



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

通信系统原理

(第二版)

主编 沈振元 叶芝慧
参编 张小虹 沈克勤
 聂志泉 赵雪荷



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

TN91
30:2

电子与通信类专业“十一五”规划教材

通信系统原理

(第二版)

主编 沈振元 叶芝慧

参编 张小虹 沈克勤 聂志泉 赵雪荷

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书是沈振元、聂志泉、赵雪荷编著的《通信系统原理》的第二版。随着通信技术的飞速发展，新的内容和技术不断出现，为此，在第一版的基础上，我们增加了一些新的内容，删除了部分陈旧与繁琐章节，以适应新的教学要求。

考虑到第一版先后加印了 10 多次，有不少院校将其作为教材使用，为便于教学的延续性，第二版将保持第一版的特色，并尽量保持原来的章节顺序，在此基础上增加了通信新技术和新系统的原理介绍。

本书讲述现代通信系统的基本原理，以数字通信基础理论为主。全书分 4 大部分。第 1 部分介绍通信基础知识和必需的数学基础；第 2 部分介绍模拟通信系统的基本原理；第 3 部分介绍数字通信系统的基本原理和新技术；第 4 部分介绍多用户通信和信息论基础。书中每章均有思考题和习题，便于读者检查所掌握的知识。

本书可作为通信专业的本科及专科教材，也可作为通信工程技术人员的参考书。

★本书配有电子教案，需要者可从出版社的网站上免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

通信系统原理/沈振元, 叶芝慧主编. —2 版. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2008. 8
高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 5606 - 0232 - 5

I. 通… II. ①沈… ②叶… III. 通信系统—高等学校—教材 IV. TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 089258 号

策 划 毛红兵

责任编辑 邵汉平 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2008 年 8 月第 2 版 2008 年 8 月第 14 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 27.125

字 数 640 千字

印 数 54 001~58 000 册

定 价 38.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 0232 - 5/TN · 0073

XDUP 0508052 - 14

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

第二版前言

现代通信技术和计算机网络技术的飞速发展和相互融合推动了信息储存、处理和传输技术的不断进步。通信专业的教材和教学在这一背景下也需要与时俱进,以适应信息社会的发展。

本书阐述信息的处理、传输以及通信系统的基本原理,并对现代通信系统的新技术加以介绍。本书是编者多年通信领域教学和科研的成果总结,比较全面、系统地论述了现代通信技术和系统的基本理论,包括确知和随机信号分析、模拟通信系统、数字信号传输、现代数字调制技术、同步原理、最佳接收、信道编码、多用户通信、网络信息论基础等。在内容编排上,强调基本理论的分析论述,同时有所侧重地介绍了现代通信的新技术和新成果。

本书第1版从1993年发行到现在已有十多年,中间经过十多次重印,而内容未作改变。为了适应现代网络通信飞速发展和新技术不断出现的形势,同时考虑到教学的延续性,此次进行的修订将保持第一版的特色,并且尽量保持原来的章节顺序。第二版在内容上增加了通信新技术和新系统的分析介绍,例如衰落信道、基于MATLAB的信号处理、OFDM调制、扩频技术、复合编码、多路复用和多址接入技术、网络信息理论等。同时,第二版缩减、删除了一些繁琐的数学推导和陈旧的内容,目的是让读者能够从系统的角度掌握知识、分析问题并解决问题。

本书的特点是通俗易懂,内容深入浅出,概念清晰,理论分析严谨,并且与实际应用密切相连。书中配有大量的思考题和习题,以帮助读者巩固基本理论知识,掌握分析和解决问题的方法。

全书共12章,分为4个部分。第1部分由第1~3章组成,介绍通信基础知识和必要的数学基础;第2部分(第4章)阐述模拟通信系统原理;第3部分包括第5~10章,论述数字通信系统的基本原理和新技术;第4部分由第11章和第12章组成,介绍多用户通信和信息论的基础知识。

第1章为绪论,介绍通信系统的概念、组成和信号处理,并讨论现代通信系统的发展趋势。

第2章为确知信号分析,主要介绍信号和系统的分类、信号频谱分析、信号不失真传输的条件、信号波形分析,并且介绍了基于MATLAB的信号处理方法。

第3章为随机信号分析,主要介绍随机信号分析所需的基础理论,并且阐述了与通信相关的噪声分析、匹配滤波器和衰落信道分析等内容。

第4章为模拟通信系统,概述了模拟基带信号传输问题,分析了线性调制及其抗噪声性能、非线性调制及其抗噪声性能,讨论了调频信号解调的门限效应问题,最后介绍了加重技术。

第5章为数字信号的基带传输,重点关注数字基带信号的频谱分析、数字基带信号传输中的码间串扰和噪声、无码间串扰特性等。本章还介绍了眼图的基本原理和模型,以及为改善数字信号基带传输性能而采取的措施,包括部分响应系统及时域均衡技术。

第6章为现代数字调制技术,包括2ASK、2FSK、2PSK调制原理及系统性能,多进制数字调制以及其他数字调制技术。在这一章里,还讨论了OFDM调制和扩频技术。

第7章为模拟信号的数字传输,在介绍抽样定理及其应用、模拟信号的量化、信号的编码和译码等原理的基础上,分析了PCM通信系统的原理和性能、增量调制以及各种改进型的增量调制方案。

第8章为同步原理,主要介绍载波同步的方法和系统性能,同步载波频率和相位误差对解调性能的影响,位同步的方法和系统性能,相位误差对系统性能的影响,以及群同步(帧同步)原理。

第9章为数字信号的最佳接收,包括二元假设检验和各种判决准则、多次测量、二元确知信号的最佳接收。

第10章为信道编码原理,对检错码、线性分组码、卷积码进行了分析讨论,并且介绍了几种实际应用中采用较多的复合编码技术,包括乘积码、链接码和Turbo码。M序列也在这一章中描述。

第11章为多路复用和多址接入,这是第二版新增加的一章,目的是适应多用户通信发展的现状。它将原来散落在各章中的频分多路复用和时分多路复用归纳在一起,并增加了码分多址、空分多址、极化多址等内容。在介绍各种多路复用和多址接入技术的基础上,本章还分析了多址通信系统及其结构,并且介绍了局域网中应用的多址接入技术。

第12章为信息论基础,包括信息源与信息的测度、离散无记忆信源编码、离散无记忆信道、香农公式及网络信息理论简介。

本书由沈振元和叶芝慧主持整个改编工作。叶芝慧编写了书中的大部分章节,沈克勤和张小虹缩写了部分章节。沈振元、聂志泉、赵雪荷、叶芝慧对全书进行了审校。在编写过程中,牛群山、曹迎、杨琼、牛小保、詹海圆、王葆宗等研究生为初稿做了大量的文字录入和图表制作等工作。本书在编写过程中得到了单位领导和同事的无私帮助,还得到了黄葆华、沈忠良、曹秀英、徐平等担任通信原理相关课程的老师所给予的建议和帮助。最后,编者要感谢西安电子科技大学出版社的大力支持,特别是本书的编辑毛红兵老师,在她的鼓励和支持下,本书才得以顺利出版。

本书虽经许多老师和多届学生使用,并得到很多专家和同事的指正,但是现代通信的发展日新月异,限于作者的水平,书内一定还有不妥和疏漏之处,敬请广大读者指正。

编者

2008年4月

第一版前言

这是一本根据通信专业教学大纲编写的“通信系统原理”教材，主要讨论数字和模拟通信系统的基本原理，但以数字通信系统为主。由于“编码技术”、“统计无线电技术”、“信息论基础”等单独开设了选修课，因此有关这些方面的内容在本教材中只作简要介绍。

本教材由绪论、确知信号分析、随机信号分析、模拟通信系统、数字信号的基带传输、数字载波调制、模拟信号的数字传输、同步原理、数字信号的最佳接收、信道编码原理、信息论基础等 11 章组成。

本教材是在中国人民解放军通信工程学院沈振元、聂志泉、赵雪荷、汪复兴编写的“通信系统原理”基础上进一步修改而成的。改编工作由沈振元、聂志泉、赵雪荷完成。改编过程中得到沈琪琪、朱德生、宋祖顺、谢佑兴、朱茂祥、张道顺、陆存乐等的关心和帮助。

改编时由于在内容上作了一些调整，版面字数上作了较大的压缩，因此难免有这样那样的问题，请读者给予指正。

编者
1993 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论 1	2.6.1 互相关函数和自相关函数..... 30
1.1 通信系统的组成..... 1	2.6.2 归一化相关函数和相关系数..... 31
1.2 数字通信的信号处理..... 2	2.7 基于 MATLAB 的信号处理..... 32
1.2.1 数字通信系统模型..... 3	2.7.1 MATLAB 概述..... 32
1.2.2 数字通信与模拟通信的性能比较..... 5	2.7.2 常用信号的 MATLAB 分析..... 33
1.3 通信系统的质量指标..... 6	思考题..... 39
1.3.1 模拟通信系统的性能指标..... 6	习题..... 39
1.3.2 数字通信系统的质量指标..... 7	第 3 章 随机信号分析 41
1.4 现代通信系统的发展趋势..... 9	3.1 引言..... 41
1.4.1 移动通信系统..... 9	3.2 随机事件与概率..... 41
1.4.2 卫星通信系统..... 11	3.2.1 事件和概率..... 41
1.4.3 光纤通信技术..... 12	3.2.2 复杂事件..... 42
思考题..... 13	3.2.3 条件概率与统计独立..... 42
第 2 章 确知信号分析 14	3.2.4 概率的基本定理..... 42
2.1 信号和系统的分类..... 14	3.3 随机变量及其数字特征..... 43
2.1.1 信号的分类..... 14	3.3.1 随机变量与概率分布..... 43
2.1.2 系统的分类..... 15	3.3.2 随机变量的函数..... 47
2.2 周期和非周期信号的频谱分析..... 15	3.3.3 随机变量的数字特征..... 47
2.2.1 周期信号用傅里叶级数展开的 三种表示式..... 15	3.4 随机过程的概念及其统计特性..... 49
2.2.2 典型周期信号的频谱分析..... 17	3.4.1 随机过程的概念..... 49
2.2.3 非周期信号的频谱函数..... 19	3.4.2 随机过程的统计描述..... 51
2.2.4 周期信号的频谱函数..... 19	3.4.3 随机过程的数字特征..... 52
2.2.5 常用信号的频谱函数..... 20	3.5 平稳随机过程和高斯随机过程..... 53
2.3 傅里叶变换的运算特性..... 23	3.5.1 平稳随机过程..... 53
2.4 谱密度和帕塞瓦尔定理..... 24	3.5.2 各态历经性..... 54
2.4.1 功率和能量的一般计算公式..... 24	3.5.3 高斯随机过程..... 55
2.4.2 帕塞瓦尔定理..... 25	3.5.4 平稳随机过程的功率谱密度及其 与自相关函数的关系..... 56
2.4.3 能量谱密度 $G(\omega)$ 和功率谱 密度 $P(\omega)$ 26	3.6 随机过程通过线性系统..... 60
2.4.4 信号带宽 B 27	3.6.1 输出过程 $Y(t)$ 的数学期望..... 60
2.5 信号通过线性系统的不失真传输 条件..... 29	3.6.2 输出过程 $Y(t)$ 的自相关函数..... 61
2.5.1 信号通过线性系统的分析..... 29	3.6.3 输出随机过程 $Y(t)$ 的功率谱..... 61
2.5.2 信号通过线性系统的不失真 条件..... 29	3.6.4 输出过程的概率分布..... 62
2.6 波形的相关..... 30	3.7 噪声分析..... 63
	3.7.1 白噪声..... 63
	3.7.2 通信系统中的噪声..... 65
	3.7.3 正弦波加窄带高斯噪声..... 69

3.8 匹配滤波器	70	习题	122
3.8.1 问题的提出	70	第5章 数字信号的基带传输	124
3.8.2 匹配滤波器的传输特性	71	5.1 数字基带信号传输系统的构成及	
3.8.3 匹配滤波器的性质	73	应用	124
3.9 衰落信道	75	5.1.1 数字基带信号传输系统的构成	124
3.9.1 信道的数学模型	75	5.1.2 基带数字信号传输的应用	126
3.9.2 恒参信道和随参信道	76	5.2 数字基带信号的码型和波形	127
3.9.3 衰落信道的传播特性	78	5.2.1 常用码型	127
3.9.4 信号的时间扩展	81	5.2.2 基带波形的形成	131
3.9.5 移动引起的信道时变性	83	5.3 数字基带信号的频谱分析	132
3.9.6 降低衰落影响的方法	84	5.3.1 随机脉冲序列的波形和一般	
思考题	86	表示式	132
习题	86	5.3.2 数字基带信号功率谱密度的	
第4章 模拟通信系统	89	推导	134
4.1 引言	89	5.3.3 对功率谱密度 $P_x(\omega)$ 的讨论	135
4.1.1 调制在通信系统中的作用	89	5.3.4 常用数字基带信号的功率谱	
4.1.2 调制的基本特性和分类	90	密度	135
4.1.3 调制系统中讨论的主要问题和		5.3.5 数字基带信号功率的计算	139
主要参数	91	5.4 数字基带传输中的码间串扰和噪声	140
4.2 模拟基带信号传输	91	5.4.1 码间串扰和噪声对误码的影响	140
4.2.1 线性失真及均衡	91	5.4.2 数字基带信号传输系统的模型	
4.2.2 非线性失真和压扩	92	和数学分析	141
4.2.3 基带传输系统中的噪声	92	5.5 无码间串扰的传输特性	144
4.3 线性调制	94	5.5.1 无码间串扰传输函数 $H(\omega)$ 的	
4.3.1 双边带调制(DSB)	94	特例	145
4.3.2 振幅调制(AM)	96	5.5.2 无码间串扰传输特性的数学	
4.3.3 抑制边带调制(SSB和VSB)	98	分析	146
4.4 线性调制系统的抗噪声性能分析	105	5.5.3 几种常用的无码间串扰的	
4.4.1 概述	105	传输特性	148
4.4.2 线性调制系统同步解调时的		5.5.4 码元速率 f_b 、带宽 B 和频带	
抗噪声性能分析	106	利用率	150
4.4.3 线性调制系统非同步解调时的		5.5.5 几个问题的讨论	151
抗噪声性能分析	108	5.6 无码间串扰时噪声对传输性能的	
4.5 非线性调制(角调制)	109	影响	152
4.5.1 角调制信号的一般概念	110	5.6.1 信号与噪声的分析	152
4.5.2 角调制信号的频谱	112	5.6.2 加性噪声作用下误码的分析	153
4.5.3 调频信号的平均功率	116	5.6.3 误码率 P_e 的计算公式	155
4.6 调频系统的抗噪声性能分析	116	5.6.4 误码率 P_e 与信噪功率比 ρ 的	
4.6.1 概述	116	关系曲线	157
4.6.2 抗噪声性能分析	117	5.6.5 误码率 P_e 与码元速率 f_b 的	
4.7 调频信号解调的门限效应	119	关系	158
4.8 加重技术	120	5.7 多进制数字基带信号的传输	158
思考题	121	5.7.1 多进制数字基带信号传输系统	158

5.7.2	多进制基带数字信号的频谱和带宽	160	6.7	二进制相移键控系统的性能	200
5.7.3	多进制基带数字信号传输时的误码率	161	6.7.1	相干检测 2PSK 系统的误码率	200
5.8	眼图	161	6.7.2	极性比较(码变换法)检测时 2DPSK 系统的误码率	201
5.8.1	什么是眼图	161	6.7.3	差分检测时 2DPSK 系统的误码率	202
5.8.2	眼图的基本原理	162	6.7.4	2PSK 与 2DPSK 系统的比较	204
5.8.3	眼图的模型	164	6.8	二进制数字调制系统性能的比较	204
5.9	改善数字信号基带传输性能的措施	164	6.8.1	同一调制方式不同检测方法的比较	205
5.9.1	部分响应系统	164	6.8.2	同一检测方法不同调制方式的比较	205
5.9.2	时域均衡	169	6.9	多进制数字调制	206
	思考题	172	6.10	其他数字调制方式	209
	习题	173	6.10.1	时频调制	209
第 6 章 现代数字调制技术		176	6.10.2	时频相调制	211
6.1	概述	176	6.10.3	窄带数字调制	213
6.2	二进制数字振幅调制	177	6.11	OFDM 调制	217
6.2.1	一般原理及实现方法	177	6.11.1	OFDM 的基本原理	217
6.2.2	2ASK 信号的功率谱及带宽	178	6.11.2	OFDM 系统的参数选择	220
6.3	二进制幅移键控系统的性能	181	6.11.3	OFDM 系统性能	221
6.3.1	包络检测时 2ASK 系统的误码率	181	6.12	扩频通信	222
6.3.2	相干检测时 2ASK 系统的误码率	184	6.12.1	直接序列扩频(DSSS)	222
6.3.3	相干检测与非相干检测时 2ASK 系统的比较	185	6.12.2	跳频扩频(FHSS)	225
6.4	二进制数字频率调制	185	6.12.3	DSSS 与 FHSS 的比较	227
6.4.1	实现调制的方法	186		思考题	227
6.4.2	2FSK 信号的解调方法	186		习题	228
6.4.3	2FSK 信号的功率谱及带宽	186	第 7 章 模拟信号的数字传输		230
6.5	二进制频移键控系统的性能	188	7.1	概述	230
6.5.1	包络检测时 2FSK 系统的误码率	188	7.1.1	模拟信号的数字传输	230
6.5.2	相干检测时 2FSK 系统的误码率	190	7.1.2	模拟信号和数字信号的互相转换	230
6.5.3	相干检测与包络检测时 2FSK 系统的比较	191	7.1.3	脉冲编码调制与脉冲振幅调制的区别	231
6.6	二进制数字相位调制	191	7.2	抽样定理及其应用	232
6.6.1	绝对码和相对码	192	7.2.1	概述	232
6.6.2	绝对相移和相对相移	193	7.2.2	低通信号的均匀理想抽样	234
6.6.3	2PSK 信号的产生和解调	194	7.2.3	自然抽样(曲顶抽样)	238
6.6.4	2DPSK 信号的产生与解调	196	7.2.4	平顶抽样	240
6.6.5	二进制相移信号的功率谱及带宽	199	7.2.5	实际应用中应注意的问题	242
			7.2.6	带通信号的抽样定理	242
			7.3	模拟信号的量化	244
			7.3.1	量化和量化噪声	244

7.3.2	均匀量化和量化信噪功率比的计算	246	性能的影响	306
7.3.3	非均匀量化的基本原理	249	8.7 群同步(帧同步)	308
7.3.4	压缩与扩张的特性	251	8.7.1 引言	308
7.4	编码和译码	255	8.7.2 连贯式插入法	309
7.4.1	常用的二进制码	255	8.7.3 间歇式插入法	311
7.4.2	编码器	257	8.7.4 起止式同步法	315
7.4.3	译码器	260	8.7.5 群同步系统的性能	315
7.5	PCM 通信系统	261	8.7.6 群同步的保护	317
7.5.1	PCM 通信系统原理	261	思考题	318
7.5.2	PCM 信号的码元速率和带宽	262	习题	319
7.5.3	PCM 系统的抗噪声性能	262	第9章 数字信号的最佳接收	321
7.6	增量调制系统	265	9.1 引言	321
7.6.1	简单增量调制	265	9.2 二元假设检验和各种判决准则	321
7.6.2	简单增量调制系统抗噪声性能分析	269	9.2.1 最小平均风险准则(贝叶斯准则)	324
7.6.3	简单增量调制的抗噪声性能	274	9.2.2 错误概率最小准则(理想观测者准则)	326
7.6.4	PCM 和 ΔM 系统性能比较	275	9.3 多次测量	327
7.7	各种改进型的增量调制	277	9.4 二元确知信号的最佳接收	329
7.7.1	总和增量调制($\Delta-\Sigma$ 调制)	277	9.4.1 最佳接收机结构	329
7.7.2	数字音节压扩增量调制	280	9.4.2 最佳接收机的检测性能	331
7.7.3	数字音节压扩 $\Delta-\Sigma$ 调制	282	9.4.3 实际接收机与最佳接收机的比较	335
7.7.4	差分脉码调制(DPCM)	283	思考题	336
思考题		286	习题	336
习题		287	第10章 信道编码原理	338
第8章 同步原理		291	10.1 概述	338
8.1 概述		291	10.1.1 信源编码与信道编码	338
8.2 载波同步的方法		292	10.1.2 纠错码的分类	338
8.2.1 直接法		292	10.1.3 差错控制的工作方式	339
8.2.2 插入导频法		295	10.1.4 纠错码的基本概念	340
8.2.3 两种载波同步方法的比较		297	10.2 检错码	342
8.3 载波同步系统的性能		297	10.2.1 奇偶监督码	342
8.3.1 稳态相位误差		297	10.2.2 行列监督码	344
8.3.2 随机相位误差		298	10.2.3 恒比码	344
8.3.3 同步建立时间和保持时间		299	10.3 线性分组码	345
8.4 同步载波频率和相位误差对解调性能的影响		300	10.3.1 基本概念	345
8.5 位同步的方法		301	10.3.2 汉明码	346
8.5.1 引言		301	10.3.3 循环码	349
8.5.2 用插入导频法提取位同步信号		302	10.3.4 BCH 码	354
8.5.3 直接提取位同步信号		304	10.3.5 里德-索洛蒙码	354
8.6 位同步系统的性能以及相位误差对			10.3.6 交错码	354
			10.4 卷积码	355

10.5 复合编码	356	12.2 信息源与信息的测度	382
10.5.1 乘积码	356	12.2.1 离散消息的统计特性	382
10.5.2 链接码	357	12.2.2 信息的测度	383
10.5.3 Turbo 码	357	12.2.3 离散无记忆信源的平均信息量 ——熵	385
10.6 m 序列	358	12.2.4 离散无记忆信源的扩展	387
10.6.1 正交码及伪随机码的概念	358	12.3 离散无记忆信源编码	387
10.6.2 线性反馈移位寄存器	358	12.3.1 编码器的作用	387
10.6.3 m 序列产生器	359	12.3.2 定长码的编码定理	389
10.6.4 m 序列的性质	360	12.3.3 变长码的编码定理	390
思考题	362	12.4 离散无记忆信道(DMC)	393
习题	362	12.4.1 离散无记忆信道的数学模型和 概率关系	394
第 11 章 多路复用和多址接入	364	12.4.2 互信息量和平均互信息量	396
11.1 通信资源的分配	364	12.4.3 信道容量	397
11.2 频分复用和频分多址	365	12.5 香农公式及其应用	400
11.2.1 频分复用原理	365	12.5.1 连续消息的熵	400
11.2.2 卫星系统的频分多址方式	367	12.5.2 有扰连续信道的信道容量	402
11.3 时分复用和时分多址	368	12.5.3 信号体积和信道容积	404
11.3.1 时分复用的原理	368	12.5.4 香农公式的应用	405
11.3.2 时分复用的 PCM 系统 (TDM-PCM)	370	12.6 网络信息论简介	407
11.3.3 时分复用/时分多址和频分复用/ 频分多址的比较	371	12.6.1 多址信道的基本概念	408
11.4 码分多址	374	12.6.2 几种典型的多址信道	408
11.5 空分多址和极分多址	375	思考题	410
11.6 多址通信系统及其结构	376	习题	411
11.6.1 多址接入信息流	376	附录	413
11.6.2 按需分配多址接入	377	附录 A 常用的三角公式	413
11.7 局域网的多址接入技术	377	附录 B 常用的积分公式和级数	413
11.7.1 载波侦听多址接入网	378	附录 C 确知信号分析中常用的公式	414
11.7.2 令牌环网	378	附录 D 贝塞尔函数表 $J_n(\beta)$	415
思考题	380	附录 E $\text{erf}(x)$ 、 $\text{erfc}(x)$ 与 x 的数值表	416
习题	380	附录 F 缩写索引	417
第 12 章 信息论基础	382	参考文献	420
12.1 概述	382		

第1章 绪 论

本书介绍通信系统的基本原理,重点阐述通信系统的基本概念,分析信道上的语音、视频或数据等信息的传输过程,以及诸如信噪比(SNR, Signal to Noise Ratio)、差错概率、带宽占用等系统基本参数之间的权衡。

由于不断增长的对数据通信的需求,并且数字传输能够提供模拟传输所无法达到的数据处理种类及灵活性,因此数字通信系统受到越来越广泛的重视。鉴于此,本书将重点分析无线应用环境下的数字通信系统,其典型特征是信号传输受到噪声和衰落的影响。

本章简要介绍以下四个方面的内容:

- (1) 通信系统的组成;
- (2) 数字通信的信号处理;
- (3) 通信系统的质量指标;
- (4) 现代通信系统的发展趋势。

本章的目的是使读者在学习各章内容之前,先对通信系统有一个初步的了解,以便搞清各章的学习目的和各章在课程中的地位和作用。

1.1 通信系统的组成

通信的目的是交换不同地点的消息,即传输消息。例如,将地点A的消息传输到地点B,或者反过来将地点B的消息传输到地点A。待传输的消息可以是语言、文字、图像或者数据等。消息在发送端首先被转换为各种形式的电信号,然后经过各种各样的电信道(例如有线通信中的明线、电缆,无线通信中的短波、微波等)传输到接收端;接收端再把接收到的电信号还原为与发送端相同或者尽可能相同的消息。

传输消息有时也称为传输信息,信息可以理解为消息中所包含的对受信者有意义的內容。本书中对消息和信息不作严格的区分,两者可以混用。

将各种通信系统和设备中消息传输的完整过程高度概括,就可以得到如图1.1所示的通信系统模型。



图 1.1 通信系统模型

在图 1.1 所示的原理框图中, 消息源是需要传输的消息来源, 如语言、文字、图像、数据等。输入转换器的作用是把消息源的消息转换为电信号, 例如通电话时, 话筒就是转换器, 它把语言转换为语音信号。通常, 这种直接由消息转换得到的电信号的频率都是比较低的, 而且最高频率和最低频率的比值很大, 称为基带信号。

基带信号可以直接经放大器等向信道传输, 这种传输称为基带传输。但是, 通常基带信号需要通过调制, 把信号的频谱搬移到比较高的频率范围后再进行传输。这种经过调制后的信号称为频带信号, 相应的传输方式称为频带传输。

发送设备输出的信号, 可以通过各种不同的信道传输。常用的信道有架空明线、电缆等有线信道和中长波、短波、微波等无线信道。信号在信道中传输时, 有各种噪声与信号混在一起。噪声主要来自信道, 而发送设备和接收设备中也有一定的噪声。为了便于描述, 在通信系统模型中, 通常将噪声集中画在一起表示。

接收设备的主要任务是从受噪声影响的有噪信号中区分信号和噪声, 并提取出信号。

1.2 数字通信的信号处理

通信系统进行“数字化”处理的最主要原因是: 与模拟信号相比, 数字信号更易于再生。图 1.2 是在传输线上传输的理想二进制数字脉冲。由于线路传输的非理想特性以及信道上存在噪声或干扰, 因此信号在传输过程中会引起波形失真。图 1.2 中, 在传输脉冲仍然能够被可靠识别之前, 即在传输脉冲恶化到模糊状态之前, 利用数字放大器将脉冲放大, 并恢复其最初的理想形状, 这样脉冲就“再生”了。

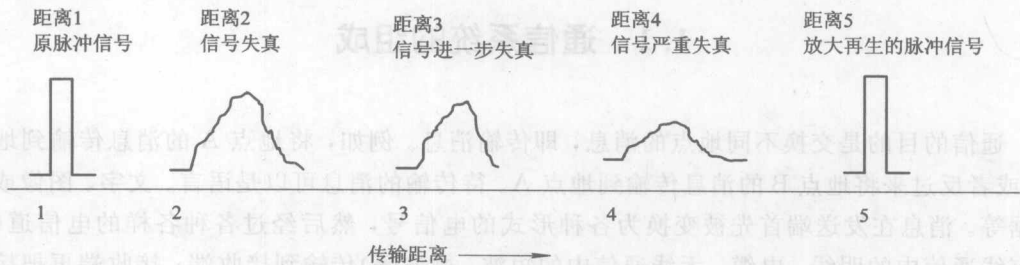


图 1.2 脉冲的失真和再生

与模拟电路相比, 数字电路有更好的抗失真和抗干扰能力。二进制数字电路的工作状态只有“开”和“关”(或者“1”和“0”)两个, 因此只有能够把电路从一种状态变换到另一种状态的干扰才能起到破坏作用。这样的两状态工作有助于信号的再生, 因而能在传输中有效地抑制噪声和其他累积干扰。与此相反, 模拟信号的波形有无限多个, 在模拟电路中, 即使很小的干扰也能导致信号产生难以接受的失真, 并且失真一旦产生, 就无法通过放大器来抑制。因为模拟信号不能去除累积的噪声, 所以也就不能很好地再生信号。

数字通信系统的优点还包括:

- (1) 数字电路比模拟电路更可靠, 且生产成本比模拟电路低。
- (2) 数字硬件比模拟硬件更具灵活性, 例如微处理器、数字开关、大规模集成(LSI),

Large Scale Integration)电路等。

(3) 时分复用(TDM, Time Division Multiplexing)信号比频分复用(FDM, Frequency Division Multiplexing)的模拟信号更简单。

(4) 不同类型的数字信号(数据、电报、电话、电视等)在传输和交换中都被看成是相同的信号,即比特信号。

(5) 为方便交换,还可以将数字信号以数据包的形式进行处理。

数字技术因能够抗干扰且能够进行加密而更适于信号处理。计算机与计算机之间、数字设备(或终端)与计算机之间的数据通信需求越来越多,这些数字终端可以通过数字通信链路获得更好的服务。

那么,数字通信系统获得这些优点的代价是什么呢?与模拟系统相比,数字系统需要更多的信号处理技术。在通信的各个阶段,数字系统都需要分配一部分资源用于实现同步,而在模拟系统中,实现同步相对比较容易。数字通信系统的另一个缺点是具有“门限效应”,即当信噪比下降到一定程度时,信号质量就会急剧恶化,而大部分模拟通信系统信号质量的下降则比较平滑。

1.2.1 数字通信系统模型

典型的数字通信系统的信号流程和信号处理过程如图 1.3 所示。图的上部表示从信源到发送端的信号传输过程,包括格式化、信源编码、加密、信道编码、多路复用、脉冲调制、带通调制、频率扩展、多址接入;图的下部表示从接收端到信宿的信号传输过程,基本上是上部信号处理的反过程。发送端将频率上变频到射频频段,经过高功率放大器馈送到天线;接收端则由天线、低噪声放大器等组成,下变频由接收器或解调器的前级末端完成。

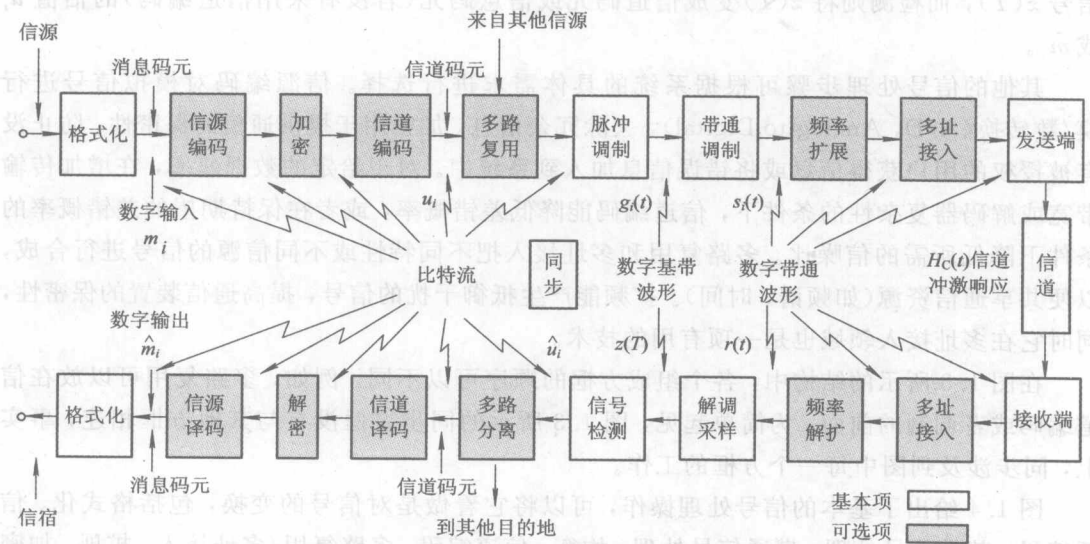


图 1.3 数字通信系统模型

在图 1.3 中, 输入信源先转换成二进制数字(比特), 然后将这些比特组合为数字消息或消息码元, 每个码元 $m_i (i=1, \dots, M)$ 都是长度为 M 的码元集中的一个。当 $M=2$ 时, 消息码元 m_i 就是二进制的, 这意味着它仅包含 1 比特的信息。每个 M 符号都由两个或两个以上比特构成, 这与模拟系统的信号波形集是无限的情况不同。经过信道编码, 消息码元序列转变成了信道码元(编码码元)序列, 信道码元记为 u_i 。由于每个消息码元或信道码元由 1 个或 1 组比特构成, 因此这样的码元序列也称为比特流, 如图 1.3 所示。

图 1.3 中必不可少的信号处理方框有格式化、调制、解调、检测和同步。格式化把源信息转换成比特, 即数字化处理。调制过程将消息码元或信道码元转换成与传输信道特性匹配的波形。脉冲调制是必不可少的步骤, 因为要传送的每个符号必须先从二进制代码(表示二进制 1 或 0 的电平)转换成基带波形。经过脉冲调制后, 每个消息码元或信道码元都转变为基带波形 $g_i(t) (i=1, \dots, M)$ 形式。

在射频传输中, 如果传输介质不支持脉冲波形的传输, 则应当应用带通调制, 此时传输介质所要求的信号是带通波形 $s_i(t) (i=1, \dots, M)$ 。带通意味着基带波形 $g_i(t)$ 的频谱通过一个载波调制被搬移到比 $g_i(t)$ 频谱高得多的频率点上。当 $s_i(t)$ 经信道传输时, 会受到信道特性的影响, 而信道特性可以用信道冲激响应 $h_c(t)$ 描述。此外, 在信号传输过程中, 加性随机噪声会使接收信号 $r(t)$ 失真, 所以接收信号 $r(t)$ 相对于发送信号 $s_i(t)$ 有一定的失真, 表示为

$$r(t) = s_i(t) * h_c(t) + n(t), \quad i = 1, \dots, M \quad (1.1)$$

其中, “*”表示卷积运算。

在相反方向上, 接收机前端或解调器对每个带通波形 $r(t)$ 进行下变频转换, 解调器将 $r(t)$ 恢复成最佳基带脉冲波形 $z(t)$ 。最后, 采样过程把成形的脉冲 $z(t)$ 变换成采样信号 $z(T)$, 而检测则将 $z(T)$ 变成信道码元或信息码元(若没有采用信道编码)的估值 \hat{u}_i 或 \hat{m}_i 。

其他的信号处理步骤可根据系统的具体需求进行选择。信源编码对模拟信号进行模/数转换(A/D, Analog to Digital), 去除冗余信息。加密用于提供通信的保密性, 防止没有被授权的用户获得信息或将错误信息加入到系统中。对于给定的数据速率, 在增加传输带宽或解码器复杂性的条件下, 信道编码能降低差错概率, 或者在保持期望的差错概率的条件下降低所需的信噪比。多路复用和多址接入把不同特性或不同信源的信号进行合成, 以便共享通信资源(如频谱、时间)。扩频能产生抵御干扰的信号, 提高通信装置的保密性, 同时它在多址接入领域也是一项有用的技术。

在图 1.3 所示的结构中, 各个组成方框的顺序可以不同。例如, 多路复用可以放在信道编码或者调制的前面。为简单起见, 图 1.3 所示的同步方框没有与其他方框相连, 事实上, 同步涉及到图中每一个方框的工作。

图 1.4 给出了基本的信号处理操作, 可以将它看做是对信号的变换, 包括格式化、信源编码、基带信号处理、带通信号处理、均衡、信道编码、多路复用/多址接入、扩展、加密和同步。这一结构框架概括了数字通信的主要技术。



图 1.4 基本的数字通信变换

1.2.2 数字通信与模拟通信的性能比较

1. 模拟信号与数字信号的区别

如果信号的某一参量，例如连续波的振幅、频率、相位，脉冲波的振幅、宽度、位置等，可以取无限多个数值，并且直接与消息对应，则称为模拟信号。例如强弱连续变化的语音信号，亮度连续变化的图像信号等都是模拟信号。

如果信号的某一参量只能取有限个数值，并且常常不直接与消息相对应，则称为数字信号。例如早期的电报信号、电传机送出的脉冲信号等都是数字信号。

需要强调的是，模拟信号有时也称连续信号，这个连续是指信号的某一参量可以连续变化(因而可以取无限多个值)，而不一定在时间上也连续。例如各种脉冲调制，经过调制以后已调信号脉冲的某一参数是可以连续变化的，但在时间上是不连续的。但由于多数情况下模拟信号在时间上和幅度上都是随着消息连续变化的，因此，有的书上把模拟信号说成是代表消息的信号在时间上和幅度上都随消息连续变化的信号。对此，读者无需过多地在定义的细节上花费时间。同样还需要强调，数字信号有时也称为离散信号，这个离散是指信号的某一参量是离散(不连续)变化的，而不一定在时间上也离散。以后要讲到的许多数字信号在时间上是连续的，例如相位键控信号、频率键控信号等。

2. 模拟通信与数字通信的区别与联系

通常将传输模拟信号的通信方式称为模拟通信，将传输数字信号的通信方式称为数字通信。模拟信号经过模/数转换以后，也可以在数字通信系统中传输，即模拟信号的数字传

输系统,例如数字电话等。

另一方面,不论模拟通信还是数字通信,在整个通信系统中均有很大一部分是可以共用的,这一点在下面要介绍的各种通信系统模型中就可以看到。因此,在通常用作模拟通信的系统中,只要加上数字终端设备,也可以传输数字信号。

模拟通信系统与数字通信系统的主要区别之一是性能评估的方法不同。模拟系统的波形是连续的,因而有无穷多个,这说明接收机必须处理无穷多个波形。衡量模拟通信系统的性能的指标是保真度标准,如信噪比、百分比失真、发端波形和收端波形之间的期望均方误差等。

与模拟通信系统不同,数字通信系统发送的是代表数字的信号,这些数字组成一个有限集或字符表,且对于接收机而言该表是先验已知的。衡量数字通信系统的一个性能参数是错误判决的概率,即差错概率。

1.3 通信系统的质量指标

在设计或者评价某个通信系统时,必须涉及到系统的质量指标问题。通信系统中的质量指标主要有以下几个方面:

- (1) 有效性:指消息的传输速度。
- (2) 可靠性:指消息传输的质量。
- (3) 适应性:指环境使用条件。
- (4) 标准性:指元件的互换性。
- (5) 经济性:指系统的成本是否可接受。
- (6) 保密性:是否便于加密。
- (7) 使用维修:是否方便。

其中最主要的是有效性和可靠性,这两个要求通常是矛盾的,应当根据实际需要进行折中或权衡。由于模拟通信系统和数字通信系统对这两个指标要求的具体内容有很大差别,因此下面分别加以讨论。

1.3.1 模拟通信系统的性能指标

1. 有效性

有效性指消息传输的速度,它取决于消息所包含的信息量和对信息源的处理。处理的目的是在单位时间内传输更多的消息或者一定频带范围内传输更多的消息。例如,单边带(SSB, Single Side Band)调制和振幅调幅(AM, Amplitude Modulation)相比较,对于每路话音信号,SSB 占用频带只有 AM 的一半,因此在一定频带内用 SSB 信号传输的路数比 AM 多一倍,可以传输更多消息。从这个角度看,SSB 的有效性比 AM 好。

2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性最终用信号噪声功率比(S/N, Signal/Noise)表示。S/N 越大,通信质量越高。模拟通信系统对 S/N 的要求为:一般无线通信系统中要求 $S/N \geq 26$ dB;语音通信中,如果能够听清 95% 以上内容,则要求 $S/N \geq 40$ dB;电视节目看起来很清楚,则要求 $S/N \geq 40 \sim 60$ dB。