

通信原理

Principles of communication

常树旺

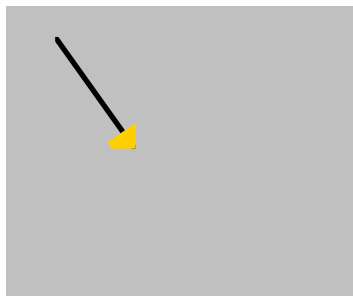
QQ: 19184681

QQ群: 493534745 (通信原理_2022秋_常)



通信原理

Principles of
communication



课程背景

课程位置

教 材

主要内容

课程特点

学习方法

参考书目

考核方法

山东大学机电与信息工程学院

退出

开始



课程背景

我们已经进入了一个**信息化**的时代，人们借助信息科学和计算机技术的理论和手段来解决科学、工程、经济等方面的众多问题。

通信是必然的交流、合作的手段，**没有通信就没有发展**。

专业设置的需要。

主要目的是学习如何有效而可靠地传输信息。



课程位置

先修课

高等数学

线性代数

概率论

信号与系统

电路分析基础

.....

通信原理

后续课程

计算机网络

移动通信

.....

本课程为通信、电子类学生重要的专业基础课，
是研究生入学考试的主要课程之一。

教材



通信原理 (第7版)

樊昌信、曹丽娜编著，国防工业出版社

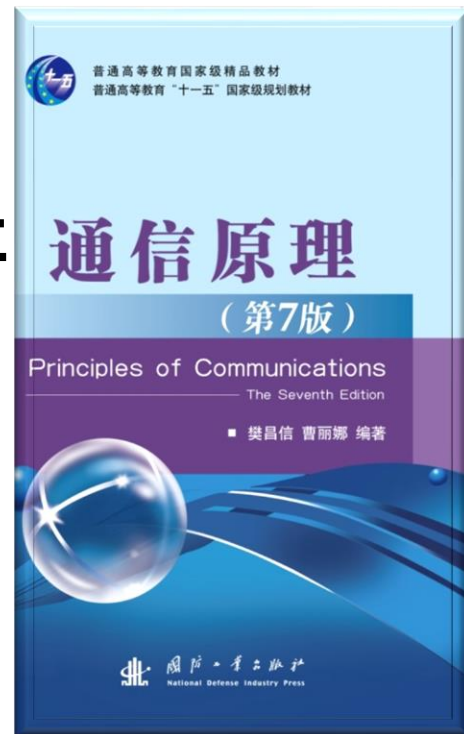
讲课内容：

1--13章 (8*、12*)

学时安排：

理论64学时 (周一1-2; 周二5-6)

实验16学时 (第9-16周周二7-10)





主要内容

本课程研究的问题可概括为：

- 信息如何传输（**发送**和**接收**）？
- 如何保证信息高质量（**有效&可靠**）传输？
- 信道、**噪声**对信息传输的影响如何？

通过本课程的学习，应具备以下基本技能：

- * 熟练掌握通信系统**模型**
- * 熟练**分析**通信系统
- * 掌握（**数字通信**）系统中的信源编码、信道编码、同步、复用等技术



课程特点

- 与“**信号与系统**”联系比较紧密，但比其更具体
- 应用数学知识（特别是**概率论**）较多，用数学工具分析物理概念



学习方法

- 牢记通信**模型**，注重系统把握
- 注重不同形式的**对比**
- 学习是个过程，**温故**而知新

可概括为：**四三二一**

四联（实际、横向、纵向、未来）

三心（耐心、用心、细心）

二意（意志坚强、意气风发）

一态（态度）



参考书目



[1] **Fundamentals of Communication Systems**

通信系统原理（第2版）

John G.Proakis等著，郭宇春、张立军等译，机械工业出版社，2015.12

[2] **Communication Systems（Fourth Edition）**

Simon Haykin著，电子工业出版社，2012.03

[3] **现代通信系统（MATLAB版）（第3版）**

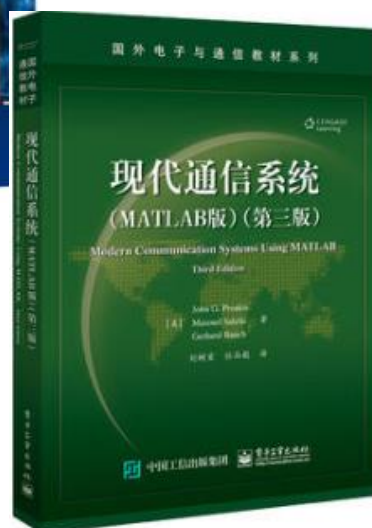
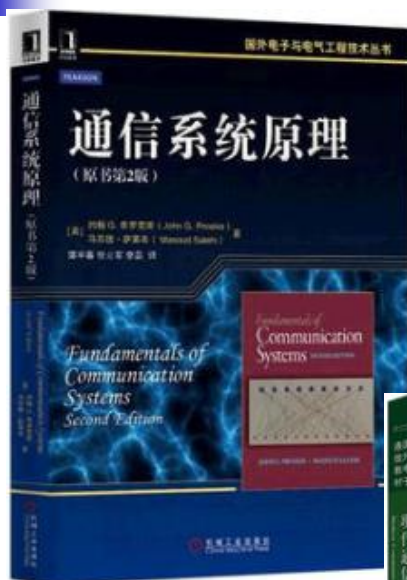
John G.Proakis等著，刘树棠等译，电子工业出版社

[4] **深入浅出通信原理**

陈爱军，清华大学出版社，2018.2

.....

参考书目



<https://www.icourse163.org/>
(中国大学MOOC)



考核方法

过程性考核：40%

实验、作业、雨课堂等

终结性考核：60%

期末、闭卷笔试



学习的3种境界

- 昨夜西风凋碧树。独上高楼，望尽天涯路。

----在为学的路上要时刻铭记着：有志者，事竟成！

- 衣带渐宽终不悔，为伊消得人憔悴。

----学习的过程犹如断石雕刻，锲而舍之，朽木不折，
锲而不舍，金石可镂。

- 众里寻他千百度，蓦然回首，那人却在灯火阑珊处。

----看到了别人所看不到的，得到了别人所得不到的。



通信原理

第1章 绪论



1.1 通信的基本概念

知识

- AM调制
- DSB调制
- SSB调制
- VSB调制
- 幅度调制一般模型

能力

- 能根据具体需求选择合适的信号调制方式
- 能使用不同模型对信号进行调制
- 学以致用解答相关问题
- 动手实践、工程意识

素养

- 约束、规则意识、法制意识
- 善于发现问题，辩证思考
- 创新意识和工程素养
- 通过模拟调制应用，增强爱国情操



1.1 通信的基本概念

1.1.1 通信的发展

全球通信技术发展史

老罗科技杂谈



1.1 通信的基本概念

1.1.1 通信的发展

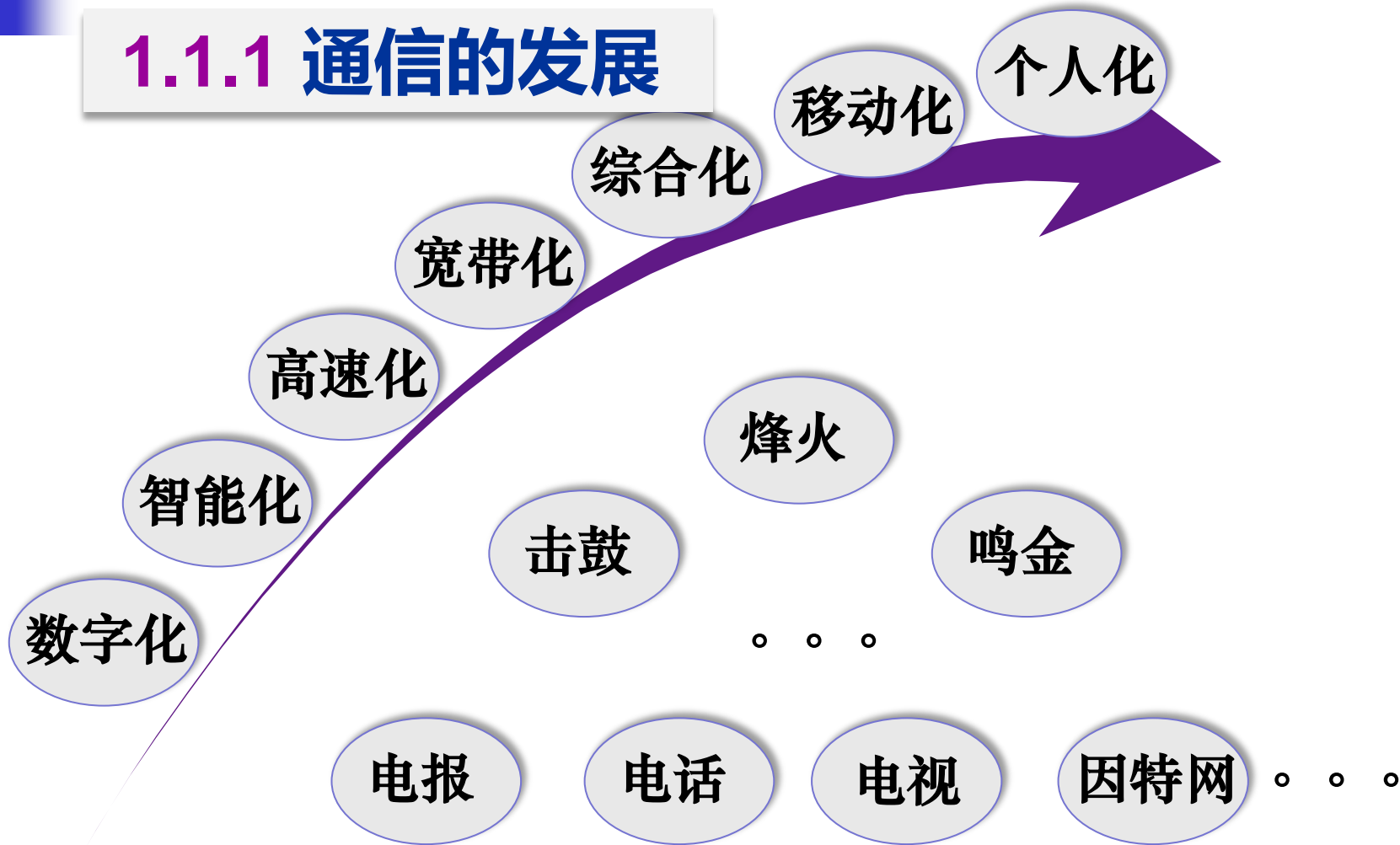


通信技术的发展对你有何启示启发？



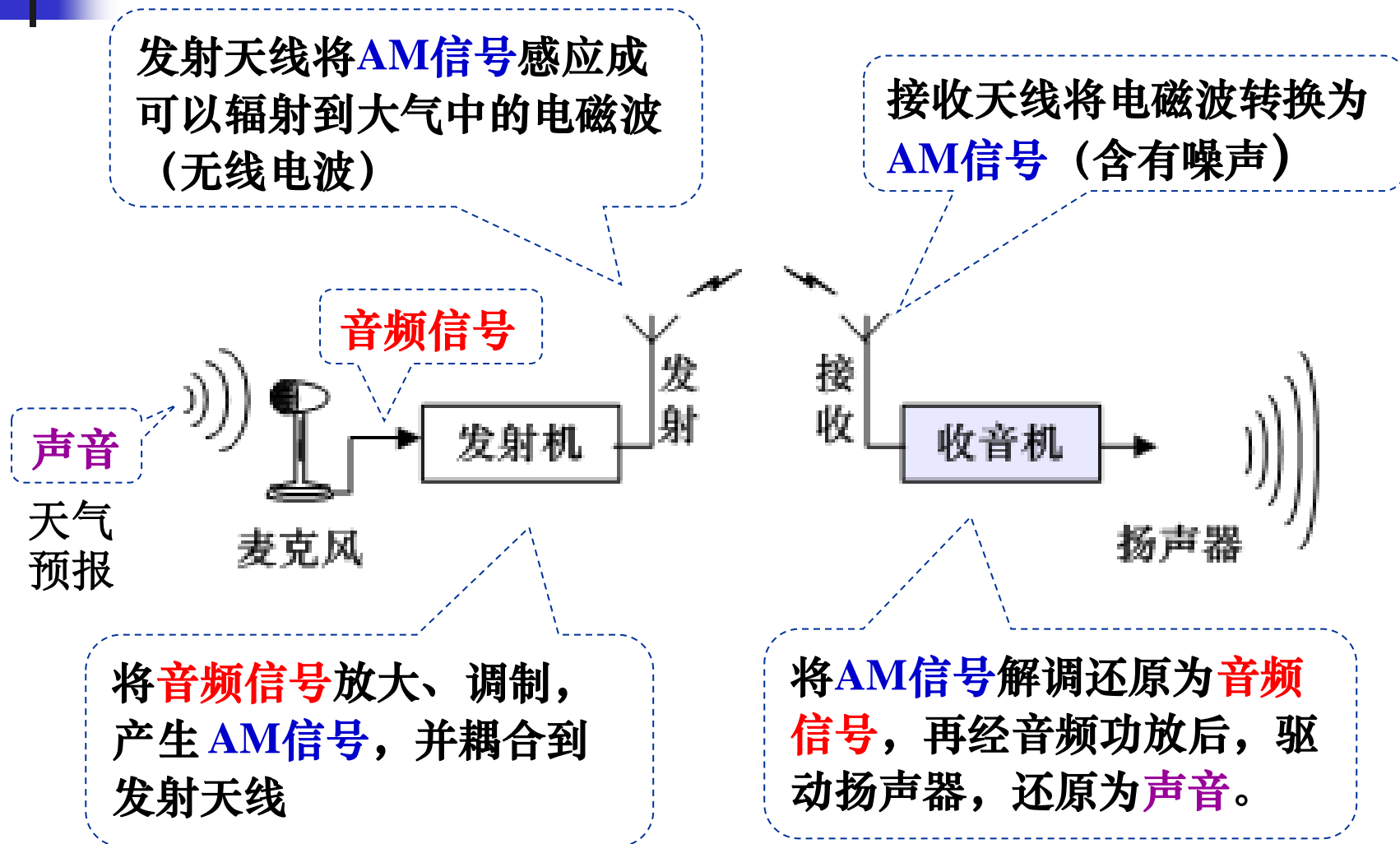
1.1 通信的基本概念

1.1.1 通信的发展





1.1.2 消息 信息 信号





1.1.2 消息 信息 信号

消息

：通信系统传输的对象。形式多样：

- **连续消息：**
语音、温度、图像
- **离散消息：**
数据、文字、符号…

信号

：消息的电表示形式/传输载体。

- **模拟信号：**
信号参量取值连续
- **数字信号：**
信号参量取值离散

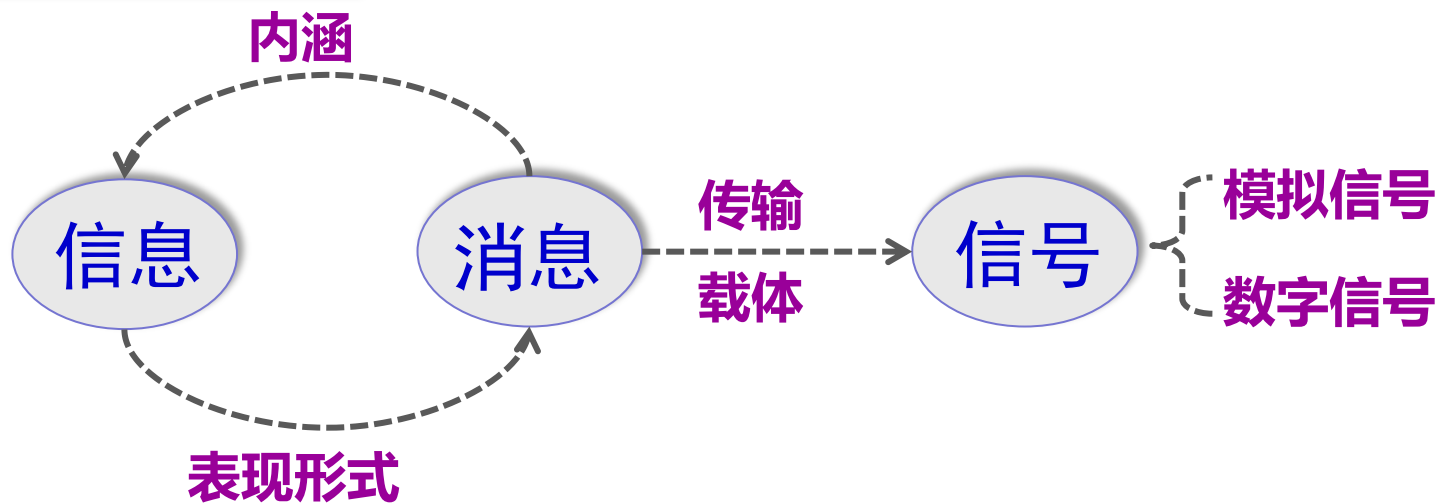
信息

：消息中蕴含的有效内容。



1.1.2 消息 信息 信号

■ 三者关系



Q&A

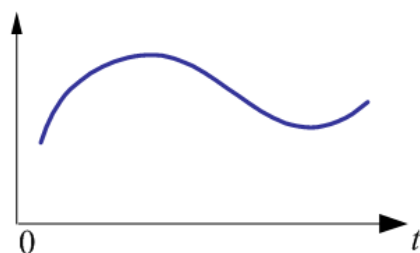
- ① 如何区分模拟与数字信号？
- ② 如何将消息转换为电信号？



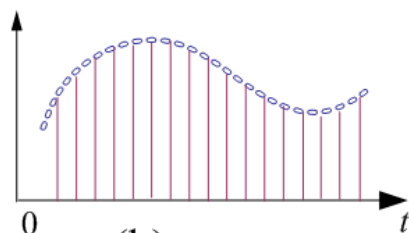
1.1.2 消息 信息 信号

① 模拟信号 和 数字信号:

取值连续
(无穷多)

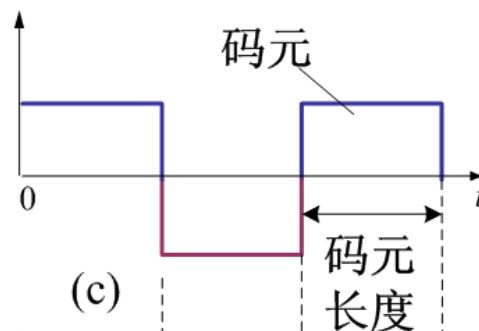


(a)

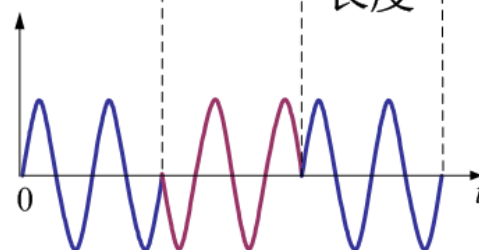


(b)

取值离散
(有限个)



(c)



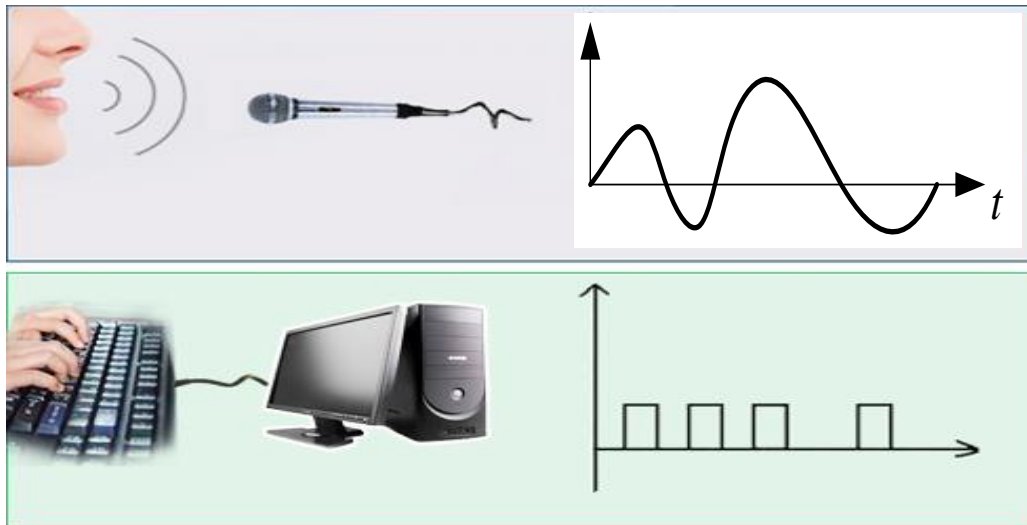
(d)

区分原则: 看携带消息的信号参量取值。



1.1.2 消息 信息 信号

② 消息 ~ 电信号的转换:



- 话筒（声音传感器）把声音转变成音频信号；
- 数字终端把符号转变成数字信号；
- 摄像机把图像转变成视频信号；
- 热敏电阻（温度传感器）把温度转变成电信号。



1.1.2 消息 信息 信号

基于以上对消息、信息和信号的理解：

通信：就是利用电信号传输消息中所包含的信息。

完成通信过程所需的电子设备和信道的
总体—— communication system

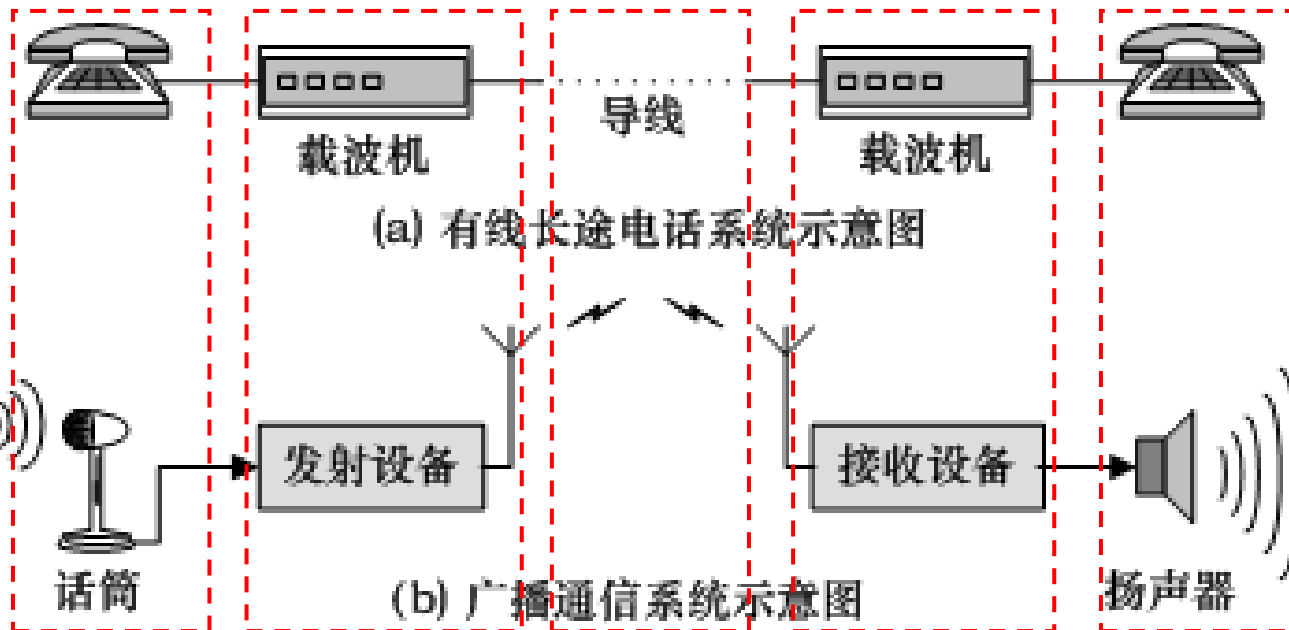
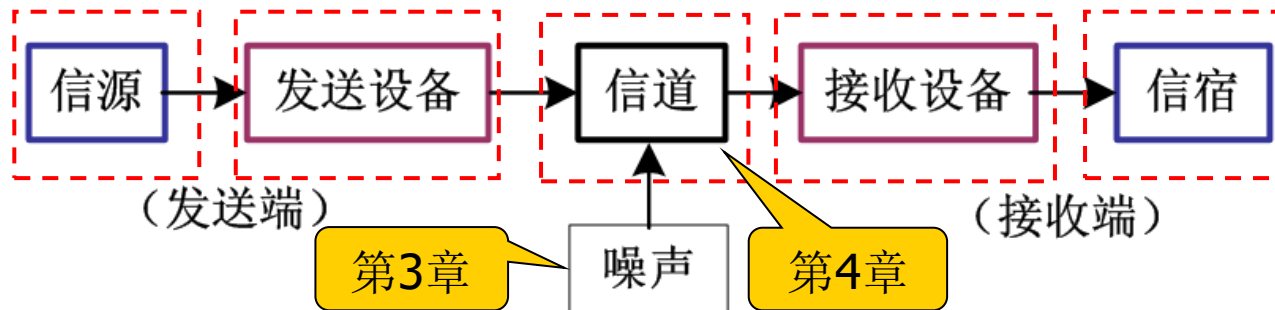
通信系统



1.2 通信系统模型

1.2.1 通信系统一般模型

建模





1.2.1 通信系统一般模型

channel

能传输信号的各种物理媒介

信源

发送设备

信道

接收设备

信宿

source

消息 → 电信号
如 电话机的**话筒**
把声音 → 音频信号

噪声

noise

transmitter

原始电信号 → 适合在信道中传输的信号。如 **编码、调制**

destination

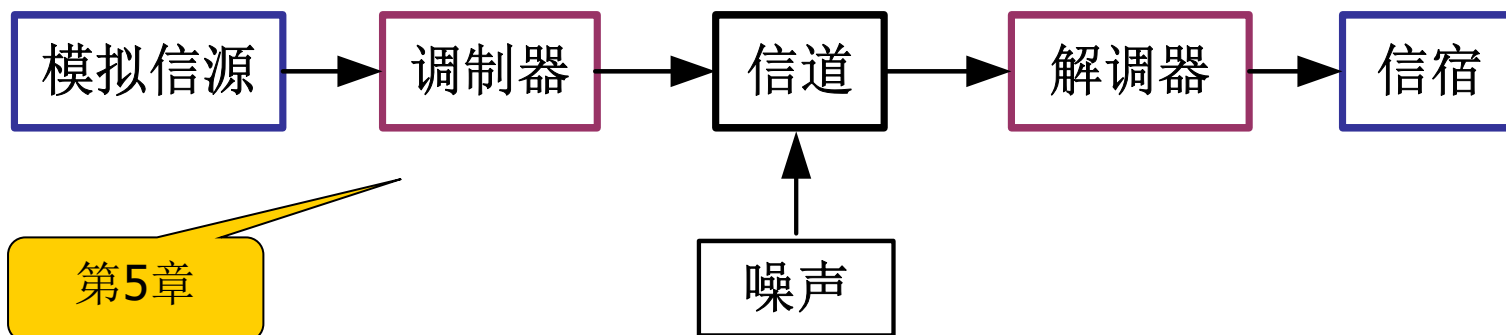
电信号 → 消息
如 电话机的**听筒**
把音频信号 → 声音

receiver

其功能与发送设备相反。
如 **译码、解调**



1.2.2 模拟通信系统模型

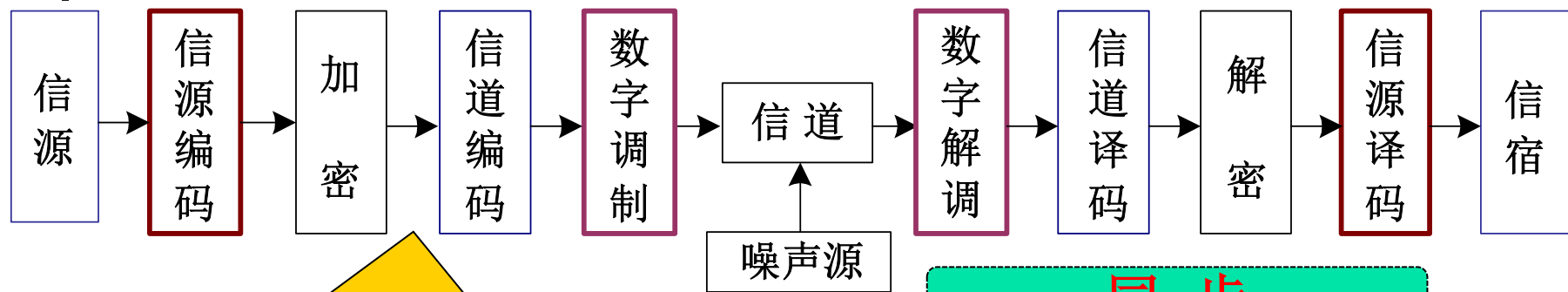


■ 两对重要变换：

- 模拟消息 \Leftrightarrow 原始电信号 (基带)
- 基带信号 \Leftrightarrow 已调信号 (带通)



1.2.3 数字通信系统模型



第6、7、8、9、10、11章

■ 信源编码:

- 模/数转换
- 提高有效性

■ 信道编码:

- 增强抗干扰能力

同步

第13章

■ 调制: 把信息寄托到载波上

■ 解调: 从已调信号中卸载信息

编码 译码 调制 解调 同步



1.2.4 数字通信的特点

优点

- 抗干扰能力强，且噪声不积累；
- 传输差错可控；
- 便于处理、变换、存储；
- 便于将来自不同信源的信号综合传输；
- 易于集成；易于加密。

缺点

- 可能需要较大的传输带宽；
- 对同步要求高。



通信系统模型对你有何启示启发？



1.3 通信系统分类与通信方式

1.3.1 通信系统分类

详见表1-1、1-2

按信道信号 特征分类	按传输媒质 分类	按传输方式 分类	按通信业务 分类	按工作波段 分类
模拟通信 数字通信	有线通信 无线通信	基带传输 带通传输	电话、数据、 图像通信等	长波、中波、 短波、微波、 红外以及激 光通信等

- 按**复用方式**划分：频分、时分、码分复用、波分、空分
- 同一个通信系统可以分属于不同分类
 - ☺ **AM广播系统**——中短波通信、模拟通信、带通传输系统（调制系统）



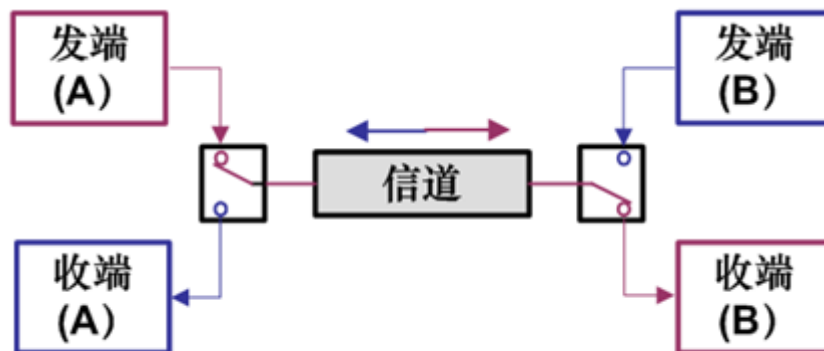
1.3.2 通信方式

■ 按传输方向和时间分：

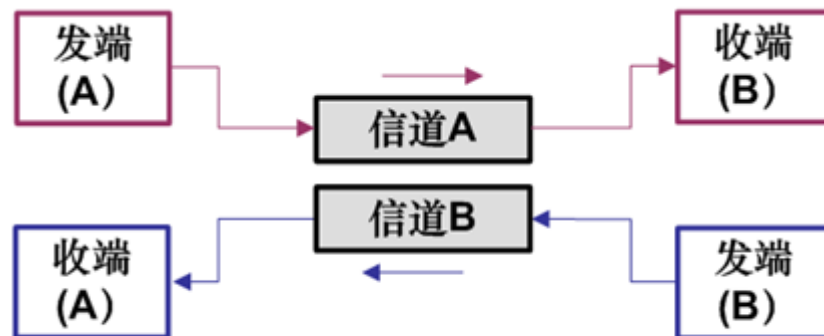
- **单工通信：**
(单向)
- **半双工通信：**
(双向、不同时)
- **全双工通信：**
(双向、同时)



(a) 单工方式



(b) 半双工方式



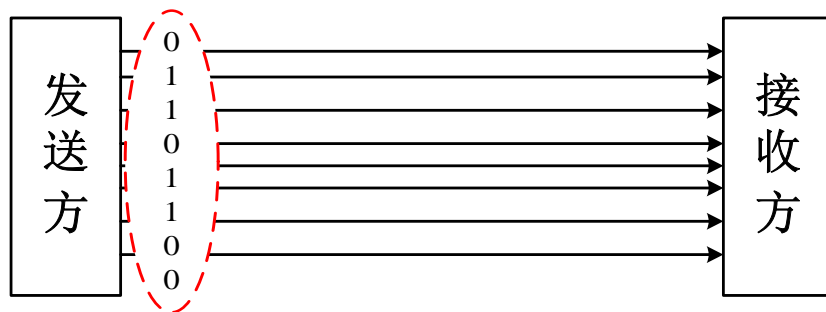
(c) 全双工方式



1.3.2 通信方式

■ 按数字码元传输时序分：

- **并行传输**：在并行信道上**同时**传输 **n** 个比特信息。



优点：节省传输时间，速度快；

缺点：需要 **n** 条通信线路，成本高；

应用：设备之间的**近**距离通信：

☺计算机和打印机之间数据的传输。

- **串行传输**：



1.3.2 通信方式

- **串行传输：** 数字码元序列按时间顺序一个接一个地在**一条**信道中传输。



优点： 只需一条通信信道，线路费用低

缺点： 速度慢，需要外加同步措施

应用： 远距离数字传输



1.4 信息及其度量

引言

- 信息是消息的内涵；
- 通信的目的在于传输消息中所包含的信息；
- 消息中**不确定的内容**才构成信息；
- 信息量就是对这种不确定性的定量描述。

- 信息具有以下特性：



- 在当今信息社会中，信息是最宝贵的资源之一。



1.4 信息及其度量

香农——一个能和牛顿、爱因斯坦比肩的神级天才

【天才简史-香农】一个能和牛顿、爱因斯坦比肩的神

天才简史 bilibili

画面来源于网络

但是学校里依旧会教授信息论

00:15 / 10:40
输入你想搜的 搜索一下

弹幕礼仪 发送

自动 选集 倍速 音量 设置 00:00

1.4 信息及其度量



如何度量消息中所含的信息量？



原则：

- 度量方法与消息来源无关
- 与消息的重要程度有关

信息量 I 可用概率 P 来度量：

$$I = f[P(x)]$$

举例：

- “美国世贸大楼被炸（9.11事件）”（时效性）
- “明天下雨”

根据概率论知识：事件的不确定性
可用事件出现的概率来描述。

可见：

- 消息中所含信息量和不可预测性或不确定性有关。
- 消息所表达的事件越不可能发生，信息量就越大。



(1) 离散消息 x 的信息量

$$P \rightarrow 1, I \rightarrow 0$$

$$P \rightarrow 0, I \rightarrow \infty$$

$$P(x) < P(y),$$

$$I(x) > I(y)$$

相加性

为什么取
对数？

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

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)}$$

$a=2$, 比特(bit), 简记为**b**

$a=e$, 奈特(nat)

$a=10$, 哈特莱(Hartley)

$$1 \text{ nat} = 1.44 \text{ b}$$

例

【1-1】

二进制信源 (0, 1)

试求：等概独立发送符号时，每个符号的信息量。

解：

$$P(0) = P(1) = \frac{1}{2}$$

$$I_0 = I_1 = \log_2 \frac{1}{P(x)} \\ = \log_2 2 = 1 \text{ b}$$

例

【1-2】

四进制信源 (0, 1, 2, 3)

$$P(0) = P(1) = P(2) = P(3) = \frac{1}{4}$$

$$I_0 = I_1 = I_2 = I_3 \\ = \log_2 4 = 2 \text{ b}$$



评注

概率相同，每个符号蕴含的信息量也相同；

➤ 二进制的每个码元含 1 (b)

➤ 四进制的每个码元含 2 (b)

➤ 推广：M进制的每个码元含 $\log_2 M$ (b)

每个四进制符号可用
2个二进制符号表示



(2) 离散消息的平均信息量

—— 信源中每个符号所含信息量的统计平均值。

设 $\left(\begin{matrix} x_1, \cdots, x_i, \cdots, x_M \\ P(x_1), \cdots, P(x_i), \cdots, P(x_M) \end{matrix} \right)$ 且 $\sum_i^M P(x_i) = 1$

则 统计独立的**M**个符号的离散信源的平均信息量为

$$H = \sum_{i=1}^M p(x_i) \log_2 \frac{1}{p(x_i)} \quad (\text{b/符号})$$

H与热力学中的熵形式一样，故称为**信源的熵**。



例

【1-3】 四进制信源 (0, 1, 2, 3),
 $P(0)=3/8$, $P(1)=P(2)=1/4$, $P(3)=1/8$,
试求信源的平均信息量。

解

$$H = \sum_{i=1}^M p(x_i) \log_2 \frac{1}{p(x_i)}$$

$$I_i = \log_2 \frac{1}{P(x_i)}$$

$$H = P(0)I_0 + P(1)I_1 + P(2)I_2 + P(3)I_3 = 1.906 \text{ (b/符号)}$$

评注

比较例 【1-3】 与 【1-2】 可知：

等概时，熵最大： $H_{\max} = \log_2 M$



例

【1-4】 某离散信源的概率场同【例1-3】，由它发送一条消息：**201020130213001203210100321010023102002010312032100120210**，求这条消息的总信息量。

解： 利用信息相加性概念来计算：

$$I_{\text{总}} = 23I_0 + 14I_1 + 13I_2 + 7I_3 = 108 \text{ (b)}$$

利用熵的概念来计算： $H = 1.906$ (b/符号)

$$I_{\text{总}} = 57 \times H = 57 \times 1.906 = 108.64 \text{ (b)}$$

评注

一条由 m 个符号构成的消息，其总信息量为：

$$I_{\text{总}} = m \times H$$



归纳:

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \quad (\text{b})$$

$$H = \sum_{i=1}^M p(x_i) \log_2 \frac{1}{p(x_i)} \quad (\text{b/符号})$$

- 二进制的每个码元含 1 bit
- 等概时, 熵最大: $H_{\max} = \log_2 M$
- 借助熵的概念: $I_{\text{总}} = m H$



(3) 连续消息的平均信息量

可用**概率密度函数**来描述。

可证明，连续消息的平均信息量（相对熵）为

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

式中， $f(x)$ — 连续消息出现的概率密度。

联系与区别：

- 1) 离散事件（消息）的信息量 I
- 2) 离散信源的平均信息量（熵） H
- 3) 连续消息的平均信息量 $H(x)$

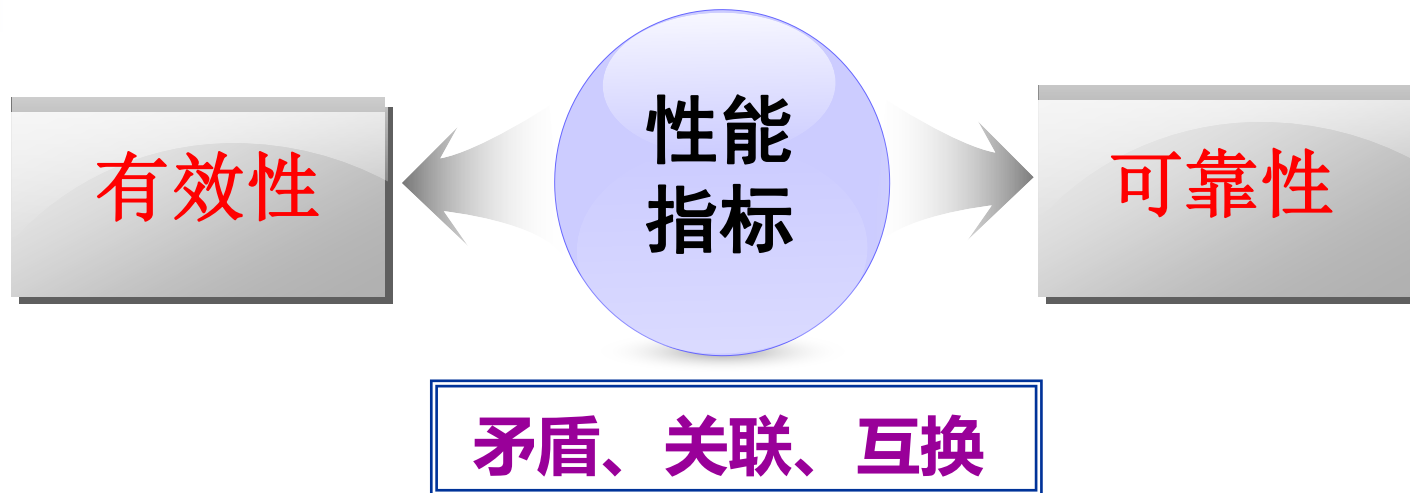
设有四个符号，其中前三个符号的出现概率分别为 $1/4$ ， $1/8$ ， $1/8$ ，且各符号的出现是相互独立的。则该符号集的平均信息量为：

- ☐ A 1.75 bit
- ☐ B 2 bit
- ☒ C 1.75 bit/符号
- ☐ D 以上都不对

提交



1.5 通信系统性能指标



模 拟 通 信

- 传输带宽/频带利用率
- 输出信噪比

数 字 通 信

- 传输速率/频带利用率
- 差错概率



1.5.1 数字通信系统的有效性指标

(1) 码元传输速率 R_B (传码率、波特率)

- ◆ 定义：每秒传送的码元个数。
- ◆ 单位：波特 (Baud)
- ◆ 计算：若一个码元的时间长度为 T_s 秒，则

与进制数
有关吗?

$$R_B = \frac{1}{T_s}$$

与信源统计
特性有关吗?

例如：1秒内传输1000个码元，则 $R_B = 1000$ Baud



1.5.1 数字通信系统的有效性指标

(2) 信息传输速率 R_b (传信率, 比特率)

- ◆ 定义: 每秒传递的比特数 (信息量)。
- ◆ 单位: 比特/秒 (**bit/s**) 简记为 **b/s** 或 **bps**

R_b 与 R_B 的关系—— H 为纽带

物理内涵?

$$R_b = R_B \cdot H$$

$$R_b = R_B \cdot \log_2 M$$

$M = 2$ 时

$$R_b = R_B$$



1.5.1 数字通信系统的有效性指标

(3) 频带利用率——把 **B** 与 传输速率 联系起来

▣ 定义为单位带宽内的传输速率，即

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

$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \quad (\text{b/s} \cdot \text{Hz}^{-1})$$

$$\eta_b = \eta \cdot \log_2 M$$

Q&A

A系统：2 000 b/s，占用 2 000 Hz的带宽；

B系统：1 500 b/s，占用 1 000 Hz的带宽。

已知二进制信号在3分钟内共传送了72000码元，(1) 问其码元速率和信息速率各位多少？
(2) 如果码元宽度不变，但改为八进制数字信号，其码元速率和信息速率又为多少？

- ☐ A 400, 400 bps, 400, 400/3 bps
- ☐ B 24000 Baud, 24000 bps, 24000 Baud, 800 bps
- ☒ C 400 Baud, 400 bps; 400 Baud, 1200 bps
- ☐ D 以上都不对

提交



1.5.2 数字通信系统的可靠性指标

(1) 误码率 P_e

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} = \frac{N_e}{N}$$

(2) 误信率(误比特率) P_b

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}} = \frac{I_e}{I_b}$$

二进制: $P_b = P_e$; M进制: $P_b < P_e$; why ?



本章小结:

- 术语, 模型, 分类, 通信方式
- 数字通信的优缺点
- 信息量: I_i , H , $I_{\text{总}}$
- R_B , R_b , η ; P_e , P_b

作业: **1-3、1-4、1-6、1-8**



第1章 绪论小结

- 通信的目的、电信发明史
- 通信系统的模型
- 数字信号、模拟信号，基带信号、已调信号（带通信号、频带信号）
- 数字通信特点
- 通信系统分类
- 单工、半双工、全双工通信，并行传输和串行传输
- 信息及其度量
- 通信系统的有效性和可靠性



附：部分练习



练1：一个由相互独立A、B、C、D组成的消息源，在传输时采用简单二进制编码，即A编为00，B编为01，C编为10，D编为11，每个脉冲宽度为5ms，试求：

(1) 4个字母等概出现时，传输的平均信息速率和码元速率。

(2) 若A、B、C、D出现的概率分别为 $1/4$ 、 $1/5$ 、 $1/4$ 、 $3/10$ ，传输的平均信息速率和码元速率。



附：部分练习



练2：已知A、B两个八进制数字传输系统，它们的码元传输速率一样，在接收端相同时间 $T_0\text{min}$ 内，A共收到 m 个错误码元，B共收到 $m+3$ 个错误比特，试比较两个系统哪个系统性能较好，为什么？

练3：八进制数字传输系统的码元速率为 3600B ，试问要保证信息传输速率不变时，系统改为二进制和十六进制时码元速率各位多少？

练4：已知某八进制数字传输系统的码元速率为 1200B ，接收端在半小时内共接收了 324bits 错误信息，试求系统的误信率和误码率。



测试题

- 1. 设有一个二进制离散信源 (0, 1)，每个符号独立发送。
 - (1) 若 “0” 和 “1” 等概率出现，求每个符号的信息量和平均信息量（熵）；
 - (2) 若 “0” 出现的概率为 $1/3$ ，重复 (1)。

- 2. 若某四进制数字传输系统的每个码元的持续时间为 0.001s ，连续工作 1h 后，接收端收到 9 个错码，且错误码元中仅发生 1bit 的错误。
 - (1) 求该系统的码元速率和信息速率；
 - (2) 求该系统的误码率和误信率。