



通信系统原理教程

第1讲 概论之一

通信教研室 杨春萍

本课程的学习要求

- **主要任务**：本课程主要介绍信息端到端的传输系统，主要讨论通信系统的组成和性能指标。
- **授课内容**：1~9、11.3、12章的内容
- **学习要求**：
要求掌握基本的通信原理，以及原理的基本应用
- **考核方式**：平时成绩30% + 考试成绩70%
- **参考书**
樊昌信，《通信原理》第5版，国防工业出版社；
曹志刚，《现代通信原理》，清华大学出版社；
周炯槃，《通信原理》，北京邮电大学出版社。

本讲内容

- 通信的发展
- 消息、信息和信号
- 数字通信
- 信道
- 信道中的噪声

通信的发展

- 古代通信的起源
- 通信的概念
- 两类通信方式：运动通信、电信
- 近代通信的发展
- 通信的发展方向

*数字化、综合化、宽带化、智能化、
个人化、标准化、融合化*

返回

通信的概念

- 通信：为达到联系的目的，采用电的或非电的任何方法，通过任何媒质，将信息从一地传到另一地的过程称为通信。
- 通信网：为了完成多用户中任意两个用户之间的通信，一般需要建立一个网络，这个多用户通信系统互连的通信体系称之为通信网。
- 通信网的构成：
 - 1) 终端设备：电话、电报、监视器（摄像头）、显示器等；
 - 2) 传输设备：电缆、光缆、微波、卫星等；
 - 3) 交换设备：程控交换、ATM交换、光交换等；
 - 4) 协议和准则

返回

消息、信息和信号

- 消息、信息和信号的概念
- 信息量的度量



消息、信息和信号的概念

- 信号（**signal**）：传输消息的手段（媒介），是消息的载体（或媒介），通信系统中传输的是信号。
- 消息（**message**）：通信的目的是传递消息，如语音、文字、图形、图像等；
- 信息（**information**）：消息的有效（或有意义）内容，不同消息可有相同内容；
- 信号信息一词在概念上与消息的意义相似，但是它的含义更普遍化、抽象化。信息可被理解为消息中包含的有意义的内容。信息的多少可以用“信息量”来衡量。

信息量的度量原则

- 度量方法应跟消息的种类无关（适合各种信息源）
- 度量方法应跟消息的重要程度无关（重要的消息，但是大家都知道也无信息量）
- 信息量与信息发生的概率有关，消息的发生概率越小，所含信息量越大；如果一个事件发生的概率是1（必然事件），那么它的信息量就是0；反之，如果一个事件发生的概率是0（不可能事件），一旦发生了那么它的信息量就是 。
- 若干独立事件构成的消息所包含的信息量等于各个独立事件所包含的信息量之和。

信息量的度量方法

■ 消息“量” 信息量

例：“明天降雨量将有1毫米” -- 信息量小

“明天降雨量将达到1米” -- 信息量大

“明日太阳将从东方升起” -- 信息量零

■ 信息量 $I = I[P(x)]$, $P(x)$ -- 发生概率

■ 定义： $$I = \log_a \frac{1}{1/m} = \log_a m$$

若 $a = 2$, 单位：比特, bit, b;

若 $a = e$, 单位：奈特, nat;

若 $a = 10$, 单位：哈特莱 (hartley)。

信息量的度量方法

$$I = \log_a \frac{1}{1/m} = \log_a m$$

通常取 $a = 2$, 此时单位为“比特”

例：对于一个等概率、二进制码元：

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

对于一个等概率、M进制码元：

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

若 $M = 2^k$, 则 $I = k \text{ bit}$

📁 等概率离散信息量的定义

若信息源包含 m 种符号，且各符号发生的概率相等，为 $1/m$ ，则该信息源每个符号的平均信息量为：

$$I = \log_a \frac{1}{1/m} = \log_a m$$

其中通常取 $a=2$ ，信息量单位为比特（b）

若 $m=2$ ，则 $I=1\text{ b}$ ；

若 $m=2^k$ ，其中 $k=1, 2, 3, \dots$ ，则 $I=k\text{ b}$ 。

Shannon关于离散信息量（离散非等概）的定义

符号 x_i	x_1	x_2	...	x_n
符号发生概率 $P(x_i)$	$P(x_1)$	$P(x_2)$...	$P(x_n)$

如离散信息信号序列发生的概率如上所示,且各符号统计独立。则每个符号的平均信息量（也称为熵，表示信源的平均不确定度）为 $H(x)$ ：

$$\sum_{i=1}^n p(x_i) = 1$$

$$\begin{aligned} H(x) &= P(x_1) \log_2 \frac{1}{p(x_1)} + P(x_2) \log_2 \frac{1}{p(x_2)} + \dots + P(x_n) \log_2 \frac{1}{p(x_n)} \\ &= \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 \frac{1}{p(x_i)} \quad (\text{bit}) \end{aligned}$$

例：若信源仅有“0”和“1”两种消息。发送“1”的概率 $P(1) = \alpha$ ，则发送“0”的概率 $P(0) = 1 - \alpha = \beta$ ，则信源的熵等于

$$\begin{aligned} H(\alpha) &= -P(1) \log_2 P(1) - P(0) \log_2 P(0) \\ &= -\alpha \log_2 \alpha - (1 - \alpha) \log_2 (1 - \alpha) \end{aligned}$$

若一个消息是一个码元，则熵 $H(\alpha)$ 的单位：比特 / 码元

$H(\alpha) \sim \alpha$ 曲线：

当 $\alpha = 1/2$ 时，此信源的熵最大；这时的两个消息是等概率出现的，其不确定度最大；

当 $\alpha \neq 1/2$ 时，一个消息比另一个消息更可能出现，因此不确定度减小。

若 α 或 β 等于0，则不确定度为0。

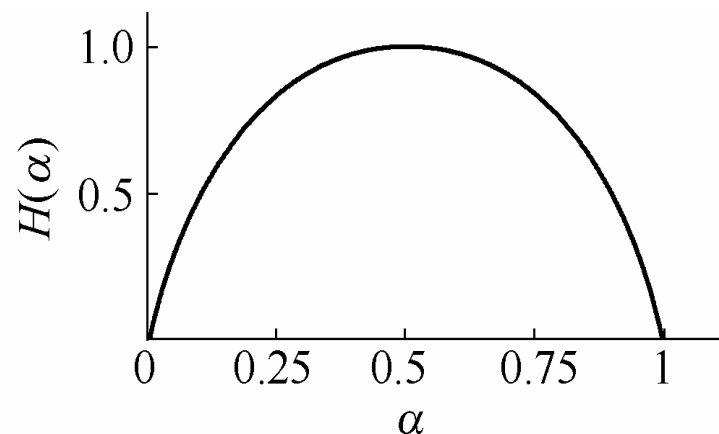
可以证明，当每个符号等概率出现时，平均信息量即熵最大。

注：各符号一般不独立，用条件概率 $P(x_i/x_j)$ 来衡量。

📁 Shannon关于连续信息量的定义

当连续消息出现的概率密度为 $f(x)$ 时，连续消息的平均信息量为

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log_2 f(x) dx \quad (bit)$$



数字通信

- 数字通信基本概念
- 数字通信的优点
- 数字通信系统模型
- 主要性能指标

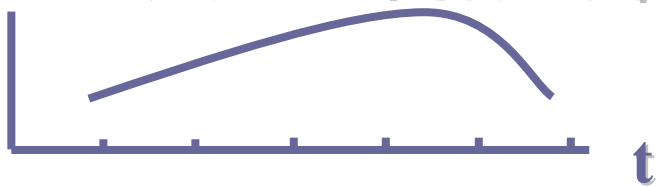


数字通信基本概念

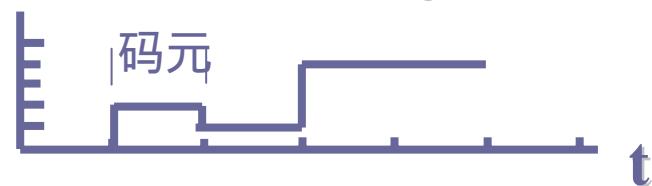
模拟信号：幅度连续，时间可连续也可以不连续。
例如语音

数字信号：幅度离散，一般时间也离散。例如数据

注：区分模拟信号与数字信号的准绳看其取值是连续的还是离散的，而不是看时间。



模拟信号



数字信号

● 模拟通信系统

利用模拟信号传递消息的通信系统。

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

● 数字通信系统

利用数字信号传递消息的通信系统。

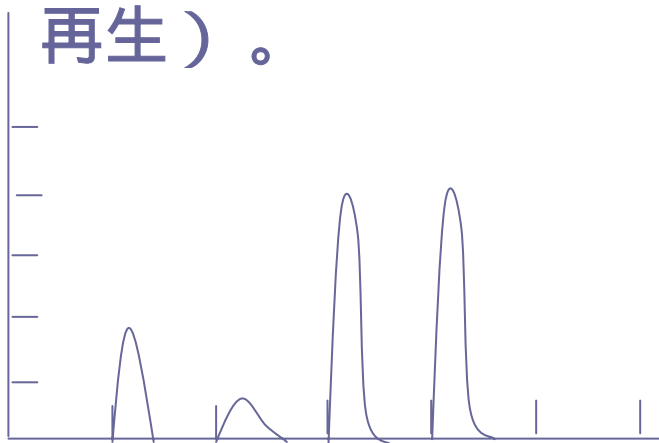
要求 - 正确

准则 - 错误率

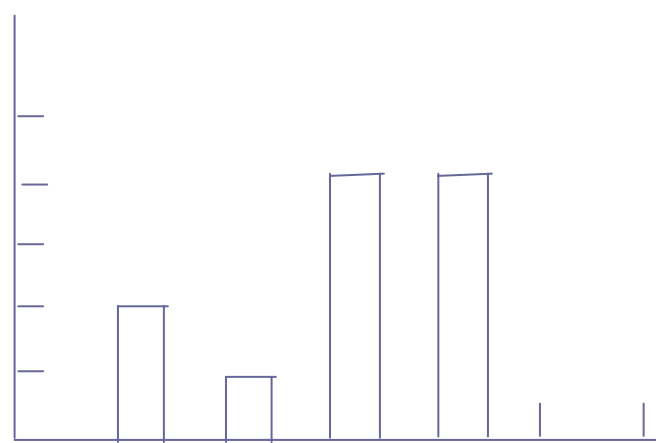
手段 - 统计判决理论

数字通信的优点

- 取值有限，能正确接收（抗干扰能力强，如通过中继再生）。



(a) 失真的数字信号



(b) 恢复的数字信号

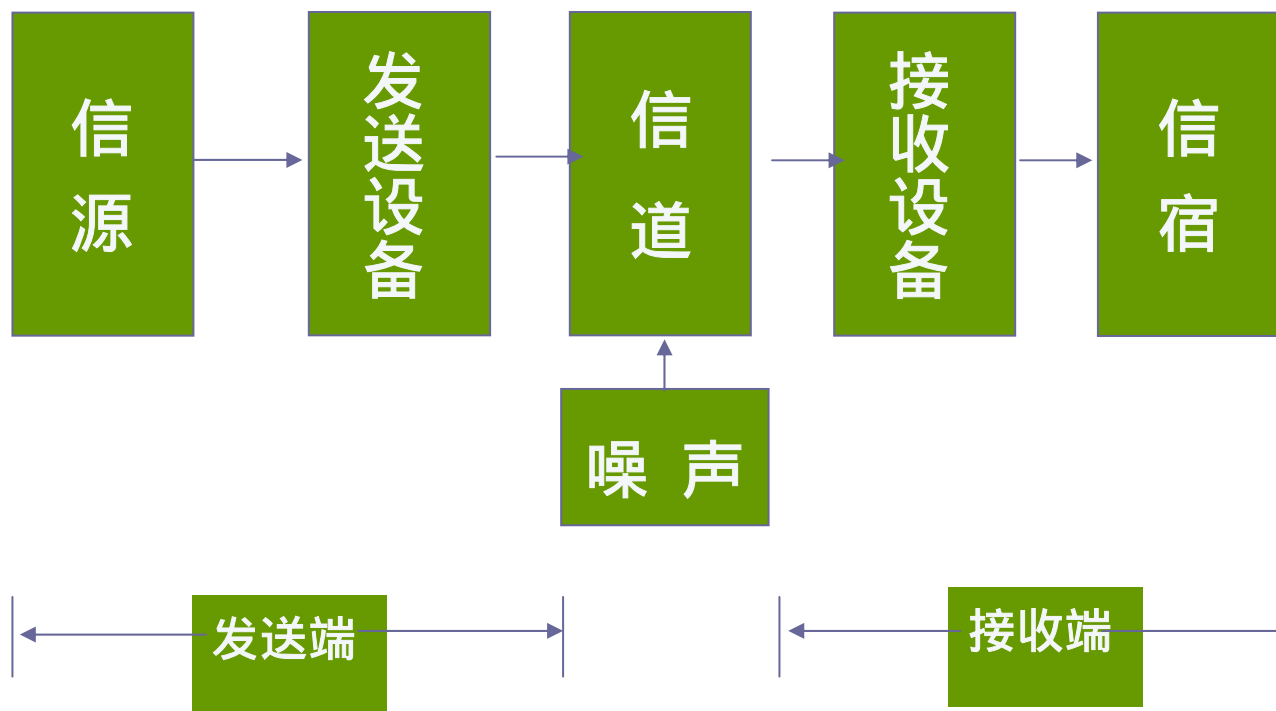
数字信号波形的失真和恢复

- 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,提高系统的保密性。
- 可综合传输各种模拟和数字输入信号,便于存储和处理（包括编码、变换等）
- 便于使用现代DSP技术对数字信号进行处理，设备易于大规模集成,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。
- 信噪比随带宽按指数规律增长（模拟系统中，输出信噪比仅和带宽成正比增长）。

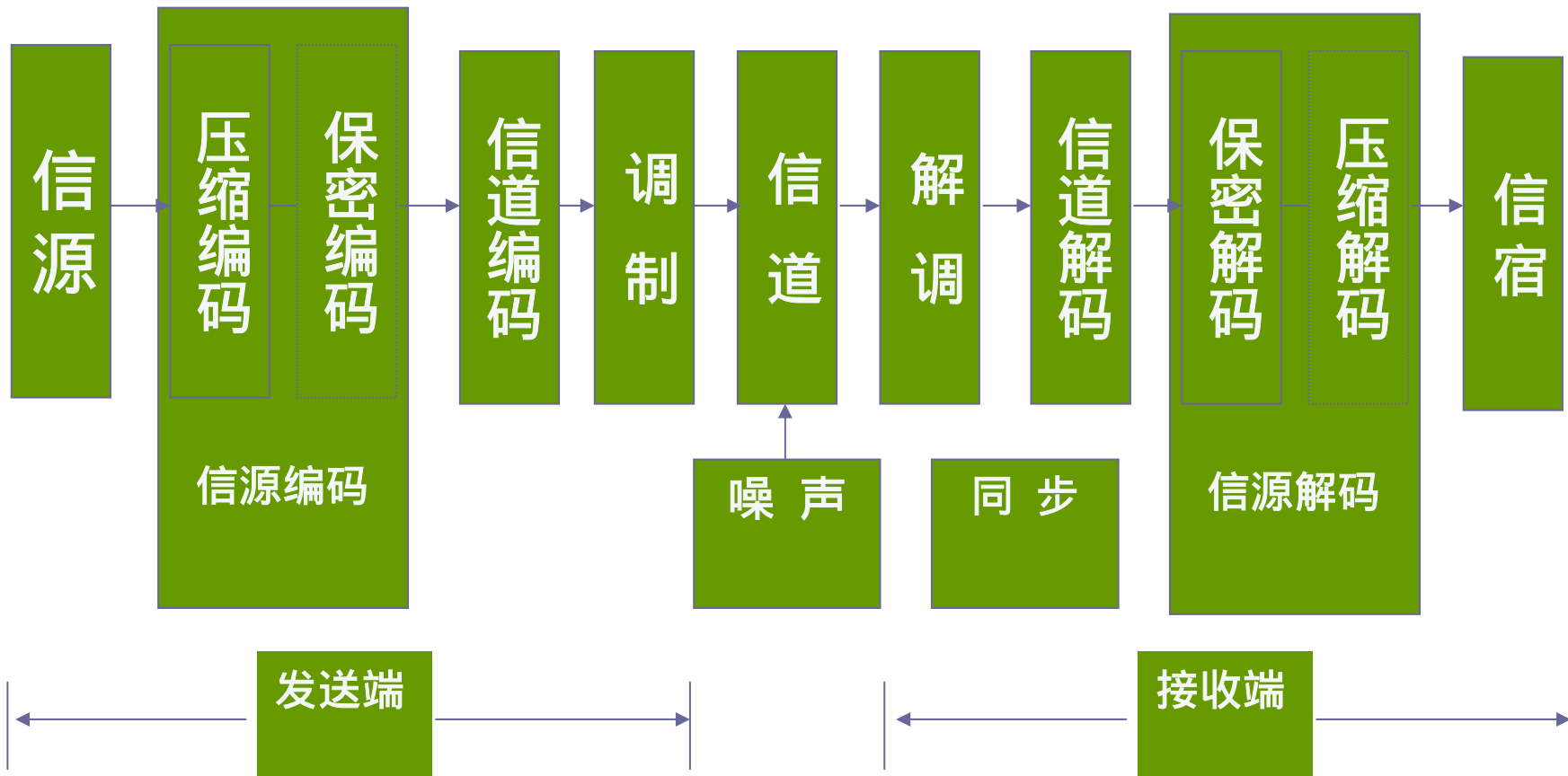
注：数字通信中需要解决同步的问题；数字通信的优点是靠占据更大的带宽来换取的（4kHz $n \times 10$ kHz）

数字通信系统模型

■ 通信系统一般模型

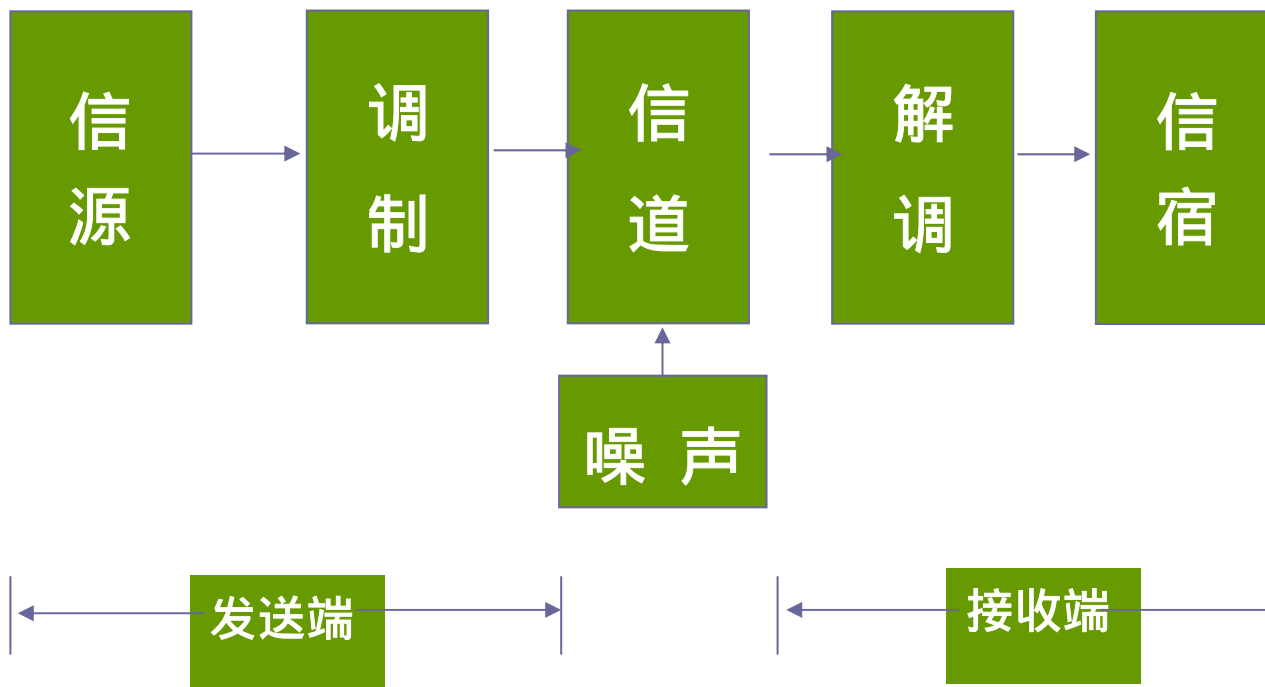


■ 数字通信系统模型



- **数字基带传输系统**：不具有调制/解调过程，信道中传输的是经过基带处理的数字基带信号。
- **数字调制系统**：具有调制/解调过程，将数字基带信号调制成数字频带信号。

■ 模拟通信系统模型



- **模拟调制系统**：具有线性特性，已调参量线性于基带信号。
- **数字调制系统**：具有一一对应性，已调参量与基带信号一一对应。

主要性能指标

- **有效性**：在给定的信道内能够传输消息的速度；
- **可靠性**：在给定的信道内接收信号的质量。
- **有效性与可靠性之间的基本矛盾**

通常有效性和可靠性是互相制约的。对于同样传输媒介，提高有效性，将降低系统的可靠性；提高系统的可靠性，将会降低系统的有效性。因此，对于不同的通信系统，在设计的时候需要具体问题具体分析，如在通信网中，语音信号的信噪比要求在20 ~ 40dB的范围内，而对于电视信号，要求信噪比在40dB以上。

数字通信系统的主要性能指标

■ 有效性

传输速率（以及频带利用率、能量利用率），分为传码率（码元速率） R_B 、传信率（信息速率） R_b 、消息速率 R_M 。传输速率越大，有效性越高。

📁 传码率（码元速率） R_B

单位时间内传输的码元数量，单位是波特（Baud）。

📁 传信率（信息速率） R_b

单位时间内传输的信息量，单位是比特/秒（bit/s，b/s或bps）

相互联系：对于M进制的码元， $R_b = R_B \log_2 M$

数字通信系统的主要性能指标

📁 消息速率 R_M

单位时间内传输的消息数目。如“字/s”，一般地，码元速率 = 消息速率。

📁 频带利用率

单位频带内所能达到的信息速率，通常与所采用的调制及编码方式有关。

📁 能量利用率

传输每一比特所需的信号能量。此能量大小和系统带宽有直接关系，并且在此能量和占用频带之间可以交换。

数字通信系统的主要性能指标

- 可靠性：误码率 P_e 、误比特率 P_b 、误字率 P_w 。误码率/误信率/误字率越小，可靠性越高。当码元足够多的情况下，误码率、误信率、误字率分别定义为：

📁 误码率 = 错误接收码元数目/传输码元总数目，表示码元传错的概率；

📁 误信率 = 错误接收信息量/传输总信息量，表示信息量丢失的概率。

📁 误字率 = 错误接收字数/传输总字数，表示字传错的概率。

例如，语音信号数字化传输时，一般要求误码率小于0.001。

数字通信系统的主要性能指标

■ 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

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

