

普通高等教育规划教材

# 数字通信原理

主 编 沈其聪  
副主编 侯 群 李有根  
主 审 王福昌



机械工业出版社

本书系统地介绍了数字通信的特点、原理、应用及性能分析的基本方法，内容包括数字通信概论、模拟信号的数字化传输、数字信号的基带传输、数字调制与解调技术、数字信号的最佳接收、同步原理、差错控制编码等。

本书各章节在内容的安排和叙述上，根据数字通信的发展和实际教学的需要，力求做到物理概念清晰、理论推导简明、体系结构完整，重点介绍了数字通信主要技术的基本概念、基本原理、基本分析方法和主要应用。

本书内容丰富，层次分明，文字简洁通畅，叙述深入浅出，重点突出，各章都配有适量的例题、思考题与习题。本书主要章节还结合现行 GSM 移动通信系统，介绍了相关数字通信技术在实际中的应用。

本书适合作为高等院校通信、电子、信息类专业的本科生教学用书，也可供其他相关专业学生或相关工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

数字通信原理/沈其聪主编.—北京：机械工业出版社，2004.7

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-14595-X

. 数 ... . 沈 ... . 数字通信—高等学校—教材 . TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 052298 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：王保家 闫晓宇

责任编辑：马军平 版式设计：冉晓华 责任校对：张晓蓉

封面设计：张 静 责任印制：

印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> · 15 印张 · 368 千字

定价： 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

# 普通高等教育应用型人才培养规划教材 编审委员会

主任：刘国荣 湖南工程学院

副主任：左健民 南京工程学院

陈力华 上海工程技术大学

鲍 泓 北京联合大学

王文斌 机械工业出版社

委员：(按姓氏笔画排序)

刘向东 华北航天工业学院

任淑淳 上海应用技术学院

何一鸣 常州工学院

陈文哲 福建工程学院

陈 扬州大学

苏 群 黑龙江工程学院

娄炳林 湖南工程学院

梁景凯 哈尔滨工业大学 (威海)

童幸生 江汉大学

# 电子与通信类专业分委员会

主任：鲍 泓 北京联合大学

副主任：张立臣 常州工学院

李国洪 华北航天工业学院

委员：(按姓氏笔画排序)

邓 琛 上海工程技术大学

叶树江 黑龙江工程学院

李金平 北京联合大学

沈其聪 总参通信指挥学院

杨学敏 成都理工大学

秘书长：何希才 北京联合大学

# 序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用。随着知识经济时代的到来，科学技术突飞猛进，国际竞争日趋激烈。特别是随着经济全球化发展和我国加入WTO，世界制造业将逐步向我国转移。有人认为，我国将成为世界的“制造中心”。有鉴于此，工程教育的发展也因此面临着新的机遇和挑战。

迄今为止，我国高等工程教育已为经济战线培养了数百万专门人才，为经济的发展作出了巨大的贡献。但据IMD1998年的调查，我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标排名世界第36位，与我国科技人员总数排名世界第一形成很大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员特别是工程应用型技术人才市场供给不足。在此形势下，国家教育部近年来批准组建了一批以培养工程应用型本科人才为主的高等院校，并于2001、2002年两次举办了“应用型本科人才培养模式研讨会”，对工程应用型本科教育的办学思想和发展定位作了初步探讨。本系列教材就是在这种形势下组织编写的，以适应经济、社会发展对工程教育的新要求，满足高素质、强能力的工程应用型本科人才培养的需要。

航天工程的先驱、美国加州理工学院的冯·卡门教授有句名言：“科学家研究已有的世界，工程师创造未有的世界。”科学在于探索客观世界中存在的客观规律，所以科学强调分析，强调结论的惟一性。工程是人们综合应用科学（包括自然科学、技术科学和社会科学）理论和技术手段去改造客观世界的实践活动，所以它强调综合，强调方案优缺点的比较并作出论证和判断。这就是科学与工程的主要不同之处。这也就要求我们对工程应用型人才的培养和对科学研究型人才的培养应实施不同的培养方案，采用不同的培养模式，采用具有不同特点的教材。然而，我国目前的工程教育没有注意到这一点，而是：过分侧重工程科学（分析）方面，轻视了工程实际训练方面，重理论，轻实践，没有足够的工程实践训练，工程教育的“学术化”倾向形成了“课题训练”的偏软现象，导致学生动手能力差。人才培养模式、规格比较单一，课程结构不合理，知识面过窄，导致知识结构单一，所学知识中有一些内容已陈旧，交叉学科、信息科学的内容知之甚少，人文社会科学知识薄弱，学生创新能力不强。教材单一，注重工程的科学分析，轻视工程实践能力的培养；注重理论知识的传授，轻视学生个性特别是创新精神的培养；注重教材的系统性和完整性，造成课程方面的相互重复、脱节等现象；缺乏工程应用背景，存在内容陈旧的现象。老师缺乏工程实践经验，自身缺乏“工程训练”。工程教育在实践中与经济、产生的联系不密切。要使我国工程教育适应经济、社会的发展，培养更多优秀的工程技术人员，我们必须努力改革。

组织编写本套系列教材，目的在于改革传统的高等工程教育教材，建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的本科教材，满足工程应用型人才培养的要求。

本套系列教材的建设原则是：

## 1. 保证基础，确保后劲

科技的发展，要求工程技术人员必须具备终生学习的能力。为此，从内容安排上，保证学生有较厚实的基础，满足本科教学的基本要求，使学生日后具有较强的发展后劲。

### 2. 突出特色，强化应用

围绕培养目标，以工程应用为背景，通过理论与工程实际相结合，构建工程应用型本科教育系列教材特色。本套系列教材的内容、结构遵循如下9字方针：知识新、结构新、重应用。教材内容的要求概括为：“精”、“新”、“广”、“用”。“精”指在融会贯通教学内容的基础上，挑选出最基本的内容、方法及典型应用；“新”指将本学科前沿的新进展和有关的技术进步新成果、新应用等纳入教学内容，以适应科学技术发展的需要。妥善处理好传统内容的继承与现代内容的引进。用现代的思想、观点和方法重新认识基础内容和引入现代科技的新内容，并将这些内容按新的教学系统重新组织；“广”指在保持本学科基本体系下，处理好与相邻以及交叉学科的关系；“用”指注重理论与实际融会贯通，特别是要注入工程意识，包括经济、质量、环境等诸多因素对工程的影响。

### 3. 抓住重点，合理配套

工程应用型本科教育系列教材的重点是专业课（专业基础课、专业课）教材的建设，并做好与理论课教材建设同步的实践教材的建设，力争做好与之配套的电子教材的建设。

### 4. 精选编者，确保质量

遴选一批既具有丰富的工程实践经验，又具有丰富的教学实践经验的教师担任编写任务，以确保教材质量。

我们相信，本套系列教材的出版，对我国工程应用型人才培养质量的提高，必将产生积极作用，会为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

机械工业出版社颇具魄力和眼光，高瞻远瞩，及时提出并组织编写这套系列教材，他们为编好这套系列教材做了认真细致的工作，并为该套系列教材的出版提供了许多有利的条件，在此深表衷心感谢！

编委会主任 刘国荣教授  
湖南工程学院院长

# 前 言

随着经济的发展和社会的进步，以数字通信技术、计算机技术和数字信号处理技术为基础，以网络技术为核心的现代信息技术，正在改变着当今社会人们的工作、学习和生活方式，人们也比以往任何时候，都更加注重和依赖于信息的获取、传输、交流和利用。在社会信息化程度不断提高的 21 世纪，数字通信已成为信息传输和交换的主要手段。学习和掌握数字通信理论和技术是每一位从事社会信息化建设的科技工作者的迫切需求。

本书是普通高等教育电子与通信类应用型本科规划教材之一，可作为高等院校通信、电子和信息类专业本科生学习现代通信理论和技术导论性课程的教学用书。本书是作者多年从事本科生和研究生教学实践的总结，它以当前广泛应用的现代通信系统和通信新技术为背景，全面、系统地介绍了数字通信的特点、原理、应用及其性能分析的基本方法。内容包括数字通信概论、模拟信号的数字化传输、数字信号的基带传输技术、数字调制与解调技术、数字信号的最佳接收、同步原理、差错控制编码等。

本书是在电子与通信类应用型本科教材编审委员会指导下编写而成的。各章节在内容的安排和叙述上，根据数字通信的发展和实际教学的需要，力求做到物理概念清晰、理论推导简明、体系结构完整，重点介绍数字通信主要技术的基本概念、基本原理、基本分析方法和主要应用。

本书内容丰富，层次分明，文字简洁通畅，叙述深入浅出，重点突出，各章都配有适量的例题、思考题与习题。为了体现教材的实用性，做到理论联系实际，本书主要章节还结合目前应用广泛的 GSM 数字蜂窝移动通信系统，介绍了相关通信技术在实际工程中的应用。

本书共七章，具体内容安排如下：

第一章为数字通信概论，介绍数字通信和数字通信系统概况，包括通信系统的概念、分类和基本模型，信息、消息和信号的区别与联系，信息的定量描述和信源熵，随机信号的基本特征，信道的概念、分类、特点，信道噪声与信道容量，数字通信系统的特点及主要性能指标，最后结合现行的 GSM 数字蜂窝移动通信系统，介绍了实际数字通信系统的组成及主要性能指标参数。

第二章为模拟信号的数字化传输，叙述模拟信号数字化的基本原理和实现方法，内容包括抽样定理、信号的抽样与恢复，非均匀量化、数字压扩技术以及 A 律 13 折线 PCM 编码，简单增量调制及其性能的改进，自适应差分脉冲编码调制 (ADPCM)、线性预测编码 (LPC) 声码器及改进型 LPC 声码器，最后，介绍了线性预测编码 (LPC) 技术在 GSM 系统语音编/解码器中的应用。

第三章为数字信号的基带传输技术，概述数字信号基带传输系统的组成及工作原理，内容包括数字基带信号、数字基带传输系统及抗噪声性能分析，无码间串扰的传输条件、基带传输码型、扰码与解扰、多进制数字基带信号，部分响应基带传输系统，眼图和时域均衡技术。

第四章为数字调制与解调技术，主要讨论了数字调制的概念与分类、二进制数字调制与

解调及抗噪声性能、常用的现代数字调制方式、扩频调制技术及应用。

第五章为数字信号的最佳接收，内容包括最佳接收的概念与最佳接收准则、确知信号与随相信号的最佳接收、匹配滤波器及其应用、基带系统的最佳化。

第六章为同步原理，内容包括载波同步、位同步、帧同步的基本原理与实现方法以及网同步的有关概念。

第七章为差错控制编码，介绍差错控制编码的作用、分类及检纠错的基本原理，论述线性分组码、循环码、卷积码、交织码、网络编码调制、Turbo 码以及 GSM 数字蜂窝移动通信系统差错控制编码方案简介。

本书由沈其聪任主编，侯群、李有根任副主编。其中第一、二、三章由沈其聪编写，第四章由李有根编写，第五、六章由高浪编写，第七章由侯群编写。华中科技大学王福昌教授审阅了全部初稿，并提出了具体的修改意见。全书由沈其聪负责统稿。

鉴于作者水平有限，难免存在错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

序	
前言	
第一章 数字通信概论 .....	1
第一节 通信与通信系统 .....	1
一、通信与通信系统的概念 .....	1
二、通信系统的分类 .....	2
三、数字通信系统的基本模型 .....	3
第二节 信息、信号与信道 .....	3
一、信息、消息和信号 .....	3
二、信号的分类及特征 .....	4
三、信息量与信源熵 .....	5
四、信道的概念、分类与特点 .....	7
五、信道噪声与信道容量 .....	9
第三节 数字通信的特点及实际系统介绍 ...	13
一、数字通信的特点 .....	13
二、数字通信的发展 .....	13
三、数字蜂窝移动通信系统简介 .....	13
第四节 数字通信系统的主要性能指标 .....	16
一、数字通信系统的有效性 .....	16
二、数字通信系统的可靠性 .....	17
三、实际通信系统性能指标举例 .....	18
第五节 数字通信研究的主要内容 .....	19
思考题与习题 .....	20
第二章 模拟信号的数字化传输 .....	21
第一节 模拟信号数字化传输的基本原理 ...	21
一、抽样定理的表述 .....	21
二、信号的抽样与恢复 .....	21
三、带通信号的抽样 .....	23
四、脉冲振幅调制 (PAM——Pulse Amplitude Modulation) .....	24
第二节 脉冲编码调制 (PCM——Pulse Code Modulation) .....	27
一、PCM 编解码原理 .....	28
二、量化误差及其分析 .....	30
三、非均匀量化 .....	33
四、数字压扩技术 .....	35
五、编码与解码 .....	37
第三节 增量调制 (M 编码) .....	46
一、增量调制的工作原理 .....	46
二、增量调制的量化误差及其分析 .....	49
三、PCM 系统和 M 系统抗噪声性能的 比较 .....	52
四、改进型增量调制介绍 .....	53
第四节 其他实用的语音编码技术 .....	57
一、概述 .....	57
二、自适应差分脉冲编码调制 (ADPCM ——Adaptive Differential Pulse Code Modulation) .....	59
三、线性预测编码 (LPC——Linear Predictive Coding) 声码器 .....	62
四、混合编码 (改进型 LPC 声码器) .....	63
五、GSM 系统的语音编/ 解码器 .....	65
思考题与习题 .....	68
第三章 数字信号的基带传输技术 .....	71
第一节 数字信号传输的基本理论 .....	71
一、数字基带信号的表示及其功率谱 .....	71
二、数字信号基带传输系统的组成 .....	78
三、基带传输与码间串扰 .....	80
第二节 基带传输的线路码型 .....	88
一、基带系统对传输码型的要求 .....	88
二、数字基带信号的常用码型 .....	89
三、扰码与解扰 .....	95
四、多进制数字基带信号 .....	97
第三节 部分响应技术 .....	99
一、部分响应波形 .....	99
二、部分响应基带传输系统 .....	103
第四节 基带传输系统的抗噪声性能 .....	107
一、信道噪声及干扰 .....	107
二、误码率与信噪比 .....	108
三、脉冲相位抖动 .....	113
第五节 眼图与时域均衡 .....	114
一、眼图 .....	114
二、均衡的概念与分类 .....	116
三、时域均衡的基本原理 .....	117

思考题与习题 .....	122	第六节 基带系统的最佳化 .....	185
第四章 数字调制与解调技术 .....	126	一、最佳基带传输系统的结构 .....	185
第一节 数字调制的概念与分类 .....	126	二、最佳基带传输系统的性能 .....	185
一、数字调制的概念 .....	126	思考题与习题 .....	186
二、数字调制的类型 .....	126	第六章 同步原理 .....	187
第二节 二进制数字调制与解调 .....	127	第一节 同步的基本内容和要求 .....	187
一、二进制振幅键控 .....	127	第二节 载波同步 .....	187
二、二进制频率键控 .....	134	一、直接法 .....	187
三、二进制相位键控 .....	139	二、插入导频法 .....	189
四、三种基本键控方式的比较 .....	146	三、载波同步系统的性能 .....	191
第三节 多进制数字调制与解调 .....	147	第三节 位同步 .....	192
一、多进制振幅键控 .....	148	一、自同步法 .....	192
二、多进制频率键控 .....	149	二、位同步系统的性能 .....	195
三、多进制相位键控 .....	150	第四节 群同步(帧同步) .....	196
四、正交振幅键控 .....	153	一、起止式同步法 .....	197
第四节 几种新型数字调制方式 .....	155	二、连贯式插入法 .....	197
一、偏移四相相移键控(OQPSK) .....	155	三、帧同步系统的性能 .....	198
二、最小频移键控(MSK) .....	156	四、帧同步的保护 .....	199
三、高斯最小频移键控(GMSK) .....	161	五、GSM系统TDMA帧的调节 .....	199
四、 $1/4$ 相对四相相移键控		第五节 网同步的基本概念 .....	200
( $1/4$ DQPSK) .....	163	思考题与习题 .....	201
五、多载波调制技术 .....	163	第七章 差错控制编码 .....	203
第五节 扩频调制 .....	164	第一节 概述 .....	203
一、扩频数字通信系统的概念和特点 .....	165	一、差错控制编码的作用 .....	203
二、直接序列扩频(DS-SS) .....	165	二、差错控制方式 .....	203
三、跳频扩频(FH-SS) .....	168	三、纠错码的分类 .....	204
思考题与习题 .....	170	四、纠错编码的基本原理 .....	205
第五章 数字信号的最佳接收 .....	173	第二节 常用的几种简单分组码 .....	206
第一节 最佳接收的概念与准则 .....	173	一、奇偶监督码 .....	206
一、最佳接收的含义 .....	173	二、二维奇偶监督码 .....	206
二、最佳接收的常用准则 .....	173	三、恒比码 .....	207
第二节 确知信号的最佳接收 .....	174	第三节 线性分组码 .....	207
一、二进制确知信号最佳接收机 .....	175	一、基本概念 .....	207
二、二进制确知信号最佳接收机的性能 .....	175	二、监督矩阵 $H$ 和生成矩阵 $G$ .....	208
三、多进制确知信号最佳接收机及性能 .....	176	三、伴随式(校正子) $S$ .....	210
第三节 随相信号的最佳接收 .....	177	第四节 循环码 .....	211
一、二进制随相信号最佳接收机 .....	177	一、生成多项式及生成矩阵 .....	211
二、二进制随相信号最佳接收机的性能 .....	179	二、监督多项式及监督矩阵 .....	212
第四节 匹配滤波器 .....	179	三、编码方法和电路 .....	213
一、匹配滤波器的原理 .....	180	四、解码方法和电路 .....	214
二、匹配滤波器在最佳接收中的应用 .....	181	五、CRC码 .....	214
第五节 实际接收机与最佳接收机的		第五节 卷积码 .....	215
比较 .....	184	一、基本概念 .....	215

## 目 录

二、卷积码的描述 .....	215	一、卷积码的运用 .....	223
三、卷积码的解码 .....	216	二、分组码的运用 .....	223
第六节 交织码 .....	217	三、奇偶码的运用 .....	223
第七节 网络编码调制 .....	218	四、交织码的运用 .....	224
第八节 Turbo 码 .....	221	思考题与习题 .....	224
一、Turbo 码编码器的组成 .....	221	附录 <b>erf ( x )</b> 、 <b>erfc ( x )</b> 与 <b>x</b> 的数 值表 .....	226
二、Turbo 码的解码 .....	221	参考文献 .....	227
第九节 GSM 移动通信系统差错控制编码 简介 .....	223		

# 第一章 数字通信概论

随着人类步入 21 世纪，社会信息化和经济全球化的步伐明显加快，人们的工作、学习、生活和社会活动比以往任何时候更需要信息，也更依赖于信息。通信技术尤其是数字通信技术，已经成为当今社会人们获取、传输和利用信息的重要手段，以通信、计算机和信号处理等技术为核心的信息技术也成为衡量一个国家综合实力的重要方面。

本教材主要讨论信息传输的基本原理，这也是信息处理、存储和交换的基础。本章将主要介绍数字通信的概念、信息及其度量方法、数字通信系统的组成与主要性能指标。

## 第一节 通信与通信系统

### 一、通信与通信系统的概念

人们常用语音、文字、数据、图形、图像等方式来表达和传递信息，有时也用收发双方预先约定的编码来表达和交换信息，收发双方之间的这种信息传递过程就是“通信”。人类的社会活动离不开信息的传递和交换，从古代的烽火台、驿站，到现代社会的电报、电话、传真、电视、Internet、空间通信等，都是利用不同的方式和手段来实现信息传递和交换的。在当今社会中，这种信息的传递和交换主要是依靠“电系统”来完成或实现的。

在通信领域，人们常将完成信息传递和交换的所有技术设备（含传输媒介）的总合称为通信系统，这包括构成系统的硬件、软件，甚至是操作或使用系统的人。信息要从信息源（信源）传递到受信者，必须经过发送设备、信道和接收设备三个部分，通信系统的基本组成如图 1-1 所示。其中信源的作用是产生含有信息的各种形式的消息，并将各种可能的消息转变为随时间变换的原始电信号；发送设备的作用是对原始电信号进行放大、滤波和调制等加工处理，使待传送信号的特性与信道所要求的特性相匹配，以适合在信道中传输；信道的作用是为信号提供传输通道。常用的信道有架空明线、同轴电缆、双绞线、光缆等有线信道和 中长波、短波、微波等无线信道。信号在实际信道中传输时，一方面由于信道特性不理想会引起信号波形的失真，另一方面信道中存在各种噪声会干扰信号的传输，图 1-1 中的噪声源是信道中的噪声和分散在通信系统内部其他各处的噪声的集中表示。接收设备的作用与发送设备正好相反，它的主要任务是从接收到的受干扰和噪声影响的有噪信号中提取所需的原始信号；受信者也称作信宿（通常包括输出转换器），其作用是将接收设备输出的原始基带电信号转换成相应形式的消息。

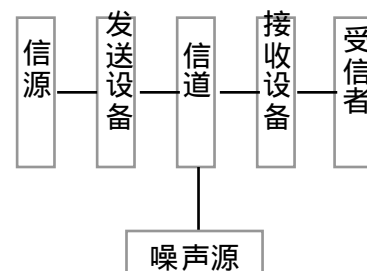


图 1-1 通信系统的基本组成

图 1-1 所示的基本系统主要是实现点对点之间的信息传递，当需传递信息的用户数量不断增加时，通常并不是在任两用户之间都建立一条固定的信道，而是增设信息转接/交换设备，构成具有交换功能的通信网，网中各用户对之间的信息传递需经交换设备中转来完成。

这种具有交换功能的通信网能够以较少的信道数为尽可能多的用户提供信息传输通道，从而大大地提高了信道的利用率，降低了通信成本。

## 二、通信系统的分类

通信系统的分类方法很多，这里仅讨论几种常用的分类方法。

### 1. 按消息的物理特征分类

根据消息的物理特征的不同，通信系统可分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统和多媒体通信系统等。电报通信是一种利用电信号传递书面信息的通信方式。电话通信是一种利用电信号传递语言信息的通信方式。数据通信是按一定协议利用二进制电信号传输由数字、字母、符号等组成的数据信息的通信方式。图像通信是利用电信号传输各种图像信息的通信方式。多媒体通信是利用宽带数字传输网络，实现以图像为中心，包括声音、数据、文件等各种信源之间的双向、实时的信息传递和交换。

### 2. 按调制方式分类

根据是否采用调制，通信系统可分为基带传输系统和频带（调制）传输系统。基带传输是指利用未经调制的基带信号直接进行传送，如音频市内电话、近距离数据传输等。频带（调制）传输是指对基带信号经不同方式变换（又称调制）后，再进行传输的总称。根据系统所传信号或信道特性的不同，有各种不同的调制方式。

### 3. 按信号的特征分类

按照信道中所传输的是模拟信号还是数字信号，可以相应地把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。凡寄载消息的信号参量可以取无限多个数值的信号称为模拟信号，如话筒输出的语音信号和现行广播电视系统中亮度信号等。凡寄载消息的信号参量只能取有限个数值的信号称为数字信号，如早期的电报信号、电传机送出的脉冲信号、计算机输出的数据信号等。

### 4. 按信号的复用方式分类

按所采用的同一信道同时传输多路基带信号方式的不同，可以相应地把通信系统分成频分复用系统、时分复用系统、码分复用系统。频分复用是利用调制器进行频谱搬移，使不同信号占据信道的不同频率范围。时分复用是根据抽样定理，采用具有“选通”功能的数字电路，使不同信号占据不同时间区间（又称时隙）。码分复用则是根据相关理论，用一组相互正交的脉冲序列分别携带不同信号进行传输的方式。

### 5. 按传输媒介分类

按传输媒介的不同，通信系统可分为有线通信（包括光纤）系统和无线通信（包含大气激光）系统。有线通信是利用金属导线或光纤传递电话、电报、数据和图像等信息的通信方式；无线通信是利用无线电波（如长波、中波、短波、微波等）来传递电话、电报、数据和图像等信息的通信方式。

### 6. 按通信用户的属性分类

按通信用户是否具有移动性，通信系统可分为移动通信系统和固定通信系统。移动通信是指通信的双方至少有一方处于移动状态的信息传输和交换方式，其中移动的一方可以是运动中的人、汽车、火车、轮船、飞机、航天器等。数字移动通信是当今通信用户增长最快、讨论最热烈、发展前景最广阔的领域。

### 三、数字通信系统的基本模型

图 1-1 所示的通信系统简化模型集中反映了通信系统的共性问题。根据分析问题的不同，又有不同具体形式的通信系统模型。

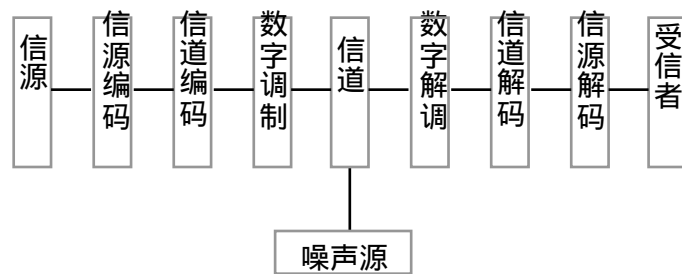


图 1-2 数字通信系统的基本模型

数字通信系统一般由信源、信源编码器、信道编码器、数字调制器、信道、数字解调器、信道解码器、信源解码器、受信者以及噪声源组成，其基本模型如图 1-2 所示。

系统模型中的信源编（解）码的主要作用有两个，作用之一是将连续信源输入的模拟信号转换为数字信号，作用之二是对模数转换后的数字信号（或对直接来自离散信源的数字信号）进行压缩编码。有关信源编码的基本原理将在第二章中介绍，其总体要求是在保证一定通信质量的基础上，尽量降低信号的冗余度，提高通信的有效性。

系统模型中，信道编（解）码的作用是为了提高实际系统传输数字信号可靠性而采取的措施，其基本思想是发送端按照一定的规则在信息码中人为地插入冗余码（又称监督码元），并连同信息码组成码字一起传送，接收端再对收到的每个码字（或码组），按照约定的规则进行检验，从而发现传输过程中由于各种原因引起的错码。如果收端能够纠错就进行纠错，如果无法纠错就丢弃错误的码组，并请求发送端重新传输该码组。故信道编码又称差错控制编码或纠错编码。信道编码的基本原理在第七章中讲述。

数字调制与解调从功能上讲，与模拟通信系统基本上相同，主要是使信号特性与信道特性相匹配。在实际工程中，为了提高噪声、干扰比较严重环境下系统的通信效果，往往需要采取扩频、跳频措施，这些抗干扰的措施通常由调制解调器实现。数字调制器的输入信号和解调器输出信号均为数字信号，而在模拟系统中均为模拟信号。第四章将介绍数字调制与解调技术的原理和应用。

需要指出，并非所有数字通信系统都是按图 1-2 组成的，根据具体情况，实际系统的组成有所增加或减少。例如，对数字基带传输系统而言，可省去“数字调制”、“数字解调”两个方框；当信源和受信者本身均是数字终端时，则“信源编码”、“信源解码”两个方框也可省去；若要实现保密通信，还可在发送端两个编码器之间插入“数字加密”方框，相应地在接收端两个解码器之间要插入“数字解密”方框；为了提高信道的利用率，还可以在发送端信道编码之后，引入多路复用器，在接收端信道解码之前加入分接器，以便利用一条信道同时传输多路信号等。另外，数字通信系统中，信息的发送与接收均是按照一定的时钟节拍进行的，收发两端的工作必须协调一致，这是靠同步系统来保证的，图 1-2 没有画出同步系统。同步系统通常是数字通信系统中的重要组成部分，同步系统的工作性能直接关系到整个通信系统的工作稳定性和通信质量，第六章将简要介绍同步的基本原理和方法。

## 第二节 信息、信号与信道

### 一、信息、消息和信号

人们是依靠通信系统来传递信息的，而信息通常是用语言、文字、数据或图像等形式来

表示的。这些语言、文字、数据、图像载体本身并不是信息而被称为“消息”，即消息通常泛指寄载信息的各种不同形式的媒体。消息是信息的表示形式，信息是消息中包含的对受信者有意义的内容；消息可以是各种各样的不同形式，但就其对受信者有意义的内容而言，消息又可统一用信息去定量地描述。在一切有意义的通信中，消息的传递意味着信息的传递，故也可以说，通信的过程就是消息传递的过程。

由于客观消息形式本身不便于直接向远方传输，因此，往往需要把待传输的消息通过一定的装置先变成与之对应的电信号，再利用通信系统传输，即信号是消息在通信系统中的表现形式，在电信系统中主要是指随时间变化的电压、电流、电磁波或光波等，在通信系统内部传输的直接对象实际上就是这些代表消息、载荷着信息的各种形式的电信号或光信号。因此，现代通信就是指采用电信号或光信号传递消息的通信，即电通信和光通信。

## 二、信号的分类及特征

### 1. 信号的分类

信号可用若干种不同的方法来分类，例如随机信号与确知信号、离散时间信号与连续时间信号、离散幅度信号与连续幅度信号、低通信号与带通信号、能量信号与功率信号、周期信号与非周期信号等。这里仅从信号的“预知性”出发，简要讨论一下确知信号和随机信号。所谓“确知信号”，即可以表示为时间  $t$  的确定函数，在“信号与系统”课程中，我们已经学习了确知信号的分析方法；而“随机信号”则无法表示成时间  $t$  的确定函数，只能用其统计特性（如概率密度函数、概率分布函数、数学期望、方差、相关函数等）来描述。通信中实际传输的信号、外界干扰和由信道引入的畸变，都可以用随机信号或随机过程来描述。因为，如果实际传输的信号都是时间  $t$  的确定函数，那么对接收者来讲，就不可能从收到的信号中获得任何新的信息，也就失去了通信的本意（利用收发双方都知道的确知信号或测试信号来检测系统的情况除外）。当然，在一定条件下，随机信号也会表现出某种确定性，因此，确知信号的分析是随机信号分析的基础。

### 2. 随机信号的特点

在现代通信系统中，信道中所传输的通信信号往往都是用待传送的随机信号对正弦波或周期方波等确定性“载波”实施调制后的随机信号（数学上称为随机过程）。对于未经调制的确知“载波”信号（正弦波或脉冲序列）的特点，大家通过前面课程的学习，已经了解得比较清楚了，这里简要介绍一下随机调制信号（原始基带信号）的主要特点，以便能更好地学习和理解后续章节的相关内容。

随机信号分为平稳随机信号和非平稳随机信号，非平稳随机信号的数学期望和方差都是时间  $t$  的函数，分析起来非常困难，这里仅介绍平稳随机信号的基本特点。

通信中，常将“任意多维概率密度函数或者分布函数与时间起点无关”的随机信号叫做“平稳随机信号”，这也是最简单的一种随机信号。若设  $x(t)$  为一平稳随机信号，则其基本特点是数学期望（信号的直流分量） $a(t)$  和方差（信号的交流功率） $\sigma^2(t)$  都是与时间  $t$  无关的常数，即

$$a(t) = E[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x; t)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx = a \quad (1-1)$$

$$\sigma^2(t) = E[x(t) - a(t)]^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - a(t)]^2 f(x; t)dx$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - a) f(x) dx = 0 \quad (1-2)$$

自相关函数只是时间间隔  $\tau = t_2 - t_1$  的函数，而与所选取的时间起点无关，即

$$\begin{aligned} R(t_1, t_2) &= E[x(t_1)x(t_2)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 f(x_1, x_2; t_1, t_2) dx_1 dx_2 \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 f(x_1, x_2; t_1, t_1 + \tau) dx_1 dx_2 \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 f(x_1, x_2; \tau) dx_1 dx_2 = R(\tau) \end{aligned} \quad (1-3)$$

即平稳随机信号的自相关函数  $R(t_1, t_2)$  仅仅是  $\tau = t_2 - t_1$  的函数  $R(\tau)$ ，而且，自相关函数  $R(\tau)$  与其功率谱密度函数  $P(f)$  互为一对傅里叶变换

$$\begin{aligned} P(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \\ R(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} P(f) e^{j2\pi f \tau} df \end{aligned} \quad (1-4)$$

自相关函数在  $\tau = 0$  点的取值  $R(0)$  (值)

$$R_{\max}(\tau) = R(0) = \overline{x^2(t)} + a^2(t) = \overline{x^2} + a^2 \quad (1-5)$$

上式表明，平稳随机信号的统计平均功率等于交流平均功率  $\overline{x^2(t)}$  与直流平均功率  $a^2(t)$  之和。另外，平稳随机信号  $x_i(t)$  通过系统  $H(f)$  后的输出信号  $x_o(t)$  的功率谱密度  $P_o(f)$  与输入信号  $P_i(f)$  和系统  $H(f)$  的模的平方的乘积，即

$$P_o(f) = |H(f)|^2 P_i(f) \quad (1-6)$$

特别是当输入为高斯过程时，线性系统的输出亦为高斯过程，只是输出随机过程的数字特征发生了变化。

平稳随机信号的一个特例是遍历平稳随机信号（又称各态历经的随机过程），例如分析通信系统的噪声时，通常认为系统的噪声是遍历平稳随机过程，这时就可以用随机过程的一个实现（或样本）的时间平均（包括均值、方差、自相关函数等）来代替整个随机过程的统计平均，从而使问题的分析变得比较容易。

### 三、信息量与信源熵

#### 1. 信息的本质

前面已经提到通信的任务是传递信息，通信系统所传输的消息或信号中必定包含了对受信者有意义的内容，这就是信息。人们对原来不确定的事件，经过通信系统的服务，变得比较确定或完全确定了，人们就获得了信息。显然，受信者对原事件存在的不确定性越大，通信后获得的信息也就越多，事件所含的信息与其不确定性是密切相关的。就一般意义而言，信息是事物运动状态或存在方式的不确定性的描述，这也是香农对“信息”的简明定义。信息既是抽象的，也可以进行定量的描述。人们借助于通信系统，对所研究对象的不确定性消除得愈多，获得的信息量也就愈大。

#### 2. 信息的量值和量纲

所谓信息量就是对随机事件的不确定性的定量描述。信息既有量值又有量纲，这里仅讨

论离散信源的信息量。

假设离散信源  $X$  是由  $M$  种符号  $x_1, x_2, \dots, x_M$  组成的集合, 各符号出现的概率对应为  $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_M)$ , 其中每个符号出现是独立的, 并且满足关系

$$0 < P(x_i) < 1, \quad \sum_{i=1}^M P(x_i) = 1 \quad (1-7)$$

那么, 该信源中任一符号  $x_i$  含有的信息量就定义为

$$I(x_i) = \log_a \frac{1}{P(x_i)} = -\log_a P(x_i) \quad (1-8)$$

式中, 当对数以  $a=2$  为底时, 信息量的单位为比特 (bit); 对数以  $a=e$  为底 (自然对数) 时, 信息量的单位为奈特 (nit); 对数以  $a=10$  为底时, 信息量的单位为哈特莱。广泛使用的信息量单位是比特。

由离散信源单符号信息量的计算公式  $I(x_i) = -\log_a P(x_i)$ , 不难得出以下结论:

- 1) 消息所携带的信息量是消息的概率的函数, 消息的概率越小, 所含信息量越大。
- 2) 信息量具有非负性, 即  $I(x_i) \geq 0$ 。
- 3) 信息量具有可加性, 相互独立事件构成的消息的总信息量等于各事件信息量之和。
- 4) 等概二元离散信源的一个符号的信息量为 1bit, 即

$$I(x_i) = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1 \quad (1-9)$$

### 3. 离散信源的平均信息量——信源的熵

(1) 信源的熵的定义 式 (1-8) 中的  $I(x_i)$  虽然使信息度量成为可能, 但  $I(x_i)$  仍然是一个与概率  $P(x_i)$  相关的随机事件, 直接用  $I(x_i)$  度量信息非常不方便, 同时考虑到离散信源的符号集的大小各异和发出消息的长短不同, 为分析问题方便, 实际中常用“平均信息量”的概念来衡量信源的信息量。

所谓平均信息量是指信源  $X$  的每个符号所含信息量的统计平均值, 因此, 离散信源  $X$  的平均信息量 (假设信源  $M$  种符号相互独立出现) 为

$$H(x) = - \sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (1-10)$$

由于计算  $H(x)$  的公式与热力学的熵的计算形式相似, 故也称其为信源的熵。

(2) 信源的熵的性质 信源熵  $H(x)$  是对整个信源  $X$  的总体信息测度, 它表示信源发出符号以前, 受信者对信源  $X$  存在的平均不确定程度的大小, 也反映了信源  $X$  的随机性的大小。信源熵的性质很多, 其主要性质如下:

- 1) 信源的熵表示信源中单个符号所携带的统计平均信息量, 量纲为“比特/符号”。
- 2) 信源的熵具有非负性, 即  $H(x) \geq 0$ 。
- 3) 信源的熵具有最大值, 当信源的各符号独立等概 (即  $P(x_i) = 1/M$ ) 出现时, 熵有最大值

$$H_{\max}(x) = - \sum_{i=1}^M \frac{1}{M} \log_2 \frac{1}{M} = \log_2 M \quad (1-11)$$

- 4) 信源的熵具有可加性, 独立信源构成的联合信源的熵等于分别熵的和。