

现代通信原理

Modern Communication
Principles





张莹

电信学院信通系

办公室：西一楼456

邮箱：yzhang627@mail.xjtu.edu.cn

电话：18092940735

使用教材

罗新民、薛少丽、田琛编

现代通信原理(第2版)，高等教育出版社，2008.6

参考书目

[1] 曹志刚主编，通信原理与应用（基础理论部分和系统案例部分），高等教育出版社，2015

[2] L.W.Couch II. 数字与模拟通信系统. 罗新民，任品毅，译. 电子工业出版社，2013.

[3] 樊昌信，曹丽娜. 通信原理（第7版），国防工业出版社，2012.

“现代通信原理”课程简介

学 分： 3

课 时： 48

课程性质： 信息工程**主干专业基础**课程

课程目的： 使学生掌握现代通信系统基本理论和基本技术。

课程内容： 以现代通信系统为背景、以通信系统模型为主线，讲述通信系统的基本原理、基本技术和系统性能的分析方法。

先 修 课： 信号与系统、概率论

考试通过率： 80%~100%

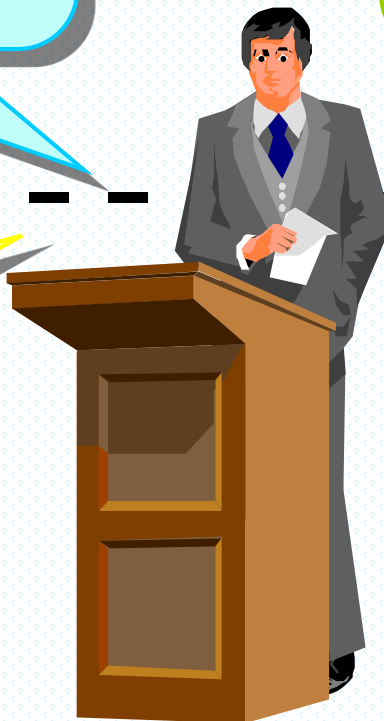
课程内容

- 第一章: 绪论
- 第二章: 确定信号分析
- 第三章: 随机信号和噪声分析

- 第四章: 信号设计导论
- 第五章: 幅度调制系统
- 第六章: 角度调制系统

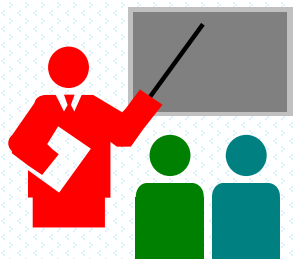
- 第七章: 信源编码
- 第八章: 数字信号基带传输系统

- 第九章: 数字载波传输系统
- 第十章: 差错控制编码



第一章

绪论



绪论

- 通信技术的发展与展望
- 信息、信息量与信道容量
- 通信系统模型
- 通信系统主要性能指标

1.1 通信技术的发展 and 展望

- 从历史上看，通信的发展可分为两个大的阶段：
 - 1) 依赖人力实现的信息交流——人类文明的建立和发展
 - 2) 以电磁波和光为媒介的信息交流——现代科技的发展

1) 依赖人力实现的信息交流 (2000年以前)

- 信息的抽象与描述——语言、文字、数制、符号（鼓语、手语、八卦）
- 技术手段——指南针、造纸术、印刷术
- 人工远距离接力通信——烽火狼烟、邮车驿马、飞鸽传信、马拉松

1.1 通信技术的发展 and 展望

2) 以电磁波和光为媒介的信息交流 (2000年以来)

• 基础理论的发展:

- 电的发现与使用(1800) —— 电流产生磁场(1820)、电磁感应(1831)、莫尔斯电报(1838)、电话(1876)
- 麦克斯韦方程(1864) —— 赫兹的电磁波辐射实验(1887)、粉末检波器(1894)、马可尼无线电报(1896)、调谐电话(1900)
- 采样定理(1928) —— 数字化处理的理论基础
- 信息论(1948)

• 硬件电路的发展:

- 电子二极管(1904)、真空管(1906)、晶体管 (1947) —— 有源可控器件小型化 —— 集成电路 (1958)
- 布尔(1815-1864)代数 —— 逻辑电路 —— 冯·诺依曼计算机(1945)

1.1 通信技术的发展 and 展望

- 各种通信技术与应用：
 - 调幅(1918)调频(1933)广播——超外差接收机(1936)
 - 扫描成像电视(1929)——电视广播BBC(1933)
 - 雷达系统(船用防撞雷达1903、无线探测目标1937)
 - 交换技术与PSTN服务(人工1878、自动1891、程控1965)
 - 人造卫星 (1957)——电视广播(1962)、通信卫星(1958、1965)、遥测、侦察、气象监测、全球导航(1978)
 - 光纤技术(1966)——信道带宽巨大扩展
 - 蜂窝通信(1964、1G1979、2G1987、3G2001、4G2010)——个人通信
 - IP网络(1968、TCP/IP提出1974、实施1983、html1991)——全球互联

1.1 通信技术的发展 and 展望

- 未来发展的趋势

- 个人通信的最终目标（5W）——Whoever, Whenever, Wherever, Whomever, Whatever

- 传输速率（带宽）
- 传输效率（频谱、功率等）
- 覆盖（组网结构、发射功率等因素）

- 设备的便携性、多样性，功能性设备的融合

- 应用多样化

1.2 信息、信息量与信道容量

1.2.1 消息、信号及信息

1.2.2 信息量

1.2.3 平均信息量

1.2.4 香农信道容量公式



1.2.1 消息、信号及信息

消息(message)

通信系统传输的对象，具有不同形式和内容。

如：气象中的温度、天气的变化，语音，
图像画面，文字及计算机数据等。

消息是对事件的物理状态变化进行描述的一种具体形式，具有人们能感知的物理特性。

1.2.1 消息、信号及信息

消息由信源产生。

消息分为两大类：连续消息、离散消息

连续消息

物理特性随时间连续变化，如语音、图像。

离散消息

物理特性随时间离散变化，如文字、数据等。

消息不能直接传输，为传输消息，应把消息通过不同的传感器转换为电压或电流信号。

1.2.1 消息、信号及信息

信号 (*signal*)

信号是由消息转换来的可以被传输和处理的
具体形式，是消息的运载工具。

电信号 随某参数（通常为 t ）变化的电量

光信号

电磁波信号（声波）

1.2.1 消息、信号及信息

信息(*information*)

信息是消息或信号随机变化中的“不确定性”，是消息中包含的本质内容。

确定的消息中不含有信息。

信息的主要特征：抽象的、具有依附性、可共享和传播

信息量(*information content*)：信息的度量。

1.2.2 信息量

(1) 信息量 I 是概率 $P(x)$ 的函数。

(2) $P(x)$ 越小, I 越大; 反之, I 越小。

$P(x) = 1$, I 为零; $P(x) = 0$, I 为无穷大。

(3) 若干个互相独立事件构成的消息, 所含信息量等于各独立事件信息量之和。—— 信息具有可加性。

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

即: 消息包含的信息量为消息出现概率的倒数的对数。

1.2.2 信息量

信息量单位：

$a=2$ 时，信息量单位为比特 (*bit---binary unit*) ；

$a=e$ 时，信息量的单位为奈特 (*nat ---nature unit*) ；

$a=10$ 时，信息量的单位为哈特莱 (*Hartley or decit*) 。

- 用不同的符号标记不同的事件发生
- 标记某一事件发生所需的平均二进制符号位数就是其信息量（比特）。

1.2.3 平均信息量

一般地说，离散信源产生多个独立的消息（符号），每个消息发生的概率不同，故包含的信息量也不相同。这时通常考虑信源的统计平均信息量（信源的平均信息量或信源熵）。

$$\left[\begin{array}{cccccc} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n \\ p(x_1) & p(x_2) & p(x_3) & \dots & p(x_n) \end{array} \right]$$

描述离散信源的方法 --- 概率场

$$\sum_i p(x_i) = 1 \quad (\text{完备性})$$

1.2.3 平均信息量

单个独立离散消息的信息量为

$$I_{x_i} = \log_2 \frac{1}{p(x_i)} = -\log_2 p(x_i)$$

独立等概时平均信息量

若有 M 个独立等概出现的消息，每个消息出现的概率为 $1/M$ ，则消息的信息量为

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{P} \right) = \log_2 1 / \frac{1}{M} = \log_2 M$$

$M=2$ 时，每个消息出现的概率为 $1/2$ ，则消息的信息量为

$$I = \log_2 1 / \frac{1}{2} = \log_2 2 = 1 \text{ bit}$$

1.2.3 平均信息量

若有 M 个独立等概的消息之一要传送，且满足 $M = 2^k$ 时，此消息可用 k 个二进制（符号、脉冲）传递，即此消息包含的信息量为 k 比特。

$$I = \log_2 M = \log_2 2^k = k \quad \text{比特}$$

1.2.3 平均信息量

独立不等概时平均信息量

$$p(x_1) \neq p(x_2) \neq \dots \neq p(x_n) \quad \sum_i p(x_i) = 1$$

平均信息量(信源熵 *Entropy*)由每个消息的信息量按概率加权求和得到

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad \text{bit/符号}$$

1.2.3 平均信息量

例1.1: 某信源的符号集由A、B、C、D和E组成, 设每一个符号独立出现, 出现的概率分别为1/2、1/4、1/8、1/16和1/16。试求该信源的平均信息量。

解: 信源的平均信息量, 即信源熵, 为

$$\begin{aligned} H(x) &= -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= -\left[\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} + 2 \times \frac{1}{16} \log_2 \frac{1}{16} \right] \\ &= 1.875 \text{ 比特/符号} \end{aligned}$$

1.2.3 平均信息量

独立且等概时平均信息量

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n$$

结论：信源符号独立等概出现时的平均信息量最大。

连续信源的平均信息量

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

条件平均信息量

当信源各符号出现不独立（统计相关）时，必须用条件概率来计算信源的平均信息量，称为条件平均信息量，前一符号为 x_i ，后一符号为 x_j 的条件平均信息量为：

$$\begin{aligned} H(x_j | x_i) &= \sum_{i=1}^n P(x_i) \sum_{j=1}^n \left[-P(x_j | x_i) \log_2 P(x_j | x_i) \right] \\ &= - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[P(x_i) P(x_j | x_i) \log_2 P(x_j | x_i) \right] \end{aligned}$$

其中： $P(x_j | x_i)$ 为前一符号为 x_i ，后一符号为 x_j 的条件概率

1.2.3 平均信息量

例1.2 某离散信源由A、B两种符号组成，其转移概率矩阵为

$$\begin{bmatrix} P(A|A) & P(A|B) \\ P(B|A) & P(B|B) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 \\ 0.2 & 0.9 \end{bmatrix}$$

已知 $P(A)=1/4$ ， $P(B)=3/4$ ，试求该信源的平均信息量。

1.2.3 平均信息量

解：由条件平均信息量计算式可得

$$\begin{aligned} H(x_j | x_i) &= -\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left[P(x_i) P(x_j | x_i) \log_2 P(x_j | x_i) \right] \\ &= -P(A) \left[P(A|A) \log_2 P(A|A) + P(B|A) \log_2 P(B|A) \right] \\ &\quad -P(B) \left[P(A|B) \log_2 P(A|B) + P(B|B) \log_2 P(B|B) \right] \\ &= 0.532 \text{ 比特/符号} \end{aligned}$$

1.2.3 平均信息量

当A、B两个符号独立出现时，信源的平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= -\sum_{i=1}^2 P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= -\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{3}{4} \log_2 \frac{3}{4} \\ &= 0.81 \text{ 比特/符号} \end{aligned}$$

结论：符号间统计独立时的信源熵大于符号间统计相关时的信源熵。

1.2.4 香农信道容量公式

信道容量：信道所能传输的最大信息速率，用 C 表示。

$$C = \max R$$

对（离散）无扰信道： $R = rH(x)$

其中： r 为信源每秒发送的符号个数。

$H(x)$ 为信源平均信息量。

对有扰信道： $H_R(x) = H(x) - H(x|y)$

$$C = \max R = \max \left\{ r \left[H(x) - H(x|y) \right] \right\}$$

1.2.4 香农信道容量公式

对连续信道：

$$C = B \log_2 (1 + S/N)$$

-----香农 (Shannon) 公式

其中： S/N 为加性高斯白噪声 (AWGN: Additive White Gaussian Noise) 信道中的信噪比。

B 为信道带宽。

$$N = n_0 B$$

1.2.4 香农信道容量公式

香农 (shannon) 公式的意义:

$$(1) \quad S/N \uparrow \rightarrow C \uparrow \quad B \uparrow \rightarrow C \uparrow$$

$$(2) \quad S/N \rightarrow \infty, C \rightarrow \infty$$

$$(3) \quad \lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{S}{n_0} \log_2 e = 1.44 \frac{S}{n_0}$$

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

$$\lim_{x \rightarrow \infty} x \log_2 \left(1 + \frac{1}{x} \right) = \log_2 e = 1.44$$

1.2.4 香农信道容量公式

香农 (Shannon) 公式的意义 (续) :

(4) C 一定时, B 与 S/N 可互换。

这为扩频通信奠定了理论基础。

(5) 若信源速率 $R \leq C$, 则理论上可实现无差错传输。

若 $R > C$, 则理论上不可实现无差错传输。

理想系统: 实现了极限信息传输速度, 且能做到任意小差错率的通信系统。

1.2.4 香农信道容量公式

例1.3 设一幅彩色图片由 3×10^6 个象素组成，每个象素有16个亮度等级，并假设每个亮度等级等概率出现。现将该幅彩色图片在一信噪比为30dB的信道中传输，要求3分钟传完，试计算所需的信道带宽。

解： 由于每个像素等概率出现16个亮度等级，故每个像素包含

的信息量为： $I_i = \log_2 16 = 4 \text{ bit}$

一幅彩色图片包含的总信息量为： $I = 3 \times 10^6 \times \log_2 16 = 1.2 \times 10^7 \text{ bit}$

要求3分钟传完该图片，故信道的信息传送速率为：

$$R = (1.2 \times 10^7) / (3 \times 60) \approx 6.67 \times 10^4 \text{ bit / s}$$

1.2.4 香农信道容量公式

因为信息传输速率 R 必须小于或等于信道容量 C ，取

$$C = R = 6.67 \times 10^4 \text{ bit/s}$$

又知信道中的信噪比为 30dB ，即 $S/N = 1000$ ，所以由香农公式，得到所需的信道带宽为

$$B = C / \log_2(1 + S/N) = (6.67 \times 10^4) / \log_2(1 + 1000) \approx 6.67 \times 10^3 \text{ Hz}$$

1.3 通信系统模型

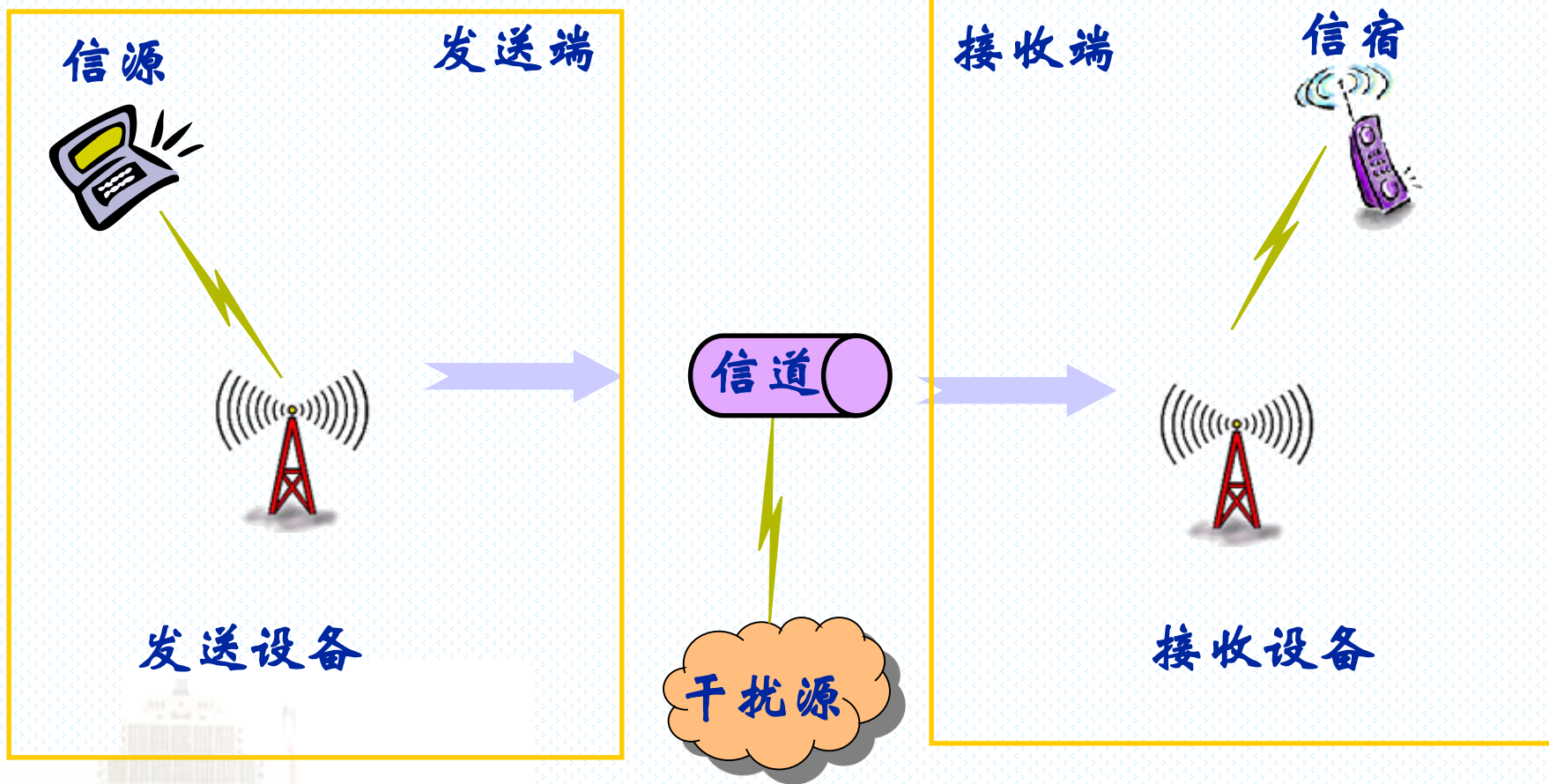
1.3.1 通信系统一般模型

1.3.2 通信系统分类

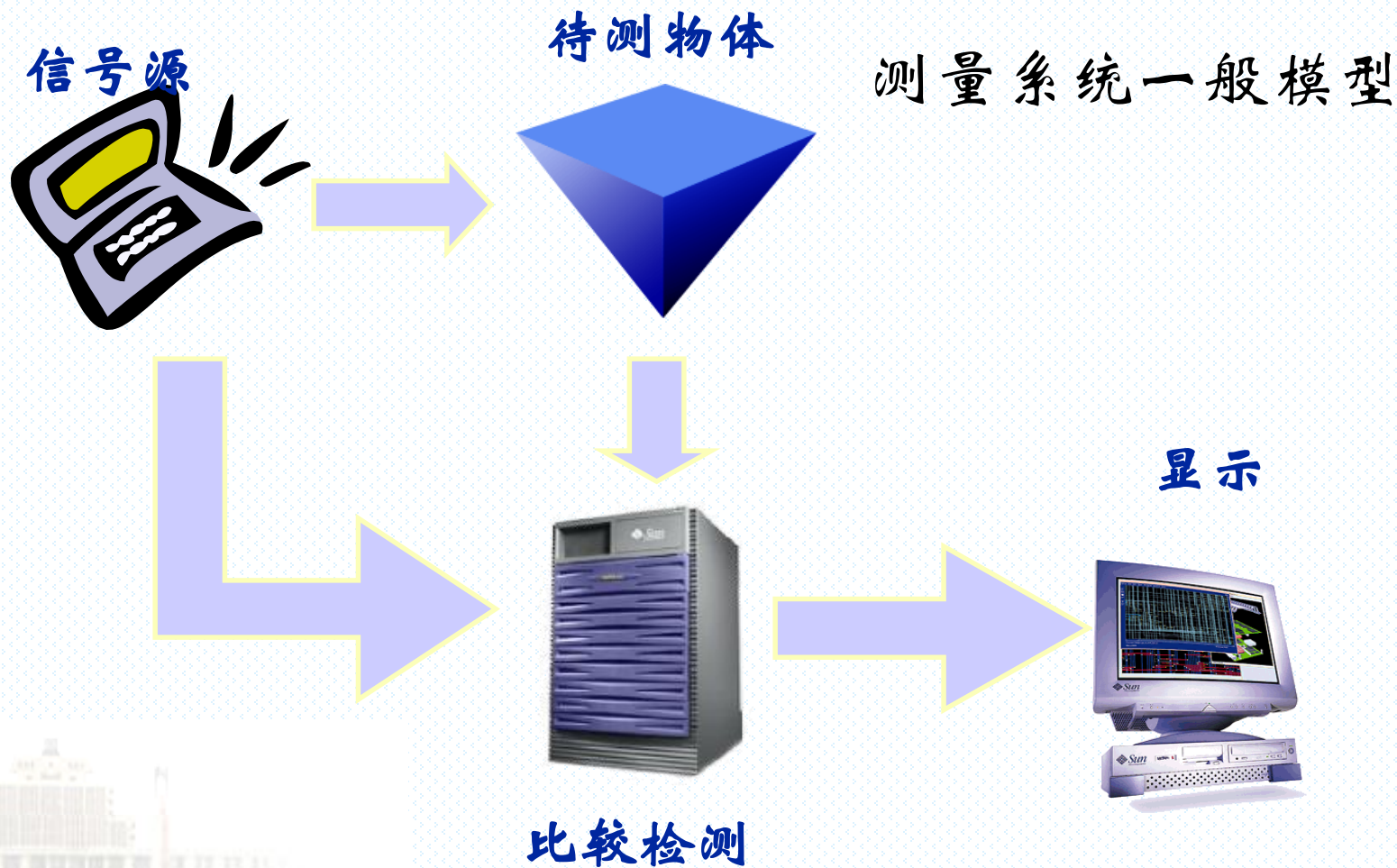
1.3.3 模拟通信系统与数字通信系统



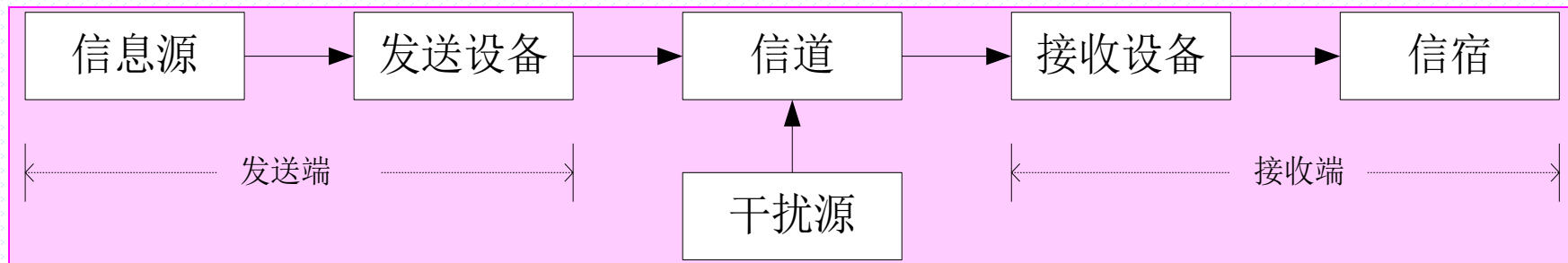
1.3.1 通信系统一般模型



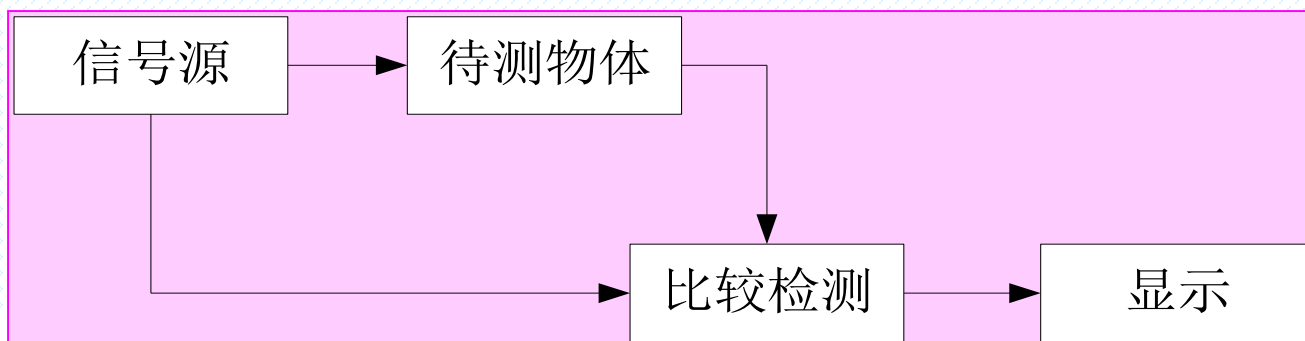
1.3.1 通信系统一般模型



1.3.1 通信系统一般模型



通信系统一般模型



测量系统一般模型

1.3.1 通信系统一般模型

信息源

简称**信源**，发出消息的人或设备，同时具有把原始的消息转换为电信号(基带信号)的功能，即完成非电量到电量的变换。

发送设备

把信源输出的信号转换为适合于信道传输的信号形式。包括对信号的放大、频谱变换等过程。

信道

传输信号的媒质。可以是有线的，也可以是无线的。

1.3.1 通信系统一般模型

干扰源

通信系统的各个环节，都不可避免地会受到噪声(干扰)的影响。为分析方便，将各种噪声对信号的影响集中表示在信道中。

接收设备

完成和发送设备相反的逆变换功能。它包括解调器、解码器等。

信宿

信息到达的目的地，完成电量到非电量的变换。

由于信源和信宿位于通信系统的两个端头，故又称为终端设备。

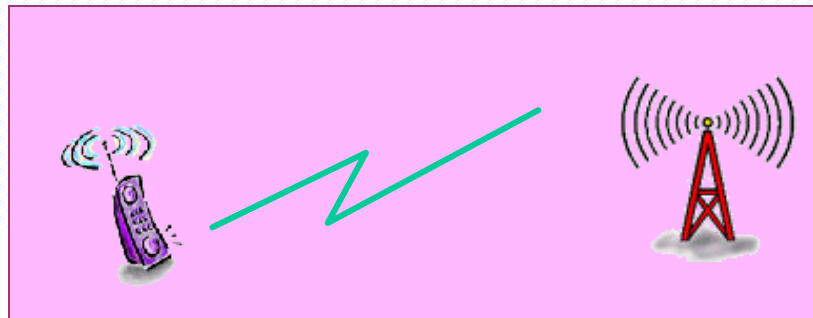
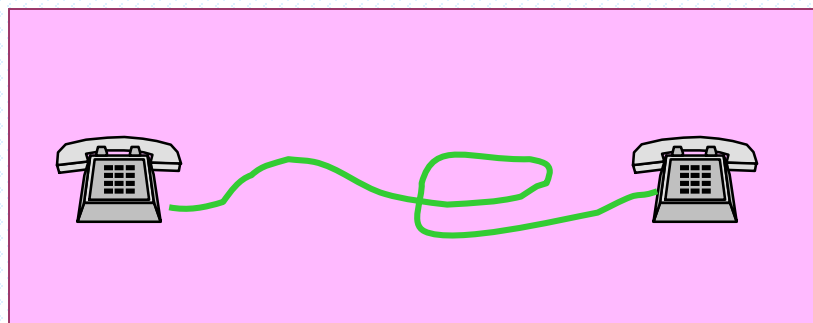
1.3.1 通信系统一般模型

通信频段划分及应用

名称	符号	频率范围	波长	应用
特低频	ELF	30~300Hz	$10^4 \sim 10^3 \text{km}$	海底通信、电报
音频	VF	0.3~3kHz	$10^3 \sim 10^2 \text{km}$	数据终端、有线通信
甚低频	VLF	3~30kHz	$10^2 \sim 10 \text{km}$	导航、电话、电报、时标
低频	LF	30~300kHz	10~1km	导航、电力线通信、信标
中频	MF	0.3~3MHz	$10^3 \sim 10^2 \text{m}$	广播、业余无线电、移动通信
高频	HF	3~30MHz	$10^2 \sim 10 \text{m}$	国际定点通信、军用通信、广播、业余无线电
甚高频	VHF	30~300MHz	10~1m	电视、调频广播、移动通信、导航、空中管制
特高频	UHF	0.3~3 GHz	$10^2 \sim 10 \text{cm}$	电视、雷达、遥控遥测、点对点通信、移动通信
超高频	SHF	3~30GHz	10~1cm	卫星和空间通信、微波接力、雷达
极高频	EHF	30~300GHz	10~1mm	射电天文、雷达、微波接力
紫外、 红外、 可见光		$10^5 \sim 10^7 \text{GHz}$	$3 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-5} \text{mm}$	光通信

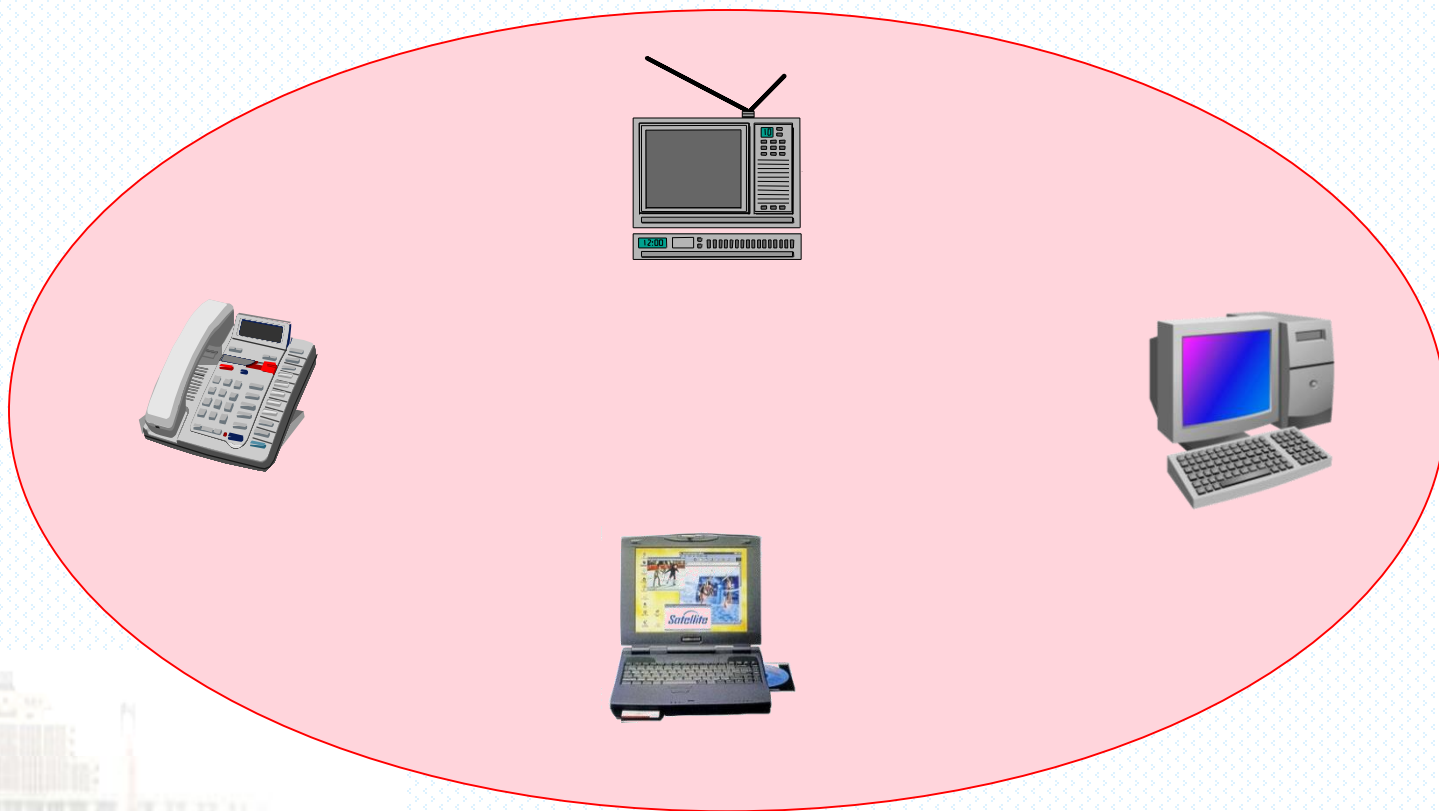
1.3.2 通信系统分类

按消息的传输媒质划分：有线、无线



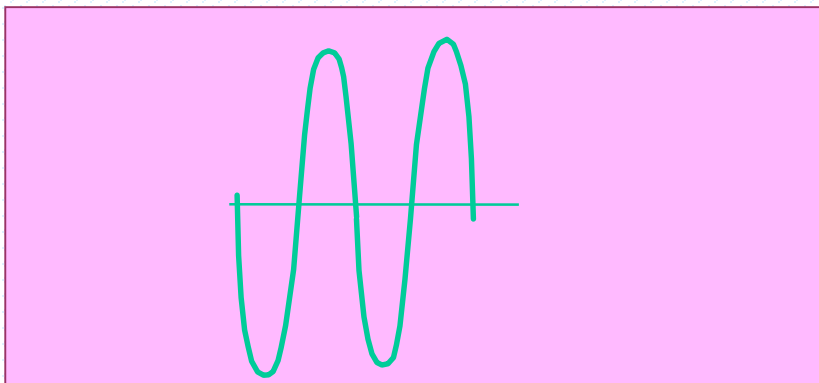
1.3.2 通信系统分类

按消息和信号的特点划分：电话、电报、图像、数据

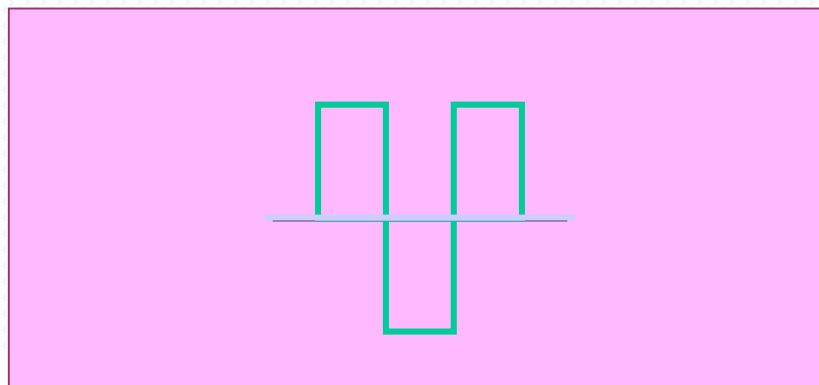


1.3.2 通信系统分类

按传输信号的特征划分：模拟通信系统、数字通信系统

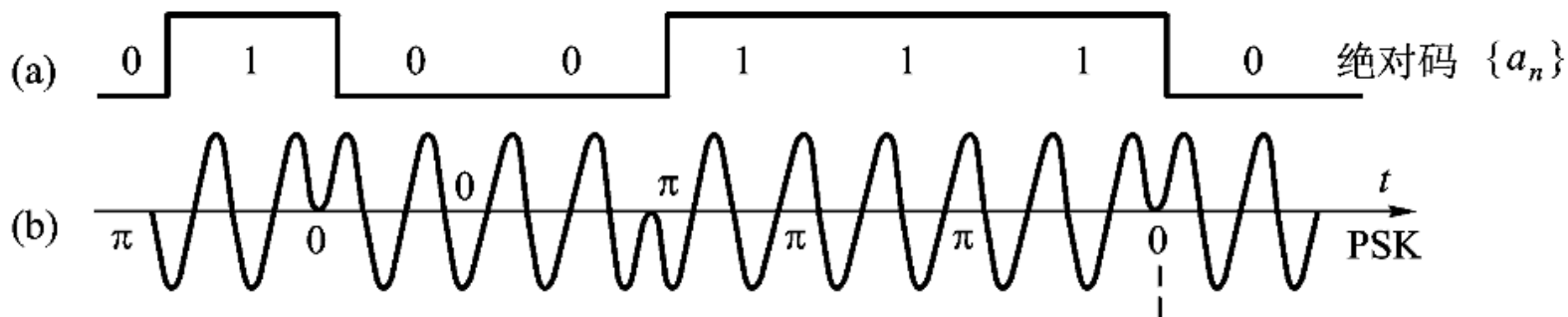
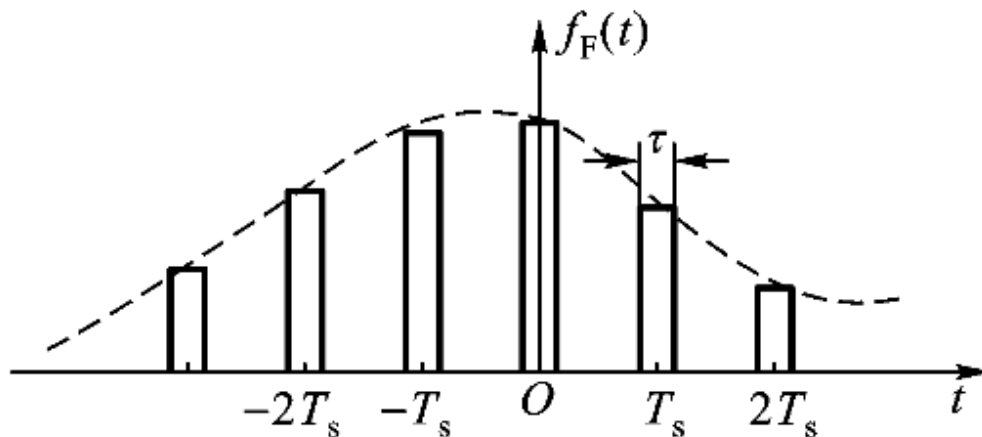


模拟信号：
参数取值连续变化的信号。
如：语音信号、图像信号。



数字信号：
参数取值离散变化的信号。
如：计算机输出信号、
PCM编码信号等。

1.3.2 通信系统分类



1.3.2 通信系统分类

模拟信号与数字信号的区别:

模拟信号的幅度取值连续且有无穷个状态。

数字信号的幅度取值离散且为有限个值。

注意:

模拟信号的取值在时间上不一定都连续, 如PAM信号;

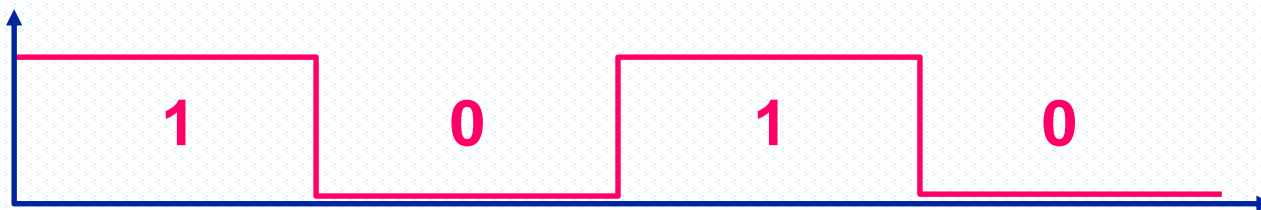
数字信号的取值在时间上不一定都离散, 如FSK信号。

结论: 模拟信号与数字信号的主要区别在于信号的**取值状态**是否有限, 而不在于信号的取值随时间变化是否连续。

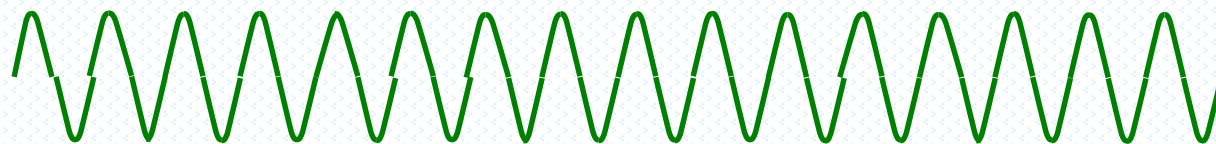
1.3.2 通信系统分类

按调制方式划分：调幅、调频、调相

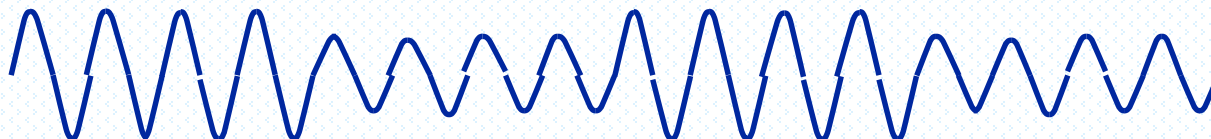
Data to be transmitted:
Digital Input



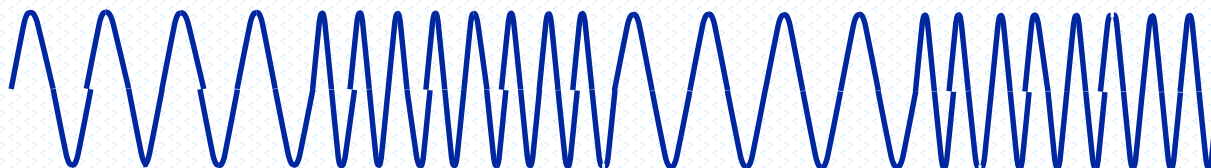
Basic steady wave



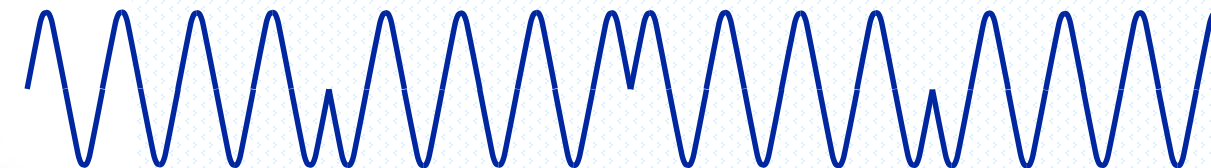
Amplitude Shift Keying



Frequency Shift Keying



Phase Shift Keying



1.3.2 通信系统分类

按消息的传送方式划分：单工、半双工、双工

单工系统：消息只能单方向传送

如广播、电视。

半双工系统：消息能双方向传送，但不能同时进行

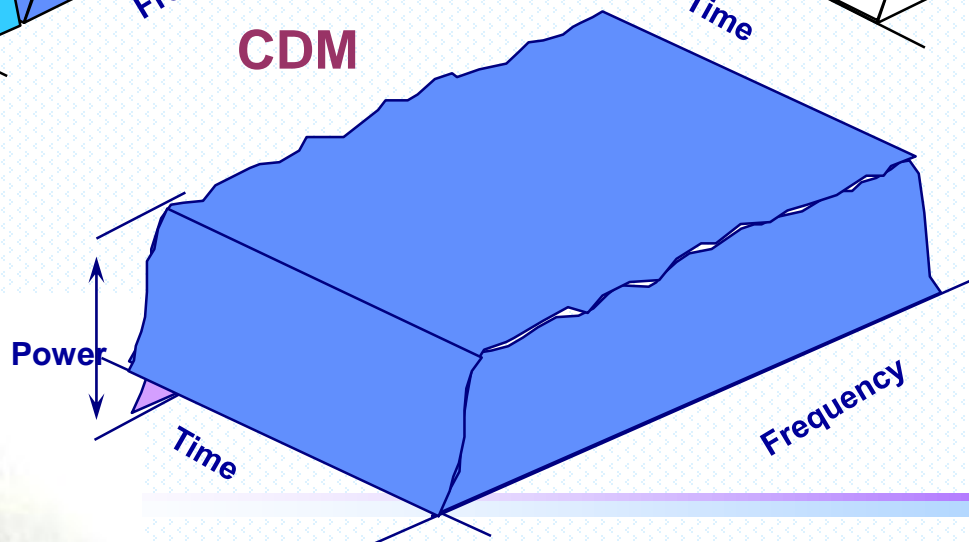
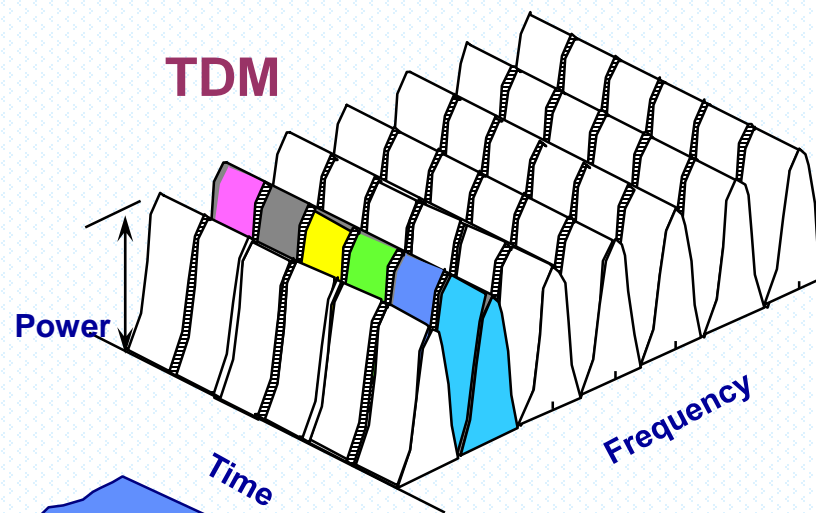
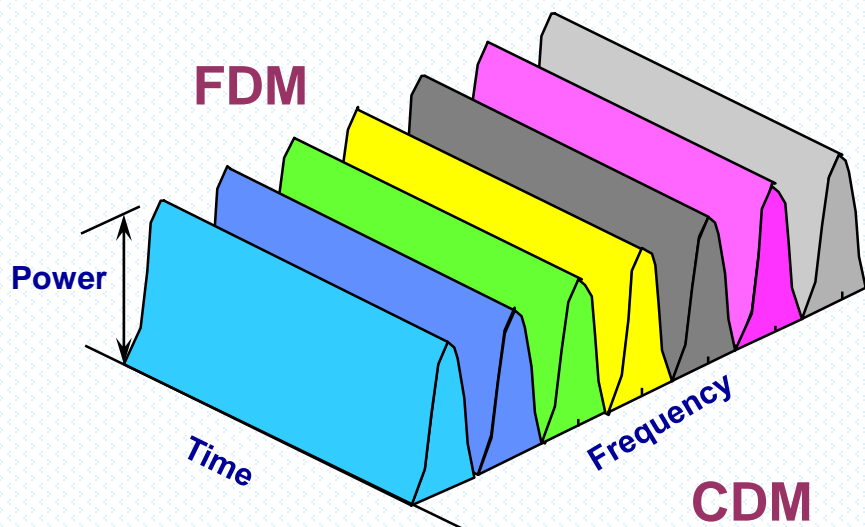
如对讲机。

双工系统：消息能同时双方向传送

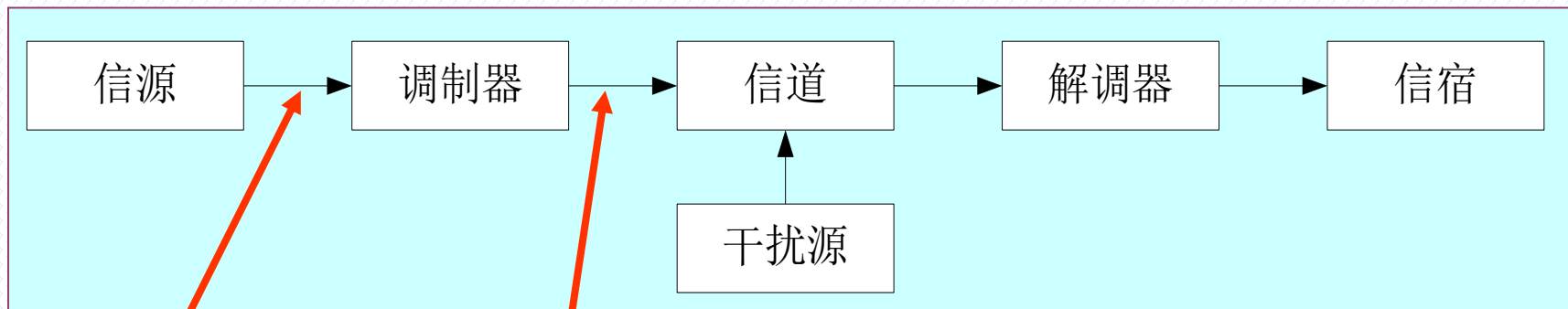
如电话、手机。

1.3.2 通信系统分类

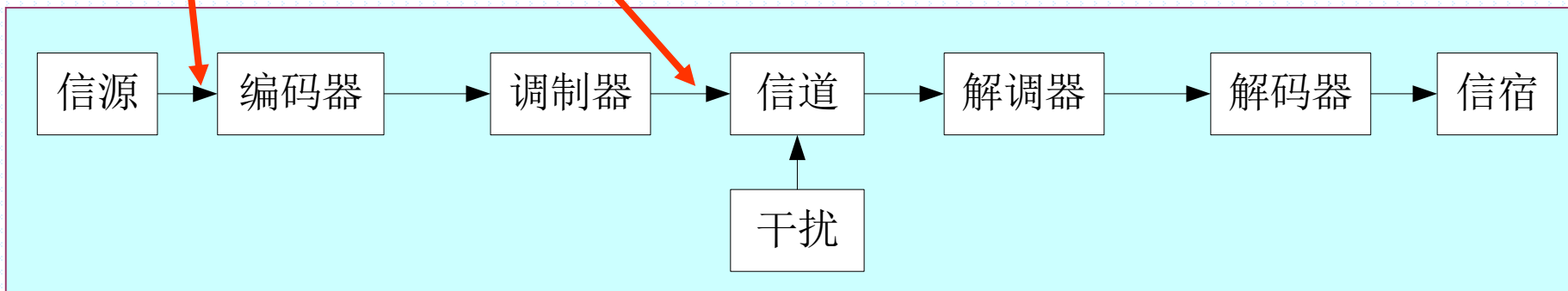
按信道复用方式划分：FDM、TDM、CDM



1.3.3 模拟通信系统与数字通信系统

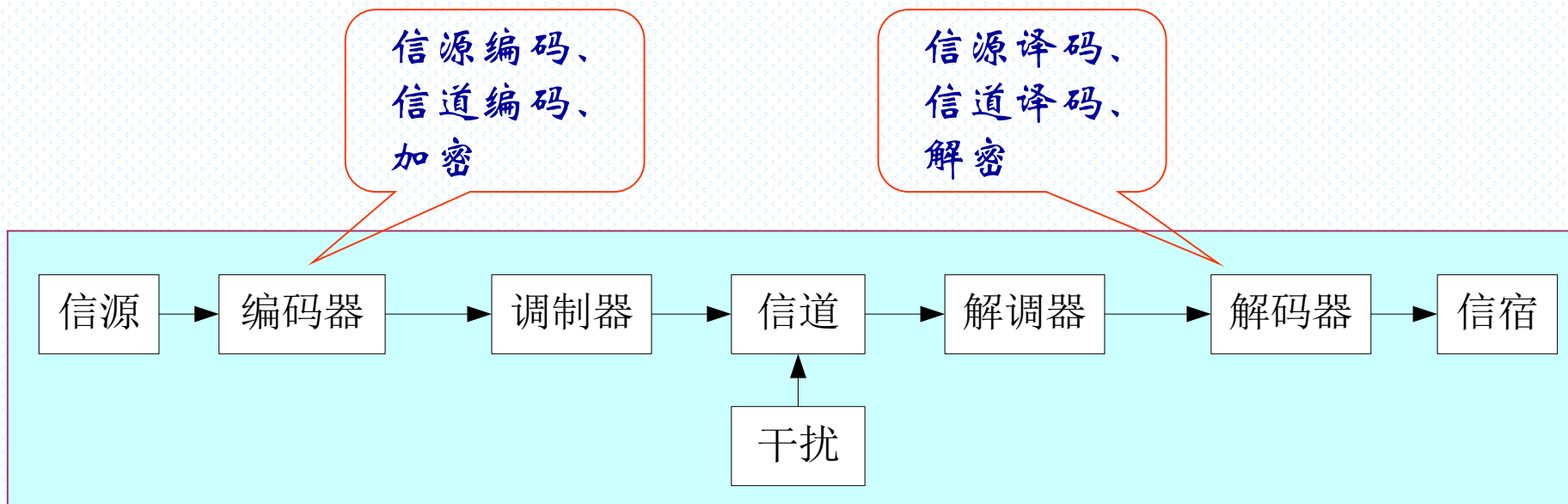


模拟通信系统模型



数字通信系统模型

1.3.3 模拟通信系统与数字通信系统



数字通信系统模型

信源编码：提高系统的有效性。

信道编码(纠错编码)：提高系统的可靠性。

数字通信系统特点

数字通信系统具有以下优点：

- ①抗干扰能力强，可靠性好；
- ②体积小，功耗低，易于集成；
- ③便于进行各种数字信号处理（压缩、存储等）；
- ④有利于实现综合业务传输；
- ⑤便于加密。

不过，数字通信系统也有以下缺点：

- ①必须保证收发两端同步（码元同步、帧同步等）；
- ②信号占用带宽大。

例如，传输一路模拟电话信号只需4 kHz带宽，但传输一路PCM电话信号（速率为64 kb/s）需几十千赫兹带宽。

1.4 通信系统主要性能指标

通信系统性能指标：有效性、可靠性、适应性、经济性、标准性、使用维修方面性。

主要性能指标：有效性（速度）、可靠性（质量）

有效性

- 模拟通信系统中：

带宽

- 数字通信系统中：

码元传输速率；

信息传输速率；

系统频带利用率。

1.4 通信系统主要性能指标

码元传输速率（码元速率、传码率）：

单位时间（每秒）内系统传输的码元符号的数目，单位为波特（Baud），用 R_B 表示。

信息传输速率（信息速率、传信率）：

单位时间（每秒）内系统传输的信息量多少，单位为比特/秒（bit/s、bps），用 R_b 表示。

1.4 通信系统主要性能指标

R_B 与 R_b 表的关系:

二进制时,

$$R_B = R_b$$

多进制 (M 进制) 时,

$$R_b = R_B \log_2 M$$

系统频带利用率:

信息传输速率与系统带宽的比值, 即, $\rho = R_b / B$
单位为: 比特/秒/赫兹 (b/s/Hz)。

1.4 通信系统主要性能指标

可靠性

- 模拟通信系统中:

信噪比S/N

- 数字通信系统中:

误码率 $P_e = \frac{\text{错误接收码元数}}{\text{传输码元总数}}$

误信率 $P_b = \frac{\text{传错的比特数}}{\text{传输的比特总数}}$

P_b 与 P_e 的关系: $P_b = \frac{M}{2(M-1)} P_e$

1.4 通信系统主要性能指标

本章基本要求：

- 了解通信技术的发展状况
- 掌握信息量、平均信息量、信道容量计算方法
- 理解通信系统模型中各组成部分的功能
- 理解系统的有效性、可靠性的概念
- 掌握传输速率、误码率的计算方法

1.4 通信系统主要性能指标

本章习题： pp.16

1-4、1-5、1-15、1-16、1-18