

通信原理

陈莉萍

计算机学院网络技术中心

QQ: 389174274

课程简介

■ 教学目标

- 专业基础理论课程，32学时/2学分
- 本课程为北邮计算机学院网络工程及相关专业学生开设，适用于非通信专业本科学生
- 其目的是使计算机相关专业毕业的学生具有一定的通信知识背景，了解和掌握现代通信系统的基本概念、原理及相关技术，尤其是数字通信的基础理论，为进一步学习通信和网络专业课程打下基础

■ 内容和基本要求

- 通信系统的基本概念
- 基本模型和原理
- 通信系统性能分析的基本方法

■ 教材

- 《通信原理》（第7版）樊昌信等，国防工业出版社，2016

■ 参考书籍

- 《通信原理》（第4版），周炯磐等，北京邮电大学出版社
- 《通信系统》（第4版），[加] Simon Haykin著，电子工业出版社

教学内容

- 通信基本模型
- 确知和随机信号分析
- 调制基本概念
- 数字基带传输系统
- 数字带通传输系统
- 模拟信号数字化

■ 先修内容

- 傅立叶分析、概率论与随机过程

■ 考核方式

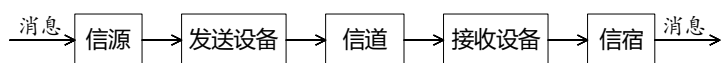
- 总评成绩 = 平时作业40% + 期末考试60%
- 2~3周交一次作业，下课之前提交（数学作业纸）

第一章

绪 论

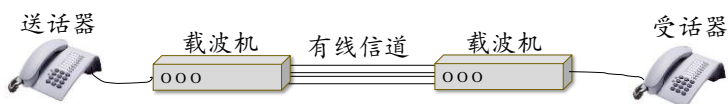
1.1 通信系统模型

- 通信
 - 互通信息，信息的传输和交换
- 通信系统
 - 完成通信过程的全部设备和传输媒质
- 本课程主要研究单向、点对点的电信号传输原理

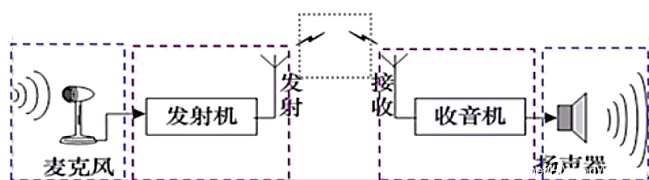


■ 通信系统示意

- 有线载波电话系统



- 无线广播系统

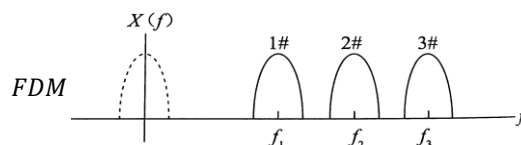
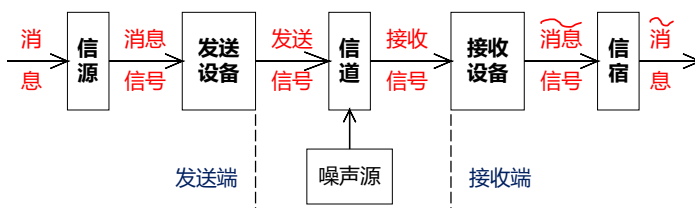


主要内容

- 通信系统的基本模型
- 信息及其度量
- 主要性能指标

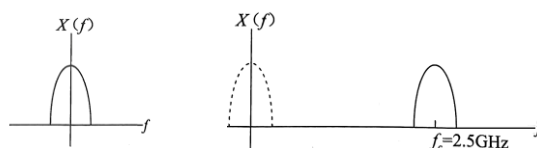
一. 基本模型

- 通信的目的是通过信号形式传递消息中的信息
 - 信息是传输的本质，消息是信息的物理表现形式，信号是消息的载体，信号是信息的数学表示形式，通信过程通过消息和信号的变换过程，传递信息。



说明

- 话音声波转换为电信号，频率在300~3400Hz
- 人可听到的声音频率范围20~20kHz
- 天线尺寸约为辐射信号波长的十分之一
- 原始电信号不适合直接传输，需要调制，将信号的频率范围“搬移”到信道通频带之内



■ 信源

- 信息源即输入设备，将各种消息转换成消息信号，即原始电信号，也称为**基带信号**
- 常见消息形式：语音、音乐、图像、温度、文字等原始物理量
- 输入设备：（电话、录音设备）拾音器、（计算机）键盘和鼠标、（相机和摄像机）图像传感器、温度传感器等

■ 信道

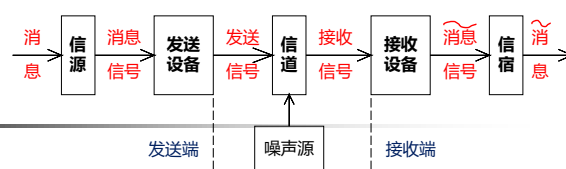
- 将来自发送设备的信号传送到接收端的物理媒质，分为有线信道和无线信道
 - 有线信道：双绞线、同轴电缆、光纤等
 - 无线信道：无线广播信道、无线移动信道、卫星信道等
- 信道一方面对信号提供**传输通路**，另一方面会对信号产生各种**干扰和噪声**

■ 接收设备

- 完成发送设备的逆变换
- 从受到减损的接收信号中正确恢复出原始电信号，输出只能是原始基带信号的估值
- 如：接收天线、放大器、滤波器、解调器、解码器（译码器）、解复用器、解密器等

■ 发送设备

- 将信源产生的原始电信号变换成适合在信道中传输的信号
- 如：载波发生器、调制器、放大器、滤波器、信源编码器、信道编码器、多路复用器、加密器、发射天线等



■ 噪声源

- 指分散在通信系统各处的噪声的集中表示，是随机的、有害的、无用的电信号
- 类型
 - 人为噪声：电火花、汽车点火、无线电干扰等
 - 自然噪声：闪电、太阳黑子、宇宙噪声、磁暴等
 - 内部噪声：自由电子热运动等

■ 信宿

- 受信者（输出设备）
- 功能与信源相反，把恢复的原始电信号还原成相应的物理量
- 如：（手机、音响、电脑）扬声器、（电脑、电视机）显示器、（相机、打印机）显影系统等

二. 模拟通信系统与数字通信系统

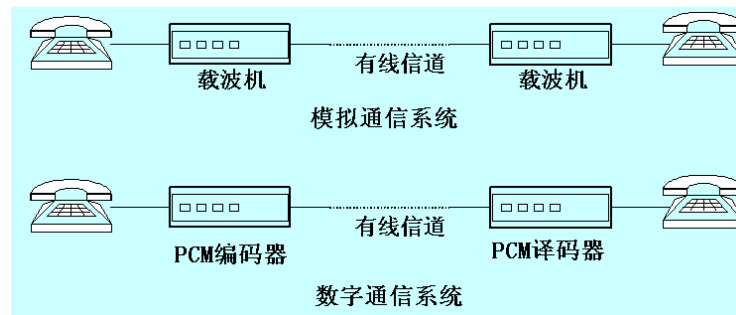
■ 按信道中传输信号的特征分类

- 模拟通信系统：信道中传输的是模拟信号
- 数字通信系统：信道中传输的是数字信号

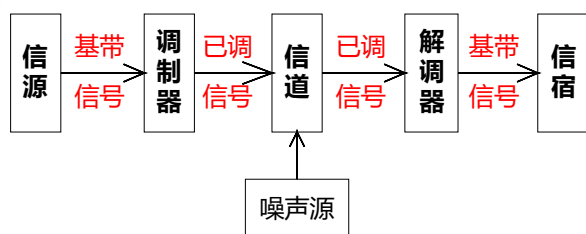
■ 模拟信号和数字信号

- 模拟信号——电信号参量取值连续无限
- 数字信号——电信号参量取值离散有限

■ 电话通信系统



1. 模拟通信系统



• 两种重要变换

- 消息 \leftrightarrow 原始电信号（基带信号）
- 基带信号 \leftrightarrow 已调信号（频带信号/带通信号）

■ 基带信号

- 基带的含义是指信号的频谱从零频附近开始，如：语音信号为300~3400Hz，图像信号为0~6MHz
- 原始的模拟电信号，一般含直流和低频，不宜直接传输

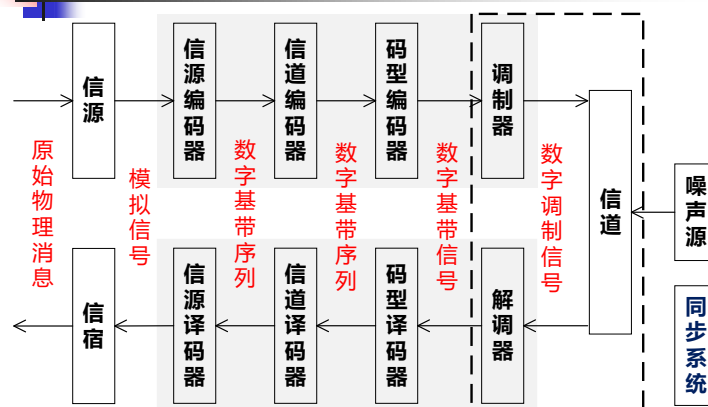
■ 已调信号

- 是适合在信道中传输的信号
- 已调信号的频谱具有带通形式，且中心频率远离零频，又称**带通信号**（频带信号）

■ 模拟通信系统的特点

- 抗干扰能力差
- 不易于保密通信
- 设备不易于大规模集成
- 不适于计算机通信
- 简单、易于实现

■ 2. 数字通信系统



■ 信源编码与译码目的

- 完成模/数转换
- 提高信息传输的有效性，即数据压缩

■ 信道编码与译码目的

- 增强抗干扰能力，即差错控制

■ 码型编码与译码目的

- 码型变换、波形变换、滤波等，形成适合在信道中传输的基带信号

■ 数字调制与解调目的

- 形成适合在信道中传输的带通信号

■ 同步目的

- 使收发两端的信号保持步调一致

■ 数字通信系统的特点

■ 优点

- 抗干扰能力强
- 传输差错可控
- 便于计算机存储和处理
- 易于集成，通信设备微型化，重量轻
- 易于加密处理，且保密性好

■ 缺点

- 需要较大的传输带宽
- 对同步要求高

■ 数字通信主要研究问题

- 模拟信号的数字化
- 数字基带信号特性
- 系统的抗噪声性能
- 数字调制与解调原理
- 同步方法
- 差错控制编码
- 加解密算法
-

■ 通信系统的任务

- 传输系统的利用
- 同步
- 差错控制
- 拥塞控制
- 流量控制
- 交换技术与管理
- 寻址和路由选择
- 安全机制
- 网络管理

1.2 信息及其度量

- 通信的目的在于传递信息，信息是消息中的有效内容

■ 信息的度量：信息量

- 与消息的种类及消息的重要程度无关
- 信息量的大小与消息的不确定程度直接相关，消息的不确定程度越大，信息量越大
- 通信过程从消息的不确定到确定，从而获取信息
- 事件的不确定性可以用概率描述，可建立信息量度量的方法

一. 信息量定义

- 信息量可以用消息中事件发生的概率来描述

- 设： I — 消息中所含的信息量

$P(x)$ — 消息中事件发生的概率

- 则 I 和 $P(x)$ 之间应有如下关系：

① $I = I[P(x)]$

② $I[P(x)]$ 是单调递减函数

$P(x) = 1$ 时， $I = 0$ ； $P(x) = 0$ 时， $I = \infty$

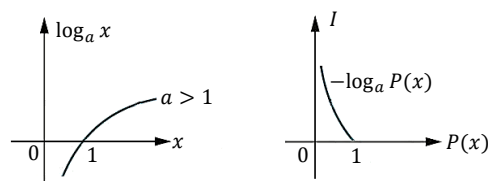
- ③ 若干相互独立事件构成的消息，所含信息量等于各独立事件信息量之和

$$I(x_1, x_2 \cdots x_n) = I(x_1) + I(x_2) + \cdots I(x_n)$$

■ 信息量定义

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

- 若 $a = 2$, I 的单位称为 **比特 (bit)**
- 若 $a = e$, I 的单位称为奈特 (nat)
- 若 $a = 10$, I 的单位称为哈特莱 (Hartley)



各独立事件联合发生的概率, 等于各独立事件概率乘积。

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

■ 联合消息的信息量等于各独立消息的信息量之和

$$I(x_1, x_2 \cdots x_n) = I(x_1) + I(x_2) + \cdots I(x_n)$$

■ 证: $I[P(x_1) \cdot P(x_2) \cdots P(x_n)]$

$$= -\log_2 [p(x_1) \cdot p(x_2) \cdots p(x_n)]$$

$$= -[\log_2 p(x_1) + \log_2 p(x_2) + \cdots + \log_2 p(x_n)]$$

$$= -\sum_{i=1}^n \log_2 p(x_i) = \sum_{i=1}^n I[p(x_i)]$$

二. 信息量的度量

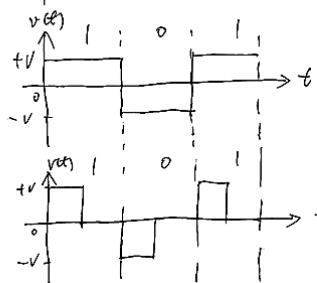
- 等概率、离散消息的信息量
- 不等概率、离散消息的信息量

- **信源消息**的信息量度量
- 离散消息由**码元/符号**组成
- 信源的消息 (码元/符号) 是有限可数的
- 各消息码元/符号出现的概率是相互独立的

数字信号以二种取值(波形), 称为一个码元(符号)

例: 二进制数字信号有二种取值 0, 1

即二种码元/符号, 二种波形表示



$$P(0) = P(1) = \frac{1}{2} \quad I = I_0 = I_1 = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1 \text{ bit/符号}$$

■ 等概率离散消息的信息量

- 若信源是 M 种符号波形, 等概率出现, 且各符号的出现是相互独立的, 则**每符号**的信息量为:

$$I = \log_2 \frac{1}{p(x)} = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \text{ (bit/符号)}$$

- 二进制符号的信息量: $I = 1 \text{ (bit/符号)}$
- M 进制符号的信息量: $I = \log_2 M \text{ (bit/符号)}$

■ 不等概率离散消息的信息量

- 设信源是由 M 种符号波形组成的集合, 各个符号 x_i 出现的概率为 $P(x_i)$, 且相互独立, 并满足:

$$\sum_{i=1}^M P(x_i) = 1, \text{ 则每符号的平均信息量为:}$$

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

- $H(x)$ 称为信源的**熵**, 只与符号概率分布有关

说明：不均概

① 平均信息量 = 各符号信息量 × 符号概率

$$\begin{aligned} & P(x_1) \cdot [-\log_2 P(x_1)] + P(x_2) \cdot [-\log_2 P(x_2)] + \dots + P(x_m) \cdot [-\log_2 P(x_m)] \\ &= \sum_{i=1}^m P(x_i) \cdot [-\log_2 P(x_i)] \\ &= -\sum_{i=1}^m P(x_i) \cdot \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit/符号}) \end{aligned}$$

② 对于等概率，各符号信息量相同，即： $-\log_2 P(x_i) = \log_2 M$

$$\begin{aligned} H(x) &= \sum_{i=1}^m P(x_i) \cdot [-\log_2 P(x_i)] \\ &= \sum_{i=1}^m [P(x_i) \cdot \log_2 M] \\ &= \log_2 M \cdot \sum_{i=1}^m P(x_i) \\ &= \log_2 M \quad (\text{bit/符号}) \end{aligned}$$

符号	概率1	概率2	概率3
00	1/4	3/8	1
01	1/4	1/4	0
10	1/4	1/4	0
11	1/4	1/8	0

■ 解：

- $H_1 = \log_2 M = \log_2 4 = 2 \text{ bit/符号}$
- $H_2 = -\left[\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} + \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8}\right] = 1.906 \text{ bit/符号}$
- $H_3 = -[1 \log_2 1 + 0 + 0 + 0] = 0$

■ 等概率时信源熵最大， $H_{\max} = \log_2 M$ (bit/符号)

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

“OK”消息：O：_ _ _，K：_ . _

■ 解：

■ 设“.”出现的概率是 P ，“_”出现的概率是 P_-

$$\begin{aligned} (1) \quad & \begin{cases} P = \frac{1}{3} P_- \\ P + P_- = 1 \end{cases} \Rightarrow P = \frac{1}{4}, P_- = \frac{3}{4} \\ & I = \log_2 \frac{1}{P} = \log_2 4 = 2 \text{ bit} \\ & I_- = \log_2 \frac{1}{P_-} = \log_2 \frac{4}{3} = 0.415 \text{ bit} \end{aligned}$$

$$(2) H = P \times I + P_- \times I_- = \frac{1}{4} \times 2 + \frac{3}{4} \times 0.415 = 0.81 \text{ bit/符号}$$

$$\begin{aligned} (3) I &= I \times \text{点数} + I_- \times \text{划数} = 2 \times 1 + 0.415 \times 5 = 4.075 \text{ bit} \\ I &= n \cdot H = 6 \times 0.81 = 4.86 \text{ bit} \end{aligned}$$

■ 例1：

■ 一个离散信源，消息符号有四种取值，各符号出现相互独立，求信源熵。

符号	概率1	概率2	概率3
00	1/4	3/8	1
01	1/4	1/4	0
10	1/4	1/4	0
11	1/4	1/8	0

■ 例2：

- 国际摩尔斯电码用“点”和“划”序列发送英文字母和数字，且“.”出现的概率是“_”的1/3，求：
 - .和_各自的信息量
 - .和_的平均信息量
 - 发送“OK”消息的信息量，其中：O：_ _ _，K：_ . _
- 一条消息的信息量： $n \cdot H(x)$

1.4 主要性能指标

- 通信技术发展的历史是人们长期寻求如何利用各种媒介实现迅速而又准确地传递更多信息到更远地方的历史。
- 通信系统的主要性能指标
 - 有效性 → 系统传输信息的效率
→ 在给定的信道内能容纳多少信息量，才能实现通信资源（频率、时间）的充分利用
 - 可靠性 → 信息传输的准确程度，传送消息的准确还原
 - 二者相互矛盾，可相互转化
 - 设计原则：保证可靠性的前提下，尽可能提高有效性

模拟系统有效性指标

■ 模拟通信系统

- 有效性：有效传输频带
- 可靠性：信噪比

■ 数字通信系统

- 有效性：传输速率、频带利用率
- 可靠性：差错率

■ 有效传输频带

- 传输信号时所占用的信道带宽，一段有效的频率范围，表示为B，单位：Hz
- 传输同一消息，占用带宽越小，有效性越高

模拟系统可靠性指标

■ 信噪比

- 信号功率与噪声功率之比，单位：分贝

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 10 \lg \frac{S}{N} = 10 \lg \frac{\text{信号平均功率}}{\text{噪声平均功率}} \quad (dB)$$

- 信噪比越高，可靠性越高
- 功率比增大一倍，信噪比提高3dB

数字系统有效性指标一

■ 传输速率

- 码元速率 R_B (符号速率、波特率、传码率)

- 单位时间传送的码元数，与进制无关，单位：baud，即符号/秒，设T为码元的持续时间

$$R_B = \frac{1}{T} \quad (\text{baud})$$

- 信息速率 R_b (比特率、传信率)

- 单位时间传输的平均信息量，单位：bit/s

$$R_b = R_B \cdot H(x) \quad (\text{b/s})$$

$$R_b = R_B \cdot \log_2 M \quad (\text{b/s})$$

数字系统有效性指标二

■ 频带利用率

- 单位频带 (1Hz) 内的传输速率

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

$$\text{或} \quad \eta_b = \frac{R_b}{B} \quad (\text{bps/Hz})$$

数字系统可靠性指标

■ 差错率

- 误码率： $P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}}$

- 误信率： $P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}}$

- 二进制系统： $P_e = P_b$

■ 例3:

八相调制系统（等概），每码元持续时间 $833\mu s$ ，连续工作一小时后，接收端收到 $6bit$ 错，若每个码元中只发生单比特错误，求：

- 该系统的信息速率
- 该系统的误码率和误信率

解： $\because M = 8, T = 833\mu s$

$$R_B = \frac{1}{T} = \frac{1}{833 \times 10^{-6}} = 1200 \text{ baud}$$

$$R_b = R_B \cdot \log_2 M = 1200 \times \log_2 8 = 3600 \text{ bps}$$

- 传一小时后的码元数 $N = R_B \times t = 1200 \times 3600s = 4.32 \times 10^6$ 个
- 误码率 $P_e = \frac{N_e}{N} = \frac{6}{4.32 \times 10^6} \approx 1.39 \times 10^{-6}$
- 传一小时后的信息量 $I = R_b \times t = 3600 \times 3600s = 1.3 \times 10^7 \text{ bit}$
- 误信率 $P_b = \frac{I_e}{I} = \frac{6}{1.3 \times 10^7} \approx 0.46 \times 10^{-6}$

■ 本章小结

- 通信基本模型
- 信息量的定义
- 离散消息的信息量计算
- 通信系统两个主要性能指标的基本概念和相关计算

■ 作业

- 阅读教材第一章内容
- 阅读学习材料
- 第一章习题：3、6、7、8