ➤ 模拟信源与数字信源

产生模拟信号的信源是模拟信源，如话音、图像；  
产生数字信号的信源是数字信源，如符号、文字；

### ➤ 模拟通信与数字通信

不论是那种信源，模拟通信与数字通信的区别在于：

模拟通信在信道中传输的是模拟信号；  
数字通信在信道中传输的是数字信号；



# 一、模拟信号与数字信号

- 模拟信号：幅度随时间连续变化的信号。
- 数字信号：有两种数字信号
  - 1、基带数字信号：离散的脉冲序列。
  - 2、频带数字信号：具有数字特征的正、余弦波形序列——比如用波形的有无、两种频率的切换、两种相位的切换来表达数字“0”与“1”；
- 频带数字信号与模拟信号的区别不在于波形是否连续，而在于它所代表的变量，是在某个范围内连续分布，还是取个数可数的分立值。

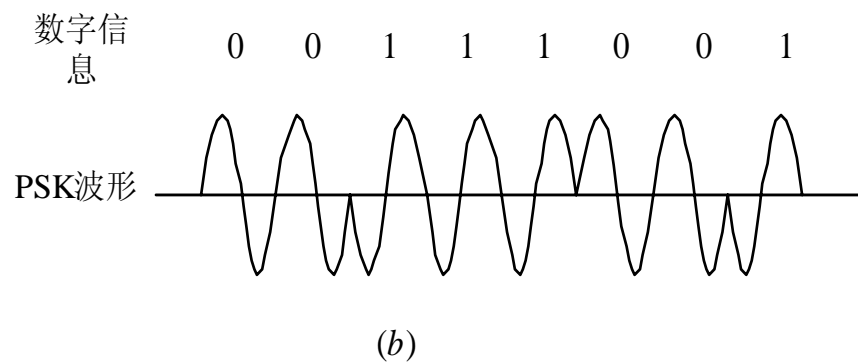
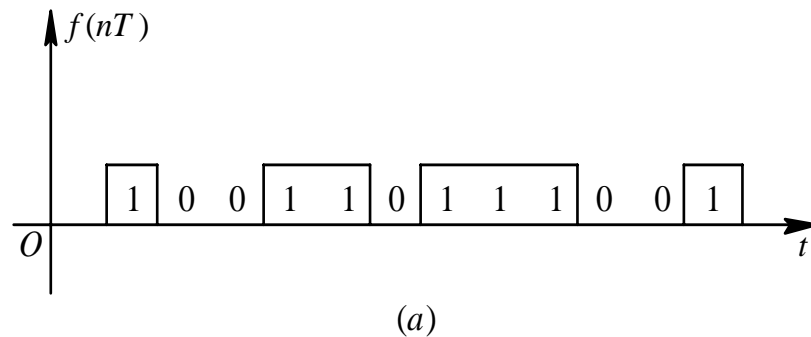
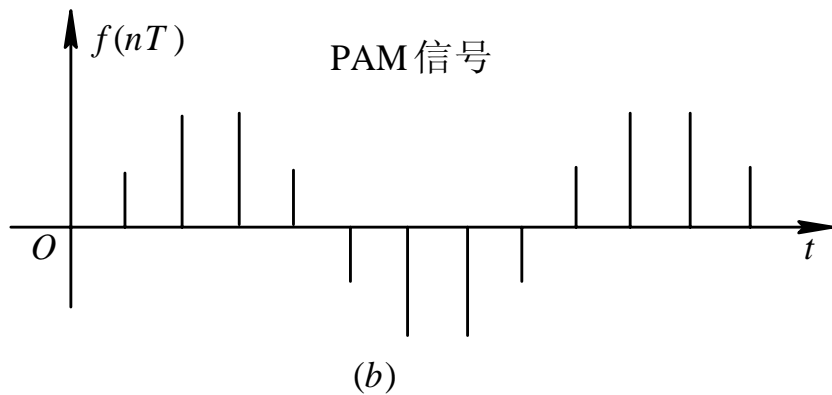
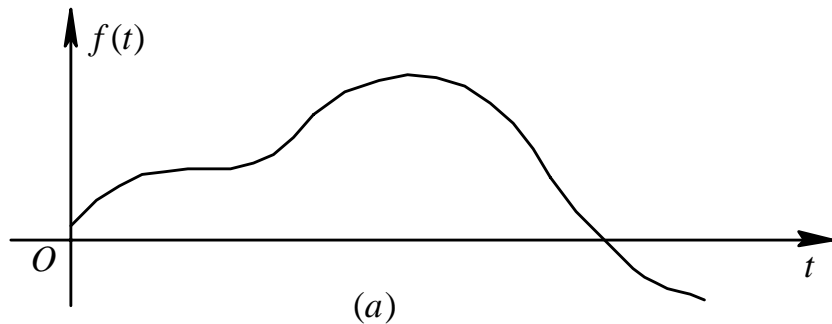


图1-5

模拟信号波形

(a) 连续信号

(b) 抽样信号

数字信号波形

(a) 脉冲波形

(b) 数字调制波形

## 二、模拟通信系统（第4章） (Analog Communication)

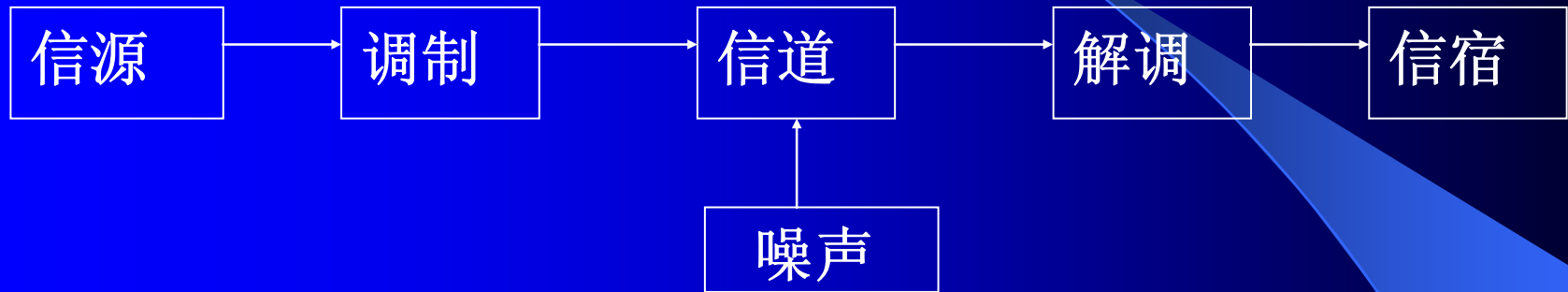


图 1-6 模拟通信系统的模型

- 特点：
- 1、信源发出模拟信号，信道中传输的也是模拟信号；
  - 2、发送设备和接收设备主要功能是完成调制与解调。

# 三、数字通信系统 (Digital Communication)

## 1、数字基带传输系统 (第5章)

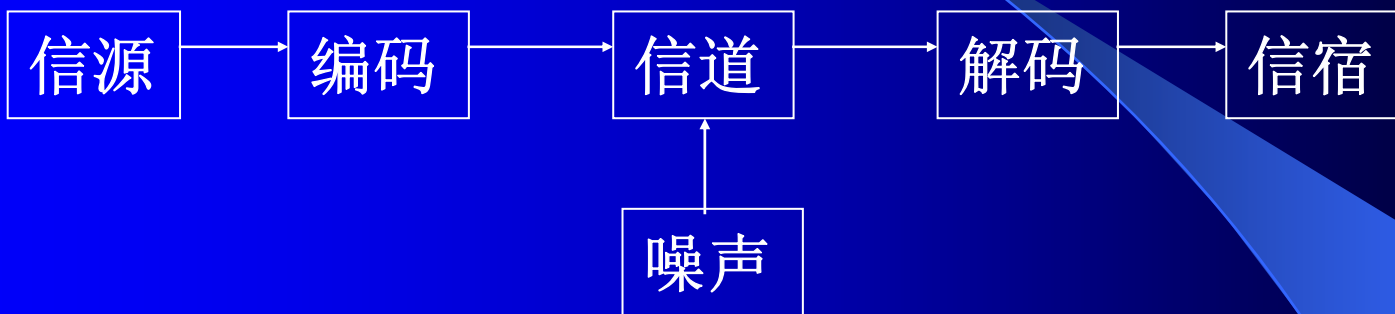


图 1-7 数字基带通信系统的模型

**基带:** 指未经调制的数字信号, 即脉冲序列。而不是具有数字特征的正、余弦波形序列;

**特点:** 1、信源发出的与信道中传输的都是基带数字信号;  
2、发送和接收设备主要是完成编码与解码功能。

## 2、数字频带传输系统（第6章）

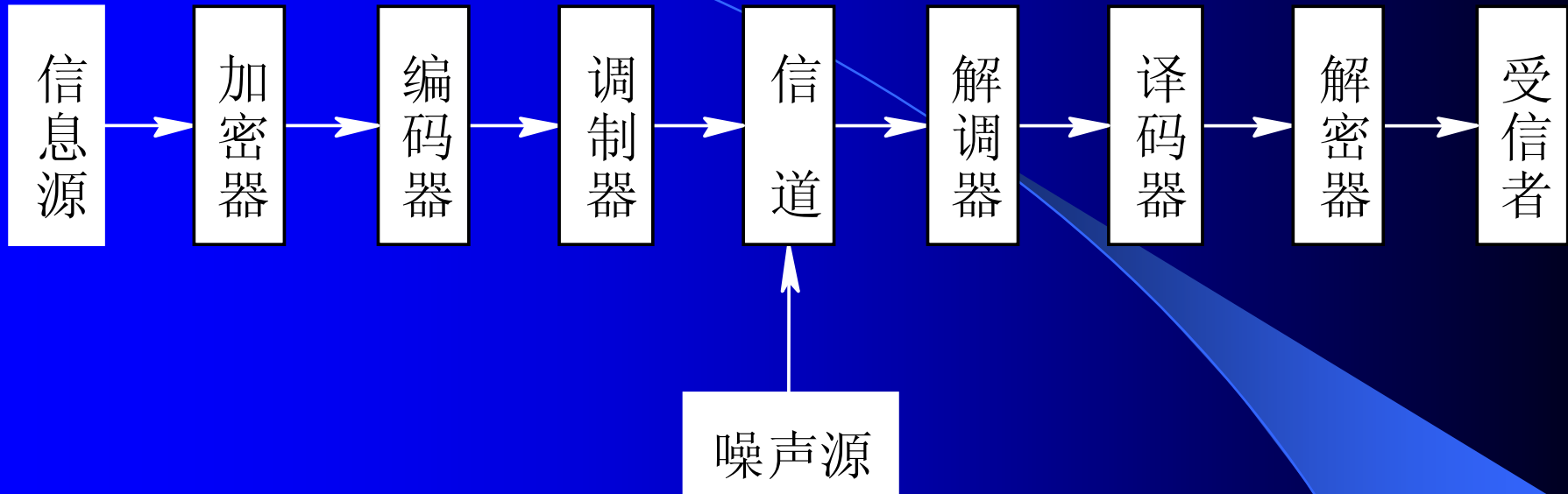


图 1-8 数字频带通信系统的模型

**频带：**指经过调制的数字信号，即具有数字特征的正、余弦波形序列；

**特点：**1、信源发出的是基带数字信号，而信道中传输的是频带数字信号；  
2、比起数字基带系统，增加了频带调制器与解调器。

## 四、数字通信系统优点

与模拟通信比较，数字通信主要有以下五大好处：

- 1、通信质量好，噪声不累积。 (图1-9)
- 2、可以通过编码进行差错控制，改善传输质量。
- 3、可利用现代数字信号处理技术处理数字信息。
- 4、可加密，保安全。
- 5、可实现综合业务，使通信功能增强。

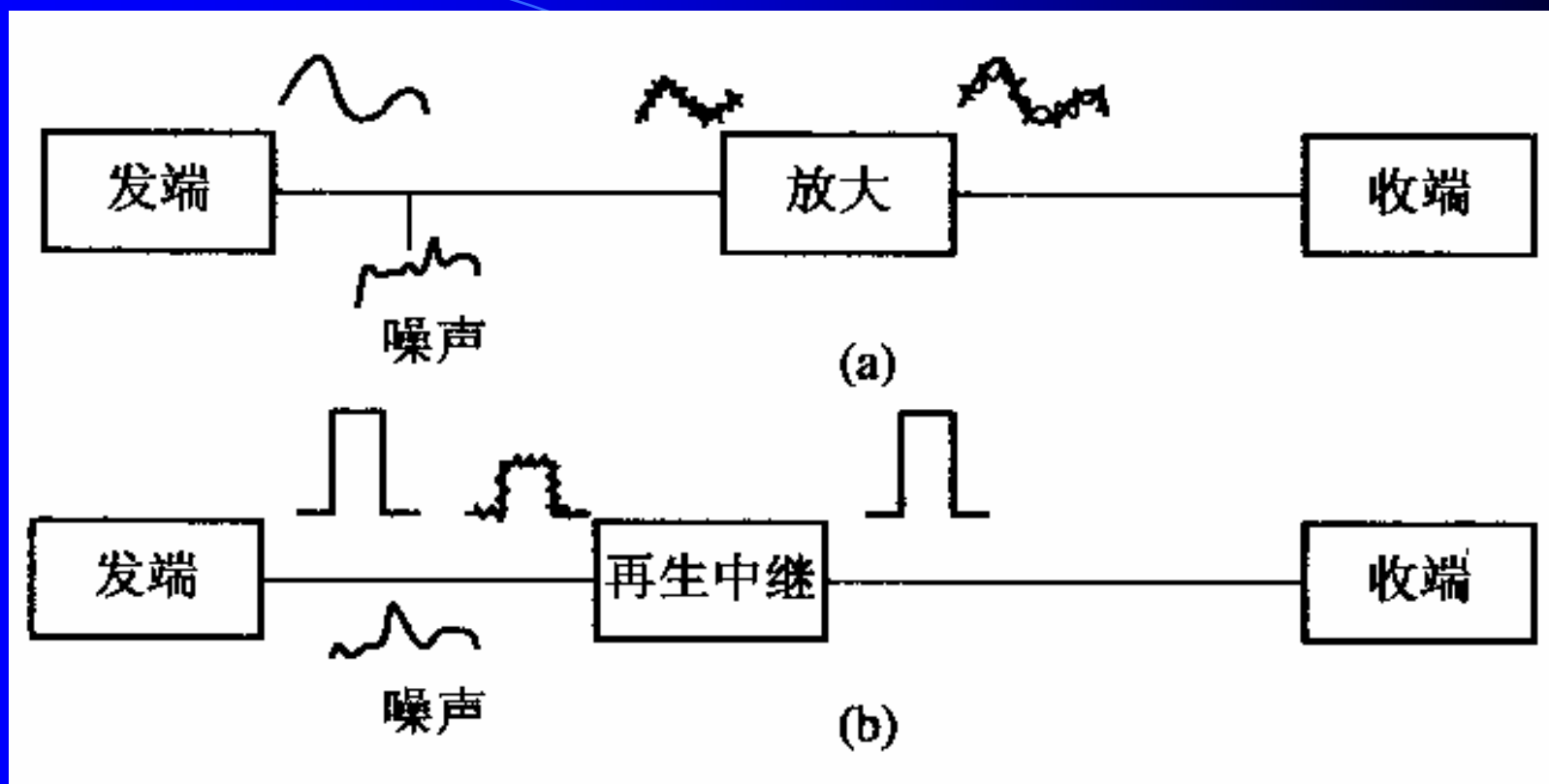


图1-9 两类通信方式抗干扰性能比较  
(a)模拟信号；(b)数字信号

## 五、模拟信号数字化通信系统（第8章）

鉴于数字通信系统的诸多优势，往往将模拟信源发出的模拟信号，也转换成数字信号，借助数字通信系统传输。其办法就是在发端与收端分别增加数/模转换与模/数转换。

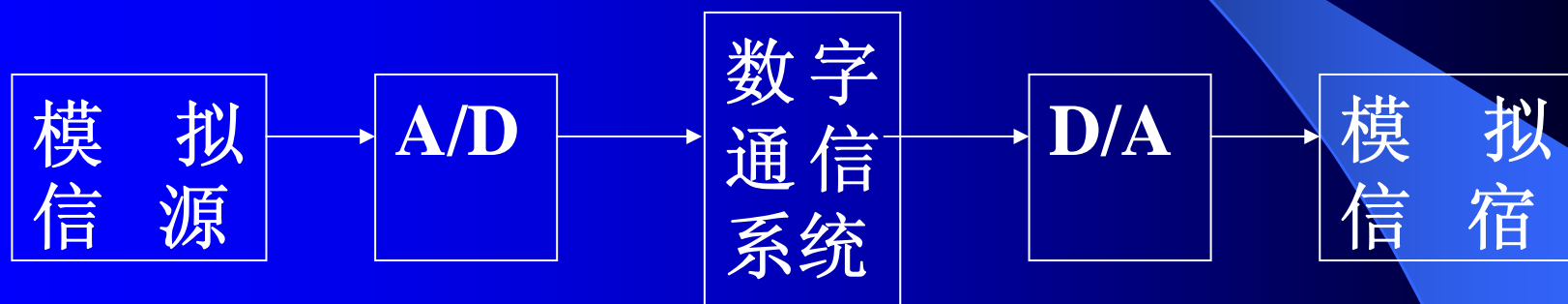


图 1-10 模拟信号数字化通信系统的模型

**A/D转换（Analog—digital conversion）：**模拟——数字转换。

**D/A转换（Digital—analog conversion）：**数字——模拟转换。





## § 1.3 信息及其量度

### 消息 (message)

有待传输的符号、文字、数据和语声等。

### 信号 (signal)

消息的物质载体。

代替消息在系统中被处理和传输的电或光的波形。

### 信息 (information)

消息中包含的有意义 (有用) 的内容。

# 一、信息的定义

通信所传输的消息，不论其形式如何（话音、符号、文字、数据等），总应当有个物理量来定量地描述其数量（消息中所含的量，系统所传输的量，以及信宿所获得的量）。这个量就是信息。问题是**如何定义信息？**

首先，谈信息离不开通信，通信的目的是让接收者了解原先所不清楚的事情。不清楚是因为信源的消息存在不确定性，如果是完全明确的事件，就没必要通信了。之所以认为消息中含有信息，是因为消息具有某种不确定性。因此，**信息是消息（信号）的不确定性的度量。**

其次，通过通信，原来不知道的事情知道了，原来不清楚的明白了，至少比通信前减少了一些不确定因素。可见通信是消除不确定性的过程。因此**可用通信所消除掉的不确定性的多少来定义所传输信息的多少。**

第三，不确定性来自客观事物本身的随机性，而随机性可以用概率统计来定量描述之：

概率为1的事件，不存在不确定性。其信息量为0。

概率越小，不确定性越大。正如罕见的事件信息量很大。

因此，**应当用概率来定义信息。**

并且信息的多少是与概率的大小成反比的。

第四，若干独立事件的总信息量应等于各事件信息量的总和；而独立事件联合概率是各事件概率的乘积。

为此定义信息： $I = \log (1 / P) = -\log P$

则当： $P = P_1 P_2 \dots P_n$ 时，

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

第五，对数以**2**为底时，信息量的单位叫“**比特**”  
(**bit**)；

对数以**e**为底时，信息量的单位叫“**奈特**”。 (**nit**)

对数以**10**为底时，信息量的单位叫“**哈特莱**”。 (**hartley**)

通常广泛使用的单位为**比特**，默认对数以**2**为底。

## 二、信息熵（平均信息量）

信息熵指每个符号平均所含的信息量。

### 1. 等概信源的熵：

如果信源只发出两种符号0和1，并且概率相等  $p_0=p_1=1/2$ ,

则： $I_0=I_1=\log_2 2=1(\text{bit})$ ；平均每符号仍为  $1(\text{bit})$ ；

如果信源发出四种符号A、B、C和D，并且概率相等，

则： $I_A=I_B=I_C=I_D=\log_2 4=2(\text{bit})$ ，平均每符号仍为  $2(\text{bit})$ ；

如果信源发出M种符号，并且概率相等，不难推知：

则： $H_0=H_{max}=\log_2 M$

## 2. 非等概信源的熵:

如果信源发出**M**个不同消息（符号）的概率各不相同，分别为

$$P_i, \quad (i=1, 2, 3, \dots, M)$$

则发不同消息（符号）时各信息量不同:

$$I_i = \log_2 \frac{1}{P_i} \quad (i=1, 2, 3, \dots, M)$$

平均而言，发出一个符号的信息量为：

$$H = E[I_i] = \sum_{i=1}^M P_i I_i = \sum_{i=1}^M P_i \log_2 \frac{1}{P_i} = - \sum_{i=1}^M P_i \log_2 P_i \quad (bit)$$

理论上已证明，非等概信源的信息熵小于等概信源信息熵。

### 3. 连续信源的熵（相对熵）

$$H(x) = -\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log f(x) dx$$

式中 $f(x)$ 为连续消息 $x$ 出现的概率密度函数。

**[例1]** 设由5个符号组成的信息源，相应概率为：

$$\begin{pmatrix} A & B & C & D & E \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} & \frac{1}{16} \end{pmatrix}$$

试求信源的平均信息量  $\bar{I}$ 。

**解**

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{1}{2} \log_2 2 + \frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{1}{8} \log_2 8 + \frac{1}{16} \log_2 16 + \frac{1}{16} \log_2 16 \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{3}{8} + \frac{4}{16} + \frac{4}{16} = 1.875 \text{ (bit/符号)} \end{aligned}$$



**[例2]** 一离散信源由0, 1, 2, 3四个符号组成, 它们出现的概率分别为 $3/8$ ,  $1/4$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ , 且每个符号的出现都是独立的。试求某消息序列:  
201020130213001203210100321010023102002010312032100120210的信息量。

解: 此消息中, 0出现23次, 1出现14次, 2出现13次, 3出现7次, 共有57个符号, 故该消息的信息量为

$$I = 23\log_2 \frac{57}{23} + 14\log_2 \frac{57}{14} + 13\log_2 \frac{57}{13} + 7\log_2 \frac{57}{7} = 107.36 \text{ bit}$$

每个符号的平均信息量为  $\bar{I} = \frac{I}{\text{符号总数}} = \frac{107.36}{57} \approx 1.88 \text{ bit/符号}$

若用熵的概念来计算  $H = -\frac{3}{8}\log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4}\log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4}\log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8}\log_2 \frac{1}{8} = 1.906 \text{ bit/符号}$

则该消息的信息量  $I = 57 \times 1.906 = 108.64 \text{ bit}$



## § 1.4 通信系统的主要性能指标

### 一、通信系统的一般性能指标：

1、有效性

2、可靠性

3、适应性

4、经济性

5、保密性

6、标准性

7、维修性

8、工艺性

# 主要性能指标：

## 有效性：

反映系统所能传输信息的多少和快慢的指标，表明传输的“数量”问题；

## 可靠性：

反映系统所传输信息准确程度的指标，表明系统的“质量”问题。

## 二、模拟通信系统的主要性能指标：

### 1、有效性-----带宽

设：系统所允许传输信号的频率范围为 $B_m$ 赫兹(Hz)

每路信号所占用的频率宽度为 $B_i$ 赫兹(Hz)

则：系统最多可传输的信号路数为： $n = B_m / B_i$

### 2、可靠性-----信噪比 (SNR)

设： $S$ 为信号功率， $N$ 为噪声功率。

则：信噪比 $\gamma = \frac{\text{信号功率}}{\text{噪声功率}} = \frac{S}{N}$

或用分贝： $\gamma(dB) = 10 \log \frac{S}{N} (dB)$

# 三、数字通信系统的主要性能指标:

## 1、有效性

(1) **传码率 $R_B$** -----码元传输速率，又称符号速率等。

它表示单位时间内传输码元的数目，

单位是**波特 (Baud)**，记为 **B**。

所以传码率又称波特率。

设：码元周期（每个码元的时间宽度）为**T**，

则：

$$R_B = \frac{1}{T} (B)$$

(2) 传信率 $R_b$ -----信息传输速率，又称比特率等。

它表示单位时间内传递的平均信息量或比特数，  
单位是比特/秒，可记为bit/s，或 b/s，或bps。

(3) 传信率 $R_b$ 与传码率 $R_B$ 的关系

$$R_b = R_B \cdot H \quad (b/s)$$

式中， $H$ 为信源中每个符号所含的平均信息量（熵）。  
往往用每个符号最大可荷载的信息量来估算：

$$R_b = R_B \log_2 M \quad (b/s)$$

式中， $M$ 为符号的进制数。

例如：码率为1200B，

采用二进制( $M=2$ )时，信息速率为1200b/s。

采用四进制 ( $M=4$ )时，信息率为2400b/s；

采用八进制 ( $M=8$ )时，信息率为3600b/s；

采用十六进制 ( $M=16$ )时，信息率为4800b/s；

二进制的码元速率和信息率在数量上相等，  
而多进制码元的信息率翻倍。

#### (4) 频带利用率 $\eta$ ：

比较不同通信系统的有效性时，单看它们的传输速率是不够的，还应看在这样的传输速率下所占用信道的频带宽度。所以，真正衡量数字通信系统传输效率的应当是单位频带内的码元传输速率或信息传输速率，即：

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad B/\text{Hz}$$

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad b/s/\text{Hz}$$



**[例1]** 已知二进制数字信号在2分钟内共传送了72000个码元。

(1) 问其码元速率和信息速率各为多少？

(2) 如果码元宽度不变(即码元速率不变), 但改为八进制数字信号, 则其码元速率为多少? 信息速率又为多少?

解: (1)  $R_{B2}=72\ 000 / (2 \times 60)=600\ (\text{B})$

$$R_{b2}=600\ (\text{b/s})$$

(2)  $R_{B8}=72\ 000 / (2 \times 60)=600\ (\text{B})$

$$R_{b8}=R_{B8} \cdot \log_2 8=1800\ (\text{b/s})$$

**[例2]** 一个由字母A, B, C, D组成的字, 对于传输的每一个字母用二进制脉冲编码, 00代替A, 01代替B, 10代替C, 11代替D, 每个脉冲宽度为5ms。

(1) 不同的字母等可能出现时, 试计算传输的平均信息速率。

(2) 若每个字母出现的可能性分别为 $P_A=1/5$ ,  $P_B=1/4$ ,  $P_C=1/4$ ,  $P_D=3/10$ , 试计算传输的平均信息速率。

## 2、可靠性

### (1) 误码率 $P_e$ -----码元差错率

指发生差错的码元数在传输总码元数中所占的比例：

$$P_e = \frac{\text{其中发生错误的码元数}}{\text{单位时间内传输总码元数}}$$

### (2) 误信率 $P_{eb}$ -----信息差错率

指发生差错的比特数在传输总比特数中所占的比例，

$$P_{eb} = \frac{\text{其中错误比特数（错误信息量）}}{\text{单位时间内传输总比特数（总信息量）}}$$

**[例3]** 已知某八进制数字通信系统的信息速率为12000 b/s，在收端半小时内共测得出现了216个错误码元，试求系统的误码率。

解：

$$R_{b8} = 12\ 000b / s$$

$$R_{B8} = R_{b8} / \log_2 8 = 4\ 000B$$

$$P_e = \frac{216}{4\ 000 \times 30 \times 60} = 3 \times 10^{-5}$$

**[例4]** 某信息源包含A, B, C, D四个符号, 这四个符号出现的概率相等, 以二进制比特进行传输, 并已知信息传输速率 $R_b=1Mbps$ 。求:

(1) 码元传输速率。

(2) 该信息源工作1小时后发出的信息量。

(3) 若在第(2)问收到的信息量比特中, 大致均匀发现了36个错误比特, 求误信率和误码率。

## § 1.5 通信技术发展概况

### 一、通信发展简史

1、诞生：1842年摩尔斯发明电报

2、发展：1970年以来的40年

3、前景 —— 未来的个人通信：

任何人（Whoever）在任何时候（Whenever）与任何地方（Wherever）的另一人（Whomever）以任何方式（Whatever）进行信息的实地实时全天候的交互。

# 表 1.1 通信重大事件表

| 年 代       | 事 件   |
|-----------|---|
| 1834      | 高斯与韦伯制造出电磁式电报机  |
| 1837      | 库克与惠斯登制成电报机   |
| 1842      | 实现莫尔斯电报通信   |
| 1860      | 瑞斯制造第一个电话系统   |
| 1864      | 麦克斯韦尔发表电磁场理论  |
| 1866      | 跨接欧美的海底电报电缆安装成功   |
| 1887      | 赫兹做电磁辐射实验成功   |
| 1894      | 洛奇表演 150 码距离无线电通信                                       |
| 1901      | 马可尼实现横贯大西洋的无线电通信  |
| 1906      | 非雷斯特发明真空三极管   |
| 1920      | 匹兹堡 KBKA 电台开始实用广播                                       |
| 1929      | 兹沃列金表演电视系统  |
| 1936      | 英国广播公司开始进行商用电视广播  |
| 1948      | 出现了晶体管；山农提出了信息论   |
| 1950~1960 | 微波通信线路研制成功  |
| 1960      | 第一个通信卫星(回波一号)发射，同时研制成功激光器                               |
| 1962      | 开始了实用卫星通信的时代  |
| 1969      | 从月球发回第一个话音消息及电视图像                                       |
| 1960~1970 | 出现了有线电视、激光通信、雷达、计算机网络和数字技术，光电处理和射电天文学迅速发展               |
| 1970~1980 | 大规模集成电路、商用卫星通信、程控数字交换机、光纤通信、微处理机等迅猛发展                   |
| 1980~1990 | 超大规模集成电路、移动通信、光纤通信的广泛应用，综合业务数字网崛起                       |
| 1990 以后   | 卫星通信、移动通信、光纤通信进一步飞速发展，高清晰彩色数字电视技术不断成熟，全球定位系统(GPS)得到广泛应用 |

## 二、通信技术的现状和发展趋势

### 1. 光纤通信

光纤通信具有容量大、成本低等优点，且不怕电磁干扰，与同轴电缆相比可以大量节约有色金属和能源。因此，自1977年世界上第一个光纤通信系统在芝加哥投入运行以来，光纤通信发展极为迅速，新器件、新工艺、新技术不断涌现，性能日臻完善。由于长波长激光器和单模光纤的出现，使每芯光纤通话路数可高达百万路，中继距离将达到100 km，市话中继光纤成本也连续大幅度下降。

我国近几年来光纤通信已得到了快速发展，目前光缆长度累计近几十万km。我国已不再敷设同轴电缆，新的工程将全部采用光纤通信新技术。



## 2. 卫星通信

卫星通信的特点是通信距离远，覆盖面积广，不受地理条件限制，可以大容量传输，建设周期短，可靠性高等。自1960年第一颗卫星发射成功以来，卫星通信发展特别迅猛。目前，卫星通信的使用范围已遍及全球，仅国际卫星通信组织就拥有数十万条话路。卫星通信的广泛应用，使国际间重大活动能及时得以实况转播，它使全世界人与人之间的“距离”缩短。

### 3. 移动通信

移动通信是现代通信中发展最为迅速的一种通信手段，它是随着汽车、飞机、轮船、火车等交通工具的发展而同步发展起来的。近10年来，在微电子技术和计算机技术的推动下，移动通信从过去简单的无线对讲或广播方式发展成为一个把有线、无线融为一体，固定、移动相互连通的全国规模，甚至全球范围的通信系统。

移动通信的发展方向是数字化、微型化和标准化。20世纪90年代是蜂窝电话迅速普及的年代。但目前世界上存在多种不同的技术体制，互不兼容，因此标准化成为当务之急。数字化的关键是调制、纠错编码和话音编码方式的确定。微型化的目标是研制重量非常轻的个人携带的手机。

## 4. 微波中继通信

微波中继通信始于20世纪60年代，它较一般电缆通信具有易架设，建设周期短等优点。它是目前通信的主要手段之一，主要用来传输长途电话和电视节目，其调制主要采用SSB/FM/FDM等方式。

微波中继通信的主要发展方向是数字微波，同时要不断增加系统容量，增加容量的途径是向多电平调制技术发展。目前采用的调制方式有16QAM和64QAM，并已出现256QAM、1024QAM等超多电平调制的方式。采用多电平调制，在40MHz的标准频道间隔内，可传送1920至7680路PCM数字电话。

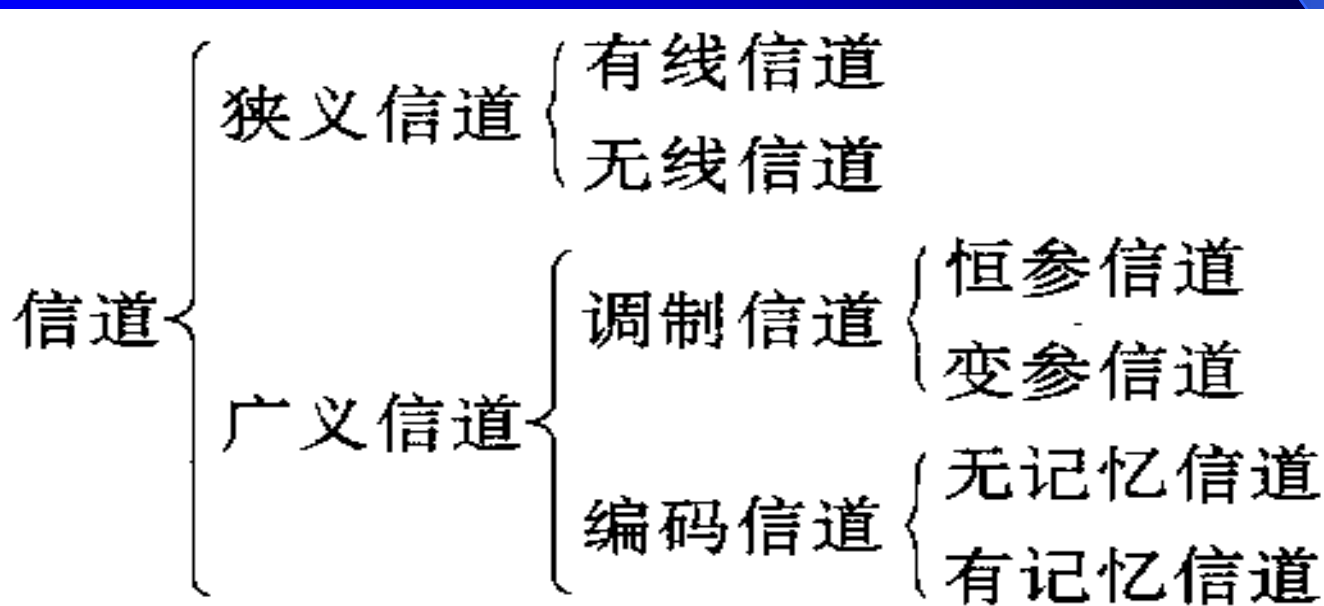


## § 1.6 信道 (Channel)



信道是信息传输的通道，是不同传输媒介各显其能的地方。噪声在这里被混入，信号在这里被衰减，系统在这里经受考验。

### 1.6.1 信道的分类和有关概念



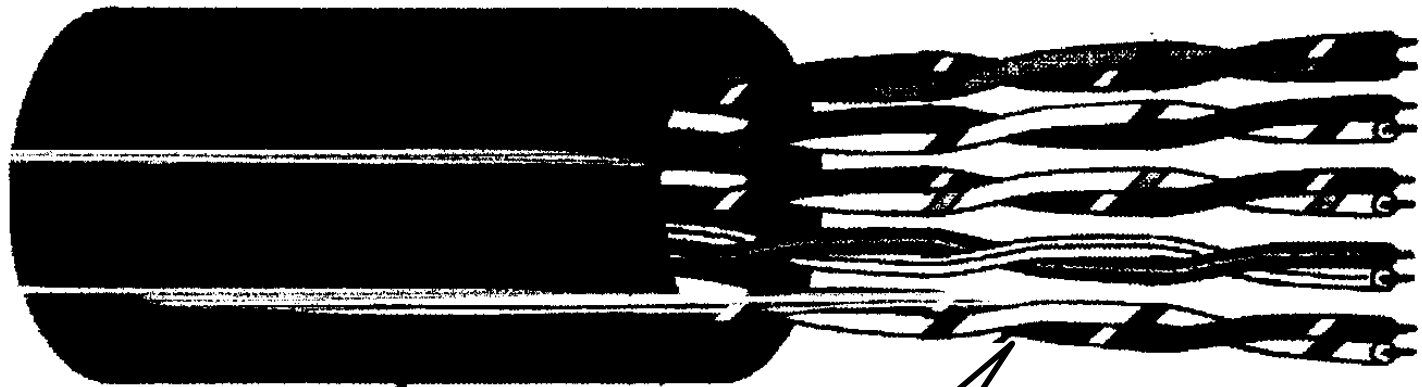
## 一、狭义信道：

- 狭义信道仅指通信媒质。
- 狭义信道又可分为有线信道和无线信道。
- 有线信道是借助线路传输信号的信道。
- 无线信道是借助于电磁波在空间传输信号的信道。

# 1、有线信道：

| 名称          | 工作频率范围                                 | 复用路数      | 无中继传输距离       |
|-------------|--|-----------|---------------|
| 架空明线        | 0.3~150 KHz                            | 12        | 100 Km        |
| <u>对称电缆</u> | 12~250 KHz                             | 24~60     | 35 Km         |
| <u>同轴电缆</u> | 60KHz~60MHz                            | 300~10800 | 1.5~8 Km      |
| <u>光导纤维</u> | 1.31 $\mu\text{m}$ ~1.55 $\mu\text{m}$ | 海量        | 100 Km~150 Km |

传输线列表

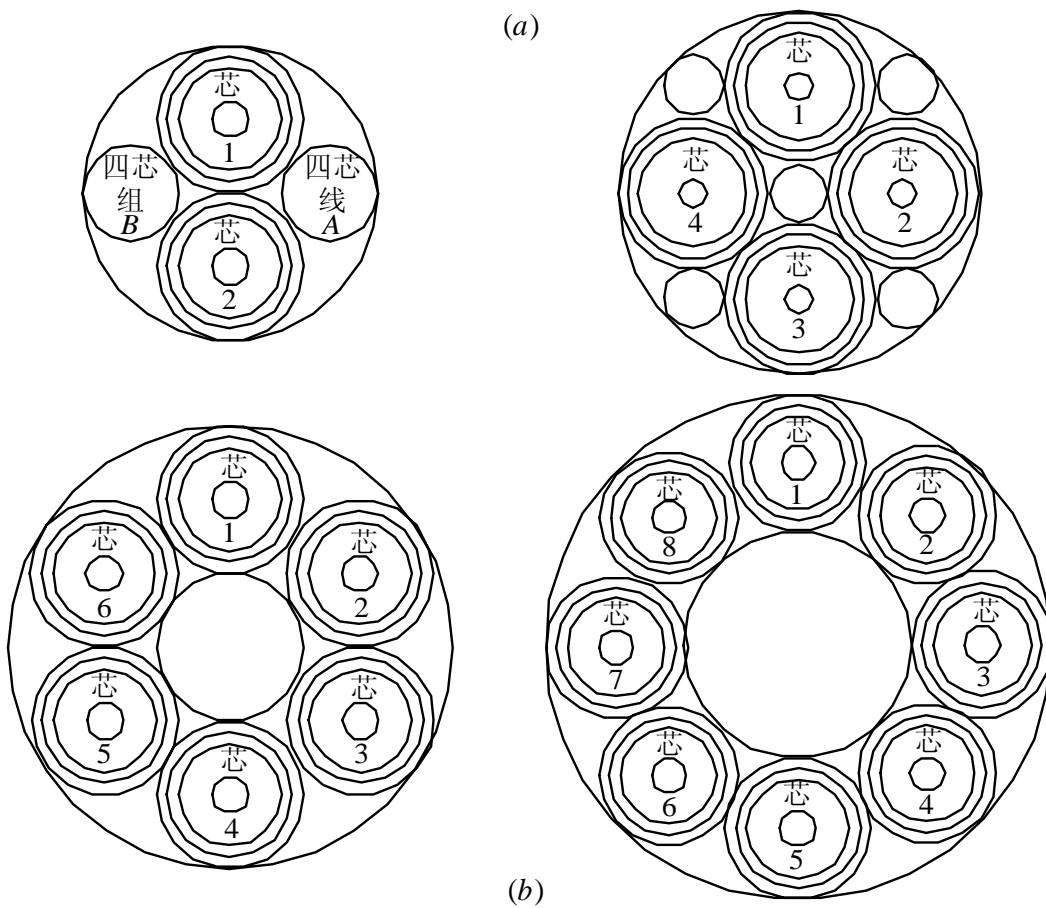
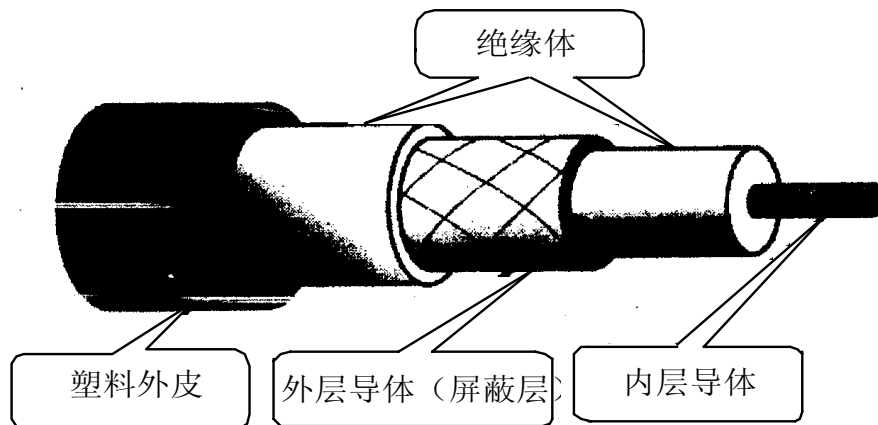


塑料外皮

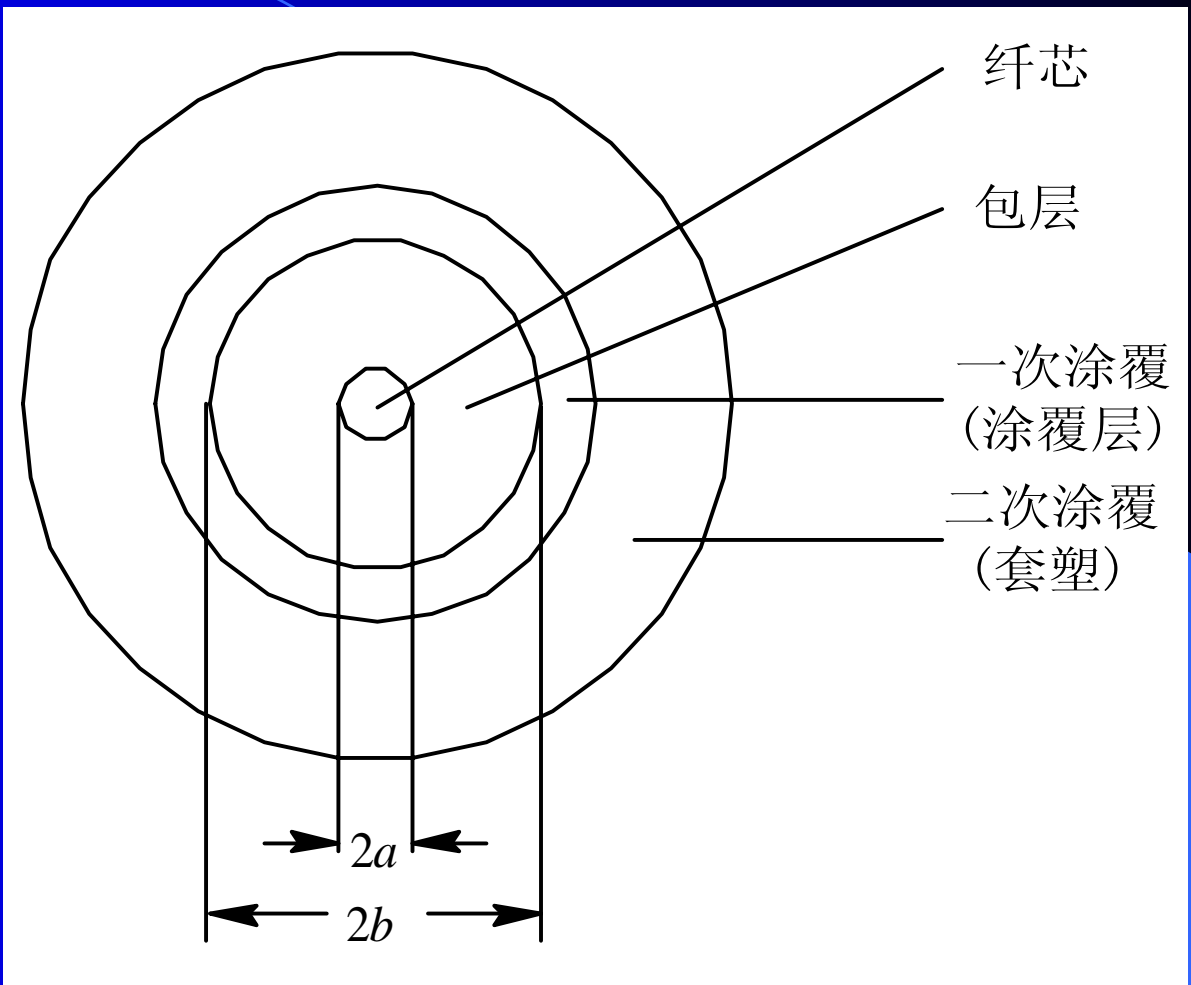
双绞线 (5对)

对称电缆结构图

# 同轴电缆结构图







由于石英玻璃质地脆、易断裂，为了保护光纤表面，提高抗拉强度，以便于实用，一般都在裸光纤外面进行两次涂覆而构成光纤芯线。光纤芯线结构如图所示。

光纤的芯线由纤芯、包层、涂覆层、套塑四部分组成。

包层的外面涂覆一层很薄的涂覆层，涂覆的材料为硅酮树脂或聚氨基甲酸酯乙脂，涂覆层的外面套塑，套塑的原料大都采用尼龙、聚乙烯或聚本烯等塑料。

## 2、无线信道:

### (1) 频率、波长公式

$$f \cdot \lambda = C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

## (2) 频率—波段表

| 频率范围<br>(f) | 波长( $\lambda$ )    | 符号      | 用途      |
|-------------|--------------------|---------|---------|
| 30~300 Hz   | $10^4\sim 10^3$ km | 特低频 ELF | 海底通信、电报 |
| 0.3~3 kHz   | $10^3\sim 10^2$ km | 音频 VF   | 实线电话    |
| 3~30 kHz    | $10^2\sim 10$ km   | 甚低频 VLF | 导航      |
| 30~300 kHz  | 10~1 km            | 低频 LF   | 电力通信    |
| 300k~3MHz   | $10^3\sim 10^2$ m  | 中频 MF   | 广播、对讲机  |

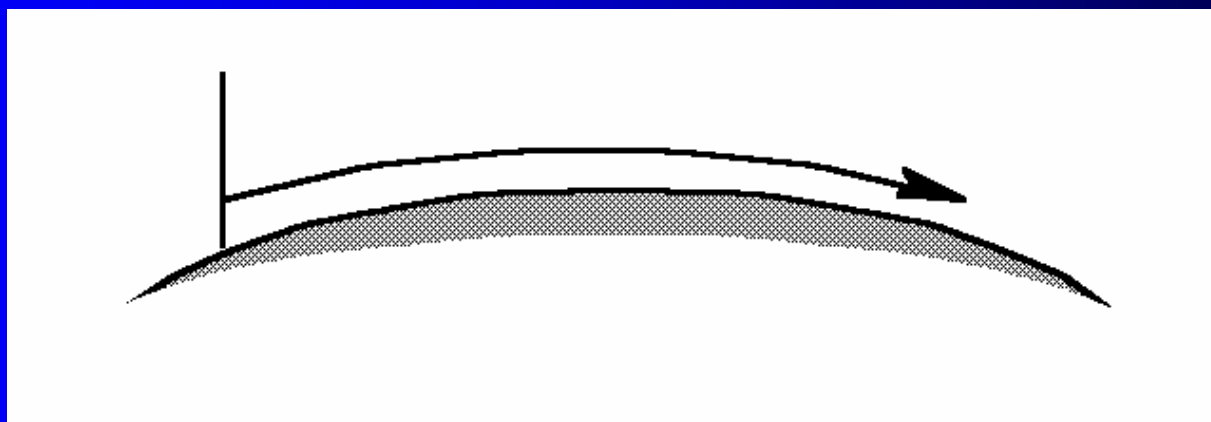
| 频率范围( $f$ )          | 波长( $\lambda$ )                                  | 符号           | 常用传输媒介        | 用途                             |
|----------------------|--|--------------|---------------|--------------------------------|
| 3~30 MHz             | $10^2 \sim 10$ m                                 | 高频<br>HF     | 同轴电缆<br>短波无线电 | 移动无线电话、短波广播、定点军用通信、业余无线电       |
| 30~300 MHz           | 10~1 m   | 甚高频<br>VHF   | 同轴电缆<br>米波无线电 | 电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航、集群通信、无线寻呼 |
| 300 MHz~3 GHz        | 100~10 cm  | 特高频<br>UHF   | 波导<br>分米波无线电  | 电视、空间遥测、雷达导航、点对点通信、移动通信        |
| 3~30 GHz             | 10~1 cm  | 超高频<br>SHF   | 波导<br>厘米波无线电  | 微波接力、卫星和空间通信、雷达                |
| 30~300 GHz           | 10~1 mm  | 极高频<br>EHF   | 波导<br>毫米波无线电  | 雷达、微波接力、射电天文学                  |
| $10^5 \sim 10^7$ GHz | $3 \times 10^{-4} \sim$<br>$3 \times 10^{-6}$ cm | 紫外、可见<br>光红外 | 光纤<br>激光空间传播  | 光通信                            |

### (3) 电磁波的辐射特性

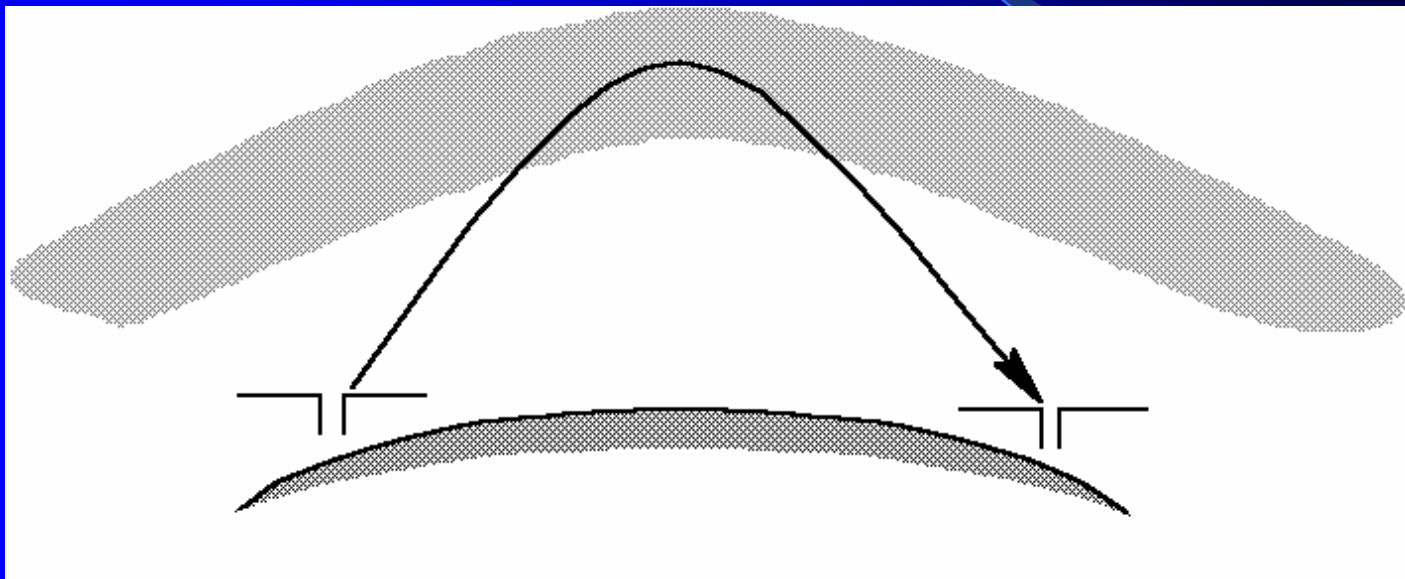
因为辐射能量 $\propto$ 频率的4次方，故频率越高，越容易辐射。

### (4) 传播特性

#### ➤ 地面波传播



## ➤ 天波传播

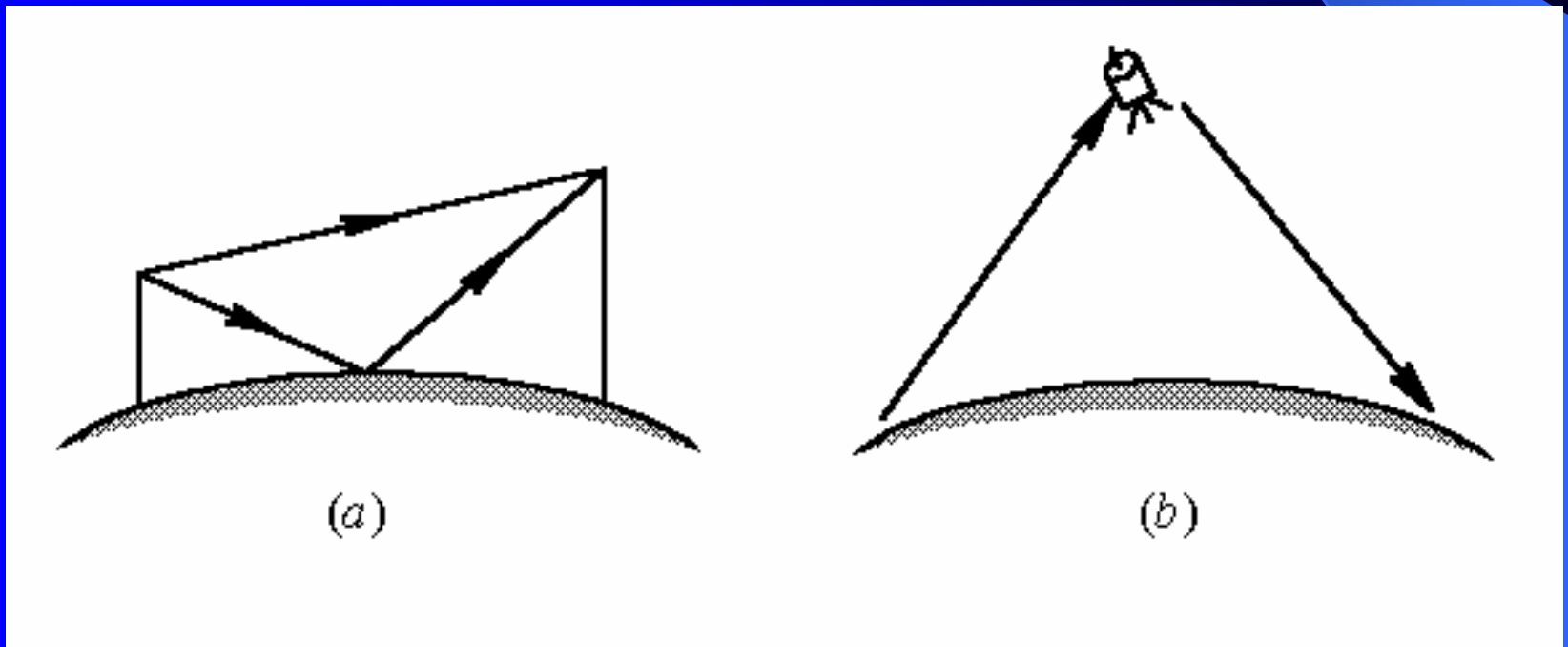


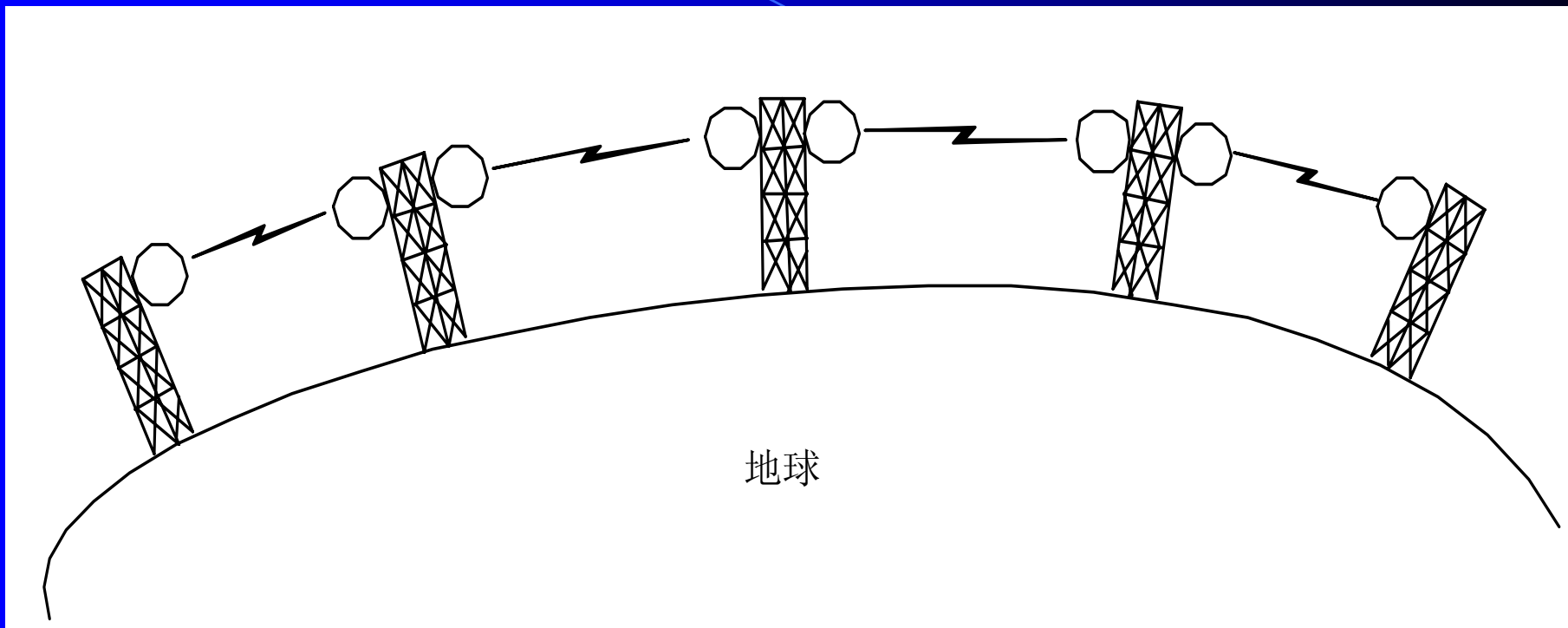
## ➤ 空间波传播（视距传播）

(a) 直射波

(b) 卫星中继信道：同步轨道高度35800公里

(c) 无线视距中继信道（微波中继）：40~50Km  
一个中继站，实现接力传输。





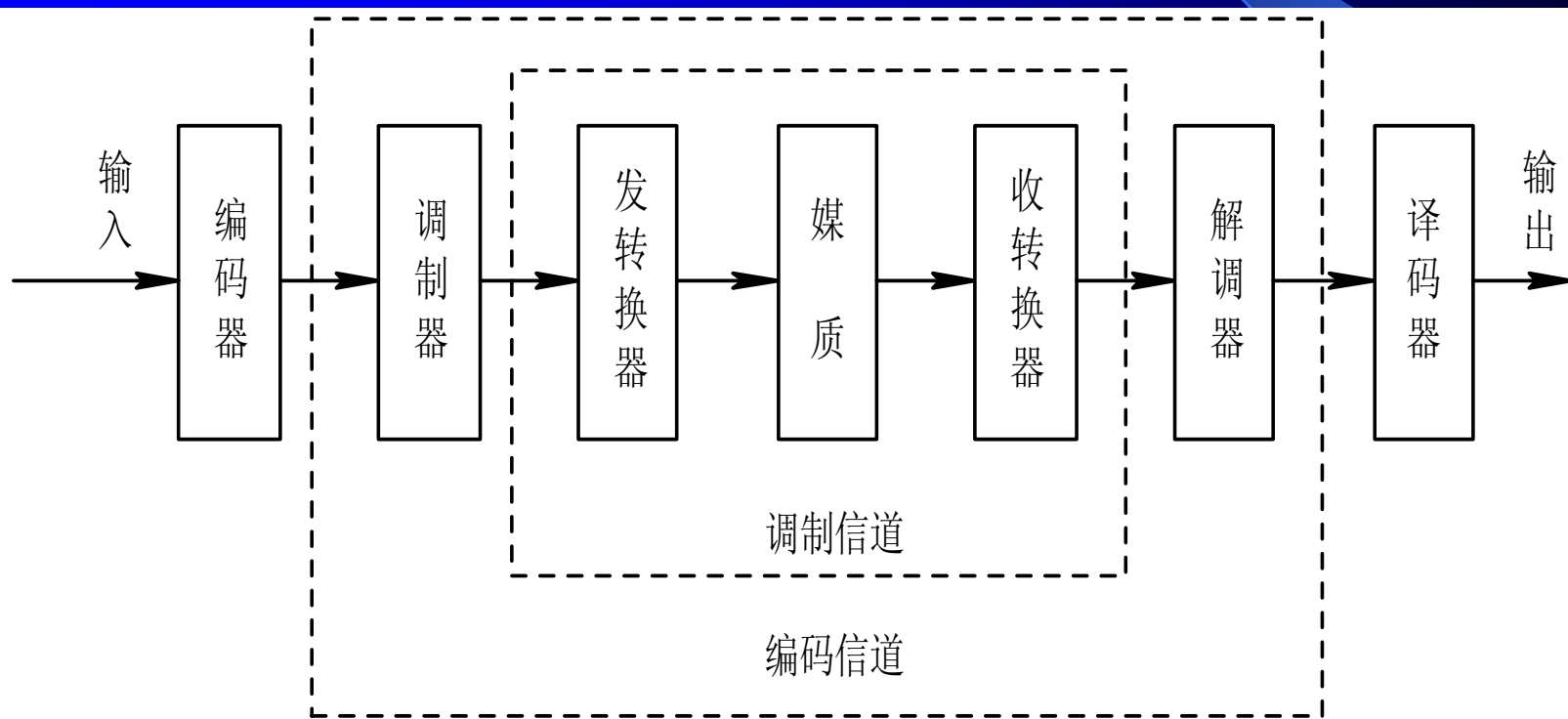
(c)微波中继信道



## 二. 广义信道:

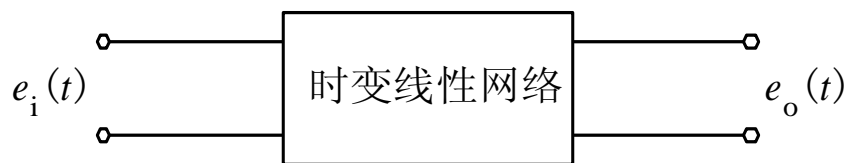
为分析问题的方便人们把收发两端的部分设备也纳入信道，建立了广义信道模型。

广义信道又可分为调制信道和编码信道。

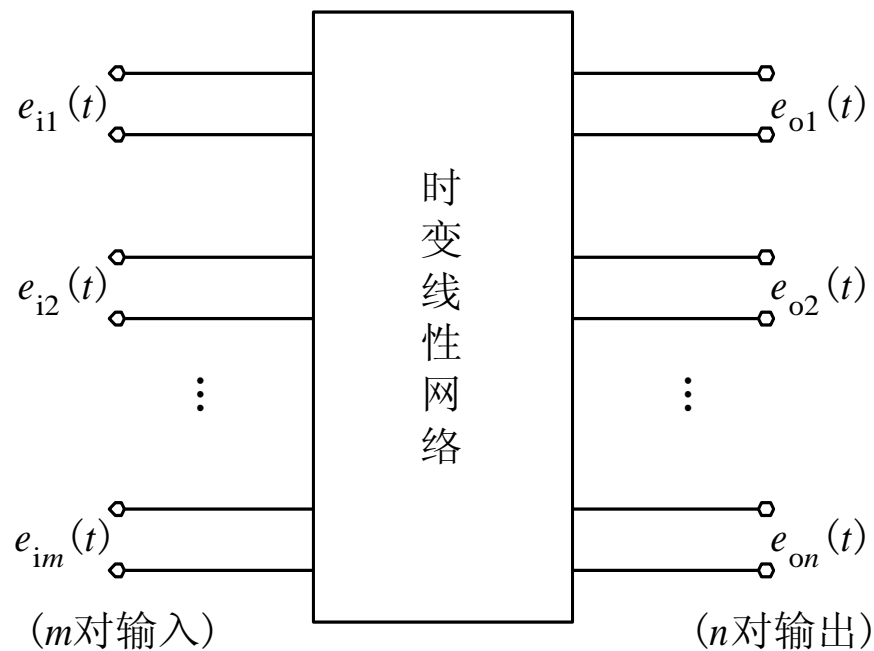


# 1. 调制信道模型:

把调制器输出端与解调器输入端之间的全部装置与传输媒体当作一个整体，而不再考虑内部细节，这种简化模型对于研究调制与解调过程是很方便的。可以用一个二端口(或多端口)线性时变网络来表示全部中间过程，它便称为调制信道模型。



(a)



(b)

对于二端口的信道模型来说，它的输入和输出之间的关系式可表示成：

$$e_o(t) = f[e_i(t)] + n(t)$$

式中， $e_i(t)$  — 输入信道的信号；

$e_o(t)$  — 信道总的输出波形；

$n(t)$  — 加性噪声(加性干扰)，与 $e_i(t)$ 相互

独立，即使信号消失噪声依然存在；

$f[e_i(t)]$  — 表示信道对信号影响(变换)的

某种函数关系。（时变线性变换）

$f[e_i(t)]$  是个高度概括的形式，为了更明确表达信道对信号的影响，可以设  $f[e_i(t)] = k(t) \cdot e_i(t)$ 。

$$e_o(t) = k(t) \cdot e_i(t) + n(t)$$

$k(t)$  — 表示乘性噪声（乘性干扰）。

它因信号而存在，与信号同生同灭。

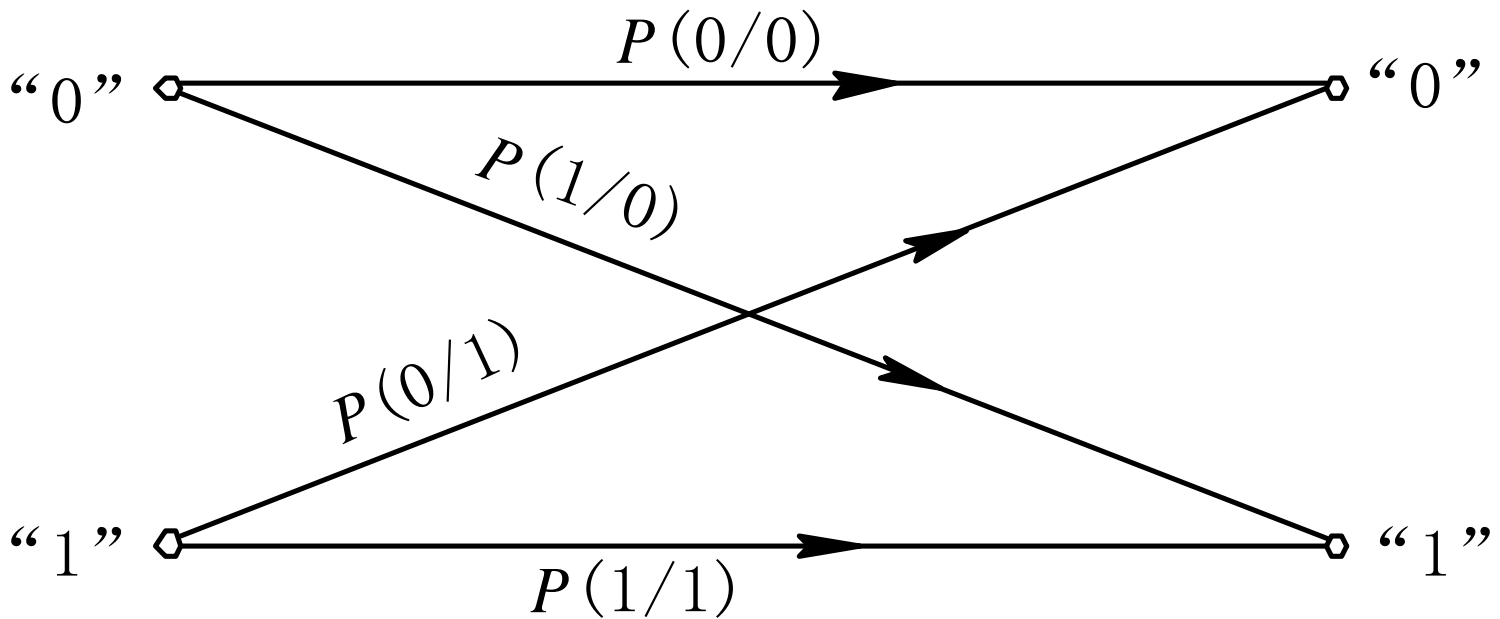
我们期望的信道(理想信道)应是  $k(t)=$ 常数， $n(t)=0$ ，即输出与输入信号波形不变，只有大小与先后的不同：

$$e_o(t) = k \cdot e_i(t - t_d)$$

## 2、编码信道模型

- 把编、译码器（如压缩编码和纠检错编码）之间的部分当作一个整体，屏蔽其细节，视为一个“广义信道”，叫做编码信道。它的输入就是编码器的输出、它的输出就是译码器的输入。这种简化模型对于研究编码算法是其方便的。
- 编码信道的输入、输出数字序列之间的关系可以用一组转移概率（条件概率）来表征。

# 以二进制无记忆编码信道为例



把 $P(0/0)$ 、 $P(1/0)$ 、 $P(0/1)$ 、 $P(1/1)$ 称为信道转移概率，

其中： $P(0/0)$ 和 $P(1/1)$ 为正确传输概率，

而： $P(1/0)$ 和 $P(0/1)$ 称为错误传输概率。

根据概率性质可知（归一化条件）：

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

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

输出的总的错误概率为：

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

## 1.6.2 恒参信道特性及其对信号传输的影响

- **恒参信道**：信道的主要电气参数不随时间变化，至少在短期内不会明显变化。  
如有线信道、无线视距信道、卫星中继信道等。
- **变（随）参信道**：信道的主要电气参数随时间波动，受温度、天气、日夜、时辰等因素影响，呈随机变化状态。  
如电离层反射信道、对流层散射信道。



# 一、恒参信道传输特性

- 1、恒参信道的电路参数（电阻、电容和电感）变化极其缓慢。因此，可以等效为一个线性时不变系统。
- 2、由于容抗和感抗都随频率而变化，所以恒参信道的系统传输函数是频率的函数：

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = |H(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$$

$|H(\omega)|$ 是幅频特性， $e^{j\varphi(\omega)}$ 是相频特性。

## 二、信号无失真传输条件

信号经过信道不失真的要求是：

$$y(t) = kx(t - t_d)$$

其中  $k$ （传输系数）和  $t_d$ （时间延迟）为常数，都是与频率无关的常数。

由傅氏变换：

$$Y(\omega) = kX(\omega)e^{-j\omega t_d}$$

其等效的线性网络传输特性为

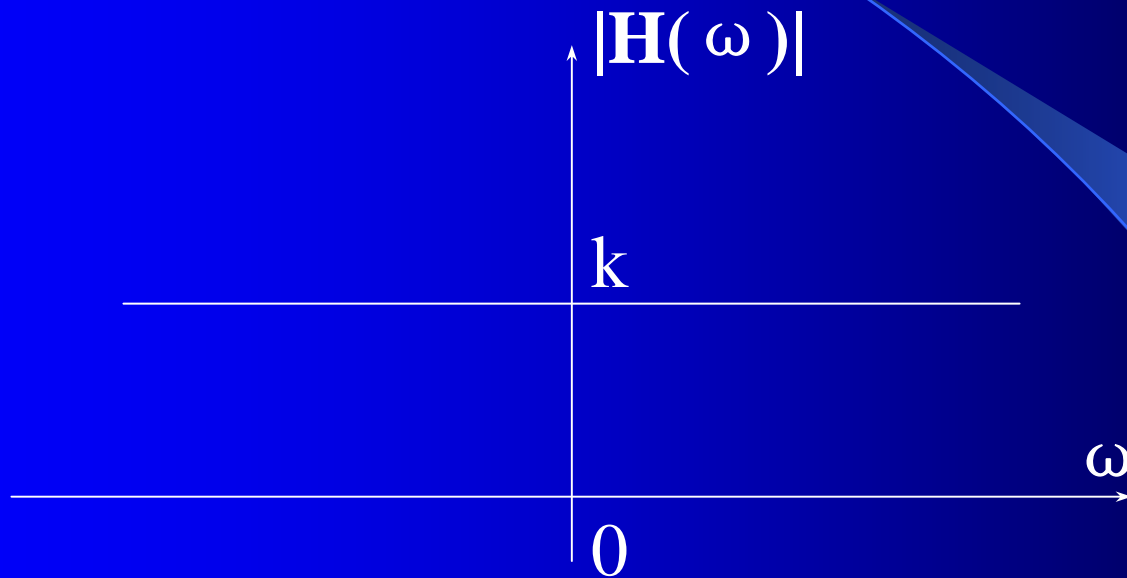
$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = ke^{-j\omega t_d}$$

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

幅频特性为常数： $|H(\omega)| = K$

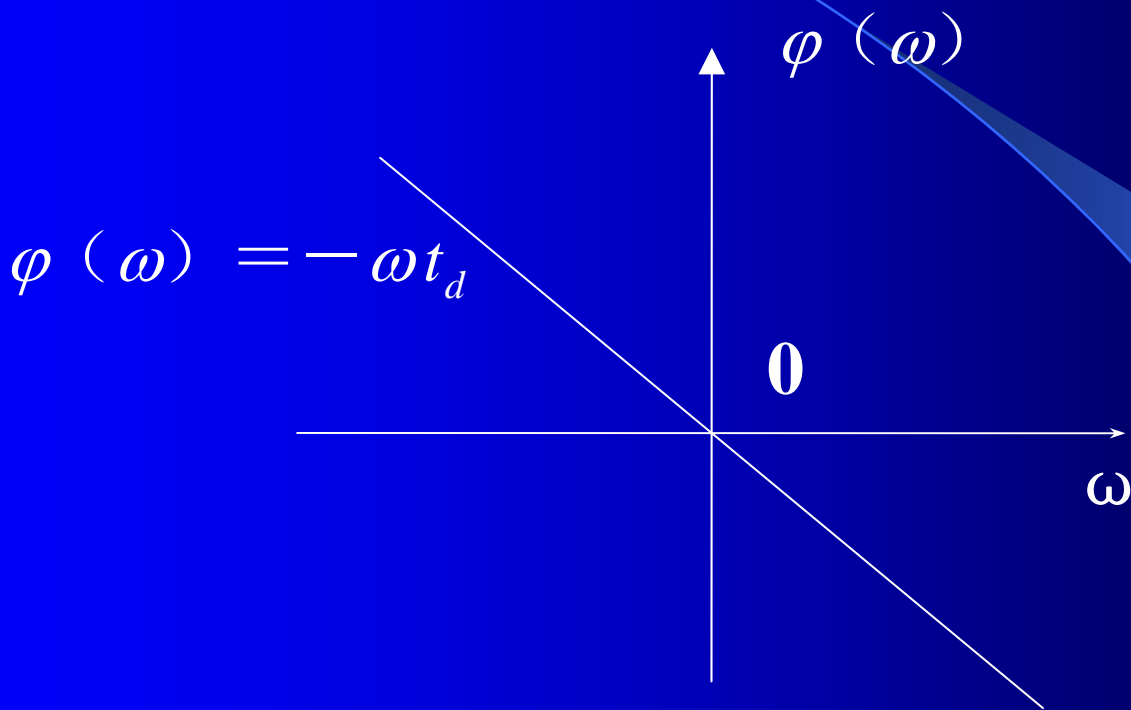
相频特性为线性： $\varphi(\omega) = -\omega t_d$

无失真传输的幅频特性曲线如下图所示。



要求幅频特性  $|H(\omega)| = K$  与  $\omega$  无关。

无失真传输的相频特性曲线如下图所示。



要求相频特性  $\varphi(\omega) = -\omega t_d$  是  $\omega$  的线性函数。

### 三、幅度-频率失真（畸变）

由于幅频特性不等于常数，即  $|H(\omega)| \neq \text{const}$  引起的失真称为幅频失真。

以双音信号为例：

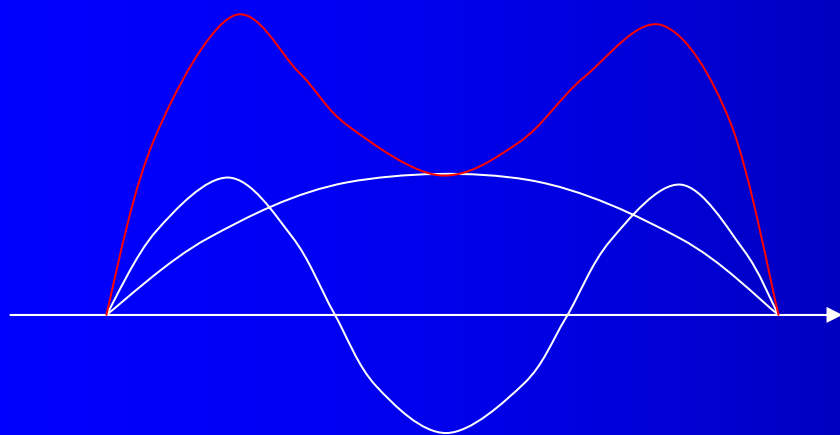
一信号由基波和三次谐波组成：

$$x(t) = A_1 \cos \omega t + A_2 \cos 3 \omega t$$

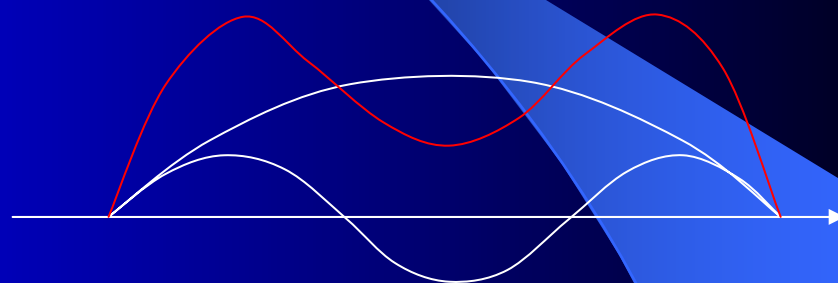
设信道对三次谐波衰减为原来的一半，而基波不变：

$$y(t) = A_1 \cos \omega t + 0.5A_2 \cos 3 \omega t$$

# 幅频失真的例子：



原来的波形  $x(t)$



失真后的波形  $y(t)$

## 四、相位-频率失真（群迟延失真）

相频特性不可能在无穷大的频率范围内为线性，相频特性的非线性会引起**相频失真**。

仍以双音信号为例：信号由基波和三次谐波组成，其幅度比为**2:1**。

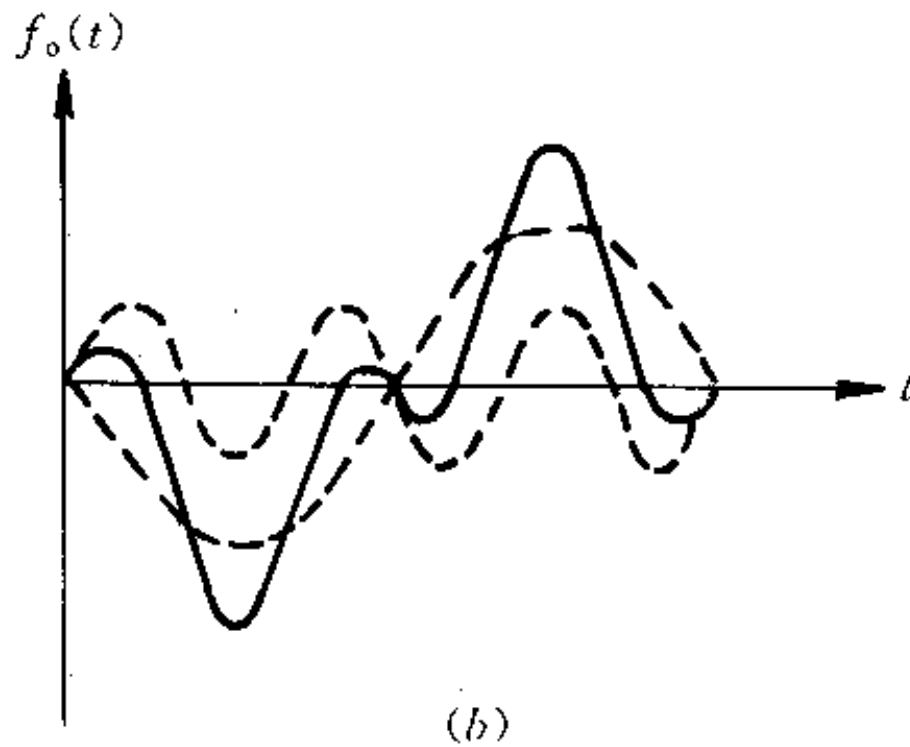
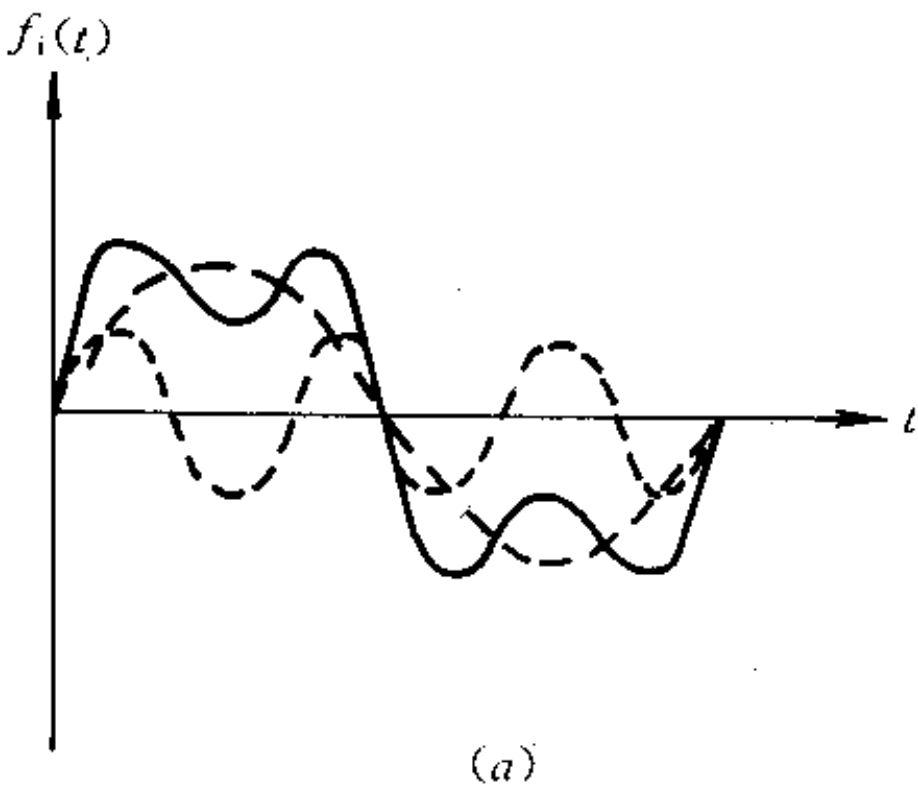
$$f_i(t) = A \cos \omega t + 0.5A \cos 3 \omega t$$

设信道对基波相移  $\pi$ ，三次谐波相移  $2\pi$ ：

$$f_o(t) = A \cos(\omega t + \pi) + 0.5A \cos(3 \omega t + 2 \pi)$$



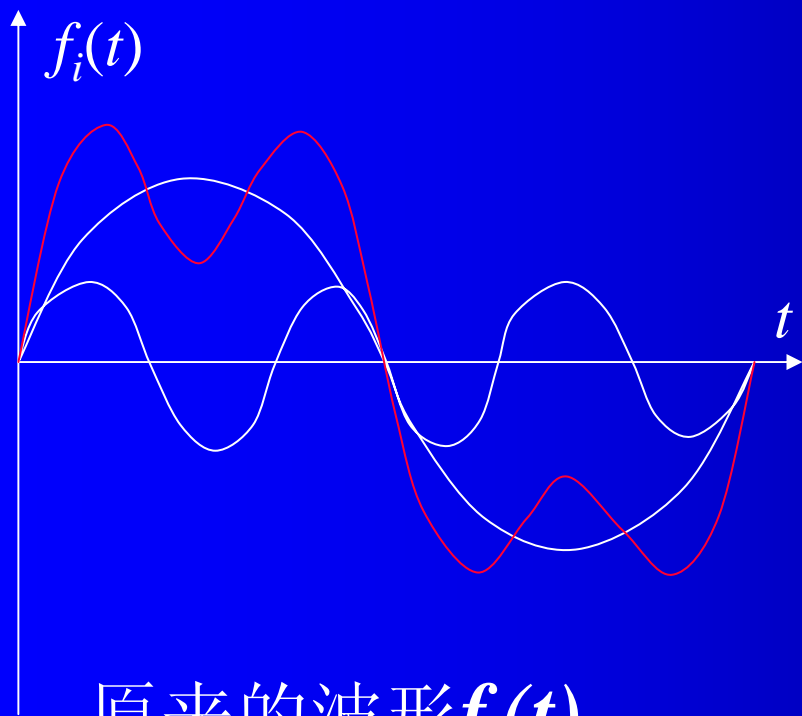
# 相移失真前后的波形比较



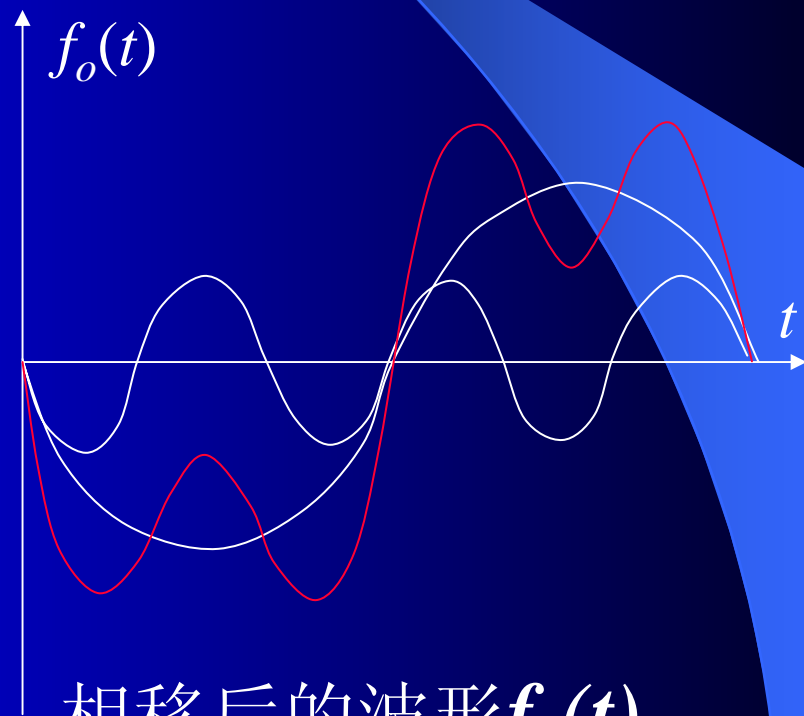
原来的波形  $f_i(t)$

相移后的波形  $f_o(t)$

为了不发生相频失真，相位就得随频率线性变化，如果基波相位移动  $\pi$ ，三次谐波的相位就应当移动  $3\pi$ ，才能使二者在时间轴上的移动相同，从而迭加出相同的波形，造成整体时移的效果。



原来的波形  $f_i(t)$



相移后的波形  $f_o(t)$

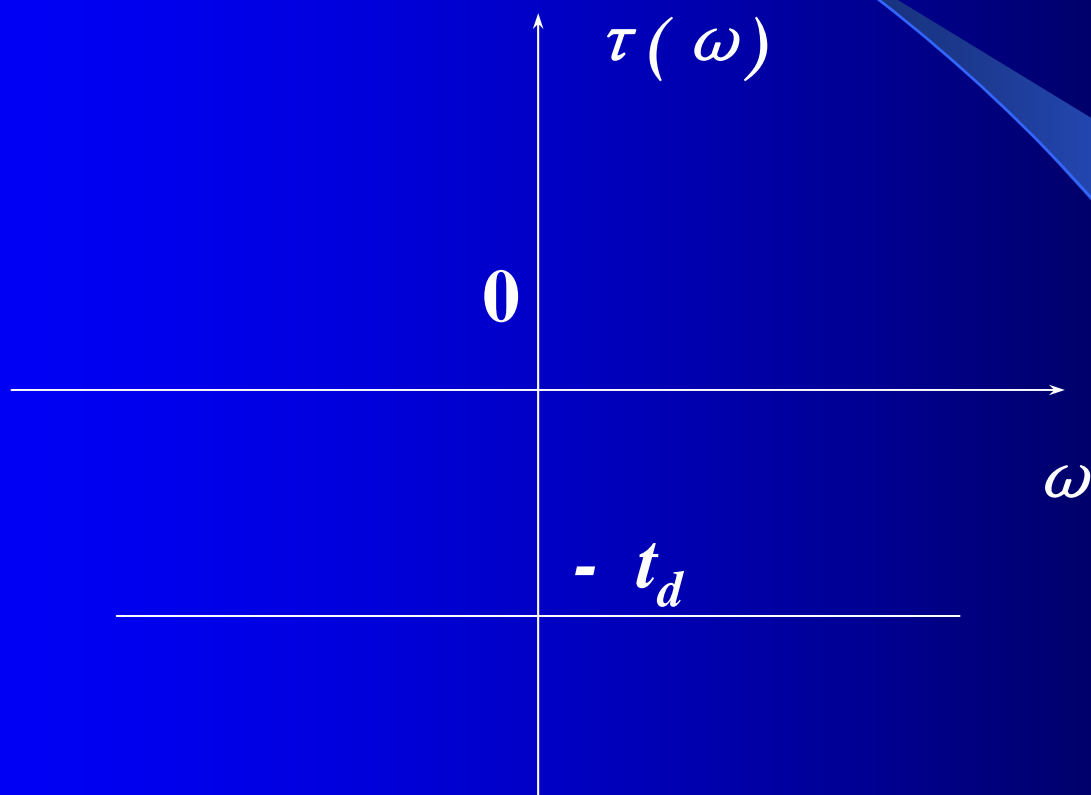
为此，引入群时延这样一个物理量：

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

从量纲分析，相位  $\varphi$  的量纲是弧度，而角频率  $\omega$  的量纲是弧度/秒，上式表明群时延的量纲是秒。

当相位与频率成正比变化时， $\varphi(\omega) = k\omega$  的微商等于常数，即群时延  $\tau(\omega) = k$  不随频率改变。因此信号的所有频率分量时移相同，合成的波形不变。

无失真信道的群迟延特性曲线如下图所示。



## 五、其它失真及矫正

➤ 幅频失真和相频失真均属线性畸变。

可以通过均衡措施加以补偿和矫正，也可以在设计系统时尽量减少失真。

➤ 还可能可能存在非线性畸变、频率偏移和相位抖动引起的失真。以上的非线性畸变一旦产生，一般均难以排除。这就需要在进行系统设计时从技术上加以重视。

## [例1]

设一恒参信道的传输函数为  $H(\omega) = k_0 e^{-j\omega t_d}$ ，式中  $k_0$  和  $t_d$  都是常数。试分析信号  $s(t)$  通过该信道后的输出信号的时域表达式和频域表达式。并对结果进行讨论。

## [例2]

设一恒参信道的传输函数为

$$H(\omega) = (1 + \cos \omega T_0) e^{-j\omega t_d}, \quad \text{式中 } t_d \text{ 为常数。试分析}$$

信号  $s(t)$  通过该信道后的输出信号的时域表达式。

并对结果进行讨论。

## 1.6.3 随参信道特性及其对信号传输的影响

随参信道是信道传输特性随时间随机快速变化的信道。

### 一、随参信道举例

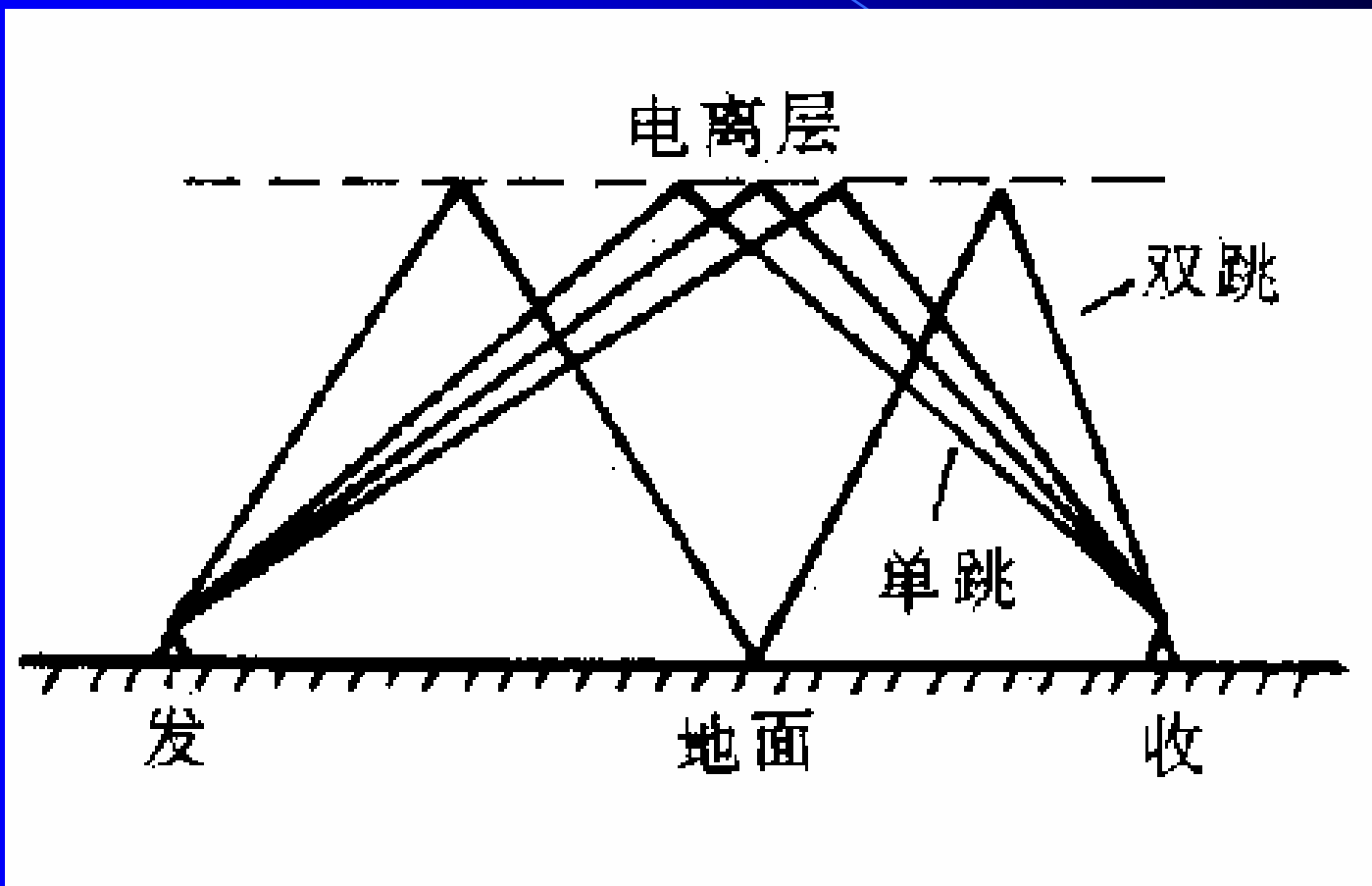
#### 1、短波电离层反射信道

波长在100~10m（频率3~30MHz）的电磁波（短波或称为高频），沿地面传输的距离是比较短的，但它可通过电离层反射传送到数千公里之遥。

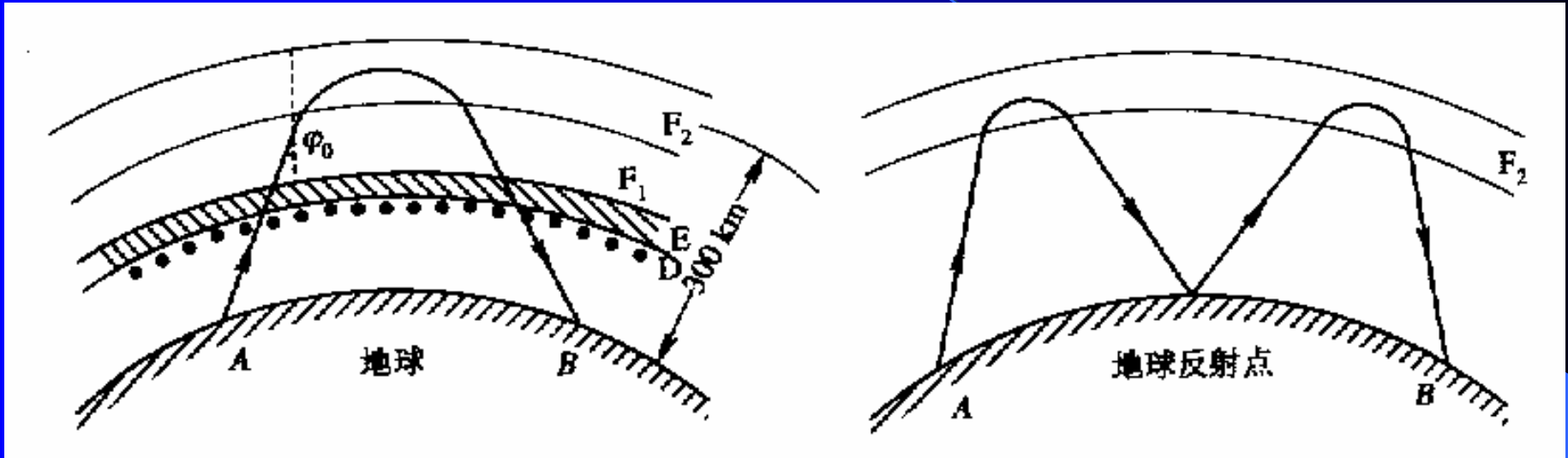
短波电离层反射信道是利用地面发射的无线电波在电离层，或电离层与地面之间的一次反射或多次反射所形成的信道。



# 短波信号从电离层反射的传播路径



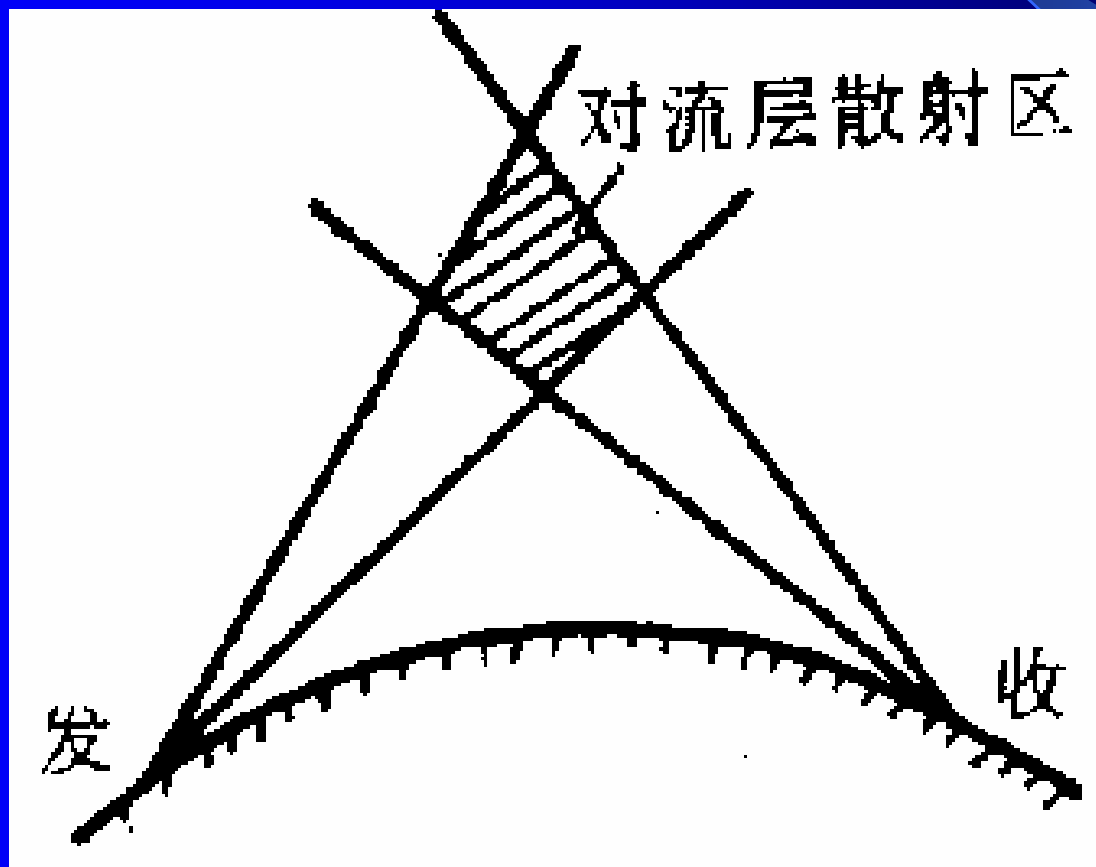
# 电离层结构示意图



电离层的吸收和反射状况与气候、温度、昼夜、季节、太阳黑子、宇宙射线等都有很大关系，具有随机性，还与电波频率和入射角有关系，常会伴随多次反射和**多径传播**的现象，引起电波的不同时延和复杂迭加情况。

## 2、对流层散射信道

对流层是距地面10~12公里的大气层，由于大气湍流运动等原因产生不均匀性，引起电波的散射。



## 二、随参信道的信号传输特点

由上面分析的两种典型随参信道特性知道，随参信道的传输媒质具有以下三个特点：

- (1) 对信号的衰耗随时间随机变化；
- (2) 信号的传输时延随时间随机变化；
- (3) 多径传播(多径效应)。

其结果将从两个方面影响信号，造成频率弥散和频率选择性衰落。

# 1、多径衰落与频率弥散

多径传播：信号经过多条不同路径传到接收端。

在存在多径传播的随参信道中，就每条路径的信号而言，它的衰耗和时延都是随机变量。因此，多径传播后的接收信号将是衰耗和时延都随时间变化的各路径的信号的合成。

我们假设发送信号为单一频率正弦波，即  $s(t)=A\cos \omega_0 t$ ，通过  $n$  条路径传播后被接收，则接收端接收到的合成波为

$$R(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \omega_0 [t - \tau_i(t)] = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos[\omega_0 t + \varphi_i(t)]$$

式中， $a_i(t)$ 为从第*i*条路径到达接收端的信号振幅， $\tau_i(t)$ 为第*i*条路径的传输时延。

传输时延可以转换为相位的形式： $\varphi_i(t) = -\omega_0 \tau_i(t)$ 为从第*i*条路径到达接收端的信号的随机相位。

$$R(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \varphi_i(t) \cos \omega_0 t - \sum_{i=1}^n a_i(t) \sin \varphi_i(t) \sin \omega_0 t$$

设：同相分量  $X_c(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cos \varphi_i(t)$

正交分量  $X_s(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \sin \varphi_i(t)$

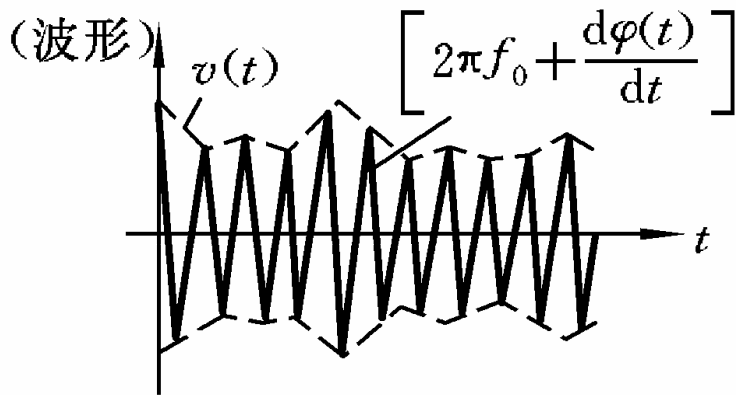
则

$$\begin{aligned} R(t) &= X_c(t) \cos \omega_0 t - X_s(t) \sin \omega_0 t \\ &= V(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] \end{aligned}$$

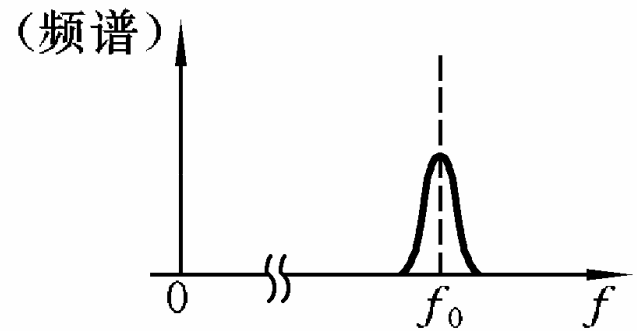
合成波 $R(t)$ 的包络  $V(t) = \sqrt{X_c^2(t) + X_s^2(t)}$

合成波 $R(t)$ 的相位  $\varphi(t) = \arg \tan \frac{X_s(t)}{X_c(t)}$

$R(t)$ 可以看成是一个窄带随机过程，包络服从瑞利分布，相位服从均匀分布。



(a)



(b)

由此我们可以得到以下两个结论:

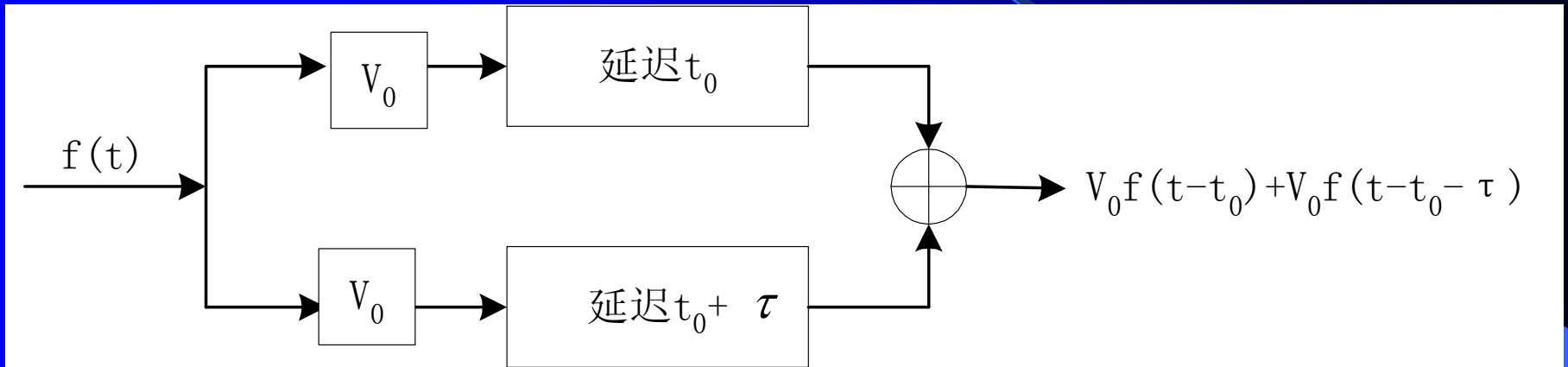
(1) 多径传播使单一频率的正弦信号变成了包络和相位受调制的窄带信号, 信号包络服从瑞利型分布律。即多径传播使信号产生瑞利型衰落;

(2) 从频谱上看, 多径传播使单一谱线变成了窄带频谱。即多径传播引起了频率弥散。



## 2、频率选择性衰落与相关带宽

假定只有两条传输路径



若发送信号为 $f(t)$ ，它的频谱为 $F(\omega)$ ： $f(t) \leftrightarrow F(\omega)$

设经信道传输后第一条路径的时延为  $t_0$ ，则  $V_0 f(t - t_0)$  的傅氏变换为：

$$V_0 f(t - t_0) \leftrightarrow V_0 F(\omega) e^{-j\omega t_0}$$

另一条路径的时延为  $(t_0 + \tau)$ ，假定信道衰减也是  $V_0$ ，故它到达接收端的信号为  $V_0 f(t - t_0 - \tau)$ 。

相应于它的傅氏变换为  $V_0 f(t - t_0 - \tau) \leftrightarrow V_0 F(\omega) e^{-j\omega(t_0 + \tau)}$

合成信号的傅氏变换为

$$V_0 f(t - t_0) + V_0 f(t - t_0 - \tau) \leftrightarrow V_0 F(\omega) e^{-j\omega t_0} (1 + e^{-j\omega \tau})$$

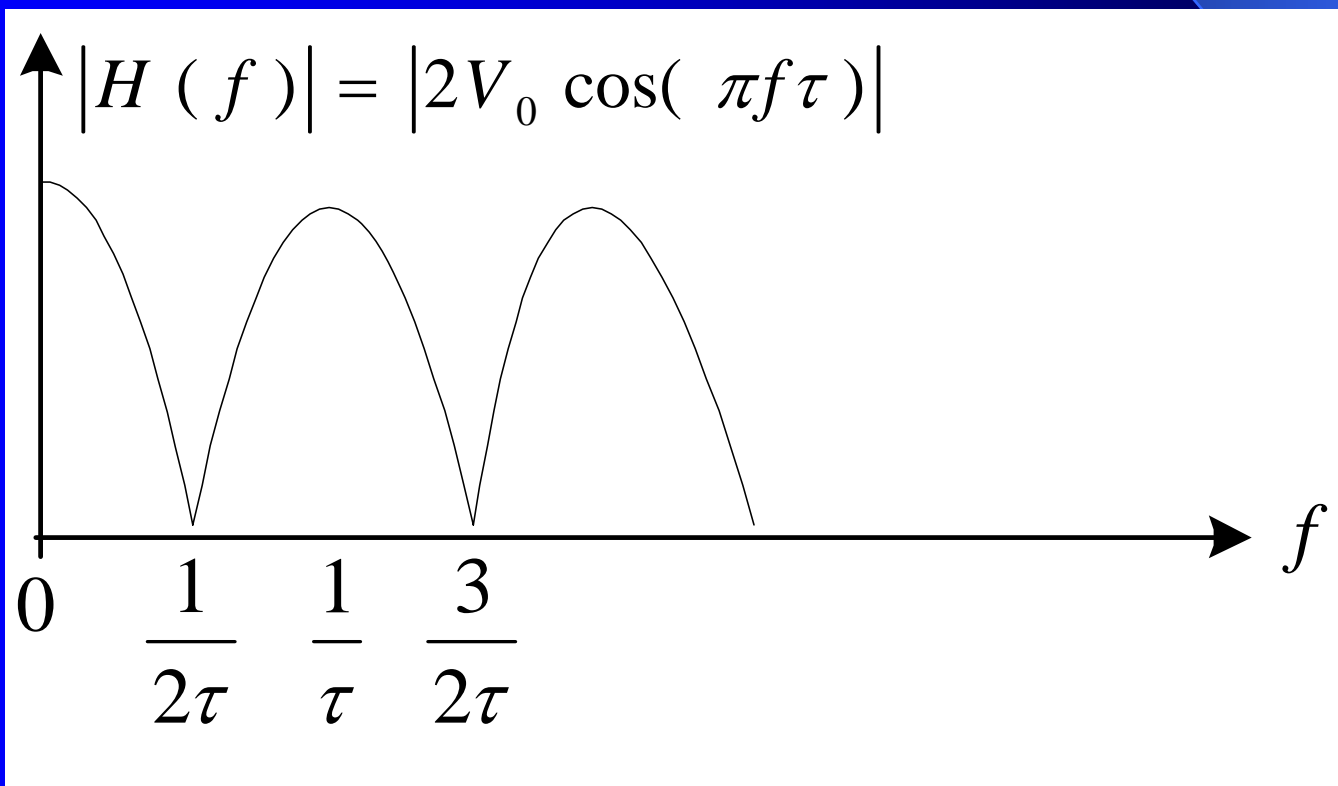
传输特性

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

**H**( $\omega$ )幅频特性为  $|H(\omega)| = |2V_0 \cos(\frac{\omega \tau}{2})| = |2V_0 \cos(\pi f \tau)|$

与相干波的干涉现象一样，当  $\omega = 2n\pi / \tau$ ，即  $f = n / \tau$  时 ( $n$ 为整数)，出现极大值。当  $\omega = (2n+1)\pi / \tau$ ，即  $f = (2n+1) / 2\tau$  时 ( $n$ 为整数)，出现极小值。

信号的某些频率分量互相加强形成传播极点，而另一些频率分量互相抵消形成传播零点。这种情况称为 **频率选择性衰落**。



### 三、伴随噪声和分集接收

随参信道产生的频率弥散和选择性衰落，都具有随机的特点，其表现（对视听效果的影响）与加性噪声相似。但是，这种“噪声”是伴随信号的传输而产生的，当信号为零时噪声自然消失。我们把这种随参信道产生的乘性噪声叫做**伴随噪声**。

为了减弱这种伴随噪声对接收信号的影响，往往采用所谓**分集接收技术**。用互相独立或基本独立的多个接收装置，分别接收来自不同路径的电波、或不同频率的电波、或不同角度、不同极化的电波，然后加以合并。

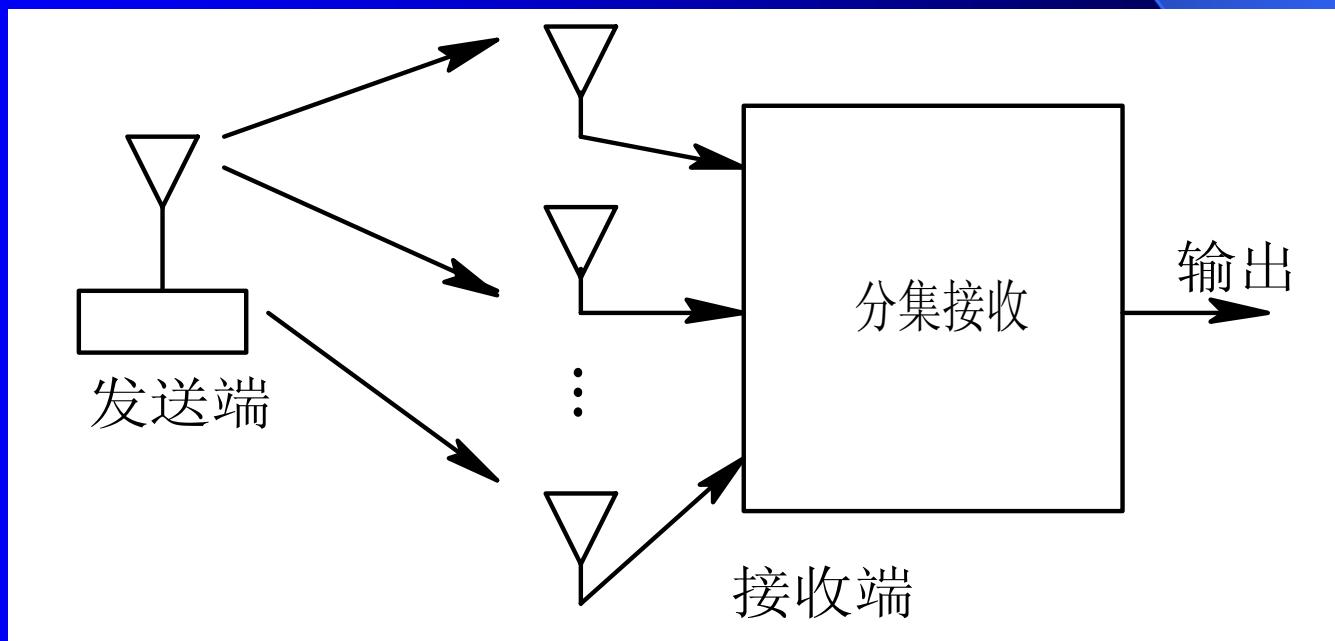
分集接收的两个含义：

- 1、分散传输——分集
- 2、集中处理——合并

# 1、分集方式

为了在接收端得到多个互相独立或基本独立的接收信号，一般可利用不同路径、不同频率、不同角度、不同极化、不同时间等接收手段来获取。

(1) **空间分集**: 接收端在不同地方设多副天线。



## (2) 频率分集

频率分集是将待发送的信息分别调制到不同的载波频率上发送，只要载波频率之间的间隔大到一定程度，则接收端所接收到信号的衰落是相互独立的。在实际中，当载波频率间隔大于相关带宽时，则可认为接收到信号的衰落是相互独立的。因此，载波频率的间隔应满足

$$\Delta f \geq B_c = \frac{1}{\tau_m}$$

$\tau_m$  为信道最大多径时延

### (3) 时间分集

时间分集是将同一信号在不同的时间区间多次重发，只要各次发送的时间间隔足够大，则各次发送信号所出现的衰落将是相互独立的。时间分集主要用于在衰落信道中传输数字信号。

在移动通信中，多卜勒频移的扩散区间与移动台的运动速度及工作频率有关。因此，为了保证重复发送的数字信号具有独立的衰落特性，重复发送的时间间隔应满足

$$\Delta t \geq \frac{1}{2f_m} = \frac{1}{2(v/\lambda)}$$

式中， $f_m$ 为衰落频率， $v$ 为移动台运动速度， $\lambda$ 为工作波长。

若移动台是静止的，则移动速度 $v=0$ ，此时要求重复发送的时间间隔 $\Delta t$ 为无穷大。这表明时间分集对于静止状态的移动台是无效果的。

- (4) 角度分集 —— 利用天线波束指向不同使信号不相关。
- (5) 极化分集 —— 利用水平极化波与垂直极化波不相关传输信号。



## 2、合并方式

合并就是根据某种方式把得到的各个独立衰落信号相加后合并输出，从而获得分集增益。合并可以在中频进行，也可以在基带进行，通常是采用加权相加方式合并。

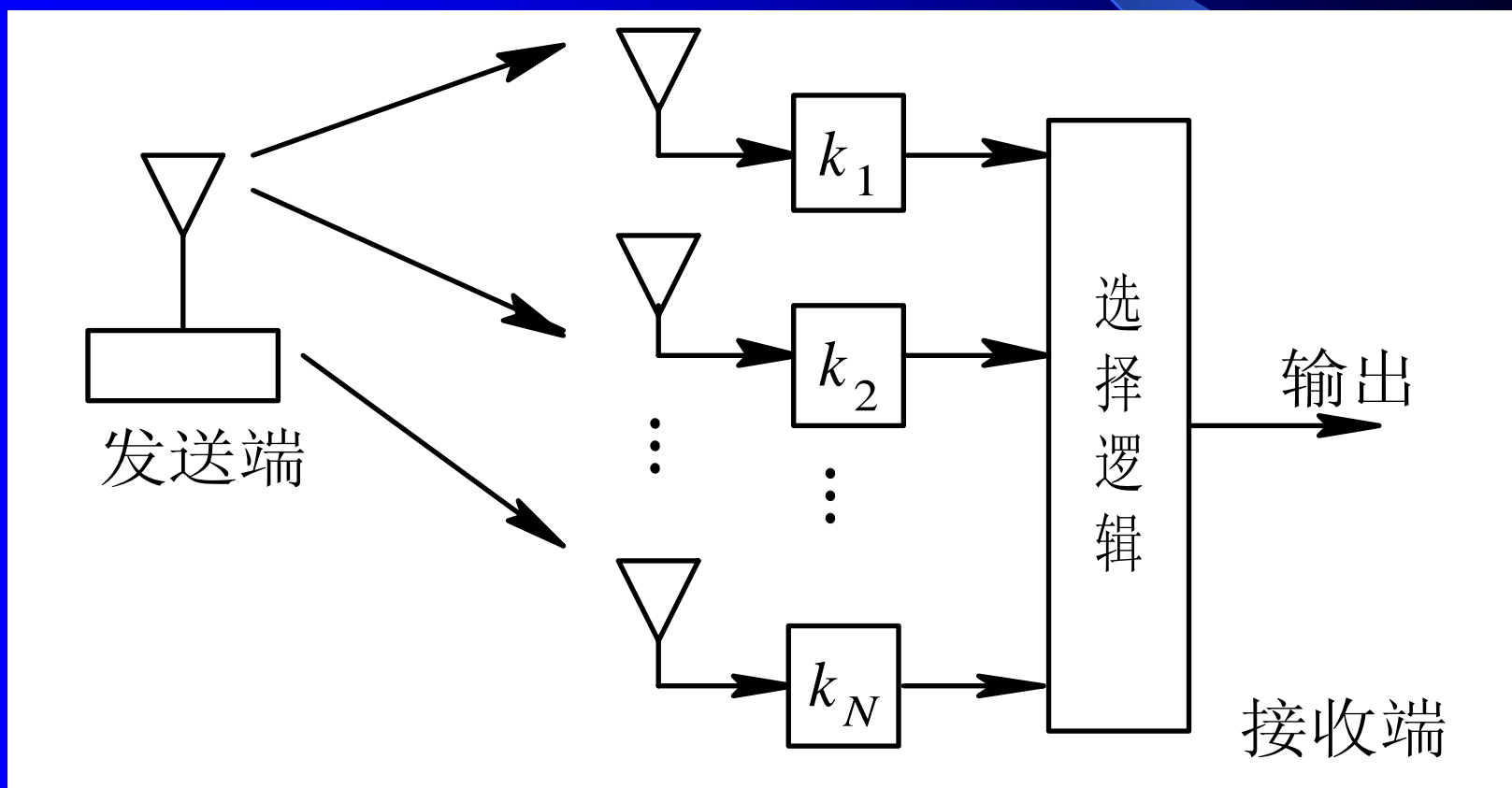
假设N个独立衰落信号分别为 $r_1(t)$ ,  $r_2(t)$ , ...,  $r_N(t)$ ，则合并器输出为  $r(t) = a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t) + \dots + a_N r_N(t) = \sum_{i=1}^N a_i r_i(t)$

式中， $a_i$ 为第i个信号的加权系数。

选择不同的加权系数，就可构成不同的合并方式。常用的三种合并方式是：选择式合并、等增益合并和最大比值合并。

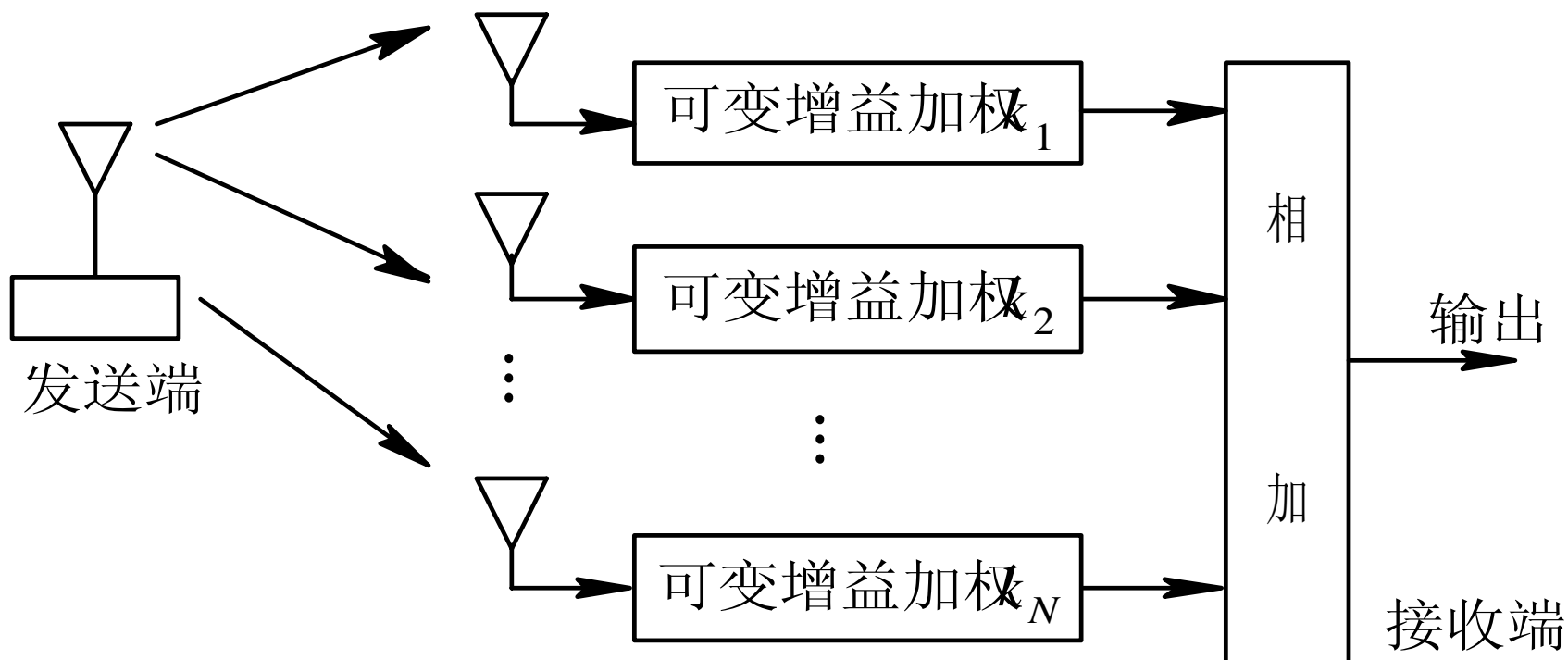
## (1) 选择式合并

选择式合并是所有合并方式中最简单的一种，其原理是检测所有接收机输出信号的信噪比，选择其中**信噪比最大**的那一路信号作为合并器的输出，其原理图如图所示。



## 2. 等增益合并

等增益合并原理如图所示。当加权系数相等，即  $k_1=k_2=\dots=k_N$  时，即为等增益合并。



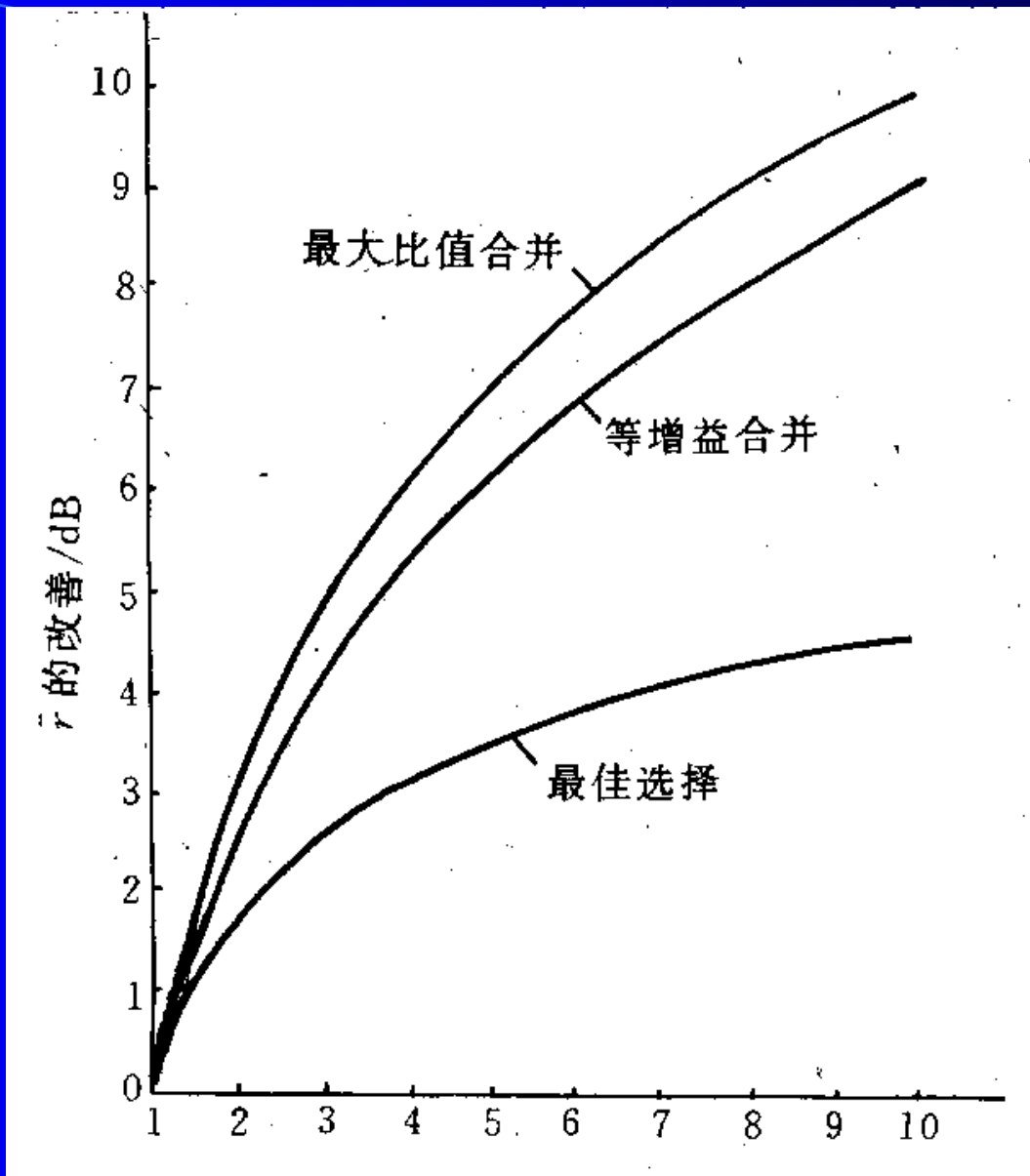
### 3. 最大比值合并

最大比值合并原理是各条支路加权系数与该支路信噪比成正比。参见上图。信噪比越大，加权系数越大，对合并后信号贡献也越大。若每条支路的平均噪声功率是相等的，可以证明，当各支路加权系数为

$$a_k = \frac{A_k}{\sigma^2} \quad \text{时，}$$

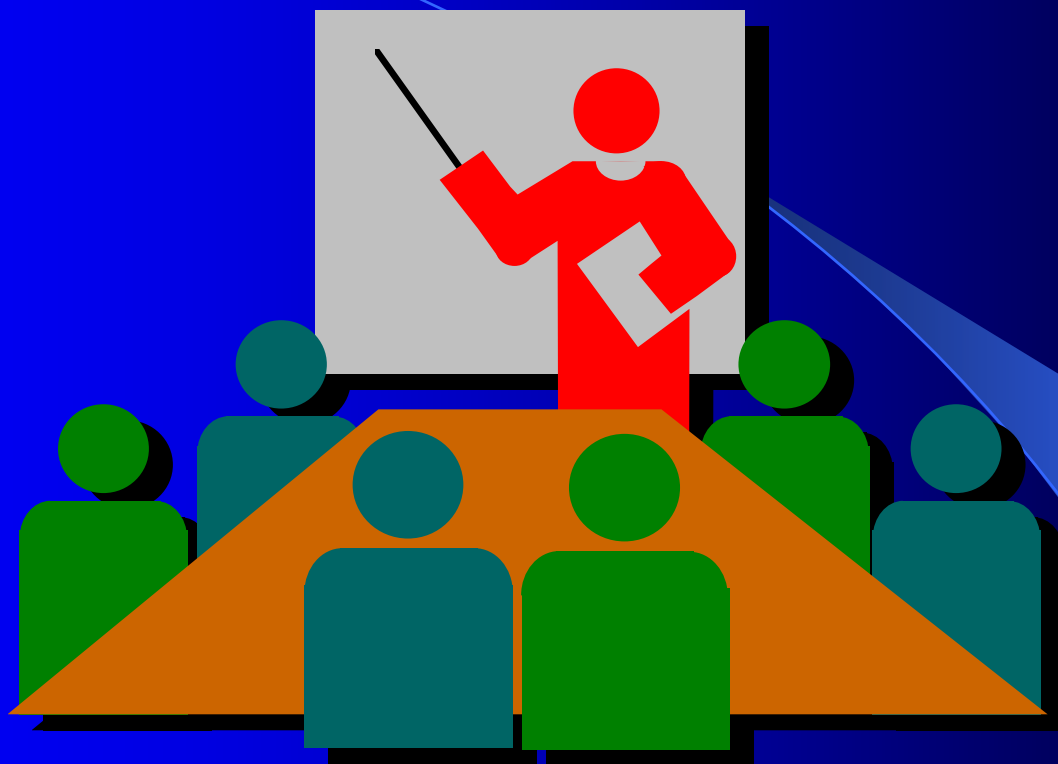
分集合并后的平均输出信噪比最大。式中， $A_k$ 为第 $k$ 条支路信号幅度， $\sigma^2$ 为每条支路噪声平均功率。

三种分集合并的性能如下图所示。可以看出，在这三种合并方式中，最大比值合并的性能最好，选择式合并的性能最差。



三种合并方式的比较





谢 谢 大 家