

# 通信原理



谢 逸  
中山大学·计算机学院  
2024年·春季



改编自樊昌信《通信原理教程》（第4版）课件

## 课后作业（第1章）：

### ● 习题：1.2、1.5、1.6、1.8 (第4版)

1.2 某个信息源由 A、B、C 和 D 这 4 个符号组成。设每个符号独立出现,其出现概率分别为  $1/4$ 、 $1/4$ 、 $3/16$ 、 $5/16$ ,试求该信息源中每个符号的信息量。

1.5 设一个信息源由 64 个不同符号组成,其中 16 个符号的出现概率均为  $1/32$ ,其余 48 个符号出现概率为  $1/96$ 。若此信息源每秒发出 1000 个独立符号,试求该信息源的平均信息速率。

1.6 设一个信号源输出四进制等概率信号,其码元宽度为  $125\mu\text{s}$ 。试求其码元速率和信息速率。

1.8 设一条无线链路采用视距传播方式通信,其收发天线的架设高度都等于 80m,试求其最远通信距离。

## 课后作业（第1章）：

### ●重要内容：

- 什么是信息量、熵、平均互信息？
- 香农信道容量定理的含义是什么？
- 数字通信系统模型的组成及各部分功能与作用。
- 数字通信与模拟通信的区别是什么？
- 数字通信的主要性能指标有什么？
- 调制在通信中有什么作用？
- 多径效应的含义是什么？
- 调制信道与编码信道的区别是什么？
- 加性高斯白噪声是什么？

### 拓展阅读：语义通信 semantic communication

[1] Yang, Wanting, Hongyang Du, Zi Qin Liew, Wei Yang Bryan Lim, Zehui Xiong, Dusit Niyato, Xuefen Chi, Xuemin Shen, and Chunyan Miao. "Semantic communications for future internet: Fundamentals, applications, and challenges." IEEE Communications Surveys & Tutorials 25, no. 1 (2022): 213-250.

3

## 第1章 概 论





### 1.1 通信的发展

- 古代通信的起源
  - ◆ 两类通信方式：人力、机械
- 近代通信的发展



## 1.2 消息、信息和信号

### ■信息：通信的有效内容、实质性内容

晴	Clear	
云	Cloud	
阴	Overcast	
雨	Rain	

### ■消息：语音、文字、图形、图像...

#### ◆人能感知的各种刺激/信息的表达方式

- ✓ 不同消息可以有相同内容
- ✓ 信息不一定是看得见、摸得着的
- ✓ 通信的目的：传输消息中的信息

5

信号

编码

消息

信息



## 1.2 消息、信息和信号

### ■编码：消息的数值表示。

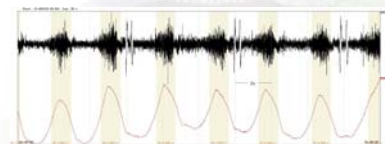
双字节 2 区

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
A	啊	阿	埃	挨	哎	唉	哀	皑	癌	藹	矮	艾	碍	爱	隘
B	鞍	氨	安	俺	按	暗	岸	胺	案	肮	昂	盎	凹	敖	翱
C	袄	傲	奥	懊	澳	芭	捌	扒	叭	吧	芭	八	疤	巴	拔
D	靶	把	耙	坝	霸	罢	爸	白	柏	百	摆	佰	败	拜	裨
E	班	搬	扳	般	颁	版	扮	拌	伴	瓣	半	办	绊	邦	帮
F	梆	榜	膀	绑	棒	磅	蚌	镑	傍	谤	苞	胞	包	褒	彪

Bytes	b <sub>4</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	Column	Row	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	@	P	~	p
0	0	0	0	1	1	1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
0	0	0	1	0	2	2	STX	DC2	"	2	B	R	b	r
0	0	0	1	1	3	3	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0	0	1	0	0	4	4	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
0	0	1	0	1	5	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0	0	1	0	1	6	6	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0	0	1	1	0	7	7	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
0	0	1	1	1	8	8	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
0	1	0	0	0	9	9	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
0	1	0	0	1	10	10	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
0	1	0	0	1	11	11	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
0	1	0	0	1	12	12	FF	FS	=	<	L	\	l	
0	1	0	1	0	13	13	CR	GS	-	=	M	]	m	}
0	1	0	1	0	14	14	SO	RS	.	>	N	^	n	~
0	1	0	1	1	15	15	SI	US	/	?	O	_	o	DEL

### ■信号：消息的载体

通信系统中传输的是信号 例如：声、光、电等



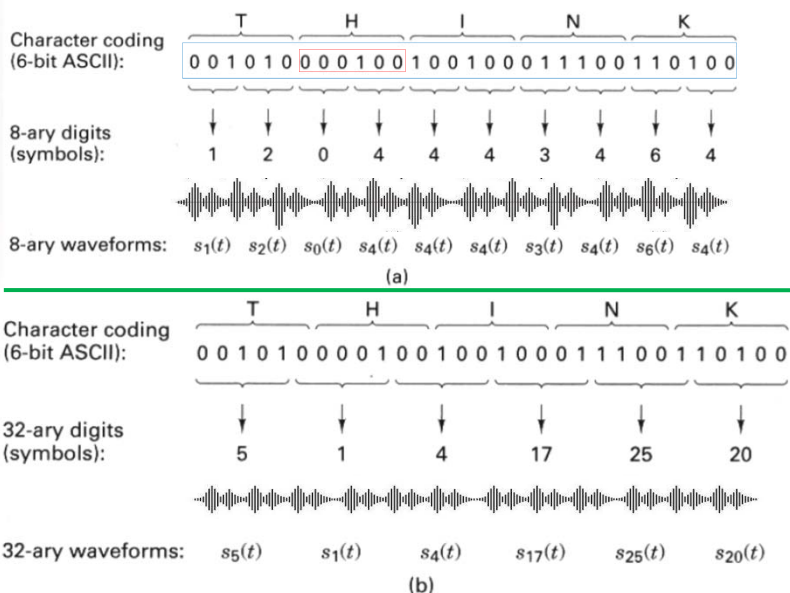
6

## 例子：传输信息 “I want to thank you”

I want to thank you

Information: I want to thank you.

Message (text): "THINK"



## 信息~消息~编码~信号

中山大学圆形、绿色校徽



文件、协议、报文...

...1110001010101  
010101010101...  
二进制码流...

待传输信息



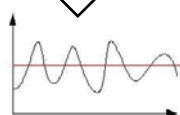
Internet



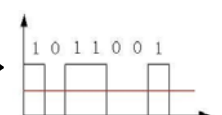
调制信号



基带信号、脉冲信号



解调信号



基带信号、脉冲信号

...11100010101  
010101010101  
10101...  
二进制码流...



文件、协议、报文...

中山大学圆形、绿色校徽

接收信息

## 什么是信息？

- 1948年，数学家香农在题为“通讯的数学理论”的论文中指出：“**信息是用来消除随机不定性的东西**”。
- 美国数学家、控制论的奠基人诺伯特·维纳在他的《控制论——动物和机器中的通讯与控制问题》中认为，信息是“**我们在适应外部世界，控制外部世界的过程中同外部世界交换的内容的名称**”。
- 英国学者阿希贝认为，**信息的本性在于事物本身具有变异度**。
- 意大利学者朗高在《信息论：新的趋势与未决问题》中认为，**信息是反映事物的形成、关系和差别的东西，它包含于事物的差异之中，而不在事物本身**。

9

- 在中国国家标准**GB4894-85**中关于信息的定义是：**信息是物质存在的一种方式、形态或运动状态，也是事物的一种普遍属性，一般指数据、消息中所包含的意义，可以使消息中所描述事件的不确定性减少**。

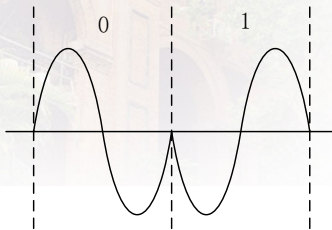
10



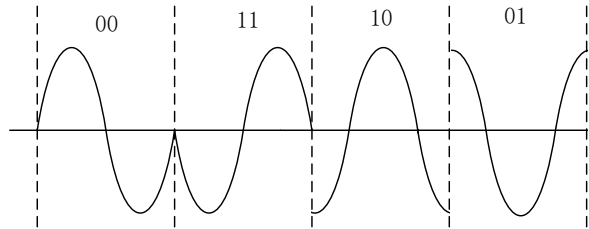
信息→消息→编码→码元→信号

带宽,信道容量

- 码元: 数字通信中一个基带波形所对应的二进制码组



二进制码元



四进制码元

- 比特: 一个码元中每一个二进制位
- 带宽=信道最高信号频率-信道最低信号频率, 单位是Hz
- 信道容量: 信道的最高比特率,bps

2024.2.28

11

- 信息的度量: 衡量一个消息包含信息的数量

\*制定度量方法考虑的原则

货 物	消 息
货运量	信息量
有多种	有多种
和种类无关	和类型无关
和贵重程度	和重要程度
无关	无关
总量是单件	总量是单件独立
货运量之和	消息的信息量之和

### \*制定度量信息的方法

# 消息“量”  $\neq$  信息量

# 例：“明天降雨量将有 1 mm” -- 信息量小

“明天降雨量将达到1 m” -- 信息量大

“明日太阳将从东方升起” -- 信息量零

# 信息量  $I = I[P(x)]$ ,  $P(x)$  – 事件 $x$ 发生的概率

# 定义:  $I = \log_a [1/P(x)] = -\log_a P(x)$

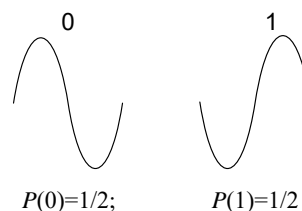
13

# 通常取  $a = 2$ , 此时单位为“比特”。 $I = -\log_a P(x)$

# 对于一个等概率、二进制码元:  $x \in \{0,1\}$

$$P(0)=1/2; P(1)=1/2$$

$$I = \log_2 [1/P(x)] = \log_2 [1/(1/2)] = 1 \text{ 比特}$$

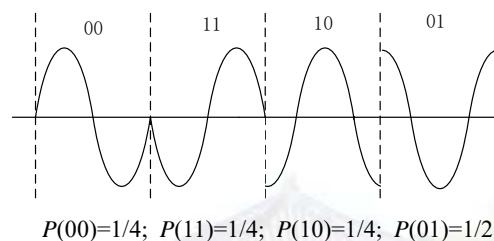


# 对于一个等概率、M进制码元:

$$I = \log_2 [1/P(x)] = \log_2 [1/(1/M)]$$

$$= \log_2 M \text{ 比特}$$

若  $M = 2^k$ , 则  $I = k$  比特



例如: 4进制(2比特); 8进制(3比特)

14

# 例：若仍用晴、阴、云、雨预报天气，并且假设这4种状态出现的**概率相等**，即  $P(x) = 1/4$ ，则每种状态的信息量等于：

$$I = \log_2(1/1/4) = 2 \quad (b)$$

(00,01,10,11)

若用晴、阴、云、雨、雾、雪、霜、霾8种状态预报天气，并且假设这8种状态出现的概率相等，即  $P(x) = 1/8$ ，则每种状态的信息量等于：

$$I = \log_2(1/1/8) = 3 \quad (b)$$

(000,001,...,111)

# 对于一个等概率、 $M$ 进制码元：

$$I = \log_2 [1/P(x)] = \log_2 [1/(1/M)]$$

$$= \log_2 M \text{ 比特}$$

若  $M = 2^k$ ，则  $I = k$  比特

15

**Why  $I = \log_a [1/P(x)]$  ?**

1.  $P(x) \downarrow \quad I \uparrow$

2. 总量是单件**独立**消息的信息量之和

$$\begin{aligned} I(x, y) &= \log_a \left( \frac{1}{P(xy)} \right) = \log_a \left( \frac{1}{P(x)P(y)} \right) \\ &= \log_a \left( \frac{1}{P(x)} \right) + \log_a \left( \frac{1}{P(y)} \right) = I(x) + I(y) \end{aligned}$$

16



## 平均信息量: 熵

### 一、熵

用随机变量 $X$ 来描述消息。设 $X$ 是一个离散随机变量，它可以取 $M$ 个可能值 $\{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ ，并且 $X$ 取 $x_i$ 的概率为 $p(x_i)$ ，于是把 $X$ 的**平均不确定性**（熵/平均信息量）定义为

$$H(X) = \sum_{i=1}^M p(x_i) \log_a \frac{1}{p(x_i)}$$

← 加权平均

**H(X)** 的含义: 集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ 中，一个符号包含的平均信息量  
如果把 $x_m$ 看成一个码元的信号， $H(x)$ 表示**平均**一个码元(信号)包含的比特数

当对数的底 $a$ 等于2时，熵的单位为比特（bit），当 $a$ 等于 $e$ 时，熵的单位称为奈特（nat）。

哪个效率高?

二进制序列: 0 0 1 0 1 0 | 0 0 1 0 1 0  
 码元序列:       ↓       ↓       ↓       ↓  
                  1       2               5  
 信号序列:       ~       ~               ~

## 两个例子说明熵定义的合理性

**[例]** 设 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 是三个二元随机变量，它们的概率分布分别为

$$\begin{Bmatrix} X \\ p(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 & x_2 \\ 0.01 & 0.99 \end{Bmatrix}$$

$$H(X) = -0.01 \log 0.01 - 0.99 \log 0.99 \approx 0.08 \text{ bit}$$

$$\begin{Bmatrix} Y \\ p(y) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} y_1 & y_2 \\ 0.4 & 0.6 \end{Bmatrix}$$

$$H(Y) = -0.4 \log 0.4 - 0.6 \log 0.6 \approx 0.97 \text{ bit}$$

$$\begin{Bmatrix} Z \\ p(z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} z_1 & z_2 \\ 0.5 & 0.5 \end{Bmatrix} \quad 0 \quad 1$$

$$H(Z) = -0.5 \log 0.5 - 0.5 \log 0.5 = 1 \text{ bit}$$

不确定性  
信息量



**[例]** 设随机变量  $X$  等可能地取4个值，而  $Y$  等可能地取二个值，即

$$\left\{ \begin{matrix} X \\ p(x) \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \end{matrix} \right\}$$

00 01 10 11

$$H(X) = 4 \cdot \left\{ \frac{-1}{4} \lg \frac{1}{4} \right\} = 2 \text{ bit}$$

实质：**4**进制码元传输，**平均**每个码元包含**2**个比特  
熵 **$H(x)$** 体现**平均信息量**

## 补充：随机事件实例的几种信息量的含义

自信息量：  $I(x_i) = \log \frac{1}{P(x_i)}$  含义：事件 $x_i$ 包含的信息量(**不确定性**)

条件信息量：  $I(x_i | y_j) = \log \frac{1}{P(x_i | y_j)}$  含义：已知 $y_j$ 的条件下，事件 $x_i$ 包含的信息量

互信息量：  $I(x_i; y_j) = I(x_i) - I(x_i | y_j)$   

$$= \log \frac{1}{P(x_i)} - \log \frac{1}{P(x_i | y_j)}$$
  

$$= \log \frac{P(x_i | y_j)}{P(x_i)} = \log \frac{P(y_j | x_i)}{P(y_j)}$$

含义：

- ✓  $I(x_i)$ 接收端在**没有**收到任何发送端的消息前，发送端待发送消息对于接收端的信息量；
- ✓  $I(x_i | y_j)$ 接收端在**收到 $y_j$ 的条件下**，发送端待发送消息 $x_i$ 对于接收端的信息量。(因为 $y_j$ 的接收，使接收端获得发送端 $x_i$ 的部分信息，消除了对 $x_i$ 的部分不确定性)
- ✓  $I(x_i; y_j)$ 用于衡量接收端收到 $y_j$ 后，**得到多少信息量**。

## 补充：几种熵的含义

熵：  $H(X) = E_{x_i}[I(x_i)] = \sum_i P(x_i) \log \frac{1}{P(x_i)}$

含义：每一个事件 $x_i$ **平均**包含的信息量(不确定性)，即：平均信息量

后验熵：  $H(X | y_j) = E_{x_i}[I(x_i | y_j)]$

$$= \sum_i P(x_i | y_j) \log \frac{1}{P(x_i | y_j)}$$

含义：接收端收到 $y_j$ 的条件下，发送端**平均**一个事件 $x_i$ 包含的信息量。因为 $y_j$ 令接收端获得部分信息，所以接收端对发送端所发送内容的不确定性降低了。

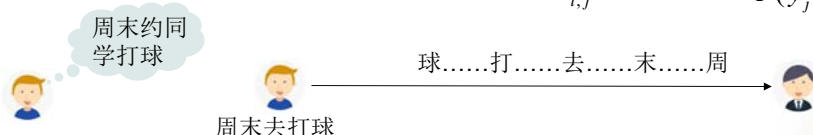
条件熵：  $H(X | Y) = E_{y_j}[H(X | y_j)] = \sum_j P(y_j) H(X | y_j)$

$$= \sum_{i,j} P(x_i y_j) \log \frac{1}{P(x_i | y_j)}$$

含义：接收端收到任意一个消息后，发送端**平均**一个事件 $x_i$ 包含的信息量。

平均互信息：  $I(X, Y) = H(X) - H(X | Y) = \sum_{i,j} P(x_i y_j) \log \frac{P(y_j | x_i)}{P(y_j)}$

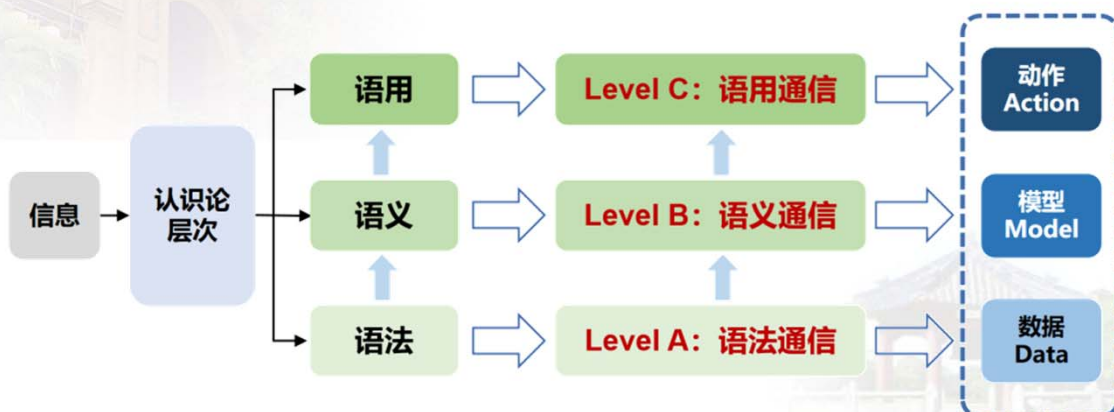
含义：接收端收到任意一个消息后，平均得到的信息量



21

## 补充：语义通信

- 1938年，美国哲学家查尔斯·莫里斯（Charles William Morris）提出了符号论。他指出，符号应该包括了**语法-语义-语用**三元概念。
- 克劳德·香农提出信息论后，和沃伦·韦弗（Warren Weaver）一起对自己的理论和模型进行延展完善。他们合著了一本书，名字仍然叫《通信的数学理论》。
- 他们俩当时就意识到，语义在通信中的重要性。于是，他们提出了通信的3个级别，即Level A/B/C。



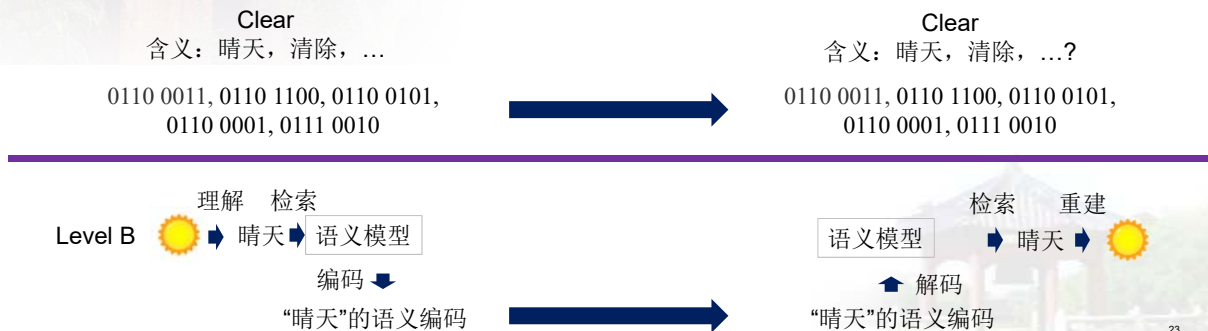
22

## 补充：语义通信

- Level A: 语法通信，解决技术问题，即通信符号如何保证正确传输；
- Level B: 语义通信，解决语义问题，即发送的符号如何传递确切的含义；
- Level C: 语用通信，解决有效性问题，即接收的含义如何以期望的方式影响系统行为。

Level A 存在的问题：

- 符号太多，存在冗余，增加网络通信压力；
- 符号不一定能准确表达发送者意图；

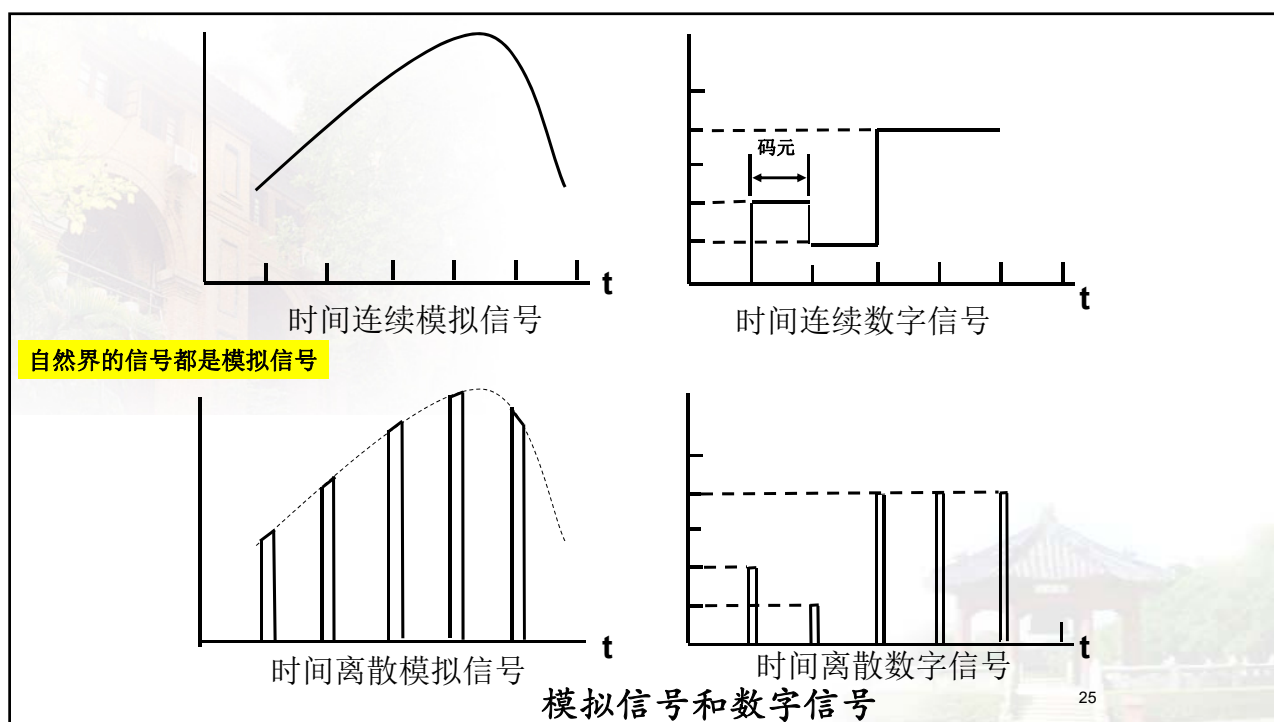


## 1.3 数字通信

### 1.3.1 基本概念

#### ◆ 两类信号

- 模拟信号：取值连续，例如语音
- 数字信号：取值离散，例如数据



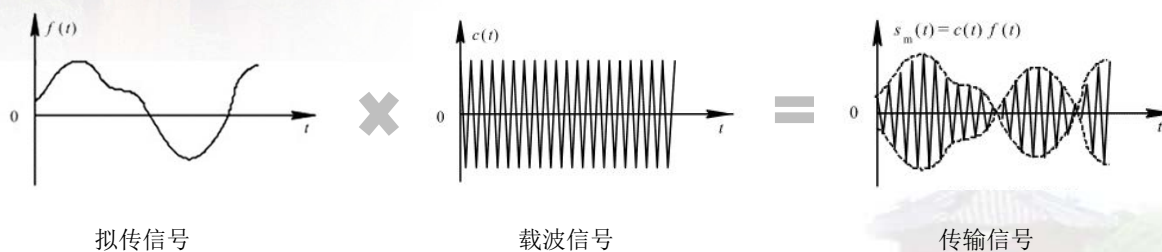
## ◆ 两类通信系统

### ● 模拟通信系统

要求 — 高保真度

准则 — 信号噪声功率（电压）比

手段 — 参量估值方法





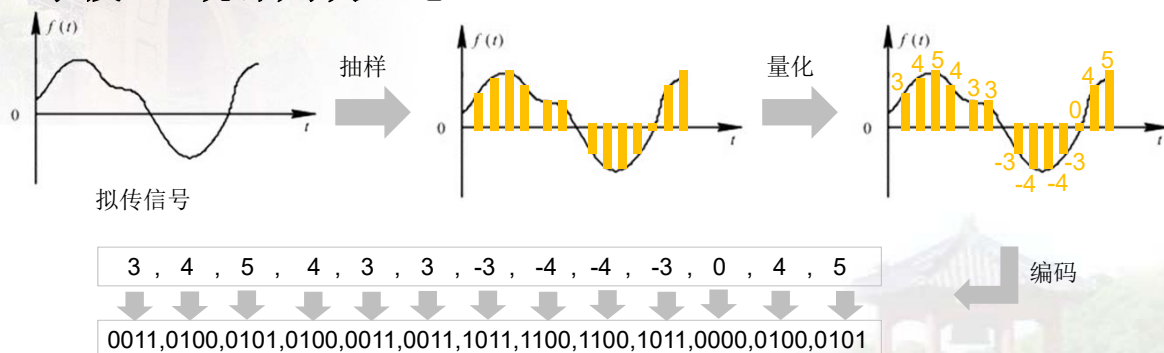
## ◆ 两类通信系统

### • 数字通信系统

要求 — 正确

准则 — 错误率

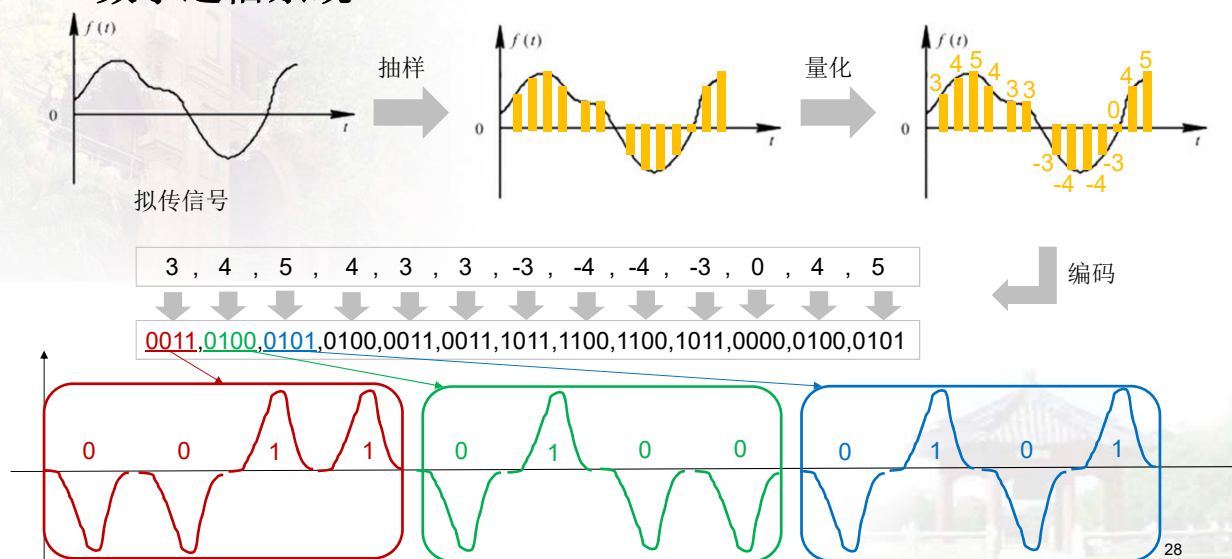
手段 — 统计判决理论



27

## ◆ 两类通信系统

### • 数字通信系统



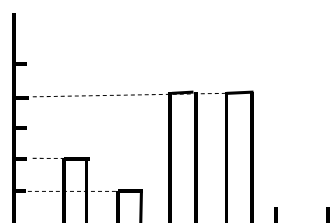
28

### 1.3.2 数字通信的优点

- 取值有限，能正确接收。



(a) 失真的数字信号波形



(b) 中继站整形后的数字信号波形

数字信号波形的失真和恢复

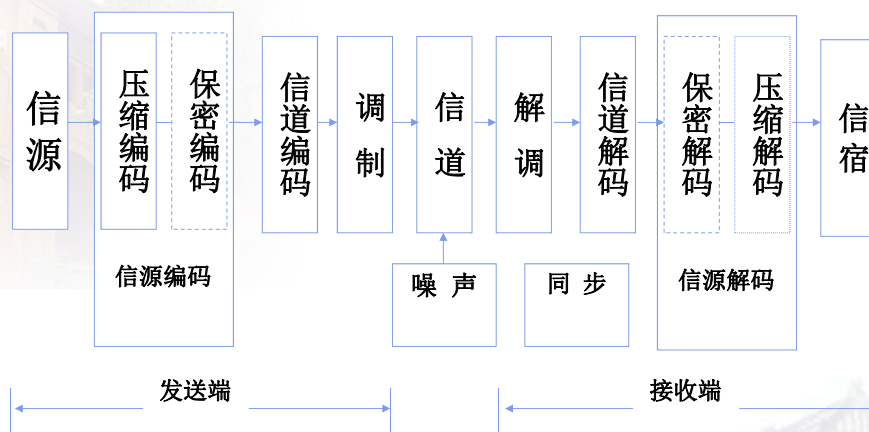
29

### 1.3.2 数字通信的优点

- 可采用**纠错和检错**技术，大大提高抗干扰性。
- 可采用高**保密**性能的数字加密技术。
- 可综合传输**各种模拟和数字输入信号**
- 易于设计、制造，体积小、重量轻。
- 可作信源编码，**压缩**冗余度，提高信道利用率。
- 输出信噪比随带宽按指数规律增长。

30

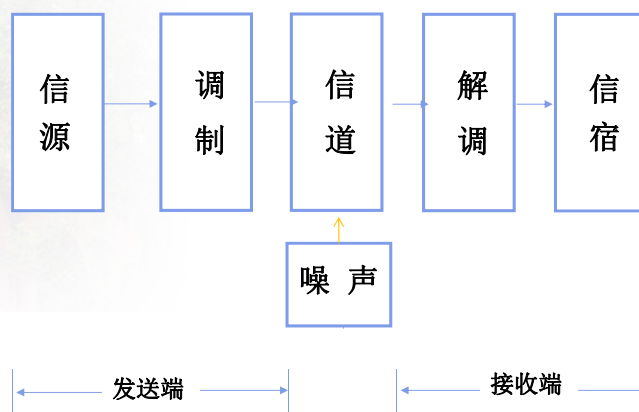
### 1.3.3 数字通信系统模型



数字通信系统模型

31

2024.3.1

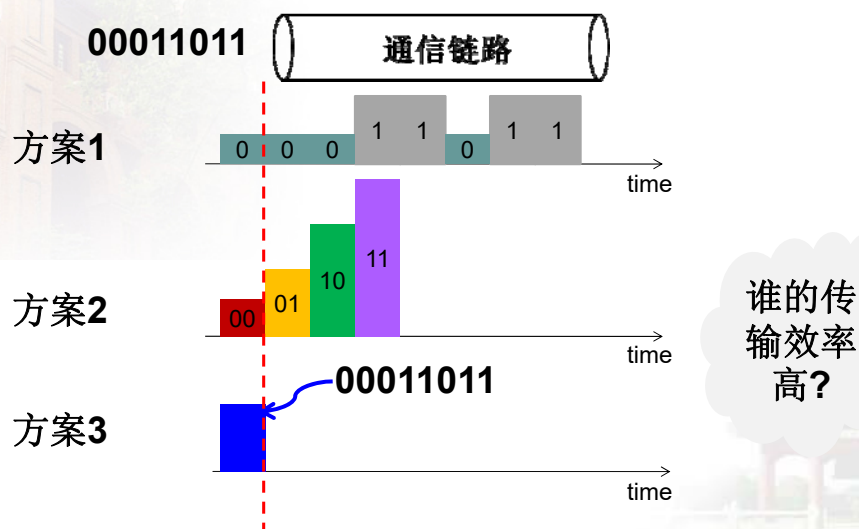


模拟通信系统模型

32

## 关于“信道容量”（C）

- 设：一信道需要传输二进制信息00011011



三个问题:

- (1) 单位时间内最多比特数(比特率);
- (2) 单位时间内最大码元数(波特率);
- (3) 一个码元最多包含的比特数(码元容量).

## “信道容量”（C）

- 定义：信道能**无错误**传送的**最大信息率**。单位是**bit/s**。它代表每秒能传送的最大信息量，或者说小于这个数的信息率**必能**在此信道中**无错误**地传送。
- 定义：一个码元（波形）能够传输的最大平均信息量（每个码元包含的二进制位数）（b/码元）

● 连续信道的信道容量

■ **Shannon公式**: 在信号平均功率受限的**加性高斯白噪声信道**中, 信道容量为:

$$C = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{bit/Baud})$$

或者  $C = \underbrace{2B}_{\text{单位时间内信道能传输的最大码元数目}} \cdot \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{bit/s})$

$$N = Bn_0$$

$n_0$ : 噪声功率谱密度

单位时间内信道能传输的最大码元数目

$$I(x) = \log \frac{1}{P(x)}$$

$$C = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = \log_2 \left( \frac{1}{\sqrt{N/(S+N)}} \right)$$

为什么要开方? 因为  $P = I^2 = U^2$

噪声功率越大, 信息信号被损坏概率越大, 有效信息量越少;

Shannon, Claude Elwood. "A mathematical theory of communication." *The Bell system technical journal* 27.3 (1948): 379-423.  
Shannon C E. Communication in the presence of noise[J]. Proceedings of the IRE, 1949, 37(1): 10-21.

香农公式的意义:  $C = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{bit/Baud})$

- 提高信噪比**S/N**, 信道容量**C**↗;
- 增大带宽**B**, **C**↗, 但不能无限增大**C**;
- 当  $B \rightarrow \infty$  时,  $C = 1.44S / n_0 \quad (\text{bit/s})$
- **C** 一定时, 带宽**B**与信噪比**S/N**可以彼此互换. 这种互换需要通过调制实现.



- 数字信道的信道容量

- **Nyquist准则**：带宽为 $B$  Hz的数字信道,无码间干扰的最高码元传输速率(波特率、符号速率、波形速率) 为 $2B$ 波特。

即：相邻2个码元波形的时间  $\geq \frac{1}{2B}$

- 无干扰的数字信道的信道容量为：

$$C = 2B \log_2 M \text{ (bit / s)}$$

### 【思考题】

- 设信息源由符号0和1组成，顺次选择两符号构成所有可能的消息。如果消息传输速率是每秒1000符号，且两符号出现的概率相等。传输中，平均每100符号中有一个符号不正确，试问这时传输信息的速率是多少？
- 电视图像可以大致认为由300000个小像元组成。对于一般要求的对比度，每一像元大约取10个可辨别的亮度电平（例如对应黑色、深灰色、浅灰色、白色等）。现假设对于任何像元，10个亮度电平是等概率出现的，每秒发送30帧图像；并且，为了满意地重现图像，要求信噪比S/N为1000（即30dB）。在这种条件下，我们来计算传输上述信号所需的带宽。

## 1.3.4 数字通信系统的主要性能指标

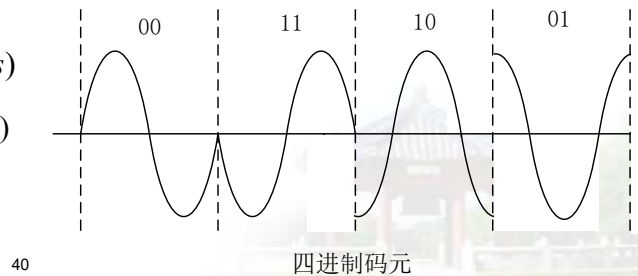
### (1) 传输速率:

- ① 符号速率(码元速率): 每秒传送的符号数目, 用  $R_B$  表示, 单位“波特 (Baud)”。
- ② 比特速率(信息速率): 每秒传送的比特数目, 用  $R_b$  表示, 单位是“比特/秒 (bit/s)”。

若符号是  $M$  进制的, 则每个符号要用  $\log_2 M$  个比特表示它,  
则这个系统的信息速率为

$$R_b = R_B \log_2 M (\text{bit/s})$$

$$R_B = R_b / \log_2 M (\text{波特})$$



### (2) 错误概率:

- ① 误码率或误符号率: 指在所传送的符号总数中错误符号所占的比例, 即

$$P_e = \text{错误符号数目} / \text{总传输符号数目}$$

- ② 误比特率: 指在所传输的总比特数中, 错误比特所占的比例, 即

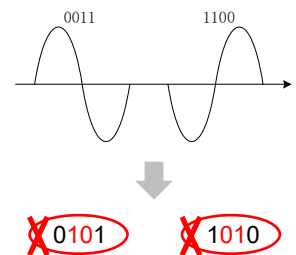
$$P_b = \text{错误比特数目} / \text{总传输比特数目}$$

如果一个符号由  $k$  个比特组成, 若其中有一个比特出错, 则这个符号必然错了, 所以  $P_e \geq P_b$ ; 如果一个符号错了, 则组成它的  $k$  个比特中至少有一个比特错, 所以,  $P_e = 1 - (1 - P_b)^k \leq kP_b$ 。

- ③ 误码字率或者误帧率:

$$P_f = \text{错误码字数 (误帧数)} / \text{总码字数 (总帧数)}$$

□在光纤线路上, 误比特率在  $10^{-9}$  量级。



例如: 共2个码元, 每个码元4个比特, 如果每个码元错了1个比特, 则:  
 $P_e = 1$ ;  $P_b = 2/8$

◆ 误字率  $P_w = \text{错误接收字数} / \text{总传输字数}$

◆ 误码率和误比特率的关系

$$P_b = P_e \times M / [2(M-1)] \approx P_e / 2$$

◆ 误字率和误比特率的关系

对于二进制,

若一个字由  $k$  比特组成, 则

$$P_w = 1 - (1 - P_e)^k$$

(3) **频带利用率**: 每赫兹频带所能支持的信息速率, 用比特/秒/赫作为单位。频带利用率和调制方式与编码方式有关。

(4) **能量利用率**: 为了达到一定的误比特率, 传输每比特所需的信号能量。在通信中用误码率与  $E_b / n_0$  的关系曲线来衡量, 其中  $E_b$  是每比特能量,  $n_0$  为噪声功率谱密度。

42

例题: 一个二进制数字信号一分钟传送了 18000 bit 的信息量,

(1) 其码元速率多大?

(2) 如果每分钟传送的信息量仍为 18000 bit, 但改用8进制数字信号, 其码元速率多大?

解: (1) 
$$R_b = \frac{18000}{60} = 300 \text{ bit} / \text{s}$$
  

$$\therefore R_{B2} = 300 \text{ B}$$

(2) 
$$R_b = 300 \text{ bit} / \text{s} \text{ 不变}$$
  

$$R_{B2} = \frac{R_b}{(\log_2 8)} = 100 \text{ B}$$

43

## 1.4 信 道

### ●信道的定义：连接收发通信设备

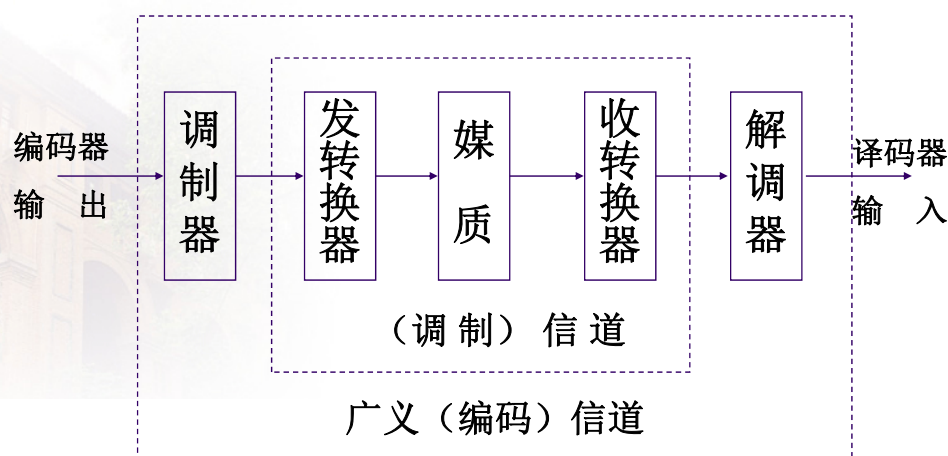
- 通俗地说，是指以传输媒介（质）为基础的信号通路。
- 具体地说，信道是指由有线或无线电路提供的信号通路；
- 抽象地说，信道是指指定的一段频带，它让信号通过，同时又给信号以限制和损害。

### ●信道的分类：无线信道、有线信道

### ●信道中的干扰：

- 有源干扰 --- 噪声
- 无源干扰 --- 信道特性不良引起

44



- **狭义信道**：仅指信号**传输媒介**的信道。可以分为：**有线信道和无线信道**
- **广义信道**：它不仅包含传输媒介（狭义信道），而且包含有关转换器。可以分为：**调制信道和编码信道**

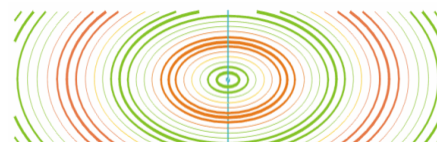
45

### 1.4.1 无线信道

#### ■无线电通信的起源

- ◆麦克斯韦（预言），赫兹（证实）
- ◆频率越低，接收天线越大：**1000Hz**，天线**30KM**

#### ■电磁波的传播：



#### ■电磁波发射对波长的要求

- ◆通信用电磁波频率高
- 频段（波长）划分：**1-300GHz**称为微波

46

- 电磁波的传输没有国界,需要国际合作保持良好的电磁环境

#### ■国际组织: ITU

#### ■国内: 无线电管理局

- 根据通信距离，频率和位置，电磁波传播可以分为视线传播，地波，天波



频段（波长）划分

频率范围 (kHz)	名 称	典型应用
3 – 30 (10-100 km)	甚低频(VLF)	远程导航、水下通信 声纳、授时
30 – 300 (1-10 km)	低频(LF)	导航、水下通信 无线电信标
300 – 3000	中频(MF) (100-1000m)	广播、海事通信、 测向、遇险求救、 海岸警卫

48

频段（波长）划分

频率范围 (MHz)	名 称	典型应用
3 – 30 (10-100m)	高频(HF)	远程广播、电报、电话、飞机 与船只间通信、船一岸通信、业余无线电
30 – 300 (米波)	甚高频(VHF)	电视、调频广播、陆地交通、 空中交通管制、出租汽车、 警察、导航、飞机通信
300 – 3000	特高频(UHF) (分米波)	电视、蜂窝网、微波链路、 无线电探空仪、导航、卫星 通信、GPS、监视雷达、无线电高度计

49

频段（波长）划分

频率范围 (GHz)	名 称	典型应用
3 – 30 象	超高频(HF) (厘米波)	卫星通信、无线电高度计、 微波链路、机载雷达、气 雷 达、公用陆地移动通信
30 – 300	极高频(VHF) (毫米波)	铁路业务、雷达着陆系统、 实验用
300 – 3000	亚毫米波 (0.1 – 1 mm)	实验用

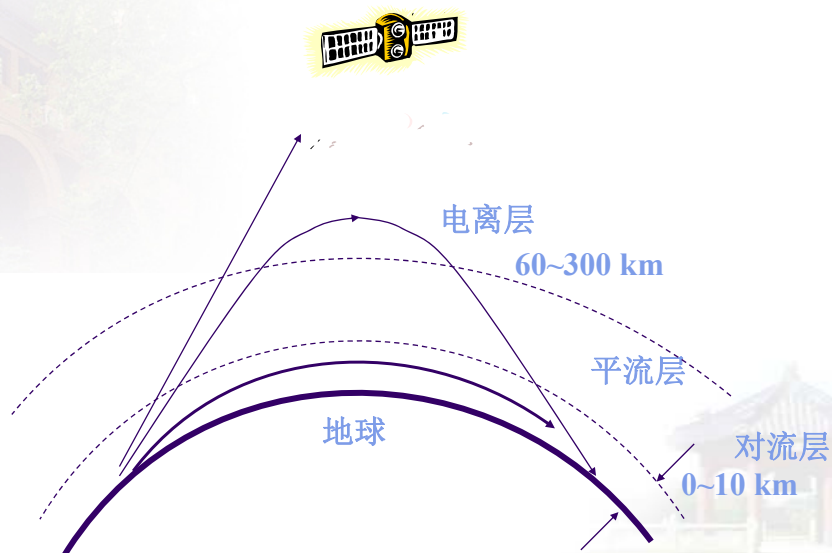
50

频段（波长）划分

频率范围 (THz)	名 称	典型应用
43 – 430	红外线 (7 – 0.7 μm)	光通信系统
430 – 750	可见光 (0.7 – 0.4 μm)	光通信系统
750 – 3000	紫外线 (0.4 – 0.1 μm)	光通信系统

注：kHz = 10<sup>3</sup> Hz,      MHz = 10<sup>6</sup> Hz,      GHz = 10<sup>9</sup> Hz,  
THz = 10<sup>12</sup> Hz,      mm = 10<sup>-3</sup> m,      μm = 10<sup>-6</sup> m

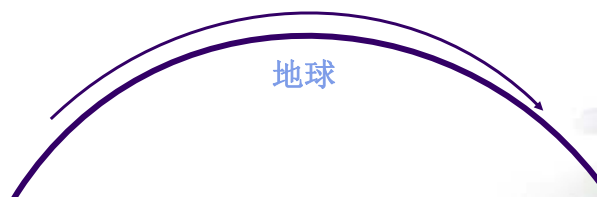
## 电磁波传播：地波、天波、视线传播



52

## 地 波

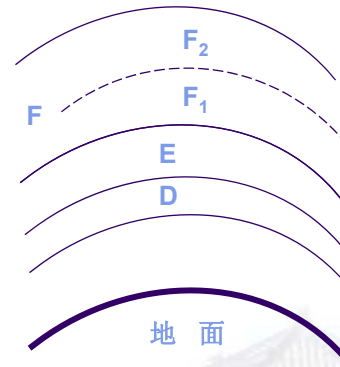
- 频率：2MHz 以下
- 绕射：发生在波长~障碍物尺寸可比时
- 通信距离：可达数百~数千 km
  - 中频广播信号都以这种方式传播。



53

## 电离层的结构

- D层：高60 ~ 80 km
- E层：高100 ~ 120 km
- F层：高150 ~ 400 km
  - ◆ F<sub>1</sub>层：140 ~ 200 km
  - ◆ F<sub>2</sub>层：250 ~ 400 km
- 晚上：D层、F<sub>1</sub>层消失  
E层、F<sub>2</sub>层减弱



54

## 天 波

- 电离层高度：60 ~ 300 km
- 单跳最大距离：4000 km
- 多跳可以环球
- 频率：2 ~ 30 MHz
  - ◆ 远程广播和电报电话都可以利用天波传播。

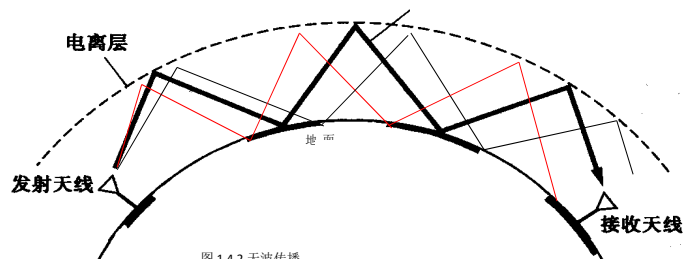
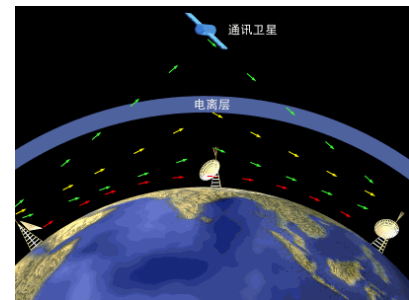


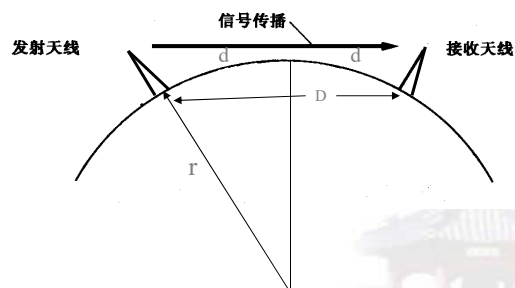
图 1.4.2 天波传播

## 视线传播

- 频率:  $> 30 \text{ MHz}$
- 传播距离:  $d^2 + r^2 = (h+r)^2 \Rightarrow d = \sqrt{h^2 + 2rh}$

$$h \approx D^2/50 \text{ (m)}$$

式中  $D$  — km



56

## 无线电中继

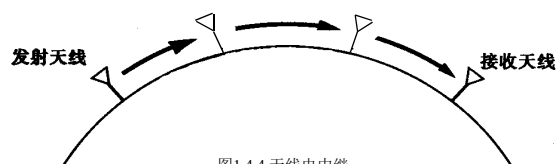
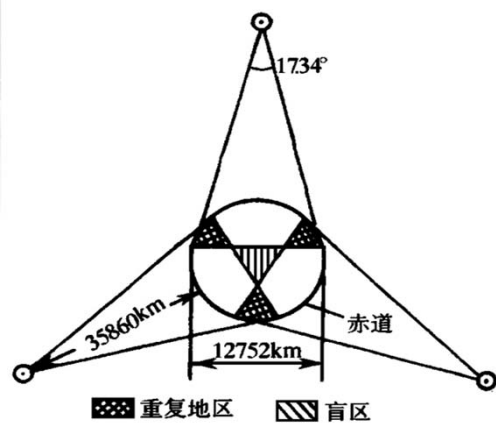


图1.4.4 无线电中继

57



## 静止卫星中继通信



58

## 平流层中继通信

- HAPS(High Altitude Platform Station)



59

## 大气对电磁波传播的影响

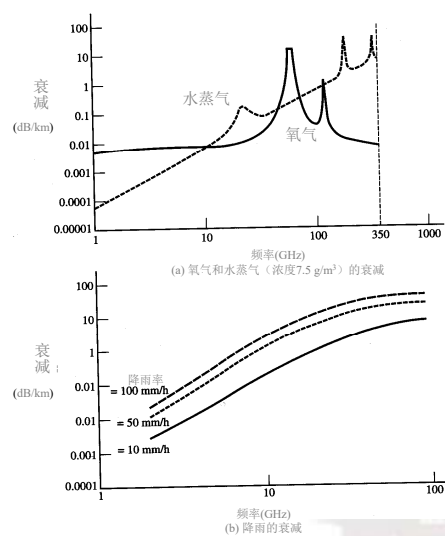


图1.4.5 大气衰减

60

## 散射通信

- 电离层散射
  - 频率: 30 ~ 60 MHz
- 对流层散射
  - 频率: 100 ~ 4000 MHz
- 流星余迹散射
  - 频率: 30 ~ 100 MHz

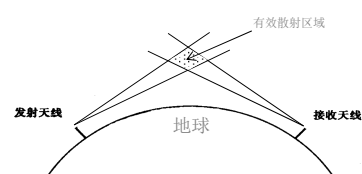


图1.4.6 对流层散射通信

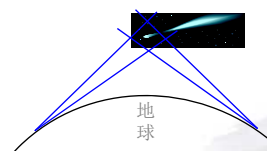
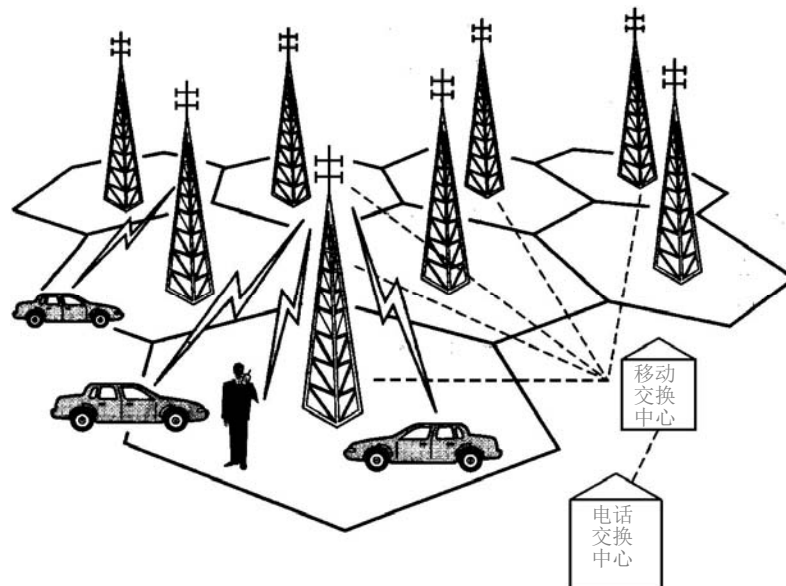


图1.4.7 流星余迹散射通信

61

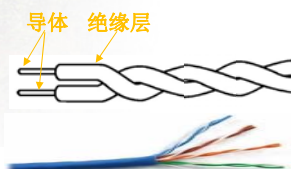
## 蜂窝网



## 1.4.2 有线信道

■ **明线:**右图为19世纪80年代纽约市百老汇大街上架设的明线，可见大约有350条线。

■ **对称电缆:**



■ **同轴电缆**

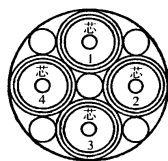
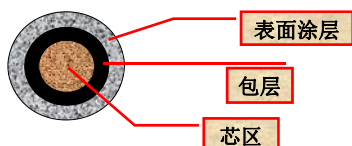
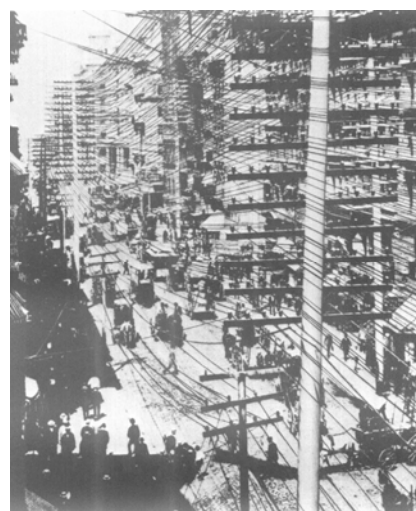


图1.4.8 同轴电缆截面示意图



有线电信道电气特性

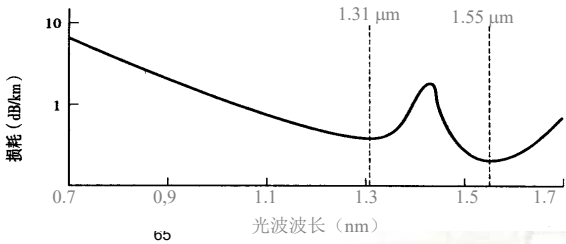
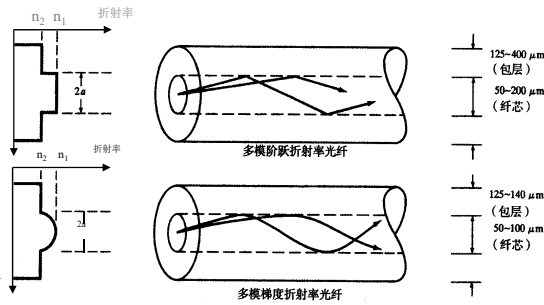
信道类型	通话容量（路）	频率范围(kHz)	传输距离(km)
明线	1+3	0.3~27	300
明线	1+3+12	0.3~150	120
对称电缆	24	12~108	35
对称电缆	60	12~252	12~18
小同轴电缆	300	60~1 300	8
小同轴电缆	960	60~4 100	4
中同轴电缆	1 800	300~9 000	6
中同轴电缆	2 700	300~12 000	4.5
中同轴电缆	10 800	300~60 000	1.5

64

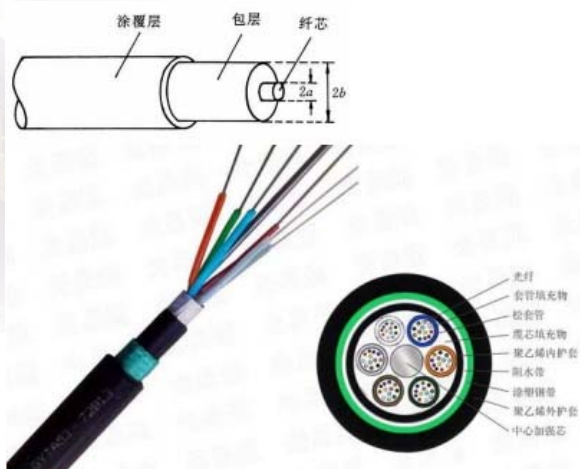
■ 光纤

◆ 结构

◆ 损耗



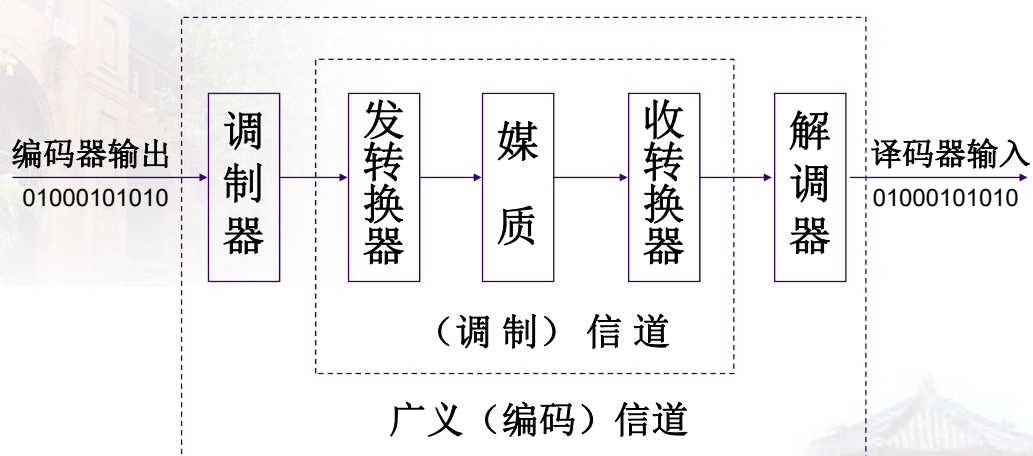
- 实用的光纤在包层外还有一层涂覆层，用于保护，并且把多根光纤组成一根光缆。



- 目前长距离传输，光纤几乎完全取代了明线和各种电缆。

66

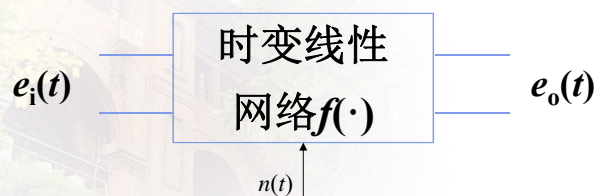
### 1.4.3 信道模型



67



- 调制信道模型: 对于单“端对”信道



$$e_o(t) = f[e_i(t)] + n(t), \text{ 其中:}$$

$e_i(t)$  — 输入的已调信号;  
 $e_o(t)$  — 输出信号;  
 $n(t)$  — 加性噪声, 它与 $e_i(t)$ 相互独立。  
 $f[e_i(t)]$  — 与输入有关的一个函数, 表示信道对信号的影响。

- 除了只有一对输入端和一对输出端的信道外。还有更复杂的信道, 见二维码1.5A。

68

通常,  $f[e_i(t)]$  可以表示为:  $k(t) e_i(t)$ ,

此时,  $e_o(t) = k(t) e_i(t) + n(t)$

其中:  $k(t)$ 表示时变线性网络的特性, 称为**乘性干扰**。 $k(t)$ 是一个复杂的函数, 反映信道的衰减、线性失真、非线性失真、延迟 ... 等。

最简单情况:  $k(t) = \text{常数}$ , 表示衰减。

当 $k(t) = \text{常数}$ , 称为恒(定)参(量)信道  
例如, 同轴电缆

当 $k(t) \neq \text{常数}$ , 称为随(机)参(量)信道  
例如, 移动蜂窝网通信信道

69

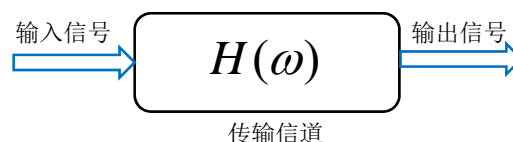


## 恒参信道一般特性

- 恒参信道传输特性可等效为**线性时不变网络**。
- 线性时不变网络可用**幅频特性** $|H(\omega)|$ 和**相频特性** $\varphi(\omega)$  来表征, 即:

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

例如: 电缆, 光纤, 微波, ...



含义:

- $H(\omega)$ : 信道对于频率为 $\omega$ 的信号响应/传输情况;
- $|H(\omega)|$ : 信道对于频率为 $\omega$ 的信号幅度上的衰减作用;
- $\varphi(\omega)$ : 信道对频率为 $\omega$ 的信号在相位上的影响。

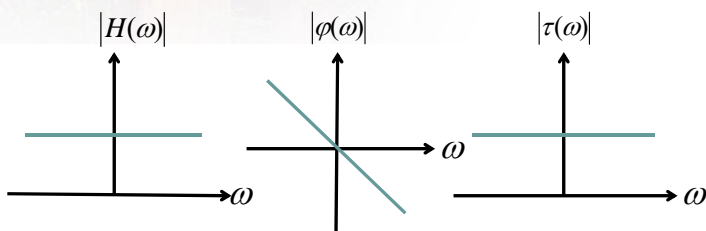
$$A \sin(\omega t + \varphi)$$

70

## 理想恒参信道

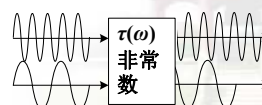
$$\begin{cases} |H(\omega)| = k = \text{常数} \\ \varphi(\omega) = \omega t_d \text{ 或} \\ \tau(\omega) = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = \frac{d(\omega t_d)}{d\omega} = t_d = \text{常数} \end{cases}$$

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



群时延 $\tau(\omega)$ 的含义:

- $\varphi(\omega)$ 是信道对频率为 $\omega$ 的信号在相位上的影响。
- 相位体现了信道对信号的时延作用;
- 如果 $d\varphi(\omega)/d\omega$ 是常数, 代表信道对不同频率的信号的相位影响是一样的, 也就是, 信号经过信道传输不会产生畸变;
- 如果 $d\varphi(\omega)/d\omega$ 不是常数, 代表信道对不同频率的信号的相位影响是不同的(有快有慢), 所以信号传输后会畸变。



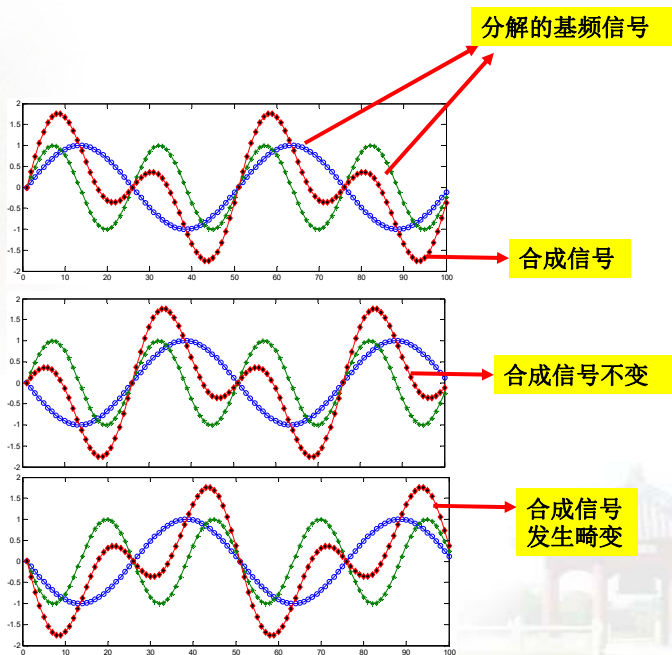
71

## 相频失真理解

输入信号由基波  
和二次波合成

基波延迟 $\pi$ 、二  
次波延迟 $2\pi$ 后  
的合成信号

基波延迟 $\pi$ 、二  
次波延迟 $3\pi$ 后  
的合成信号



72

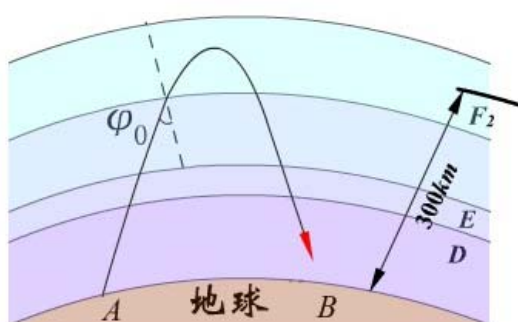
## 2.4 随参信道及其对信号的影响

- 典型随参信道
- 随参信道特点
- 随参信道对信号影响

73

## 一.典型随参信道

### 短波电离层反射信道



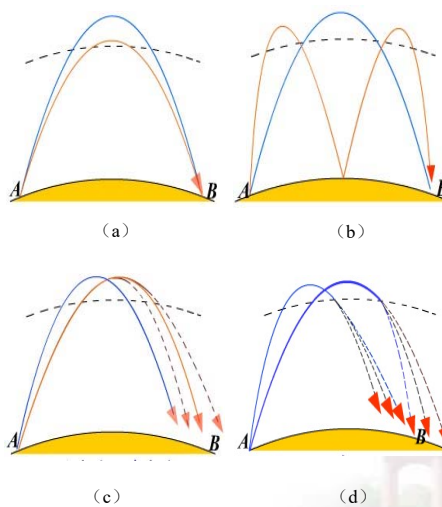
最主要的特征是多径传播

74

## 多径传播的形式

- (1) 电离层反射区高度不同；
- (2) 电波从电离层的一次反射和多次反射；
- (3) 地球磁场引起的电磁波束分裂成寻常波与非寻常波；
- (4) 电离层不均匀引起的漫射现象。

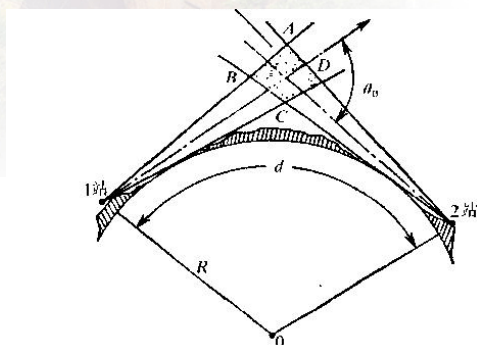
多径传播造成信号到达  
时间不同, 相位不同, 导  
致合成信号出现畸变



75

## 一.典型随参信道

### 对流层散射信道

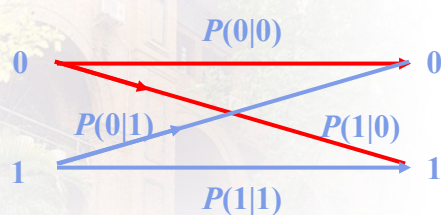


## 二.随参信道特点

- 信号的衰耗随时间随机变化
- 信号传输的时延随时间随机变化
- 多径传播

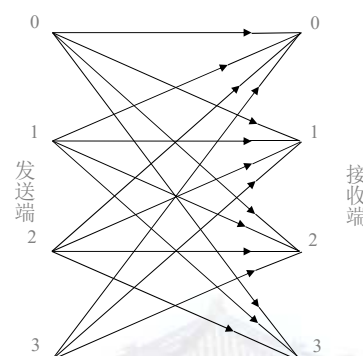
### •编码信道模型:

- 二进制信号、无记忆信道,



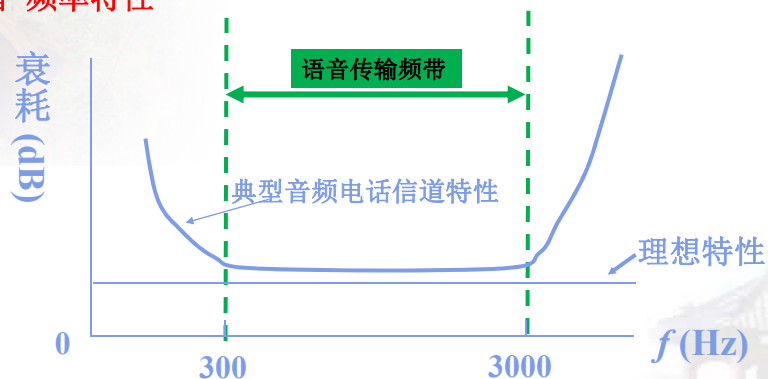
其中,  $P(0|0)$ ,  $P(1|1)$  — 正确转移概率  
 $P(0|1)$ ,  $P(1|0)$  — 错误转移概率  
 转移概率 — 决定于编码信道的特性  
 $P(0|0) = 1 - P(1|0)$   
 $P(1|1) = 1 - P(0|1)$

### ◆四进制



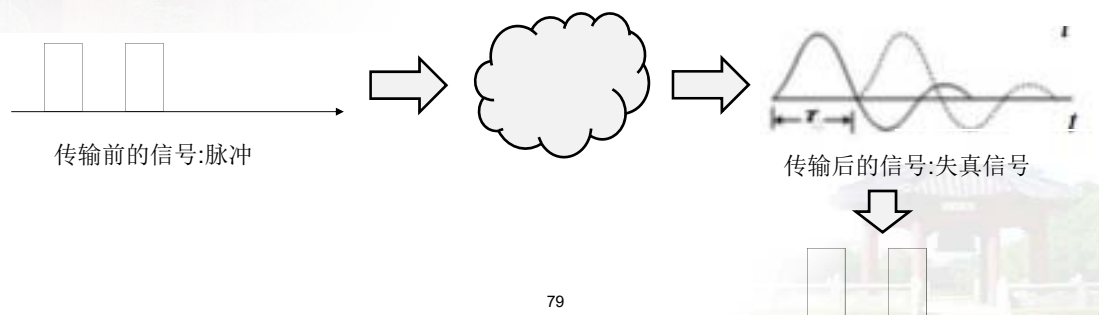
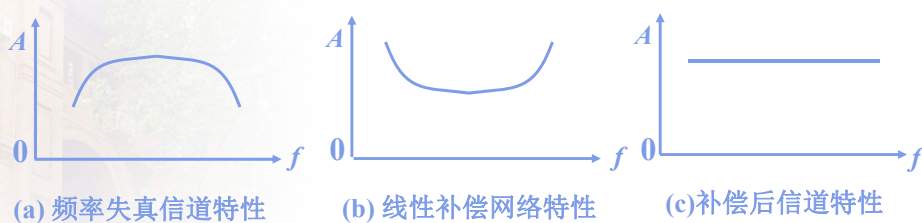
### 1.4.4 信道特性对信号传输的影响

- 恒参信道：~ 非时变线性网络
- ◆ 链路：一段物理线路，中间没有任何交换设备。
- ◆ 振幅~频率特性



78

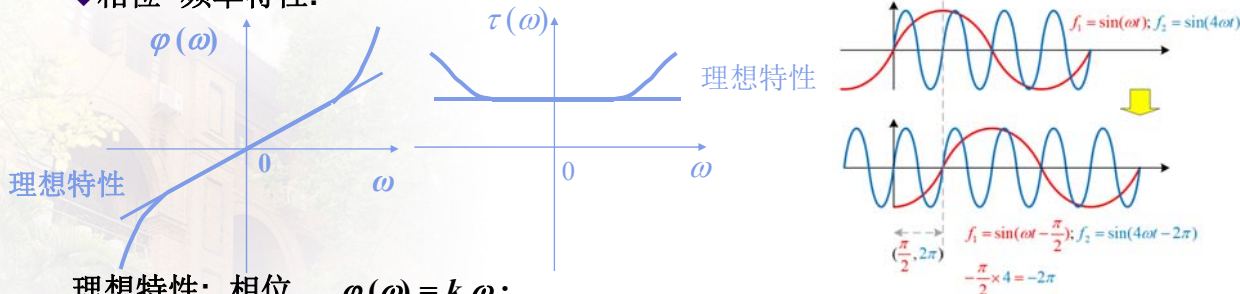
#### ➤ 频率失真的补偿



79

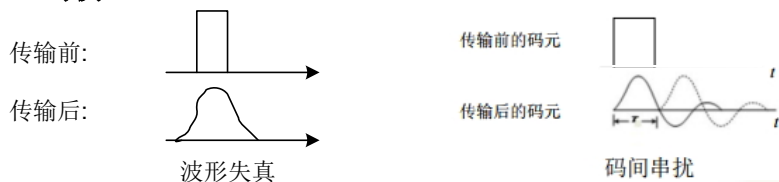


## ◆相位~频率特性:



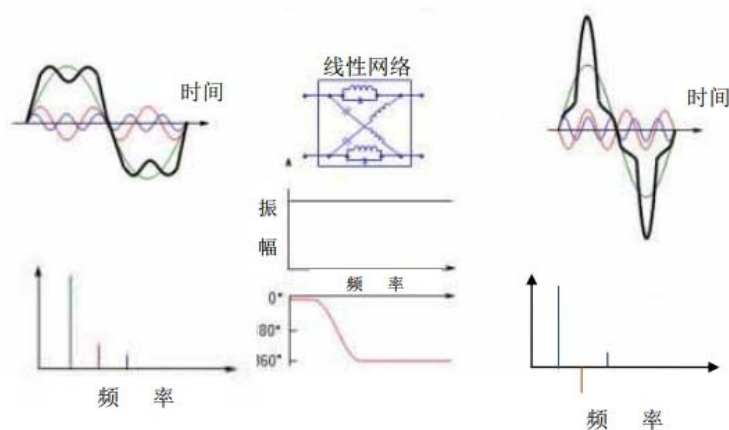
畸变的影响: 波形失真 (相位失真)、码间串扰。

## ◆线性失真: 频率失真和相位失真: 属于线性失真可用“线性补偿网络”纠正——“均衡”



## 相位-频率特性对传输信号的影响

$$f(t) = \sin(\omega t) + 1/3 \sin(3\omega t) + 1/5 \sin(5\omega t)$$



在上图中, 线性网络的输入信号包含 3 个正弦波: 基波 (绿色)、3 次谐波 (棕色) 和 5 次谐波 (蓝色)。它经过此线性网络传输后, 基波产生  $0^\circ$  相移, 3 次谐波产生  $180^\circ$  相移, 5 次谐波产生  $360^\circ$  相移, 因此, 输出波形产生了严重波形失真。



◆非线性失真:

振幅特性非线性、频率偏移、相位抖动 ...

非线性失真 — 难以消除

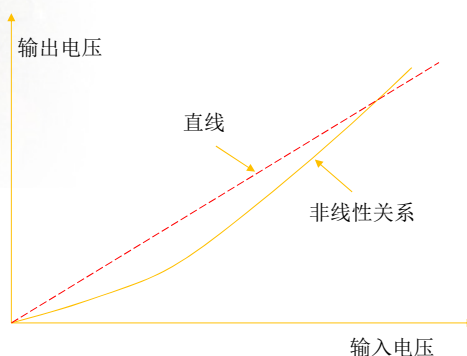


图1.4.13 非线性特性

82

■变参信道:

◆变参信道的共性 — 衰落: 衰减随机变化

传输时延: 随机变化

多径效应: 快衰落

◆接收信号的特性:

设发送单频信号为  $A\cos(\omega_0 t)$ , 则经过  $n$  条路径传播后的接收信号  $R(t)$  可以表示为:

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

式中  $r_i(t)$  — 第  $i$  条路径的接收信号振幅;

$\tau_i(t)$  — 第  $i$  条路径的传输时延

$$\phi_i(t) = -\omega_0 \tau_i(t)$$

$$R(t) = \underbrace{\sum_{i=1}^n r_i(t) \cos \phi_i(t)}_{X_c(t)} \cos \omega_0 t - \underbrace{\sum_{i=1}^n r_i(t) \sin \phi_i(t)}_{X_s(t)} \sin \omega_0 t$$

83

$$R(t) = X_c(t) \cos \omega_0 t - X_s(t) \sin \omega_0 t = V(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$$

式中  $V(t)$  — 合成波  $R(t)$  的包络; [多径衰落]

$\varphi(t)$  — 合成波  $R(t)$  的相位。

即有 
$$V(t) = \sqrt{X_c^2(t) + X_s^2(t)}$$

$$\varphi(t) = \arctan \frac{X_s(t)}{X_c(t)}$$

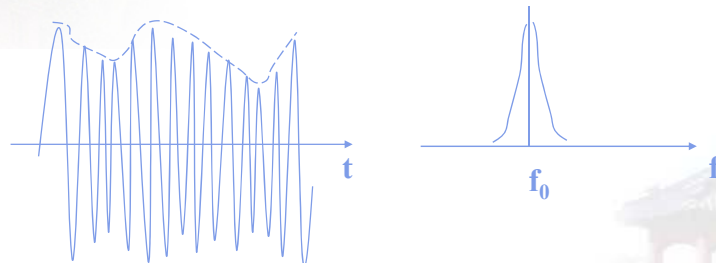
由于, 相对于  $\omega$  而言,  $r_i(t)$  和  $\phi_i(t)$  变化缓慢, 故  $X_c(t)$ ,  $X_s(t)$  及  $V(t)$ ,  $\varphi(t)$  也是缓慢变化的。所以,  $R(t)$  可以视为一个窄带信号 (随机过程)。

$$R(t) = \underbrace{\sum_{i=1}^n r_i(t) \cos \phi_i(t) \cos \omega_0 t}_{X_c(t)} - \underbrace{\sum_{i=1}^n r_i(t) \sin \phi_i(t) \sin \omega_0 t}_{X_s(t)}$$

由右式可见,  $R(t) = V(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] = V(t) \cos[(\omega_0 + \varphi'(t))t]$

原发送信号  $A \cos(\omega_0 t)$ , 经过传输后:

- \* 恒定振幅  $A$ , 变成慢变振幅  $V(t)$ ;
- \* 恒定相位  $0$ , 变成慢变相位  $\varphi(t)$ ;
- \* 因而, 频谱由单一频率变成窄带频谱。(原因: 多个路径到达信号的合成)



### ◆频率选择性衰落

设：只有两条多径传播路径，且**衰减相同，时延不同**；

发射信号为 $f(t)$ ，接收信号为 $af(t - \tau_0)$ 和 $af(t - \tau_0 - \tau)$ ；

发射信号的频谱为 $F(\omega)$ 。

则有

$$f(t) \Leftrightarrow F(\omega)$$

$$af(t - \tau_0) \Leftrightarrow a F(\omega) e^{-j\omega\tau_0}$$

$$af(t - \tau_0 - \tau) \Leftrightarrow a F(\omega) e^{-j\omega(\tau_0 + \tau)}$$

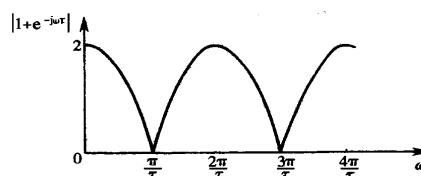
$$af(t - \tau_0) + af(t - \tau_0 - \tau) \Leftrightarrow a F(\omega) e^{-j\omega\tau_0} (1 + e^{-j\omega\tau})$$

$$\therefore H(\omega) = a F(\omega) e^{-j\omega\tau_0} (1 + e^{-j\omega\tau}) / F(\omega) = a e^{-j\omega\tau_0} (1 + e^{-j\omega\tau})$$

$$|1 + e^{-j\omega\tau}| = |1 + \cos\omega\tau - j\sin\omega\tau| = [(1 + \cos\omega\tau)^2 + \sin^2\omega\tau]^{1/2}$$

$$= 2|\cos(\omega\tau/2)|$$

接收信号的幅度  
衰减与频率 $\omega$ 有关



多径信道的传输衰减与信号频率有关(选择性衰减)

### ◆三类信号：

\*确知信号

\*随相信号

\*起伏信号

86

## 1.5 信道中的噪声

### ■按照来源分类：

◆人为噪声：电火花、家用电器...

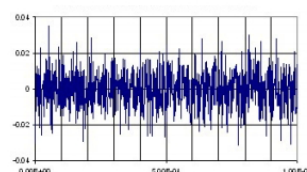
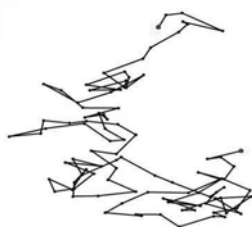
◆自然噪声：闪电、大气噪声、热噪声...

### ■按照性质分类：

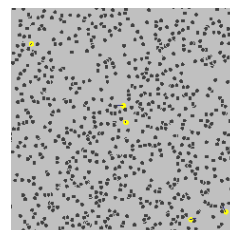
◆脉冲噪声

◆窄带噪声

◆起伏噪声



随机热噪声波形



### ■今后讨论通信系统时主要涉及：

白噪声 — 热噪声是一种典型白噪声。

# 谢谢

Q & A



Email: [xieyi5@mail.sysu.edu.cn](mailto:xieyi5@mail.sysu.edu.cn)  
<https://cse.sysu.edu.cn/content/2462>