

现代通信原理

Modern Communication Principles

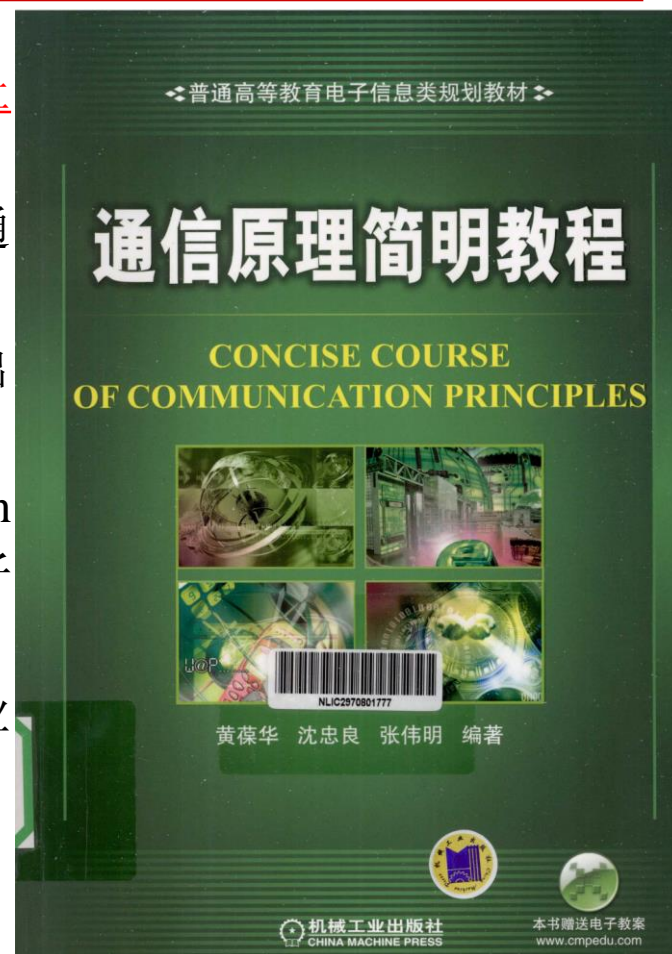
时巧

qiaoshi@swjtu.edu.cn

信息科学与技术学院

参考书籍

1. 黄葆华等，通信原理简明教程，机械工业出版社，2012
2. 周炯槃，庞沁华，续大我，吴伟陵，杨鸿文，通信原理(第4版)，北京邮电大学出版社，2015。
3. 李晓峰，周宇，周亮，通信原理，清华大学出版社（第二版）
4. Bernard Sklar, Digital Communication Fundamentals and Applications, 2nd edition, 电子工业出版社。
5. 樊昌信，曹丽娜，通信原理(第6版)，国防工业出版社，2006。
6. 课程资料: <http://dean.swjtu.edu.cn/>



课程评分

考核方式	考核详细说明	所占比例
平时成绩	课后作业、随堂测验、考勤	15%
课程设计	报告、答辩	15%
期中考试		10%
期末考试		60%
总计		100%

交作业方式：第二次上课前交上一次作业（**不补交**）

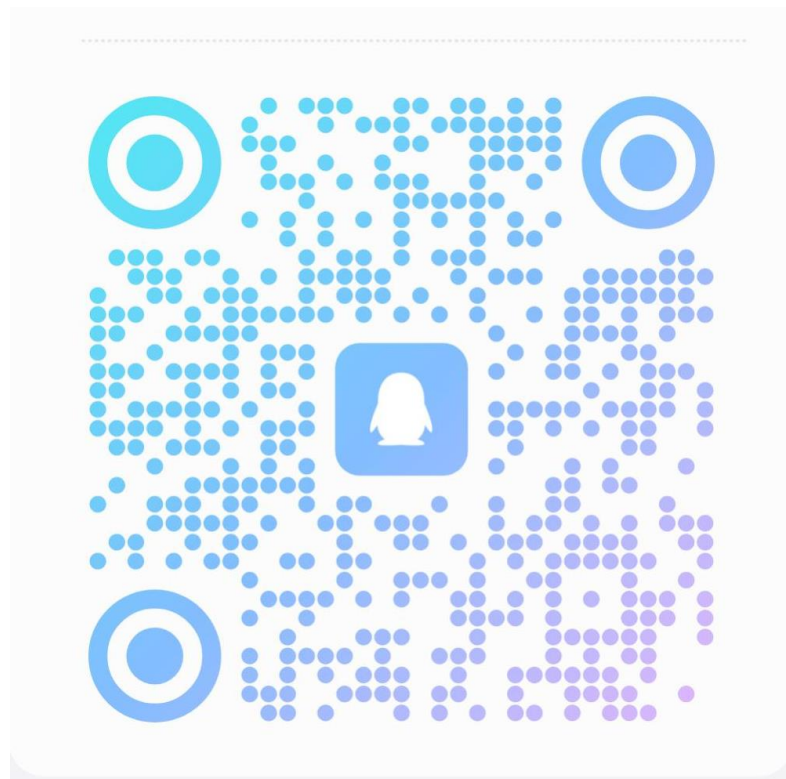
联系方式

班级QQ群：**809102787**

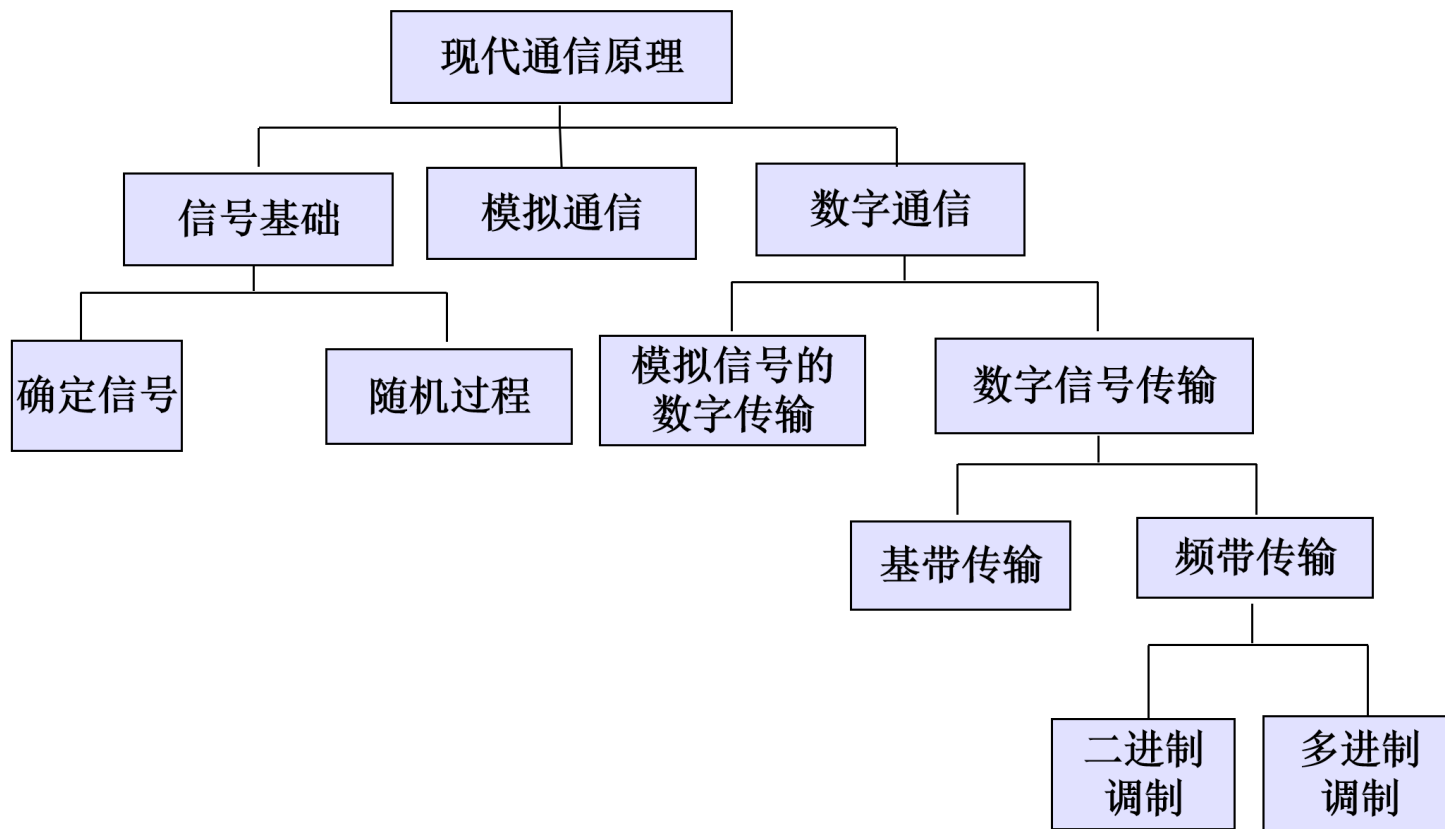
教学班号：轨道-**03**班

群名称：

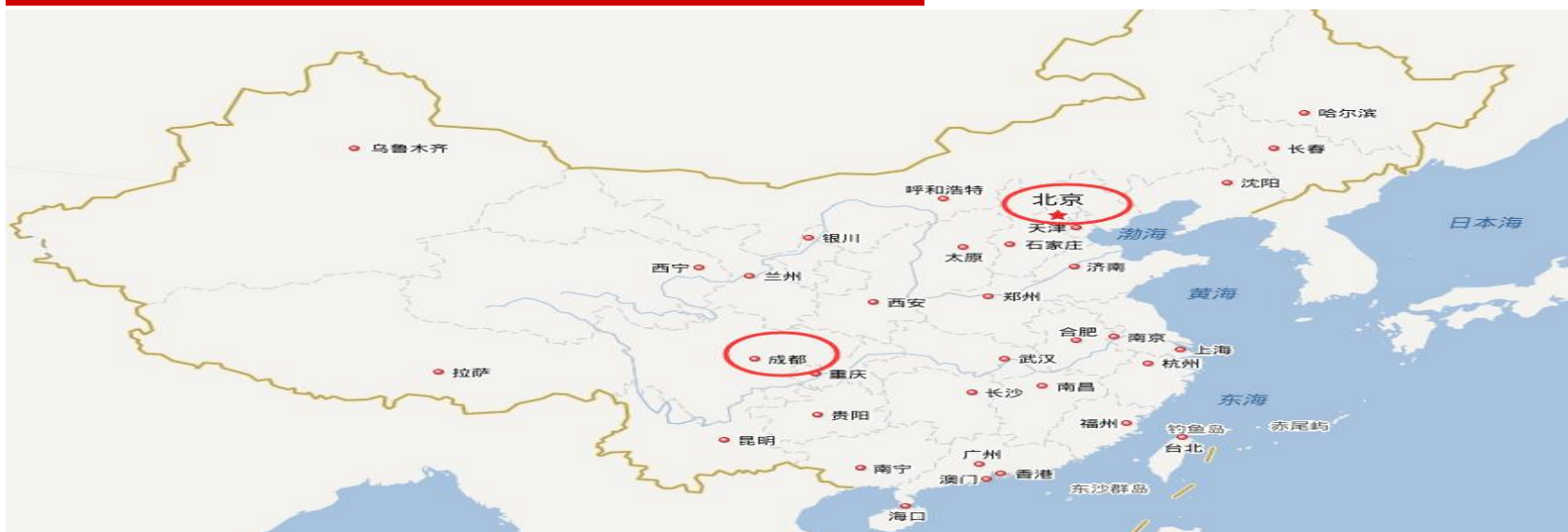
2024现代通信原理C（轨道3班）



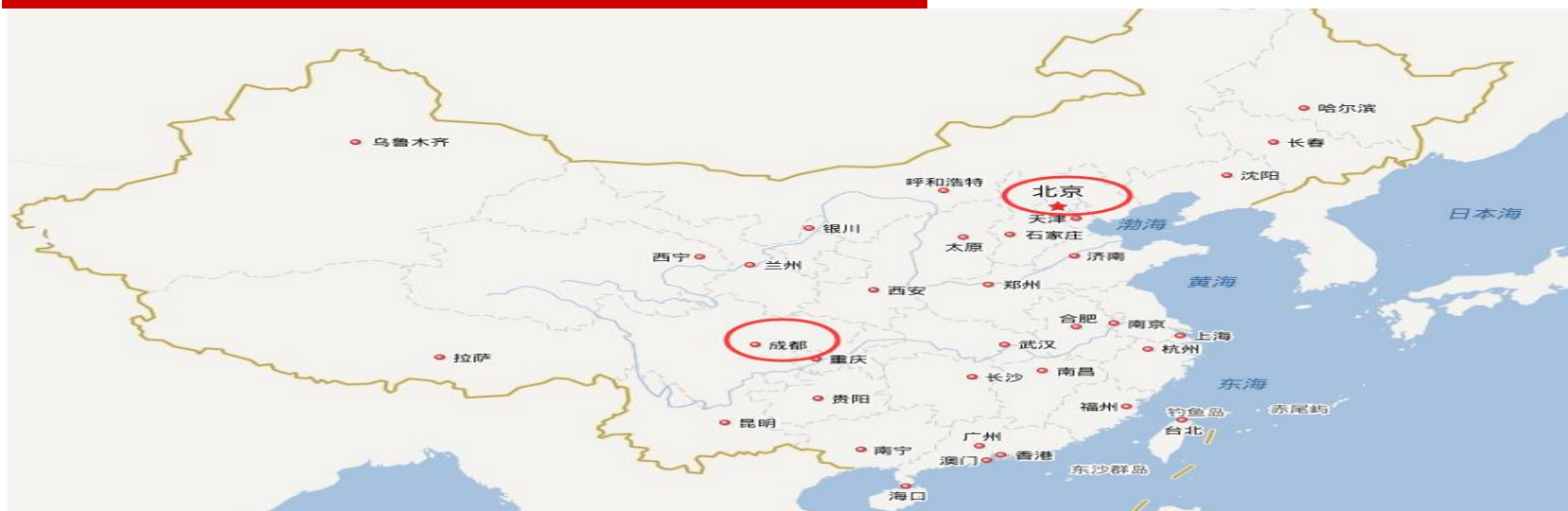
课程主要内容



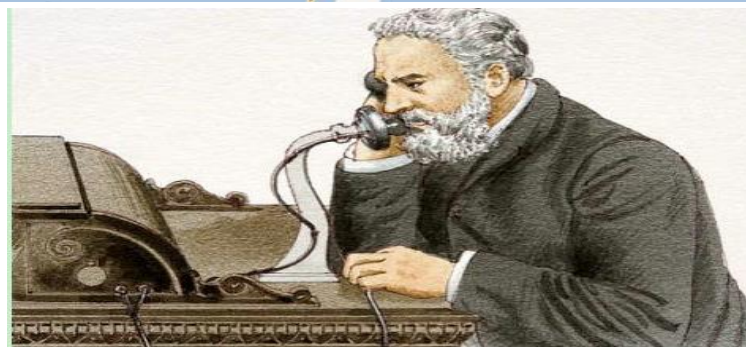
通信发展简史



通信发展简史

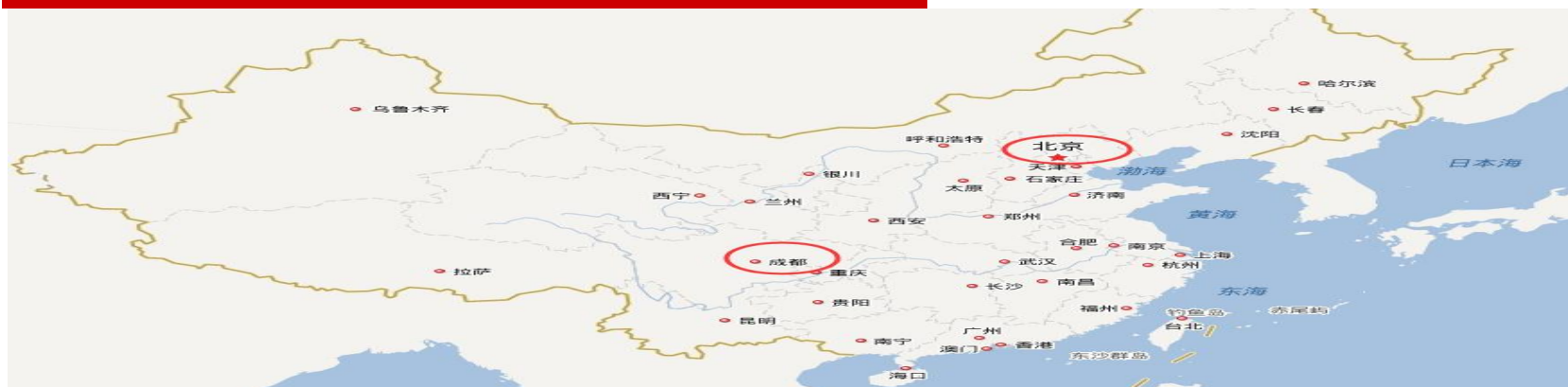


电通信时代



通信走进千家万户

通信发展简史



1G时代（80年代）
语音

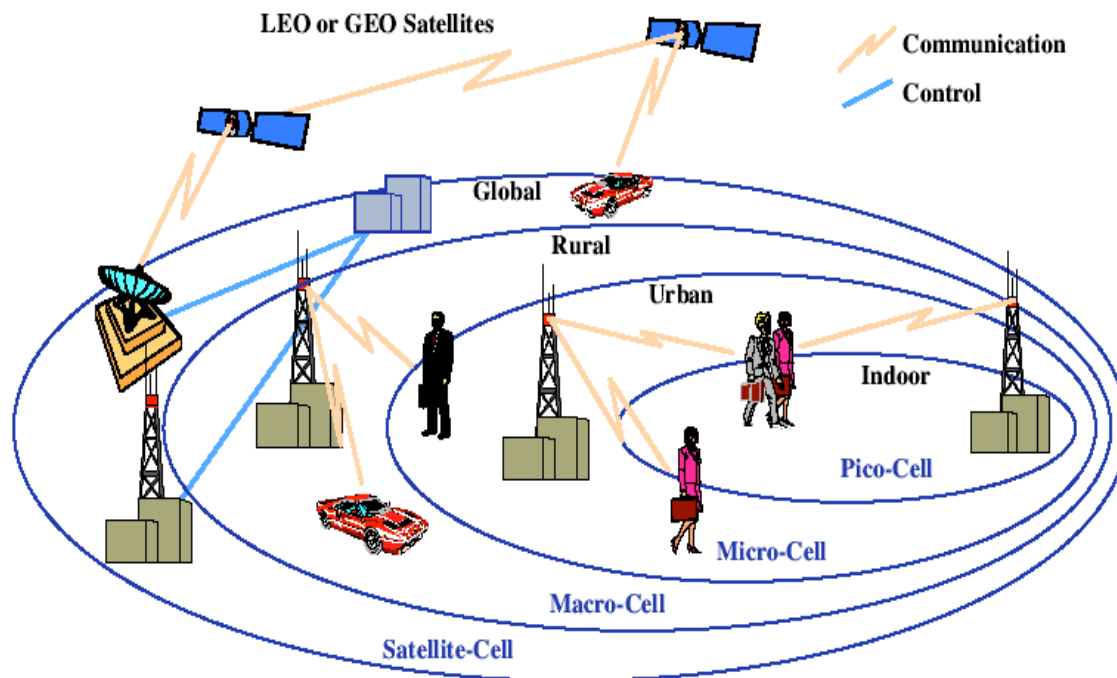


2G时代（90年代）
语音、短信



3G/4G时代
语音、短信、微信、微博...

通信发展简史



人类对新技术的追求是无止境的，对新的通信系统和通信技术的研究仍在不断进行。人类通信的目标是任何人在任何地点、任何时间，都能利用通信终端与在任何地方的人进行通信。

第1章 绪论

- **1.1** 通信系统的组成
- **1.2** 信息及其度量
- **1.3** 通信系统的性能指标

1.1 通信系统的组成

- **通信意义**：通信与传感技术、计算技术紧密结合，构成现代社会的“神经中枢”。通信技术已成为推动人类社会文明、进步与发展的巨大动力。
- **通信概念**：信息的传递过程称为通信。本课程讲述以**电信号**为信息载体的通信方式，即电通信。
- “通信系统”与“电信系统”：

通过电信号（如：电流、电压、电磁波、光波等）来传播消息的系统叫电信系统。因此，现代的“通信系统”也常叫做“电信系统”。（莫尔斯电报系统是最古老的电信系统）

1.1.1 通信系统模型及各部分作用

1. 完成信息传递所需的**通信设备**和**传输媒质**组成通信系统。

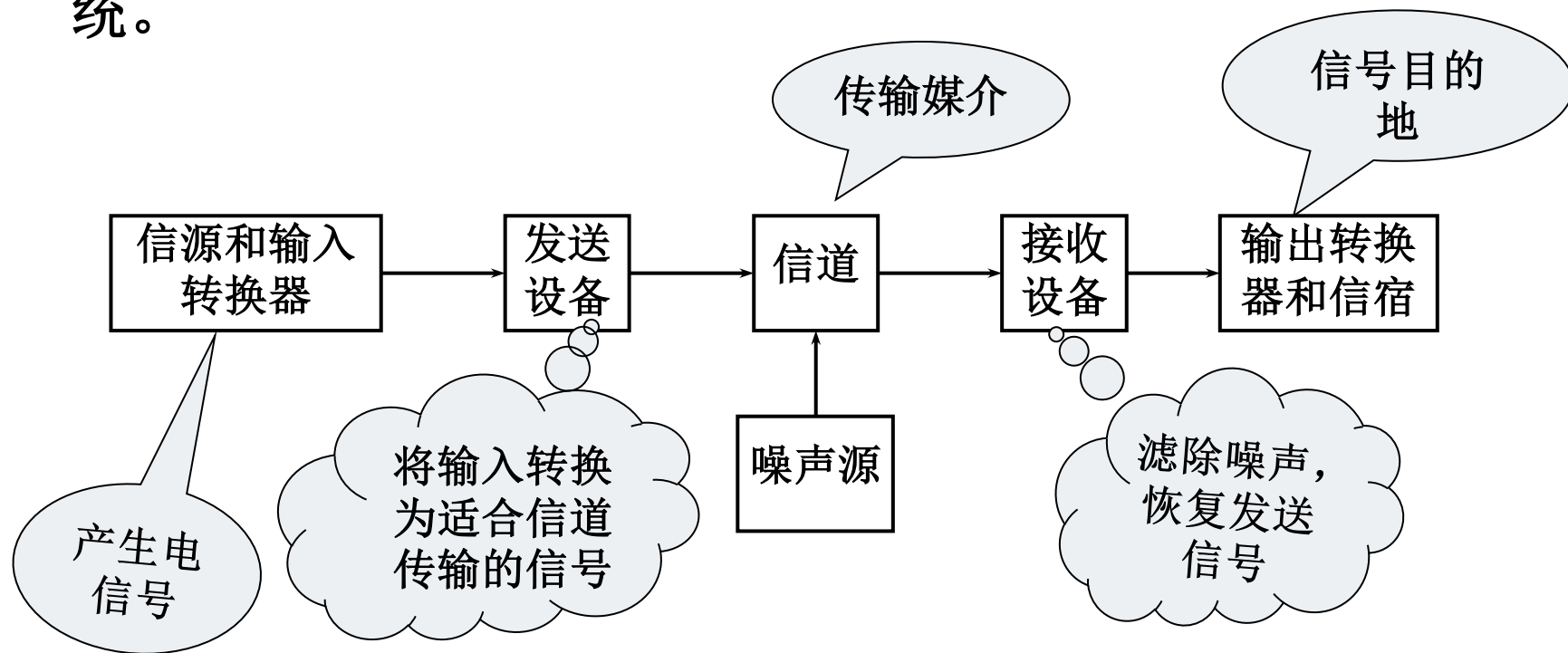


图1-1 通信系统的一般模型

1.1.1 通信系统模型及各部分作用

2. 通信系统分类

- **根据通信业务分：**电话通信系统、电报通信系统、图像通信系统、广播电视系统等。
- **根据信道分：**有线通信系统、无线通信系统等
- **根据工作波段分：**中长波通信系统、短波通信系统、超短波通信系统、微波通信系统等。
- **根据信道传输信号分：**模拟通信系统和数字通信系统。

表1-1通信波段与常用传输媒质

频率范围	波长	符号	传输媒质	用途
3Hz~30kHz	$10^4 \sim 10^8 \text{m}$	甚低频 VLF	有线线对 长波无线电	音频电话、岸与潜艇通信、 超远距离导航
30~300kHz	$10^3 \sim 10^4 \text{m}$	低频 LF	有线线对 长波无线电	电力线通信、地下岩层通信、 远距离导航
300kHz~3MHz	$10^2 \sim 10^3 \text{m}$	中频 MF	同轴电缆 中波无线电	调幅广播、业余无线电、船 用通信、中距离导航
3~30MHz	$10 \sim 10^2 \text{m}$	高频 HF	同轴电缆 短波无线电	短波广播、移动无线电话、 军用无线电通信、业余无线 电
30~300MHz	1~10m	甚高频 VHF	同轴电缆 米波无线电	调频广播、电视、雷达、军 用无线电通信
300MHz~3GHz	0.1~1m	特高频 UHF	波导 分米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、 雷达
3~30GHz	1~10cm	超高频 SHF	波导 厘米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、 雷达
30~300GH	1~10mm	极高频 EHF	波导 毫米波无线电	微波接力、雷达、射电天文 学
$10^5 \sim 10^6 \text{GHz}$	$3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6} \text{m}$	紫外、可见 光、红外	光纤 激光空间传播	光通信

1.1.2 模拟与数字通信系统模型

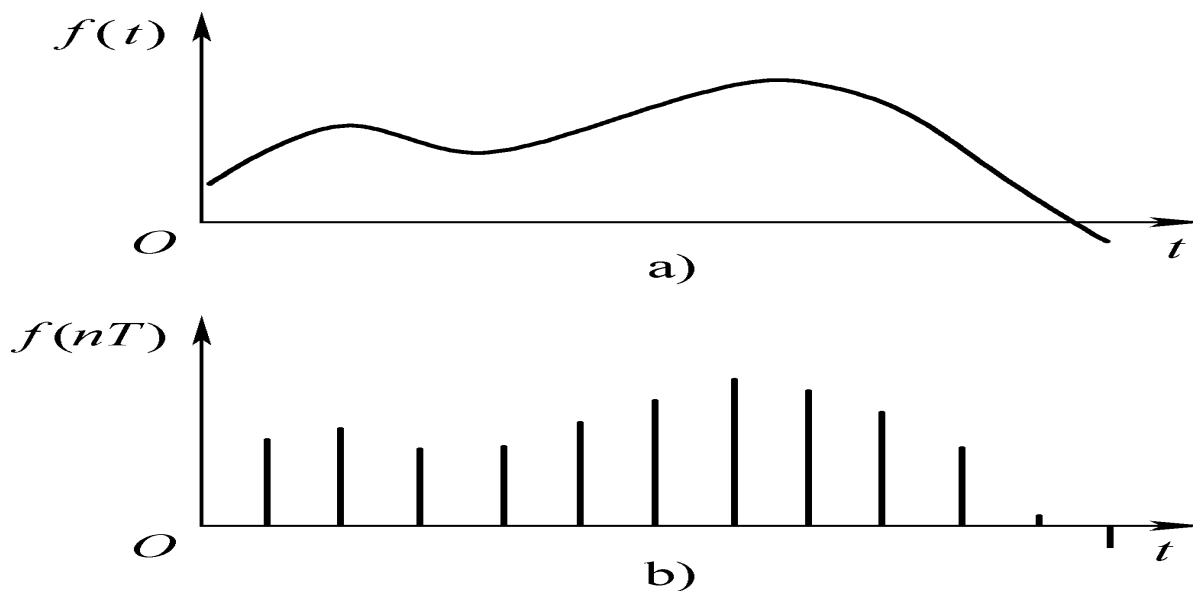
1. 模拟信号与数字信号

- 信息通常寄托在电信号的一个或几个参量上（幅度、频率、相位等）。
- 若携带信息的电信号参量的取值是连续的，则电信号携带的是连续信息，则这样的电信号称为模拟信号。
- 若携带信息的电信号参量的取值是离散的，则电信号携带的是离散信息，则这样的电信号称为数字信号。
- 时间离散信号不一定是数字信号，时间连续信号也不一定是模拟信号。
- 重点是携带信息的电信号参量是连续的还是离散

1.1.2 模拟与数字通信系统模型

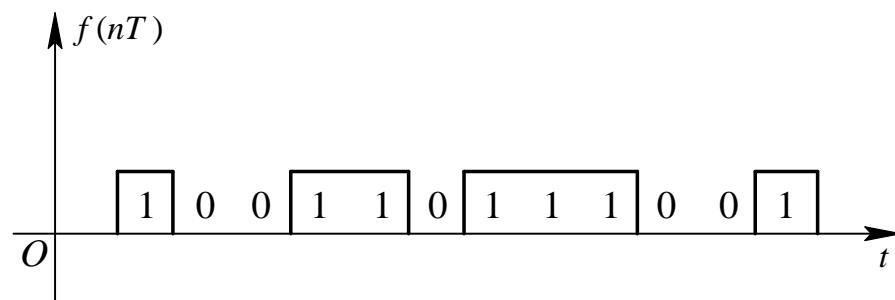
1. 模拟信号与数字信号

■ 模拟信号波形 **(a)** 连续信号； **(b)** 抽样信号

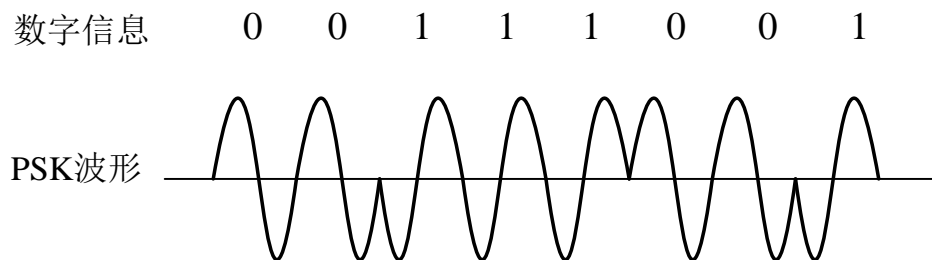


1.1.2 模拟与数字通信系统模型

■ 数字信号波形 (a) 二进制波形; (b) 2PSK波形



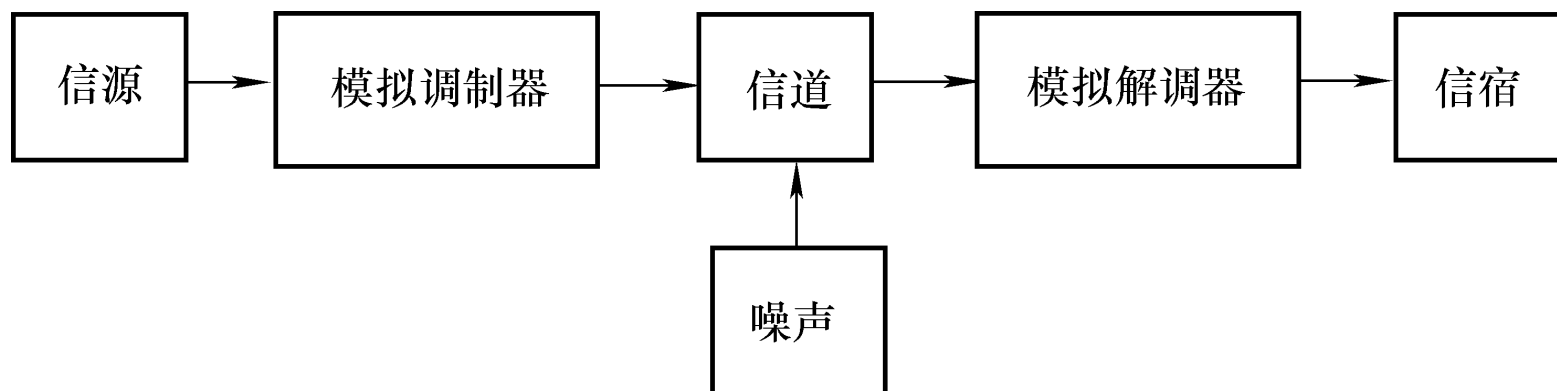
(a)



(b)

1.1.2 模拟与数字通信系统模型

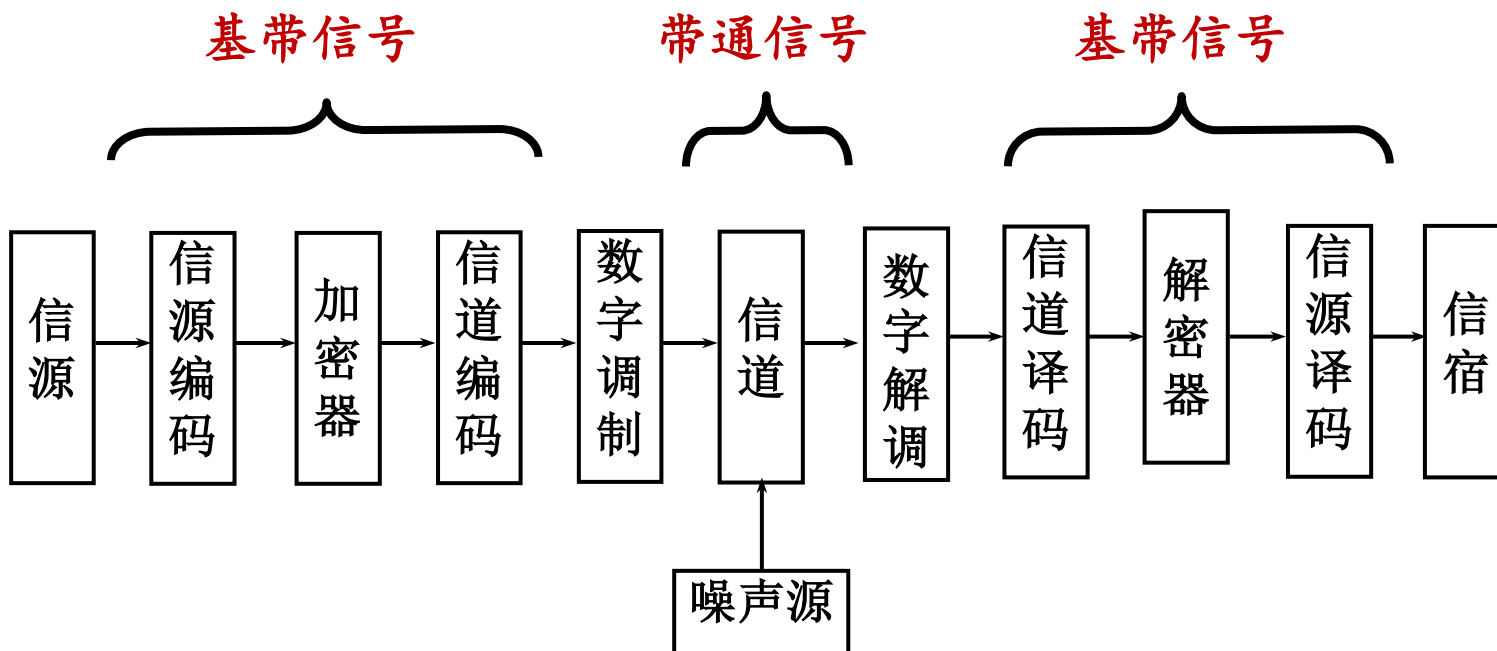
2. 模拟通信系统模型



模拟通信系统模型

1.1.2 模拟与数字通信系统模型

3. 数字通信系统模型



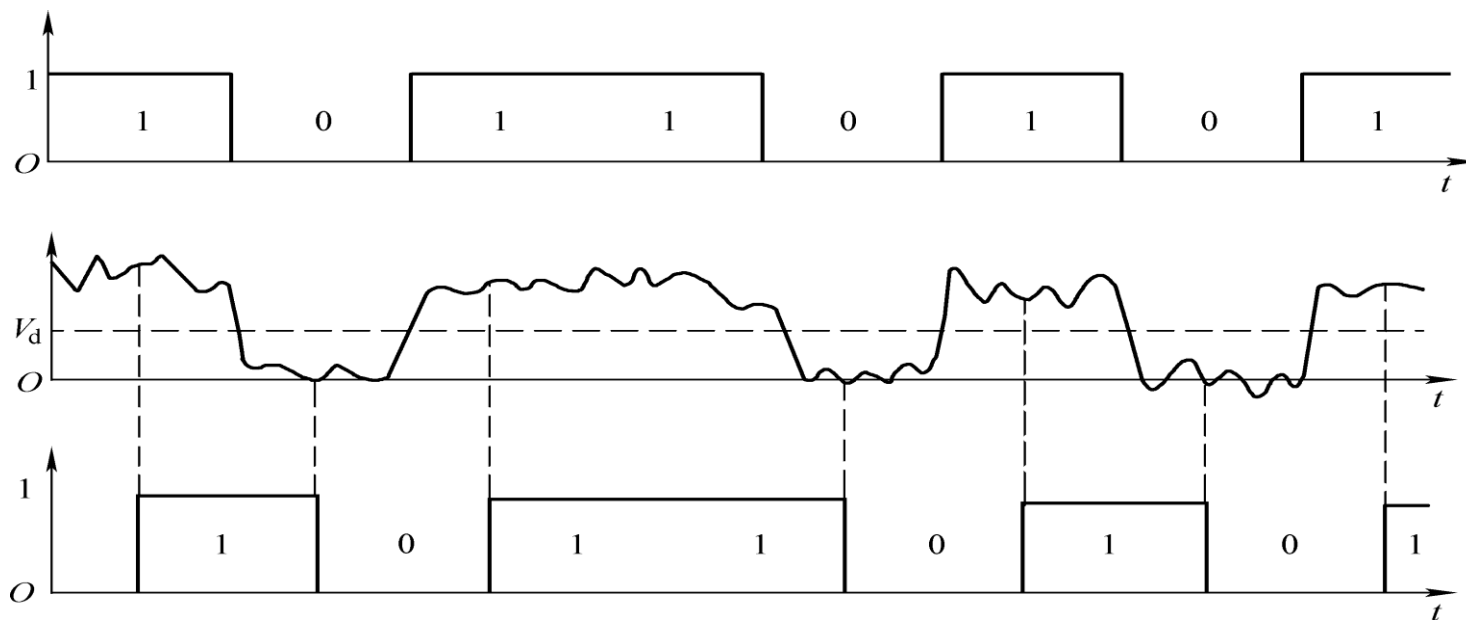
数字通信系统模型

1.1.2 模拟与数字通信系统模型

4. 数字通信的优缺点

优点:

抗噪声性能好，允许信号失真，接力通信时无噪声积累。

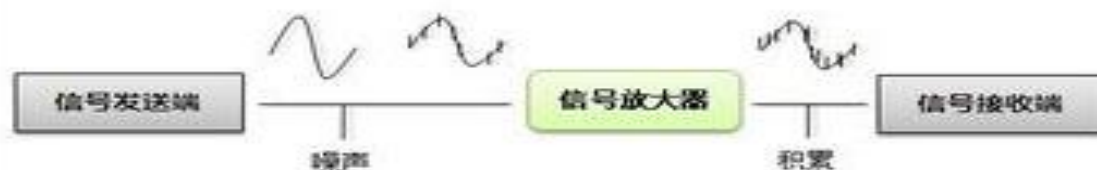
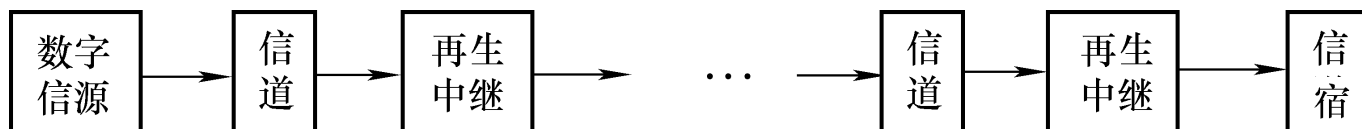


1.1.2 模拟与数字通信系统模型

4. 数字通信的优缺点

优点：

抗噪声性能好，允许信号失真，接力通信时无噪声积累。



1.1.2 模拟与数字通信系统模型

优点:

- 差错可控，可采用纠错编码及交织技术。
- 数字通信易于加密处理，保密性强。
- 便于处理、存储、交换及和计算机等设备连接，从而语音、图像、文字、数据等多种业务可以变换成统一的数字信号在同一个网络中进行传输、交换和处理。
- 易于集成化，体积小，成本低。

1.1.2 模拟与数字通信系统模型

缺点：

□ 占据更多带宽。

■ 由压缩编码及宽带信道解决

■ 如模拟话音，只有**3KHz**的带宽；数字话音，
64Kb/s

□ 同步设备复杂。

第1章 绪论

- **1.1** 通信系统的组成
- **1.2** 信息及其度量
- **1.3** 通信系统的性能指标

1.2 信息及其度量

1.信息量的定义

- 信号是消息的载体，而信息是其内涵。
- **信息量**：信息的多少，就是对消息中不确定性的度量。消息出现的概率越小，消息中包含的信息量就越大。
 - 今天太阳从东边升起
 - 今天太阳从西边升起
 - 越不可能发生的事件，越会使人感到惊奇，带来的信息越多。
- 设信息源是由离散符号事件组成的集合。每个符号的发生是相互独立的，若符号 S_i 的出现概率为 $P(S_i)$ ，则其携带的信息量为

$$I(s_i) = \log_2 \frac{1}{P(s_i)} = -\log_2 P(s_i) \text{ bit}$$

1.2 信息及其度量

【例1-1】在26个英文字母中，e出现的概率为0.105，x出现的概率为0.002，试求e和x的信息量。

$$I(S_i) = \log_2 \frac{1}{P(S_i)} = -\log_2 P(S_i) \text{ bit}$$

解 由于 $P(e)=0.105$, $P(x)=0.002$, 由信息量定义式，得两个字母的信息量分别为

$$I(e) = \log_2 \frac{1}{P(e)} = \log_2 \frac{1}{0.105} = 3.25(\text{bit})$$

$$I(x) = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 \frac{1}{0.002} = 8.97(\text{bit})$$

1.2 信息及其度量

【例1-2】设有一个离散信源，输出四种不同的符号，已知符号 s_1 出现的概率为0.5，符号 s_2 的概率为0.25，其余两种符号 s_3 、 s_4 等概出现，求信源每种符号携带的信息量。

$$I(S_i) = \log_2 \frac{1}{P(S_i)} = -\log_2 P(S_i) \text{ bit}$$

解 由题意及信息量定义式得：

$$P(s_1) = 0.5, \text{ 则 } I(s_1) = \log_2 \frac{1}{0.5} = \log_2 2 = 1 \text{ bit}$$

$$P(s_2) = 0.25, \text{ 则 } I(s_2) = \log_2 \frac{1}{0.25} = \log_2 4 = 2 \text{ bit}$$

$$P(s_3) = 0.125, \text{ 则 } I(s_3) = \log_2 \frac{1}{0.125} = \log_2 8 = 3 \text{ bit}$$

$$P(s_4) = 0.125, \text{ 则 } I(s_4) = \log_2 \frac{1}{0.125} = \log_2 8 = 3 \text{ bit}$$

1.2 信息及其度量

2. 熵的概念

设信源输出 M 种离散符号 s_1, s_1, \dots, s_M , 每种符号的出现概率都是独立的, 第 i 种符号 s_i 出现的概率为 $P(s_i)$, 且 $\sum_{i=1}^M P(s_i) = 1$, 则信源的每个符号的平均信息量为

$$H(S) = \sum_{i=1}^M P(s_i) I(s_i) = -\sum_{i=1}^M P(s_i) \log_2 P(s_i) \text{ (bit/sym)}$$

可以证明, 当信源的 M 中符号等概出现时, 该信源每个符号的平均信息量最大, 即信源熵有最大值, 可表示为

$$H_{\max}(S) = \sum_{i=1}^M P(s_i) I(s_i) = \sum_{i=1}^M \frac{1}{M} \log_2 M = \log_2 M$$

【例1-3】某离散信源由0，1，2，3四种符号组成，且各符号独立出现。

- (1) 若符号“0”，“1”，“2”，“3”出现概率分别为1/2，1/4，1/8，1/8，求该信源每个符号的平均信息量。
- (2) 求符号序列1020，0100，0130，0130，0120，3210，1003，0101，0023，1000，0201，0310，0321，0012，0010的信息量。
- (3) 若四种符号等概出现，则信源熵为多少？

$$H(S) = \sum_{i=1}^M P(s_i) I(s_i) = - \sum_{i=1}^M P(s_i) \log_2 P(s_i)$$

解 (1) 由式 (1-2) 求得信源每个符号的平均信息量为

$$\begin{aligned} H(S) &= \sum_{i=1}^M P(S_i) I(S_i) \\ &= \frac{1}{2} \log_2 2 + \frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{1}{8} \log_2 8 + \frac{1}{8} \log_2 8 \\ &= 0.5 + 0.5 + 0.375 + 0.375 \\ &= 1.75 (\text{bit/sym}) \end{aligned}$$

故60个符号的总信息量为

$$I = 60H(S) = 60 \times 1.75 = 105(\text{bit})$$

(2) 此符号序列中，符号“0”出现31次，符号“1”出现15次，符号“2”出现7次，符号“3”出现7次，共有60个符号，故该符号序列的信息量为

$$\begin{aligned} I &= 31I(0) + 15I(1) + 7I(2) + 7I(3) \\ &= 31 \log_2 2 + 15 \log_2 4 + 7 \log_2 8 + 7 \log_2 8 \\ &= 31 + 30 + 21 + 21 = 103 \text{ (bit)} \end{aligned}$$

103
bit?

105
bit?



符号序列长度增加，两种计算的误差趋近于0.

(3) 当四种符号等概时，每个符号携带相同的信息量，信源熵达最大值，即

$$H_{max} = \log_2 M = \log_2 4 = 2 \text{ (bit/sym)}$$

第1章 绪论

- **1.1** 通信系统的组成
- **1.2** 信息及其度量
- **1.3** 通信系统的性能指标

1.3 通信系统的性能指标

- 有效性和可靠性。
- **有效性**是指在给定信道内所传输的信息内容的多少，或者说是传输的“**速度**”问题；
- **可靠性**是指接收信息的准确程度，也就是传输的“**质量**”问题。
- 这两个问题**相互矛盾而又相对统一**，通常可以互换。

1.3.1 模拟通信系统主要性能指标

- **有效性可用有效传输频带来度量**，同样的消息用不同的调制方式，则需要不同的频带宽度。
- **可靠性用接收端最终输出信噪比来度量**。不同调制方式在同样信道信噪比下所得到的最终解调后的信噪比是不同的。
 - 如调频信号抗干扰能力比调幅好，但调频信号所需传输频带却宽于调幅。

调频信号的可靠性更高，但是有效性不如调幅信号。

1.3.2 数字通信系统主要性能指标

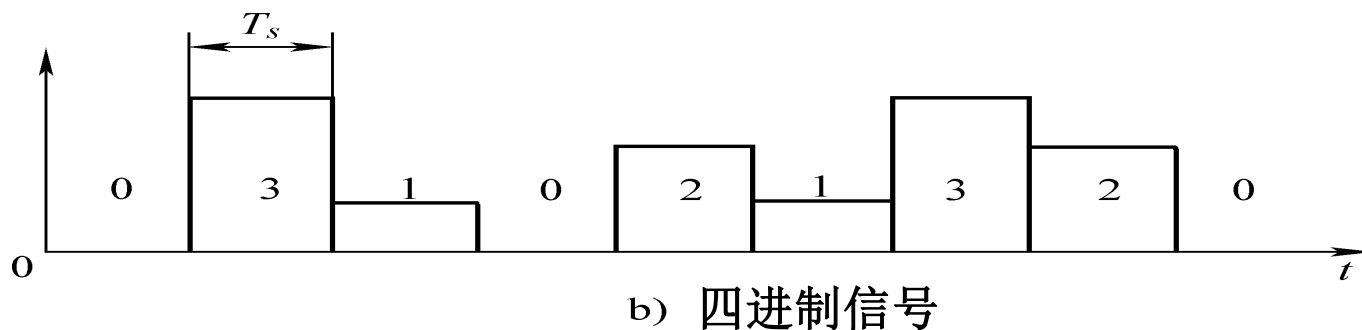
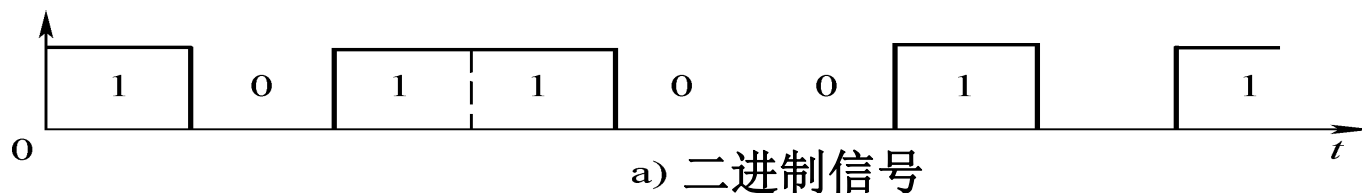
- **有效性：**码元速率、信息速率及频带利用率
- **码元速率**，每秒传输码元的数目，

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

单位波特，简记**Baud**或**B**，其中 T_s 为码元持续时间或码元宽度或码元间隔。

1.3.2 数字通信系统主要性能指标

□ 码元速率与进制数无关，只与码元宽度有关。



1.3.2 数字通信系统主要性能指标

- 信息速率，表示每秒传输的信息量

$$R_b = H(S) R_s$$

其中， $H(S)$ 为每符号信息量， R_s 为码元速率，单位为比特 / 秒，记为bit/s或b/s

- 当各符号等概时，信息速率达到最大值：

$$R_b = R_s \log_2 M$$

其中， M 为进制数。

1.3.2 数字通信系统主要性能指标

【例1-5】某二进制系统1分钟传送了18000bit信息。问：

(1) 其码元速率和信息速率为多少？

(2) 若保持信息速率不变，改用8进制传输，则码元速率为多少？

解 由题意， $T = 60s$ ， $I = 18000bit$

(1) $R_b = I/T = 18000/60 = 300 \text{ bit/s}$ ，又因为 $M=2$ ，故码元速率为

$$R_S = R_b / \log_2 M = 300 / \log_2 2 = 300B$$

(2) $R_b = 300bit/s$ ，且 $M=8$ ，则码元速率为

$$R_S = R_b / \log_2 M = 300 / \log_2 8 = 100B$$

1.3.2 数字通信系统主要性能指标

□ **频带利用率**，用于对比传输特定速率的信息所占用的信道带宽。

(1) 码元频带利用率，每**Hz**信道上码元传输速率

$$\eta_s = \frac{R_s}{B} \quad \text{Baud/Hz}$$

(2) 信息频带利用率，每**Hz**信道上信息传输速率

$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \quad \text{bit/s/Hz}$$

1.3.2 数字通信系统主要性能指标

【例1-6】设A系统为二进制传输系统，码元速率为2000Baud，占用信号带宽为2000Hz，B系统为四进制传输系统，码元速率为1000Baud，占用信道带宽为1000Hz。试问：A、B两个系统中哪个系统的有效性更高？

解 由题意， $M_A=2$ ， $M_B=4$ ， $R_{sA}=2000\text{B}$ ， $R_{sB}=1000\text{B}$ ， $B_A=2000\text{Hz}$ ， $B_B=1000\text{Hz}$ ，故可求得

$$\text{A系统的信息传输速率为} \quad R_{bA} = R_{sA} \log_2 M_A = 2000 \times \log_2 2 = 2000\text{b/s}$$

$$\text{A系统的信息频带利用率为} \quad \eta_A = \frac{R_{bA}}{B_A} = \frac{2000}{2000} = 1\text{b/s/Hz}$$

$$\text{B系统的信息传输速率为} \quad R_{bB} = R_{sB} \log_2 M_B = 1000 \times \log_2 4 = 2000\text{b/s}$$

$$\text{B系统的信息频带利用率为} \quad \eta_B = \frac{R_{bB}}{B_B} = \frac{2000}{1000} = 2\text{b/s/Hz}$$

所以，B系统的有效性更好。

1.3.2 数字通信系统主要性能指标

□ **可靠性：** 误码率、误比特率

□ 误码率（误符号率）：

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输的总码元数}}$$

□ 误比特率（误信率）：

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输的总比特数}}$$

□ 二进制系统中， **$P_e = P_b$** ，在 **M** 进制系统中两者关系较复杂，若一个码元中最多发生**1bit**错误，则有 $P_b = \frac{P_e}{\log_2 M}$

1.3.2 数字通信系统主要性能指标

【例1-7】设某四进制数字传输系统的码元传输速率为1200B, 连续工作1小时后, 接收端收到6个错码, 且错误码元中仅发生1比特的错误。求该系统的误码率和误比特率。

解 该系统的信息传输速率为 $R_b = R_s \log_2 M = 1200 \times 2 = 2400b/s$

则1小时传送的码元数为 $N = R_s t = 1200 \times 3600 = 432 \times 10^4(\text{个})$

故误码率为 $P_e = \frac{N_e}{N} = \frac{6}{432 \times 10^4} = 1.39 \times 10^{-6}$

当每个错误码元中仅发生1比特的错误时, 误比特率为

$$P_b = P_e / \log_2 M = 6.94 \times 10^{-7}$$

本章小结

□ 基本概念：

- 通信：信息或消息的传输与交换
- 消息：信息源所产生的信息的物理表现
- 信息：消息的内涵
- 信号：消息的物理载体，携带信息的物理过程
- 数字信号：信号参量只能取有限个值。
- 模拟信号：信号参量能连续取值或有无穷个取值

□ 信息量

□ 通信系统的组成

- 模拟通信系统模型
- 数字通信系统模型

□ 数字通信的特点

□ 通信系统质量指标

- 有效性
- 可靠性

□ 作业:

1-2 1-5 1-6 1-7 1-9