



普通高等院校“十二五”规划教材

通信系统原理

TONGXIN XITONG YUANLI

□ 主 编 王 虹
□ 副主编 卢珞先 朱健春



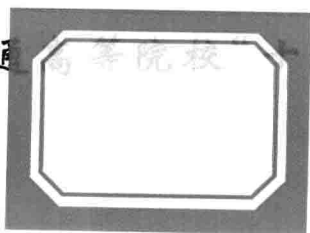
國防工業出版社

National Defense Industry Press

普通

高等院校

“二五”规划教材



通信系统原理

主 编 王 虹

副主编 卢珞先 朱健春

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以通信系统为主线,以数字通信为重点,全面讲解了通信系统中的信号分析、调制解调、性能分析等基本原理和基本技术,此外还包括了现代调制技术的内容。从全书到各章节内容安排,都力争以系统的方式呈现,以使读者建立清晰的学习思路。

全书分8章,第1章是绪论,第2章是数学基础,为后面章节的学习提供保障,第3~6章是基本调制技术,第7章是现代调制技术,第8章是纠错编码技术。本书的特点是系统突出,简化了不必要的公式推导,强调公式的物理意义和应用,通俗易懂,可读性强。每一章均给出思考题和习题。

本书可供高等学校通信类、电子工程类、信息类专业的师生使用,也可作为相关科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

通信系统原理/王虹主编. —北京:国防工业出版社,2014. 8
ISBN 978-7-118-09363-6

I. ①通... II. ①王... III. ①通信系统 IV. ①TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 127324 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 19 字数 436 千字

2014 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

自从有了人类活动,就产生了通信。随着电信号和电磁波的发现,人类通信领域也因此产生了根本性的变革。现代通信技术的发展日新月异,而且正在迅速地向各个领域渗透,可以说各个行业乃至人们的生活都离不开通信技术的应用。因此学习和掌握通信的基本原理和技术,是电子、通信和信息类学生必不可少的重要内容。

本书是根据课程的教学需要,并结合作者多年的教学实践经验而编写。本书的主要特点有:(1)增强了系统性,以帮助读者建立通信系统的概念。如将同步的内容分散到多个章节中,使同步系统和通信系统的结合更加紧密;信道的内容归入了第1章等。(2)结合通信技术的发展,增加了新的内容,以扩大读者的知识面。如在第4章增加了移动通信中的频域均衡等;(3)加大了仿真示例,书中的大多数结果都是利用 Matlab 产生。

全书共分为8章。第1章绪论,包括的内容有通信发展史、通信系统组成、各部分作用、性能指标、无线频谱管理及通信频带划分。第2章是通信原理分析的数学基础,主要是随机信号分析。考虑到读者学习的方便,将确知信号分析的重要结论也纳入,尽管属于进修课程的内容。第3章是模拟通信系统调制、解调以及性能,尽管目前数字通信是主流技术,但模拟通信系统依然有实际应用,并且模拟通信系统的理论分析方法,也是数字系统分析的基础。第4~6章主要介绍基本数字调制技术,其中第4章是数字基带系统,第5章主要是关于模拟信号数字化的问题,第6章是数字频带系统,主要针对 PCM 电话即固定电话的信号处理。第7章是对现代调制技术的介绍,几种调制技术都是在提高通信的有效性或可靠性方面进行了改进。第8章是纠错编码技术,其目的是提高通信的可靠性。为方便读者学习,书的末尾还给出附录,包含了多种常用信号的时域公式、误差函数表和常用术语中英文对照等。

本书第1章和第5章由王虹编写;第6章由卢珞先编写;第4章和第8章由朱健春编写;第7章由艾青松编写;第2章由梁小宇编写。全书由王虹统稿。

限于作者水平,书中难免存在不足或差错,恳请读者提出宝贵意见并给予指正。

编者

2013.12 于武汉

目 录

第1章 通信系统概述	1
1.1 通信的历史回顾.....	1
1.2 通信系统的组成.....	3
1.3 信道	5
1.3.1 信道的分类	5
1.3.2 常用信道	6
1.3.3 恒参信道对信号传输的影响	9
1.3.4 随参信道对信号传输的影响.....	10
1.4 噪声	12
1.4.1 噪声来源.....	12
1.4.2 噪声分类.....	12
1.4.3 高斯白噪声.....	13
1.5 无线频谱管理及通信频带划分	13
1.6 通信系统的性能指标	15
1.6.1 模拟通信系统性能.....	15
1.6.2 数字通信系统性能.....	16
1.7 小结	17
思考题.....	18
习题.....	19
第2章 通信信号分析.....	20
2.1 确知信号分析方法	20
2.1.1 信号的频谱和频谱密度.....	20
2.1.2 信号的功率谱密度和能量谱密度.....	25
2.1.3 希尔伯特变换(Hilbert Transform)	27
2.2 随机信号分析方法	27
2.2.1 随机过程.....	28
2.2.2 平稳随机过程.....	30
2.2.3 高斯随机过程.....	33
2.2.4 窄带高斯噪声.....	35
2.2.5 正弦波加窄带高斯噪声.....	37
2.3 随机过程通过线性系统	39

2.3.1	信号通过线性系统的不失真条件	39
2.3.2	随机过程通过线性系统的特性	40
2.4	小结	43
	思考题	44
	习题	45
第3章	模拟调制系统	47
3.1	引言	47
3.2	幅度调制原理	48
3.2.1	AM 调制	48
3.2.2	DSB 调制	50
3.2.3	SSB 调制	52
3.2.4	VSB 调制	55
3.3	线性调制系统的抗噪声性能	57
3.3.1	分析模型	57
3.3.2	性能分析指标	57
3.3.3	抗噪声性能分析	58
3.4	角度调制原理	64
3.4.1	角度调制的基本概念	64
3.4.2	调频信号的产生和解调	69
3.5	调频系统的抗噪声性能	72
3.5.1	分析模型	72
3.5.2	输入信噪比	73
3.5.3	大信噪比时的系统抗噪声性能	73
3.5.4	小信噪比时的门限效应	75
3.6	信道的频分复用	76
3.6.1	信道复用	76
3.6.2	频分复用	77
3.7	各类模拟调制系统性能比较	78
3.8	模拟调制系统载波同步原理	79
3.8.1	载波同步	79
3.8.2	载波同步器性能指标	80
3.9	小结	81
	思考题	82
	习题	83
第4章	数字信号的基带传输	87
4.1	数字基带信号波形与频谱	87
4.1.1	基本的数字基带信号波形	87

4.1.2	基带信号的频谱	89
4.2	基带传输的常用码型	93
4.2.1	二元码	93
4.2.2	三元码	95
4.3	无码间干扰的基带传输	97
4.3.1	无码间干扰基带系统的时域和频域条件	97
4.3.2	理想低通系统的无码间干扰传输	100
4.3.3	滚降低通系统的无码间干扰传输	101
4.4	无码间干扰基带系统的噪声性能	102
4.5	眼图	105
4.6	部分响应系统	106
4.6.1	第 I 类部分响应波形	107
4.6.2	部分响应系统的一般形式	109
4.7	位同步	111
4.7.1	外同步法	111
4.7.2	自同步法	111
4.8	均衡技术	114
4.8.1	线性均衡	114
4.8.2	非线性均衡	119
4.8.3	均衡器的调整	119
4.8.4	频域均衡	121
4.9	小结	122
	思考题	124
	习题	125
第 5 章	模拟信号数字化	128
5.1	概述	128
5.2	脉冲编码调制 PCM	128
5.2.1	PCM 系统模型	128
5.2.2	PCM 术语说明	129
5.2.3	PCM 系统的奈奎斯特带宽	130
5.3	模拟信号的抽样	130
5.3.1	抽样定理	130
5.3.2	实际抽样	134
5.4	抽样信号的量化	136
5.4.1	基本概念	136
5.4.2	均匀量化及其量化性能	136
5.4.3	非均匀量化	138
5.5	量化信号的编码	141

5.5.1	自然二进制码和折叠二进制码	141
5.5.2	电话信号的编译码	142
5.5.3	电话信号的编译码器	143
5.6	PCM 系统的抗噪声性能	145
5.6.1	概述	145
5.6.2	自然二进制码的误码噪声功率	145
5.6.3	折叠二进制码的误码噪声功率	146
5.6.4	PCM 系统的输出信噪比	146
5.7	差分脉冲编码调制 DPCM	147
5.8	增量调制 DM	149
5.9	PCM 信号的时分复用和复接	151
5.9.1	复用和复接的概念	151
5.9.2	PCM 基群帧结构及数字复接系列	151
5.9.3	数字复接技术 PDH 和 SDH	153
5.10	帧同步	155
5.10.1	帧同步码的插入方式	155
5.10.2	帧同步码	156
5.10.3	帧同步码的识别	157
5.11	小结	158
	思考题	161
	习题	161
第 6 章	基本的数字调制技术	164
6.1	二进制数字信号的调制	164
6.1.1	二进制振幅键控(2ASK)	164
6.1.2	二进制频移键控(2FSK)	166
6.1.3	二进制相移键控(2PSK 与 2DPSK)	168
6.2	二进制数字解调技术与抗噪声性能	170
6.2.1	2ASK 信号的解调	170
6.2.2	2FSK 信号的解调	178
6.2.3	2PSK 与 2DPSK 信号的解调	183
6.3	四进制数字信号的调制解调	186
6.3.1	四相相移键控(QPSK)	186
6.3.2	差分四相相移键控(DQPSK)	189
6.4	载波同步	191
6.4.1	直接提取法	192
6.4.2	插入导频法	193
6.5	小结	194
	思考题	195

习题	196
第 7 章 现代调制技术	198
7.1 正交振幅调制(QAM)	198
7.1.1 QAM 调制原理	198
7.1.2 QAM 解调原理	201
7.1.3 QAM 系统性能	201
7.2 最小频移键控与高斯最小频移键控	203
7.2.1 最小频移键控 MSK	203
7.2.2 MSK 信号的正交调制与解调	204
7.2.3 MSK 的性能	206
7.2.4 高斯最小频移键控(GMSK)	207
7.3 正交频分复用(OFDM)	209
7.3.1 OFDM 基本原理	210
7.3.2 OFDM 信号调制与解调	212
7.4 伪随机序列	214
7.4.1 概述	214
7.4.2 m 序列	215
7.4.3 Gold 序列	220
7.5 扩频通信	221
7.5.1 概述	221
7.5.2 扩频通信特点	223
7.5.3 直接序列扩频(DS 扩频)	224
7.5.4 跳频扩频(FH 扩频)	225
7.6 小结	227
思考题	228
习题	228
第 8 章 纠错编码技术	230
8.1 纠错编码的基本概念	230
8.1.1 错码的分类	230
8.1.2 差错控制方法	230
8.1.3 错码控制编码基本原理	231
8.1.4 码距与纠错性能	232
8.1.5 纠错编码的效用	234
8.2 几种简单的纠错编码	234
8.3 线性分组码	236
8.3.1 基本概念	236
8.3.2 监督矩阵	237

8.3.3	生成矩阵	238
8.3.4	汉明码编译码电路	239
8.3.5	线性分组码的变形	240
8.3.6	线性分组码的误码性能	242
8.4	循环码	243
8.4.1	循环码特性	243
8.4.2	码多项式的模运算	244
8.4.3	生成多项式	244
8.5	循环码的编译码方法	246
8.5.1	循环码的编码	246
8.5.2	循环码译码	247
8.6	实用循环码	249
8.6.1	循环冗余校验码(CRC)	249
8.6.2	BCH 码	250
8.6.3	里德-索洛蒙码(RS 码)	252
8.6.4	法尔码(Fire 码)	252
8.7	卷积码	253
8.7.1	解析表示	254
8.7.2	图解表示	255
8.7.3	卷积码的距离特性	256
8.7.4	卷积码译码	257
8.8	网格编码调制	261
8.8.1	4 状态 8PSK 网格编码调制	262
8.8.2	TCM 码设计原则	263
8.8.3	TCM 编码增益	265
8.9	级联码与 Turbo 码	266
8.9.1	级联码	266
8.9.2	Turbo 码	267
8.10	低密度奇偶校验(LDPC)码	268
8.11	小结	270
	思考题	271
	习题	272
附录 1	常用傅里叶变换对	275
附录 2	贝塞尔函数值表	277
附录 3	数字基带信号功率谱公式推导	278
附录 4	误差函数表	282
附录 5	常用术语中英文对照	286

第 1 章 通信系统概述

1.1 通信的历史回顾

通信是指人们通过某种媒介进行信息传递。早期进行远距离通信的基本方式都是直接依靠人的视觉与听觉,如古代的烽火狼烟、击鼓鸣号、飞鸽传信、驿马邮递等。19 世纪中叶以后,随着电磁波的发现,电信号作为新的信息载体,人类通信领域也因此产生了根本性的变革,开始了通信的新时代。

本书主要讨论电通信的理论与应用的相关内容,以下首先简要回顾电通信的发展历程。

1837 年,毕业于耶鲁大学的美国艺术家兼发明家莫尔斯(S. F. B. Morse),因一次在大西洋邮船上被同船乘客电磁原理的讲演所吸引,于是投身电学领域,研究出用“点”、“划”、“线”表示信号的莫尔斯电码,并成功研制出世界上第一台电磁式电报机。1844 年,莫尔斯在国会大厦用莫尔斯电码发出了人类历史上的第一份电报,实现了有线长途电报通信。

1864 年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)建立了一套电磁理论,提出了麦克斯韦方程,预言了电磁波的存在,说明了电磁波与光具有相同的性质,两者都是以光速传播。

1876 年,美国发明家贝尔(Alexander Graham Bell)发明了世界上第一台电话机,1878 年在相距 300km 的波士顿和纽约之间成功地进行了首次长途电话实验。1925 年成立的以贝尔命名的贝尔实验室,则是晶体管、激光器、发光二极管、数字交换机、通信卫星、电子计算机、蜂窝移动通信设备、电视、有声电影、立体声录音以及通信网等许多重大发明的诞生地,拥有的专利已超过 25000 项。

1887 年,德国物理学家海因里希·赫兹(H. R. Hertz)用电波环进行了一系列实验,发现了电磁波的存在,用实验证明了麦克斯韦的电磁理论。频率的国际单位以赫兹的名字命名,以纪念他对电磁学的贡献。他的实验成为近代科学技术史上的一个重要里程碑,也促进了无线电的诞生和电子技术的发展。

1901 年,意大利电气工程师和发明家马可尼(G. M. Marconi)首次实现了在英国与纽芬兰之间(3540km)横跨大西洋的无线电通讯。事实上马可尼在大学期间,就已经利用电磁波进行了约 2km 的无线电通信实验,图 1-1 为早期的通信科学家。

1918 年,美国无线电工程师阿姆斯特朗(E. H. Armstrong)发明了超外差式接收机,并于 1933 年发明频率调制技术。

1928 年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)提出了奈奎斯特准则和奈奎斯特抽样定理。同年法恩斯沃斯(P. T. Farnsworth)推出第一台电子式电视机。

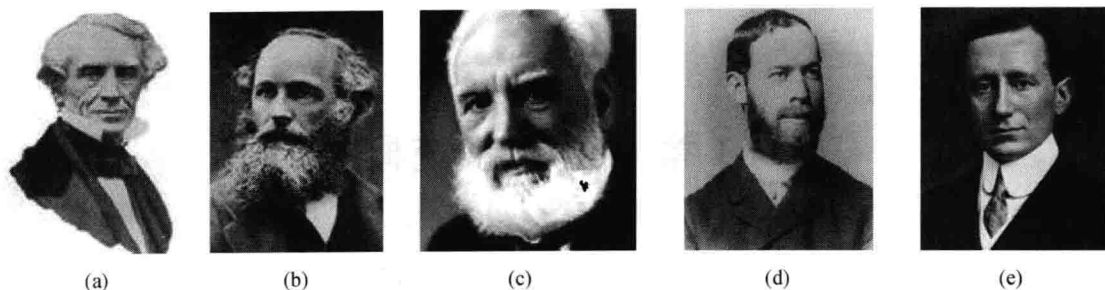


图 1-1 早期的通信科学家

(a) 莫尔斯; (b) 麦克斯韦; (c) 贝尔; (d) 赫兹; (e) 马可尼。

1937 年,里弗斯(A. Reeves)发明脉冲编码调制 PCM(Pulse Code Modulation),PCM 在 20 世纪 70 年代末期以后广泛应用于市话中继传输、数字程控交换、用户电话机以及应用于其他音频编码,如 CD、DVD 等。

1943 年,诺斯(D. O. North)提出数字信号最佳接收的匹配滤波器原理。

1946 年,第一台电子数字计算机面世,它由美国宾夕法尼亚大学莫尔电工学院制造,同期冯·诺伊曼(Von. Neumann)研制了被认为是现代计算机原型的通用电子计算机。

1948 年,贝尔实验室发明了晶体管,1960 年晶体管用于数字交换和数字通信。

1958 年,美国宇航局发射世界上第一颗有源广播试验通信卫星“斯科尔”(SCORE),进行了磁带录音信号的传输。1960 年美国发射的“回声”(ECHO)无源反射卫星,进行了调频电话和电视的转播。1964 年美国发射的“辛康 3 号”(SYNCOM - III)同步轨道试验卫星,成功转播了东京奥运会。中国的试验通信卫星(STW satellite)于 1984 年 4 月 8 日发射升空。

1958 年,仙童公司的罗伯特·诺伊斯(Robert Noyce,英特尔创始人之一)与德州仪器公司的基尔比(Jack Kilby)间隔数月分别发明了集成电路(IC: Integrated Circuit),开创了微电子学的历史。

1960 年,贝尔实验室制造出第一台激光器。

1970 年代,大规模集成电路(LSI: Large Scale Integration)、数字程控交换系统、光纤通信系统先后推出。

比较有代表性的大规模集成电路:1971 年 Intel 推出 1kB 动态随机存储器(DRAM),同年推出全球第一个采用 MOS 工艺的微处理器 4004;1974 年 RCA 公司推出第一个 CMOS 微处理器 1802;1976 年 16kB DRAM 和 4kB SRAM 问世;1978 年 64kB 动态随机存储器诞生,不足 0.5cm^2 的硅片上集成了 14 万个晶体管;1979 年 Intel 又推出 5MHz 8088 微处理器;之后,IBM 基于 8088 推出全球第一台 PC。

1970 年法国成功开通了世界上第一个数字程控交换系统,它标志着交换技术从传统的模拟交换进入数字交换时代。

1970 年,美国康宁(Corning)公司研制成功石英光纤,1976 年,美国在亚特兰大进行了世界上第一个实用光纤通信系统的现场试验。

1980 年代,出现了超大规模集成电路(VLSI: Very Large Scale Integration)、互联网(Internet),同时卫星通信系统和光纤通信系统得到广泛应用。

1988 年,16M DRAM 问世,1cm² 大小的硅片上集成有 3500 万个晶体管,标志着进入超大规模集成电路(VLSI)阶段。

1983 年,美国研制成功了用于异构网络的 TCP/IP 协议,从而诞生了真正的 Internet。1986 年,美国国家科学基金会(NSF:National Science Foundation)利用 TCP/IP 协议,在 5 个科研教育服务超级电脑中心的基础上建立了 NSFnet 广域网。如今,NSFnet 已成为 Internet 的重要骨干网之一。

80 年代开始,西方很多公司开始意识到未来个人通信全球化的巨大需求,即 5W: Whoever(任何人)、Wherever(任何地点)、Whenever(任何时间)、Whomever(任何对象)、Whatever(采用任何方式),相继发展了卫星移动通信系统。

1980 年,美国标准化 FT-3 光纤通信系统投入商业应用;1983 年,日本敷设了纵贯日本南北的光缆长途干线;1988 年,第一条横跨大西洋 TAT-8 海底光缆通信系统建成;1989 年,第一条横跨太平洋 TPC-3/HAW-4 海底光缆通信系统建成。

1991 年,GSM(Global System of Mobile Communication)移动通信系统投入商业运行;1995 年,第一个 CDMA(Code Division Multiple Access)商用系统(被称为 IS-95A)在美国运行;90 年代以后,Internet 的使用不再限于研究与学术领域,已可以用于商业用途,世界各地无数的企业及个人纷纷涌入 Internet,带来 Internet 发展史上一个新的飞跃。1994 年 4 月,中国率先与美国 NSFnet 直接互联,标志着我国最早的国际互联网络的诞生。

21 世纪的通信发展趋势,将具有宽带化、智能化、个人化和综合化的特征,能向用户提供多种形式、大容量、高速率的通信业务,能满足用户任何时间、任何地点向其他任何人通过声音、数据、图像、视频等方式相互交换信息的要求。这样的网络不可能是单一网络,而是涉及固定和移动、有线和无线等各类通信网的网络。

1.2 通信系统的组成

各类通信系统传送的消息内容不相同,例如电话系统主要传输语音,广播系统传输语音和音乐,电视系统传输语音、音乐和图像。消息的表现形式也各不相同,要想定量对通信系统进行分析,需要将具体系统抽象化,建立通信系统的数学模型从而反映通信的本质。

信息论创始人香农(C. E. Shannon)从研究通信系统传输信息的实质出发,提出通信的“形式化假说”,即通信的任务只是在接收端把发送端发出的消息从形式上复制出来,而不须对复制出来的语义做任何处理和判断。因此香农把通信系统概括成信源、信道、信宿以及收发设备和噪声几个部分。“形式化假说”使得利用数学工具定量分析通信系统成为可能。同时,他还提出“非决定论”,即一切有通信意义的消息都是随机的,消息传递过程中遇到的噪声干扰也是随机的,因此必须应用概率论、随机过程等数学工具寻找消息和噪声的统计规律。“非决定论”观点是对通信活动的总的认识观,从原则上解决了用什么样的数学工具分析通信系统。

最基本的通信系统模型是单路、单向、点对点形式,包括信源、发送设备、信道、接收设备、信宿以及噪声源,如图 1-2 所示。当然,通信系统的工作方式不限于此,主要包括(1)单工(Simplex),单向通信,如广播;(2)准双工(Half-duplex),如步话机;(3)全双工

(Duplex),双向通信,如固定电话和移动电话。广播通信是点到多点的形式,电话通信是一个多点到多点的通信网。

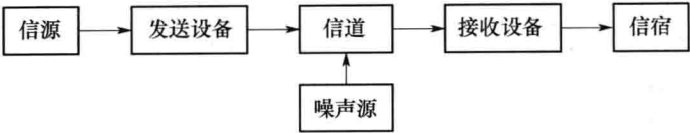


图 1-2 通信系统模型

根据通信系统传输的消息类型不同:连续(模拟)消息或离散(数字)消息,通信系统可分为模拟通信系统或数字通信系统。

对于模拟通信系统,发送设备主要包含调制器,接收设备主要包括解调器,对于远距离通信,还包括天线系统等。实际上要使模拟通信系统正常工作,载波同步系统也是必要和重要的部分,因为对于相干(或称相关)解调,接收端需要一个和调制载波同频同相的本地载波。

而对于数字通信系统,发送设备和接收设备中包含信源编解码、信道编解码以及保密编解码,此外为保证系统正常工作,载波同步、码元同步和帧同步也是必不可少的。码元同步用于对接收信号抽样时的准确定时,以正确判决并恢复发送的数字信息。帧同步则用于将特定的信息组正确分离。数字通信系统模型如图 1-3 所示。

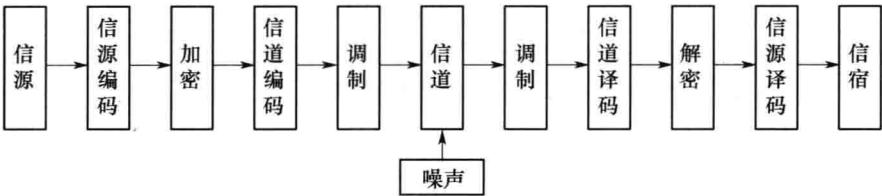


图 1-3 数字通信系统模型

数字通信是当今通信发展的必然趋势。数字通信系统的主要特点如下:

- (1) 抗干扰能力强,噪声不积累。这是因为数字信号的符号个数有限,对于二进制通信只有“0”和“1”两个符号,对于多进制通信符号个数通常是 2 的幂,如 16、64 等。接收端的目标是正确恢复数字信号,而不是关注接收波形是否失真。当干扰未影响到接收符号的恢复,则在长距离传输中反复转发时,不会积累噪声;
- (2) 可采用信道纠错编码技术,提高通信可靠性,当然实现纠错编码需要付出一定的比特开销,即增加了传输的比特数;
- (3) 对于不同形式的通信对象,如语音、图像等,可以形成统一的传输序列(数字序列),便于处理、变换和存储;
- (4) 易于大规模集成;
- (5) 易于加密处理,保密性好;
- (6) 相比模拟通信系统,占用更多的带宽。但随着光纤传输系统的大量应用,带宽已不再是问题;
- (7) 需要更复杂的同步系统,数字通信系统多路复用时,除了需要载波同步外,还需

要码元同步以及帧同步,因此其同步系统远比模拟通信系统复杂。

在图 1-3 中,对于数字信源,信源编码的目的是减少信源的冗余度,减少信息表达的比特数,提高信息传输的有效性。对于模拟信源,信源编码还应包括模拟信号变换为数字信号的功能。对于一般的信源编码,本书不涉及,有兴趣的读者可以查阅信息理论书籍。模拟信号的数字化在第 5 章介绍。

信道编码的目的是提高信息传输的可靠性,发现或者纠正通信过程中产生的误码。信道编码通常需要在信息组中附加特定的码元,称为监督码,利用信息码和监督码的某种代数结构,检测或纠正错误。具体内容在第 8 章介绍。

加密可以防止非授权用户窃取信息,在模型中加密的位置可以和信道编码交换。由于密码学已发展成为专门的学科,有完整的理论体系,加解密也不是本课程的重点,因此本书不涉及相关内容。

不论是模拟还是数字通信系统,调制解调通常是必不可少的部分。信息只有通过调制,才能实现远距离传输,以及实现多路复用。需要注意的是,对于数字通信系统,调制不仅指载波调制,还可以是 PCM 调制(具体见第 5 章)。数字基带系统和数字频带系统的术语一般指无载波调制或有载波调制。数字基带系统的内容见第 4 章,数字频带系统的内容见第 6、7 章。

数字通信系统的同步包含载波同步、码元同步和帧同步,为了便于读者理解其重要性和应用,本书将这些内容分别安排在第 3~6 章的末尾。

1.3 信道

1.3.1 信道的分类

信道是用于在发送端和接收端之间传输信号的通道。

按照信号的传输媒质,信道可分为:有线信道和无线信道。按照信道的特性,可分为:恒参信道和随参信道。按照信道的模型,又可分为调制信道和编码信道。

固定电话网、有线电视网和光纤网均为有线信道,移动电话、卫星通信和无线电广播等均为无线信道。

若信道仅指传输媒质,称为狭义信道。有时候为了分析方便,将传输媒质和其他通信设备一起看成信道,称为广义信道。对应于模拟和数字通信系统,广义信道又分别称为调制信道和编码信道。调制信道和编码信道以及媒质的关系如图 1-4 所示。

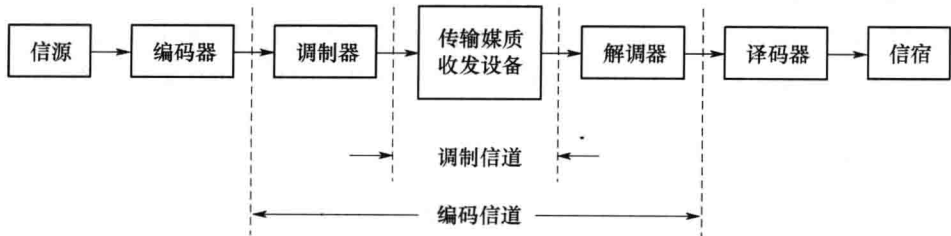


图 1-4 调制信道和编码信道

对于模拟通信系统,我们关注的是发送端调制器输出至接收端解调器输入之间,信道对信号的影响,这时将发送设备和接收设备(不含调制解调器)和媒质一起看成信道。

用 $e_i(t)$ 表示信道输入, $e_o(t)$ 表示信道输出, $n(t)$ 表示信道噪声, $k(t)$ 表示信道特性,信道的输出由信道输入、信道特性、信道噪声共同决定。信道噪声是叠加在信号上的,称为加性噪声,而信道特性对信号的影响通常在有输入信号时才存在,因此可以将信道对信号的影响简化表示为相乘的关系,称为乘性噪声。信道输入输出之间的关系可用式(1.3-1)表示。

$$e_o(t) = k(t)e_i(t) + n(t) \quad (1.3-1)$$

对于数字通信系统,我们关注的是数字信号传输前后之间的关系,即编码器输出至接收端译码器输入之间,这时将调制解调器也看成信道的一部分。数字信号符号个数有限,例如二进制信号,符号为“0”或“1”,这时信道对信号的影响用传输概率体现,可表示为矩阵形式。

$$[P]_{n \times n} = \begin{bmatrix} P(0/0) & P(1/0) \\ P(0/1) & P(1/1) \end{bmatrix} \quad (1.3-2)$$

此处 $X=[0,1]$, $Y=[0,1]$ 分别表示信道输入和输出信源。 $P(0/0)$ 和 $P(1/1)$ 是正确传输概率, $P(0/1)$ 和 $P(1/0)$ 是错误传输概率。信道的转移关系也可以用线图形式表示,如图1-5所示。

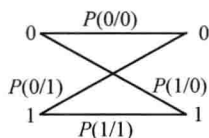


图1-5 二进制编码信道线图

信道特性 $k(t)$ 的性质决定了信道是恒参还是随参。恒参信道指信道的特性可以用恒定(或近似恒定)的传输函数表示,即 $k(t)$ 是确定函数;随参信道则是信道的特性只能用随机过程表示,也就是说其特性随时间会发生改变,即 $k(t)$ 是随机过程。

1.3.2 常用信道

对于常用的通信方式:固定电话、电视、广播、微波通信、卫星通信、移动通信,常用信道有对称电缆、同轴电缆、光纤、无线广播信道、微波中继、卫星中继、无线移动信道等。其中,有线信道、无线信道中的微波中继和卫星中继是恒参的,其他无线信道是随参的。

1. 对称电缆

对称电缆是由两根相互绝缘的导线绞合而成,因此又称为双绞线,两条导线绞合可以减轻电磁干扰。双绞线损耗较大,但性能较稳定,主要用于近距离传输话音信号和数字信号,即固定电话网中用户接入和局域网。图1-6是双绞线示意图和实物图。

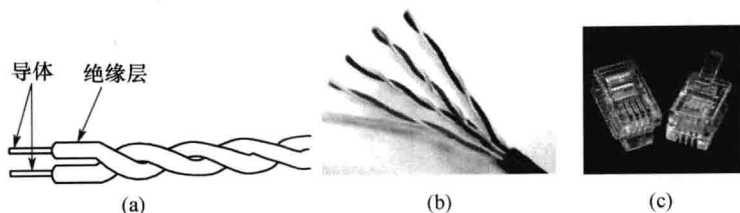


图 1-6 双绞线

(a) 示意图;(b) 双绞线;(c) 电话线接头。

2. 同轴电缆

同轴电缆是指有两个同心导体的电缆,内导体以硬铜线为导线,外包一层绝缘材料,外导体是密织的网状导体,网外再覆盖一层保护性材料。网状导体起到屏蔽作用,使内导体传输的信号不受外界电磁干扰。与双绞线相比,同轴电缆带宽更宽,抗干扰能力更强,但是其体积大,价格比双绞线高,且直接传输距离近。同轴电缆主要用于有线电视网络和视频监控。图 1-7 是同轴电缆示意图和实物图。

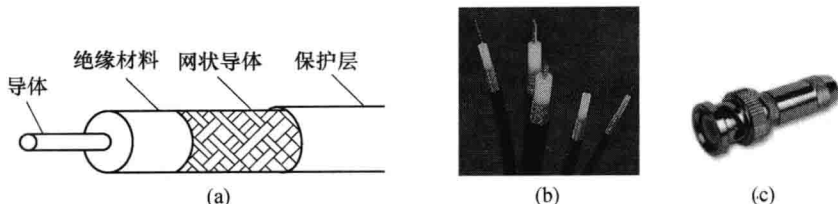


图 1-7 同轴电缆

(a) 同轴电缆结构示意图;(b) 同轴电缆;(c) 同轴电缆接头。

3. 光纤

光纤是光导纤维的简称,用于传输光信号。光纤在使用前必须由保护结构包覆,包覆后的缆线被称为光缆。光缆由内芯、包层和包覆层组成。内芯和包层都是高纯度的石英玻璃介质,它们的折射率不同,内芯的折射率大于包层,于是光波会在边界处不断产生反射,从而约束光信号在内芯传输。

光纤通信是利用光导纤维传输光信号来实现通信的,与其他通信方式相比有许多显著的特点:(1)衰耗极低,而且在相当宽频带内各频率的衰耗几乎相同,中继距离长,特别适合长途干线通信;(2)具有极大传输带宽,传输容量极大,一对金属电话线至多只能同时传送一千多路电话,而根据理论计算,一对细如蛛丝的光导纤维可以同时通一百亿路电话。(3)在有电磁干扰的环境下也能实现正常通信;(4)光纤接头不产生放电,可用于矿井、石油化工等易燃易爆环境;(5)熔点高,可在建筑物不慎起火时,保证缆内光纤通信畅通;(6)生产光纤的主要原料硅,来自于取之不尽、用之不竭的石英砂,不含有色金属,节省金属资源。且尺寸小、重量轻、不会锈蚀、化学稳定性相当好。

光线在光纤中有两种传播模式:单模和多模。将光纤的线芯和包层交界面上产生全反射的光线称为光的一个传输模式,当光纤的芯直径较大,光波以多个特定角射入光纤截面并传播,此时光纤中就有多个模式,传输多个模式的光纤称为多模光纤。当光纤芯直径很小时,只允许一种最基本的模式传播,模式单纯,称为单模光纤。单模光纤频带更宽,传