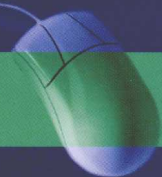


电子信息工程系列教材



通信原理教程

主编 殷小贡



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

电子信 息 工 程 系 列 教 材

通信原理教程

主 编 殷小贡

副主编 余 静 李灵芝 胡文敏



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

通信原理教程/殷小贡主编. —武汉:武汉大学出版社,2009.8

电子信息工程系列教材

ISBN 978-7-307-07050-9

I. 通… II. 殷… III. 通信理论—高等学校—教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 078240 号

责任编辑:林 莉 责任校对:黄添生 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:通山金地印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:23.25 字数:557千字

版次:2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷

ISBN 978-7-307-07050-9/TN·37 定价:36.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

电子信息工程系列教材

编 委 会

主 任: 王化文

编 委: (以姓氏笔画为序)

王代萍 王加强 李守明 余盛武 殷小贡 唐存琛

章启俊 焦淑卿 熊年禄

执行编委: 林莉, 武汉大学出版社计算机图书事业部主任



内 容 简 介

本书比较全面地讲述现代通信系统和通信技术的基本原理及分析方法,共分 11 章,以数字通信为主。主要内容包括:通信系统和信息论的基本概念、随机信号分析的基本理论、通信信道、模拟调制、模拟信号的数字化、数字信号的基带传输、数字信号的频带传输、数字信号的最佳接收、同步原理、差错控制编码和通信网基础。各章后均附有思考题和习题。章节号后加“※”的内容是难度较大可选讲的部分,这些部分删减后课程仍能保持一个基本完整的框架。考虑到独立院校和高职高专的教学实际,本书编写中避免太过烦琐的数学分析,但必要的推导过程予以保留,必须掌握的核心内容则不惜花费较大的篇幅交代清楚。

本书可作为独立学院信息类及相关专业本科生的教材,讲授时适当节选便可适用于高职、高专相关专业,还可作为广大工程技术人员学习通信基础理论及应用的参考书。



前言

现代通信技术发展异常迅速,遍布全世界每个角落的信息网络,构成了现代社会的神经系统,是国民经济和社会发展的重要条件和保障。要对通信系统及各种通信设备作深入研究,必须掌握最基本的通信理论,获得足够的通信技术应用知识。这就是编写本书的基本目的。

通信原理是信息类各专业最重要的一门专业基础课,是学好其他专业课的铺路石。目前书市上的通信原理教材版本不少,但这些教材或者过于深奥、数学推导过于复杂,或者过于简洁、不少内容难于讲清楚,都不太适合在处于“三本”层次的独立院校使用。一方面,不同于处于“一本”、“二本”层次的普通公办高校,独立院校培养的目标是大众化、应用型人才,对于理论知识的要求可以不那么系统、深入;另一方面,独立院校又不同于高职高专,培养的是本科层次人才,有一部分学生还会攻读研究生、继续深造,因此必须学习基本的理论知识。本书的编写试图在折中处理上进行尝试,以基本概念、基本理论、基本方法为主线,比较全面地讲述现代通信系统和通信技术的基本原理及分析方法,使本书仍有一个基本完整的体系;编写中避免太过烦琐的数学分析,但必要的推导过程予以保留,必须掌握的核心内容则不惜花费较大的篇幅交代清楚。希望这本教材能够满足独立院校的教学需要,对内容做适当选取后,也能够满足高职高专的使用要求。

本书共分11章,以数字通信为主。主要内容包括:通信系统和信息论的基本概念、随机信号分析的基本理论、通信信道、模拟调制、模拟信号的数字化、数字信号的基带传输和频带传输、数字信号的最佳接收、同步原理、差错控制编码和通信网基础知识。各章后均附有思考题和习题。章节号后加“※”的内容是难度较大可选讲的部分,这些部分删减后课程仍能保持一个基本完整的框架。需要说明的是“第10章※差错控制编码”,如果没有开设“编码理论”之类的课程,其基本内容是应该讲授的,但卷积码和网格编码调制可视具体情况选择,我们建议不讲,编进教材是考虑到考研同学的自学所需。为满足考研同学的需要,本书还特地选编了2005—2008年的研究生入学考试试题四套,作为“附录二”,供同学们自学参考。

本书由殷小贡、余静、李灵芝、胡文敏编写,殷小贡任主编。余静编写第2、3、4、5章,李灵芝编写第6、7、8章,第9、10章和附录三、附录四由胡文敏编写,附录二由李灵芝和胡文敏共同完成,殷小贡编写第1章和第11章,并负责全书的修改和定稿。附录一的部分习题参考答案由各章编写人员分别提供。在本书的编写过程中,得到了华中科技大学武昌分校、武汉科技大学中南分校、湖北大学知行学院等学校相关部门和专业老师的大力支持和帮助;武汉大学出版社计算机图书事业部林莉主任做了精心的策划和大量的组织、协调工作;《电子信息工程系列教材》编委会主任王化文教授十分关心本教材的编写出版工作,提出了许多很好的指导意见。对于以上各位同志的鼎力帮助以及有关参考文献的编著者,作者一并表示诚挚的谢意。

本书可作为独立学院信息类及相关专业本科生的教材,经适当节选便可适用于高职、高



专相关专业，还可作为广大工程技术人员学习通信基础理论及应用的参考书。由于编者水平所限，书中错、漏之处在所难免，恳请使用本教材的老师和读者不吝指教。

编 者

2009 年仲春于武昌

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 通信的含义	1
1.1.2 消息、信息与信号	1
1.2 通信系统的组成	2
1.2.1 通信系统模型	2
1.2.2 模拟通信系统和数字通信系统	2
1.3 通信系统的分类及通信方式	4
1.3.1 通信系统分类	4
1.3.2 通信方式	5
1.4 信息论的基本概念	6
1.4.1 信息量	7
1.4.2 信道容量	7
1.5 通信系统的主要性能指标	9
1.6 通信技术的发展	11
思考题与习题	12
第2章 随机信号分析	14
2.1 概述	14
2.2 随机过程的表述	14
2.2.1 随机过程	14
2.2.2 随机过程的统计特性	15
2.2.3 随机过程的数字特征	15
2.3 平稳随机过程	17
2.3.1 平稳随机过程的定义	18
2.3.2 平稳随机过程的遍历性	18
2.3.3 平稳随机过程自相关函数的性质	19
2.3.4 平稳随机过程的功率谱密度	19
2.4 高斯随机过程	21
2.4.1 高斯随机过程的定义	21
2.4.2 高斯随机过程的重要性质	21
2.4.3 高斯随机过程的统计特性	22
2.5* 窄带随机过程	24

2.5.1 窄带随机过程的表示方法	25
2.5.2 窄带随机过程的统计特性	25
2.6 白噪声	27
2.6.1 高斯白噪声	27
2.6.2 带限型和带通型白噪声	28
2.7* 正弦波加窄带高斯过程	30
2.8 平稳随机过程通过线性系统	32
2.9 小结	36
思考题与习题	37
第3章 通信信道	41
3.1 概述	41
3.2 信道的定义和分类	41
3.2.1 信道定义	41
3.2.2 信道分类	41
3.3 信道的数学模型	42
3.3.1 调制信道模型	42
3.3.2 编码信道模型	43
3.4 常用信道	44
3.4.1 恒参信道	44
3.4.2 随参信道	47
3.5 恒参信道特性及其信号传输	48
3.5.1 幅频特性	48
3.5.2 相频特性	49
3.6 随参信道特性及其信号传输	50
3.6.1 多径衰落与频率弥散	50
3.6.2 频率选择性衰落与相干带宽	52
3.7 分集接收	53
3.7.1 分集接收技术	54
3.7.2 合并方式	54
3.8 信道的噪声	55
3.8.1 噪声的分类	55
3.8.2 起伏噪声及其特性	56
3.9 信道容量	59
3.9.1 离散信道的信道容量	59
3.9.2 连续信道的信道容量	59
3.10 小结	60
思考题与习题	61
第4章 模拟调制系统	62



4.1 概述	62
4.2 线性调制	62
4.2.1 幅度调制原理	62
4.2.2 普通调幅 (AM)	63
4.2.3 双边带调制 (DSB)	64
4.2.4 单边带调制 (SSB)	65
4.2.5 残留边带调制 (VSB)	66
4.3 线性调制系统的性能分析	68
4.3.1 DSB 系统的性能	69
4.3.2 SSB 系统的性能	70
4.3.3 AM 系统性能	71
4.4 非线性调制	74
4.4.1 非线性调制的原理	74
4.4.2 窄带调频 (NBFM)	75
4.4.3 宽带调频 (WBFM)	77
4.4.4 调频信号的产生与解调	79
4.5 调频系统的性能分析	81
4.5.1 调频系统的抗噪声性能	81
4.5.2 门限效应	86
4.5.3 加重技术	87
4.6 各种模拟调制系统的比较	88
4.6.1 性能比较	88
4.6.2 特点与应用	88
4.7 频分复用技术	90
4.7.1 频分复用 (FDM) 原理	90
4.7.2 调频立体声广播	91
4.8 小结	92
思考题与习题	93
 第 5 章 模拟信号的数字化	 96
5.1 概述	96
5.2 抽样定理	96
5.2.1 低通信号抽样定理	96
5.2.2 带通信号抽样定理	99
5.3 模拟信号的量化	102
5.3.1 均匀量化	103
5.3.2 非均匀量化	104
5.4 脉冲编码调制	109
5.4.1 脉冲编码调制原理	109
5.4.2 PCM 系统的噪声	115

5.5*	差分脉冲编码调制	117
5.5.1	差分脉码编码调制(DPCM)的基本原理	117
5.5.2	DPCM 系统的噪声	118
5.6*	增量调制	119
5.6.1	增量调制 (DM) 的基本原理	119
5.6.2	DM 系统的噪声	121
5.7	时分复用和 PCM 数字电话系统	122
5.7.1	时分复用 (TDM) 原理	122
5.7.2	PCM 时分多路电话系统组成	122
5.7.3	PCM 系统的标准制式	124
5.8	小结	126
	思考题与习题	126
第 6 章	数字信号的基带传输	129
6.1	概述	129
6.2	数字基带信号及其频率特性	130
6.2.1	数字基带信号的波形	130
6.2.2	数字基带信号频率特性分析	132
6.2.3	随机基带序列的功率谱分析	134
6.3	数字基带信号的传输码型	136
6.4	基带信号传输与码间串扰	138
6.4.1	数字基带传输系统模型	138
6.4.2	码间串扰及奈奎斯特准则	138
6.4.3	无码间串扰的传输条件及波形	141
6.4.4	眼图	142
6.5*	部分响应系统	144
6.6	基带传输系统的抗噪声性能	148
6.7	时域均衡	151
6.8	小结	154
	思考题与习题	155
第 7 章	数字信号的频带传输	158
7.1	概述	158
7.2	二进制幅移键控 (2ASK)	158
7.2.1	调制/解调原理	158
7.2.2	功率谱及带宽	160
7.2.3	误码率	162
7.3	二进制频移键控 (2FSK)	167
7.3.1	调制/解调原理	167
7.3.2	功率谱及带宽	169

7.3.3 误码率	172
7.3.4 最小频移键控 (MSK)	174
7.4 二进制相移键控 (2PSK)	181
7.4.1 调制/解调原理	181
7.4.2 功率谱及带宽	183
7.4.3 误码率	185
7.4.4 差分相移键控 (2DPSK)	186
7.5 二进制数字调制系统的性能比较	192
7.6* 多进制数字调制	194
7.6.1 多进制幅移键控	194
7.6.2 多进制频移键控	196
7.6.3 多进制相移键控	198
7.6.4 多进制差分相移键控	202
7.7 小结	207
思考题与习题	208
第 8 章* 数字信号的最佳接收	210
8.1 概述	210
8.1.1 数字信号的统计表述	210
8.1.2 最佳接收的意义	211
8.2 最佳接收准则	211
8.3 确知信号的最佳接收	213
8.3.1 二进制确知信号的最佳接收机	213
8.3.2 二进制确知信号最佳接收机的误码率	215
8.4 起伏信号的最佳接收	218
8.5 实际接收机和最佳接收机的性能比较	220
8.6 匹配滤波器	221
8.6.1 匹配滤波器原理	221
8.6.2 匹配滤波器的实现	222
8.7 最佳基带传输系统	226
8.8 小结	229
思考题与习题	229
第 9 章 同步原理	231
9.1 同步的基本概念与分类	231
9.2 载波同步	232
9.2.1 插入导频法	232
9.2.2 直接提取法	233
9.2.3 载波同步系统的性能	236
9.3 位同步	238

9.3.1 外同步法	238
9.3.2 自同步法	239
9.3.3 位同步系统的性能	242
9.4 群同步	243
9.4.1 插入同步码组法	243
9.4.2 起止式同步法	246
9.4.3 群同步系统的性能	247
9.5 网同步	248
9.5.1 常用的网同步方式	249
9.5.2 数字同步网	250
9.6 小结	252
思考题与习题	252

第 10 章 差错控制编码 255

10.1 概述	255
10.1.1 差错控制的基本概念	255
10.1.2 差错控制方式	255
10.2 差错控制编码的基本原理	256
10.2.1 检错与纠错的基本原理	256
10.2.2 差错控制编码的分类	259
10.2.3 差错控制编码系统的性能	260
10.3 奇偶监督码	261
10.3.1 一维奇偶监督码	262
10.3.2 二维奇偶监督码	263
10.4 线性分组码	263
10.4.1 线性分组码的基本概念	263
10.4.2 监督矩阵和生成矩阵	264
10.4.3 汉明码	267
10.5 循环码	269
10.5.1 循环码的概念	269
10.5.2 循环码的运算及其生成	270
10.5.3 循环码的编解码	273
10.5.4 几种典型循环码	274
10.6* 卷积码	276
10.6.1 卷积码结构	276
10.6.2 卷积码的编码原理	277
10.6.3 卷积码的解码原理	278
10.7* 网格编码调制	282
10.7.1 网格编码调制的概念	282
10.7.2 网格编码调制基本原理	283

10.8 小结	286
思考题与习题	286
第 11 章 通信网基础	289
11.1 通信网的基本概念	289
11.1.1 通信网及其构成要素	289
11.1.2 通信网的业务	290
11.1.3 通信网的分类	291
11.1.4 通信网的一般性能	291
11.1.5 通信网的发展趋势	292
11.2 通信网络基本原理	294
11.2.1 通信网络拓扑结构	294
11.2.2 通信网络体系结构	297
11.2.3 网络协议	300
11.3 数据通信网	304
11.3.1 数据通信网概念及其分类	304
11.3.2 分组交换网	305
11.3.3 DDN 网	306
11.3.4 帧中继网	308
11.3.5 ATM 网	309
11.4 通信网络管理系统	310
11.4.1 网络管理系统的管理功能和指标	310
11.4.2 网络管理系统的体系结构	312
11.5 小结	314
思考题与习题	315
附录一 部分习题参考答案	316
附录二 研究生入学考试样卷	331
附录三 Q 函数与误差函数	347
附录四 通信专业常用缩略语	350
主要参考文献	354

第1章 绪论

1.1 概述

通信,在现代信息社会的作用非常重要。不难想象,如果没有通信,人们的工作、生活各方面的活动都将一筹莫展。

遍布全世界每个角落的信息网络,构成了现代社会的神经系统,是国民经济和社会发展的重要条件和保障。为了学习、掌握各种通信系统的工作原理,开展相关的研究、开发和运行维护工作,首先必须掌握通信的基本原理,这就是编写本书的根本目的。

本章主要介绍通信与通信系统的基本概念、通信系统的基本组成与分类及其主要质量指标等,使读者对通信与通信系统建立起一个最初步的印象,为后续各章节的深入学习打下基础。

1.1.1 通信的含义

“通信”的最早含义,是指由一地向另一地传递消息,即信息的传输。

随着通信技术的不断发展和社会的进步,通信用户急剧增加,其地理覆盖范围不断扩大,单条线路的信息传输早已不能满足通信的需要,从而形成了四通八达的复杂网络。有了信息网络,信息的传输势必伴随着信息的切换(交换)。因此,考虑到网上信息的交换问题,“通信”的概念应包含信息的传输与交换。

现代通信的业务量即信息量已十分巨大,信息的处理工作异常繁复,必须依靠计算机高速完成。事实上,现代通信系统是通信技术和计算机技术高度融合的结果。从这个视角出发,现代通信技术已包括三个方面的内容,即信息的处理、传输和交换。

1.1.2 消息、信息与信号

消息、信息与信号是三个近义词,但作为专业术语,它们各有不同的含义。

1. 消息

信息源所产生的物理信息,如语音、图像以及电报、文字、符号等。

2. 信息

消息中所包含的对受信者(信宿)有意义的内容,即人们尚不知晓的内容。若某则消息全是你熟知的内容,则该消息对你而言毫无信息。

3. 信号

消息的物理表现形式。在通信系统中,此“信号”常指电信号;在现代通信中,也已广泛使用光信号(光纤通信)。如用波形表示信号,或用电压电流的大小表示信号,或用光的强弱表示信号,等等。具体来说,就是用电信号(或光信号)的某些参量来承载消息。

若信号参量的变化连续取值, 则为模拟信号; 若只能离散取值, 则为数字信号。

1.2 通信系统的组成

1.2.1 通信系统模型

1. 通信系统的概念

通信系统是指将携带信息的信号从一个地方传至另一个地方的系统。

2. 通信系统的一般模型

点对点通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

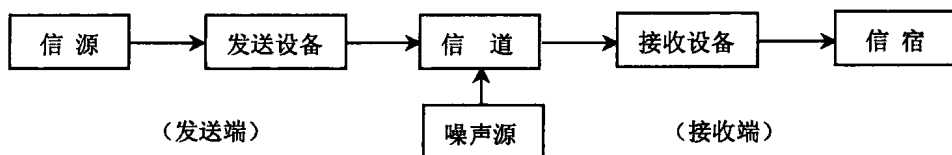


图 1-1 通信系统的一般模型

(1) 信源: 信源的功能是把消息转换成原始电信号(基带信号), 即完成非电量→电量的变换。话筒(语音→音频信号)、摄像机(图像→视频信号)、电传机(键盘字符→数字信号)等都是信源的典型例子。

(2) 发送设备: 发送设备的主要功能是信号的放大和变换。要把信号传往远处, 就必须把它放大到具有足够的功率, 这就是放大。信号变换则包括编码、调制等, 其目的是使变换后的信号适于在相应信道中传输。

(3) 信道: 信道是信号传输的通道, 可分为无线信道和有线信道两大类。通常, 信号在信道中传输时会受到衰减, 发生畸变, 其程度取决于信道的传输特性。另外, 几乎所有信道都会受到噪声的干扰, 影响信道的传输质量。

(4) 接收设备: 接收设备完成放大和反变换两个功能。经过信道传输后到达接收端的信号往往很微弱, 需要放大后才能进行相关的处理。反变换则是完成与发送设备中的变换相反的功能, 如解码、解调。

(5) 信宿: 信宿是通信系统的终点, 完成电量→非电量的变换, 恢复原始信号, 供人们视、听。典型例子有扬声器、显像管、计算机等。

(6) 噪声源: 噪声源是作用到信道的外部噪声和系统内部各处噪声的等效集中表示。

1.2.2 模拟通信系统和数字通信系统

1. 模拟通信系统

模拟通信系统指在信道中传输模拟信号的通信系统, 系统模型如图 1-2 所示。

与图 1-1 相比, 模拟通信系统中发送设备换成了调制器, 接收设备换成了解调器。事实上, 除了调制器外, 发送设备还应包含放大、滤波、混频、辐射等环节。本模型中认为这些环节都足够理想, 从而不再讨论。调制的主要功能是频谱变换, 即把基带(调制)信号的低



通频谱变换为频带信号（已调信号）的带通频谱，以便与信道频率特性相匹配。由此可见，模拟通信系统主要完成两个变换功能：非电信号——电信号；基带信号——频带信号。在这里，基带信号指原始的模拟电信号，其主要特点是：①信号频率一般比较低；②一般为低通型信号。

在模拟通信系统中，因为噪声会不断累积，严重影响传输质量，故不适于长途传输。

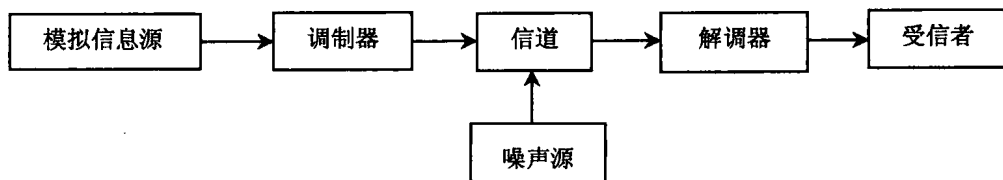


图 1-2 模拟通信系统模型

2. 数字通信系统

数字通信系统指在信道中传输数字信号的通信系统，一般模型如图 1-3 所示。

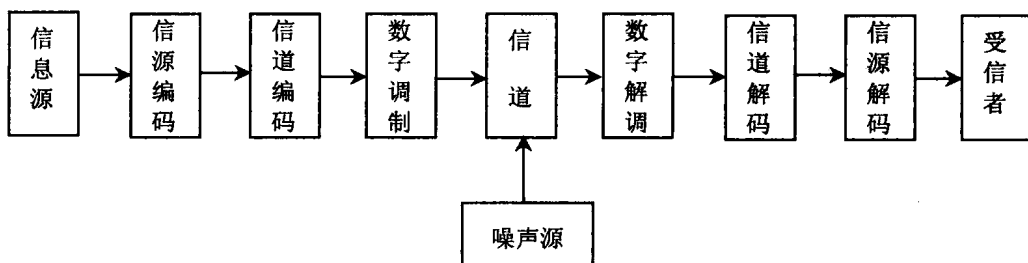


图 1-3 数字通信系统模型

系统模型中信源编码、信道编码和数字调制三个环节的主要功能如下所述。

（1）信源编码：信源编码主要完成两项功能，一是模/数变换，将模拟信源来的模拟信号变换为数字信号，实现模拟信号的数字化，以进入数字通信系统传输；二是提高消息传输的有效性和安全性，如采用各种压缩技术减少信息的冗余度、采用适当的加密措施保护信息传输的安全，等等。

（2）信道编码：信道编码主要完成两项功能，一是进行检错/纠错编码以实现传输错误的检查和纠正，提高数字信息传输的可靠性；二是结合传输信道和系统的具体情况和技术要求，对于信源编码的数字信息进行适当的变换，以满足系统传输的需要。

（3）数字调制：信道编码输出的信号仍是二进制数字脉冲信号，称为数字基带信号。在大多数信道中不能传输这种基带信号，因此必须用基带信号去调制载波信号，同时完成频谱搬移功能，此后才能正常传输。

数字解调、信道解码、信源解码则分别完成相反的功能，最终还原成原始信号提交给受信者。