

中国科学院电子信息与通信系列规划教材

通信原理

张 辉 曹丽娜 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统、深入地介绍了现代通信系统的基本概念、基本原理和基本分析方法。本书的编写遵循通信的理论体系,突出基础性和实用性,反映通信的最新技术和发展动态。全书共分12章,内容包括通信系统的基本概念、随机过程、信道和信道容量、模拟调制技术、数字基带传输、数字调制技术、信源编码、均衡技术、部分响应技术、同步技术、扩频技术、复用和数字复接技术、最佳接收系统、差错控制编码和典型通信系统介绍。每章列举了一定数量的例题,并附有大量的思考题和习题。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息、计算机通信等专业本科生和低年级研究生的教材,也可作为通信工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理 / 张辉,曹丽娜编著. —北京:科学出版社,2007
(中国科学院电子信息与通信系列规划教材)

ISBN 978-7-03-019686-6

I. 通… II. ①张…②曹… 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(2007)第 128166 号

责任编辑:匡敏 余江 潘继敏 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈敬

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年9月第一次印刷 印张:30 1/2

印数:1—3 000 字数:591 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换())

《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》

编委会

顾 问：保 铮 中国科学院院士 西安电子科技大学
刘永坦 两院院士 哈尔滨工业大学
陈俊亮 两院院士 北京邮电大学

主 任：谈振辉 教授 北京交通大学

副主任：任晓敏 教授 北京邮电大学

梁昌洪 教授 西安电子科技大学

冯正和 教授 清华大学

张文军 教授 上海交通大学

林 鹏 编审 科学出版社

委 员：(按姓氏汉语拼音排序)

段哲民 教授 西北工业大学

顾学迈 教授 哈尔滨工业大学

洪 伟 教授 东南大学

焦李成 教授 西安电子科技大学

李少谦 教授 电子科技大学

毛军发 教授 上海交通大学

沈连丰 教授 东南大学

唐朝京 教授 国防科技大学

王成华 教授 南京航空航天大学

王文博 教授 北京邮电大学

徐安士 教授 北京大学

严国萍 教授 华中科技大学

杨建宇 教授 电子科技大学

姚 彦 教授 清华大学

张宏科 教授 北京交通大学

张晓林 教授 北京航空航天大学

秘 书：段博原 编辑 科学出版社

从 书 序

信息技术的高速发展及其广泛应用,使信息技术成为当今国际竞争中最重要
的战略技术。信息技术对经济建设、社会变革乃至国家安全起着关键性的作用,它
是经济发展的“倍增器”和社会进步的“催化剂”,是体现综合国力的重要标志。在
人类历史上,没有一种技术像信息技术这样引起社会如此广泛、深刻的变革。在
20 世纪末和 21 世纪前半叶,信息技术乃是社会发展最重要的技术驱动力,可以
说,21 世纪人类已经步入了信息时代。信息产业在世界范围内正在由先导产业逐
步变为主导产业。从微观上看,表现为单位产品的价格构成中,能源和材料的消耗
减少而信息技术和信息服务的比重上升;从宏观上看,表现为国民生产总值
(GDP)中信息产业所占的比重增加。一个国家信息产业的发展水平将是衡量该
国社会经济总体发展和现代化程度的重要标志之一。

目前,信息科学已成为世界各国最优先发展的科学之一。党的十六大提出了
“加速发展信息产业,大力推进信息化,以信息化带动工业化”的发展战略,以及“优
先发展信息产业,在经济和社会领域广泛应用信息技术”的基本国策,使我国信息
产业得到了前所未有的重视,信息产业呈现出飞速发展的势头。信息产业的发展
离不开信息化人才,信息化人才建设将是信息产业可持续发展的关键。然而,有关
调查表明,我国国家信息化指数为 38.46,而信息化人才资源指数仅为 13.43。据
权威机构预测,从 2005 年到 2009 年,中国信息行业将以 18.5% 的年复合增长率
高速增长,中国信息市场将迎来又一个“黄金年代”。

为了适应新世纪信息学科尤其是电子信息与通信学科的长足发展,在规模上、
素质上更好地满足我国信息产业和信息科学技术的发展需要,更好地实现电子信
息与通信学科专业人才的培养目标,推进国内信息产业的发展,中国科学院教材建
设专家委员会和科学出版社组织电子信息与通信领域的院士、专家、教学指导委
员会成员、国家级教学名师及电子信息与通信学科院校的相关领导等组成编委会,共
同组织编写这套《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》。

本套教材主要面向全国范围内综合性院校电子信息工程、通信工程、信息工程
等相关专业的本科生。本套教材的编委会成员具有国内电子信息与通信方面的较
高学术水平,他们负责对本套教材的编写大纲及内容进行审定,可使本套教材的质
量得以保证。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。依据最新专业规范,系列教材主要根据教育部最新公
布的电子信息与通信学科相关专业的“学科专业规范”和“基础课程教学基本要求”

进行教材内容的安排与设置。同时,根据各类型高校学生的实际需要,编写不同层次的教材。

2. 结构体系完备。本套教材覆盖本科、研究生教学层次,各门课程的知识点之间相互衔接,以便完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。

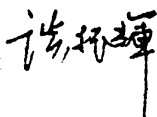
3. 作者水平较高。我们将邀请设有电子、通信国家重点学科的院校,以及国家级、省级教学名师或国家级、省级精品课程负责人编写教材。

4. 借鉴国外优秀教材。编委会为每门课程推荐一本国外相关的经典原版教材,作为教师编写的参考书。

5. 理论与实际相结合,加强实践教学。教材编写注重案例和实践环节,着力于学生实际动手能力的培养。

6. 教材形式多样。本套教材除主教材外,还配套有辅导书、教师参考书、多媒体课件、习题库及网络课程等。

根据电子信息与通信学科专业发展的战略要求,我们将对本套系列教材不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子信息与通信领域教育及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。

北京交通大学校长 

2005年10月

前 言

通信乃是传输和交换信息。

近年来,随着通信技术与计算机技术及微电子技术的相互促进和迅猛发展,通信产业已成为我国乃至全世界的主导产业。越来越多的人才投入到这一发展前景广阔的行业,并渴望学习和掌握系统的通信理论和实用有效的工程应用能力。

《通信原理》就是为了满足读者需求而编著的一本教材。它全面系统地介绍了电子通信技术领域的基本知识、基本概念和基本技术,并及时反映了通信技术的最新发展。

全书共 12 章,第 1~3 章是基础部分,第 4 章是模拟通信,第 6 章是模拟信号数字传输,第 5、7~12 章是数字通信。

第 1 章为绪论,介绍通信系统的概念、组成和主要性能指标,概述了通信现状和未来发展趋势。

第 2 章为通信理论基础,主要介绍随机信号分析所必需的一些基础理论,包括随机信号的统计描述和分析,高斯过程、窄带高斯过程、正弦波加窄带高斯过程的统计特性,平稳随机过程通过线性系统。

第 3 章为通信信道,概述了调制信道和编码信道,分析了恒参信道、随参信道特性及对信号传输的影响,介绍了几种分集技术,最后介绍了香农信道容量概念。

第 4 章为模拟通信系统,介绍了线性调制和非线性调制原理,给出一般模型,分析了线性调制系统和非线性调制系统抗噪声性能,最后对常用的线性调制系统和非线性调制系统性能进行了综合比较。

第 5 章为数字基带传输系统,概述了数字基带信号、数字基带传输系统、无码间干扰传输条件,分析了数字基带传输系统抗噪声性能,介绍了眼图、时域均衡和部分响应技术。

第 6 章为模拟信号数字传输技术,阐述了低通型信号、带通型信号抽样定理和均匀量化、非均匀量化基本原理。以基本的脉冲振幅调制(PAM)、脉冲编码调制(PCM)和简单增量调制(ΔM)为重点讨论了工作原理,分析了系统抗噪声性能。最后介绍了自适应差分脉冲编码调制(ADPCM)和自适应增量调制(ADM)技术。

第 7 章为数字频带传输系统,概述了数字调制解调的基本原理。以二进制调制系统为主,论述了二进制数字调制解调原理和方法,分析了系统抗噪声性能。介绍了多进制数字调制解调和最小移频键控(MSK)原理。

第 8 章为数字最佳接收理论,讨论了数字信号接收的统计模型和最佳接收准则。重点论述匹配滤波器最佳接收和相关器最佳接收原理,阐述了确知信号和随

相信号最佳接收机结构及性能。最后介绍了最佳基带传输系统原理。

第9章为多路复用和数字复接技术,讨论了频分复用、时分复用原理,介绍了正码速调整数字复接原理和同步数字系列(SDH)帧结构及复用原理。

第10章为差错控制编码,介绍了差错控制编码的基本原理和常用差错控制方法,论述了线性分组码、循环码和卷积码的编码和译码方法,重点讨论了卷积码的Viterbi译码。

第11章为同步原理,讨论了载波同步、位同步、群同步和网同步的原理及技术。

第12章简单介绍了GSM数字蜂窝移动通信系统、码分多址(CDMA)蜂窝移动通信系统、第三代移动通信系统、INTELSAT卫星通信系统、INMARSAT卫星通信网、VSAT卫星通信网等现代广泛使用的通信系统。

本书理论体系完整,结构严谨,概念清晰,文字通俗易懂,便于自学。本书可作为高等院校通信工程、电子信息、计算机通信等专业本科生和低年级研究生的教材,也可以作为通信工程技术人员的参考书。

本书由张辉主持编写,并编写其中第3、7~10、12章,曹丽娜编写第1、2、4、5、6、11章,任光亮参与了第3章的部分编写工作。全书由张辉修改定稿。景滨、李乐亭、孙鹏、李鹏、王宇伟等研究生对本书的初稿进行了阅读,对其中的习题进行了校订,并提出参考意见。本书在编写过程中还得到西安电子科技大学通信工程学院的支持和其他同事的帮助,同时也得到科学出版社的大力支持,在此一并表示感谢。

鉴于作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2007年4月

目 录

丛书序

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 通信系统的组成	1
1.1.1 通信系统的一般模型	1
1.1.2 模拟通信和数字通信模型	2
1.2 通信系统分类与通信方式	6
1.2.1 通信系统的分类	6
1.2.2 通信方式	9
1.3 信息及其度量	10
1.4 主要性能指标	13
1.5 通信发展趋势	14
思考题与习题	16
第 2 章 随机过程	18
2.1 随机过程的基本概念	18
2.1.1 何谓随机过程	18
2.1.2 随机过程的分布函数	19
2.1.3 随机过程的数字特征	20
2.2 平稳随机过程	22
2.2.1 定义	22
2.2.2 各态历经性	23
2.2.3 平稳随机过程的自相关函数	23
2.2.4 平稳随机过程的功率谱密度	24
2.3 高斯随机过程	27
2.3.1 定义	27
2.3.2 重要性质	27
2.3.3 高斯随机变量	28
2.3.4 高斯白噪声	30
2.4 随机过程通过线性系统	31
2.5 窄带随机过程	35
2.5.1 $\xi(t)$ 和 $\xi_c(t)$ 的统计特性	36

2.5.2	$a_c(t)$ 和 $\varphi_c(t)$ 的统计特性	39
2.6	正弦波加窄带高斯噪声	40
	思考题与习题	42
第3章	信道与噪声	46
3.1	信道定义与数学模型	46
3.1.1	信道定义	46
3.1.2	信道的数学模型	47
3.2	有线信道	51
3.2.1	双绞线电缆	51
3.2.2	同轴电缆	54
3.2.3	光纤	55
3.3	无线信道	58
3.3.1	微波中继信道	59
3.3.2	卫星中继信道	59
3.3.3	短波电离层反射信道	60
3.3.4	陆地移动信道	61
3.4	信道特性及其对信号传输的影响	65
3.4.1	恒参信道特性	65
3.4.2	随参信道特性	67
3.5	分集接收技术	71
3.5.1	分集方式	71
3.5.2	合并方式	73
3.6	加性噪声	75
3.6.1	噪声的分类	76
3.6.2	起伏噪声及特性	77
3.7	信道容量的概念	79
3.7.1	香农公式	79
3.7.2	香农公式的应用	80
	思考题与习题	81
第4章	模拟调制系统	84
4.1	幅度调制(线性调制)的原理	84
4.1.1	调幅(AM)	85
4.1.2	抑制载波双边带调制(DSB-SC)	86
4.1.3	单边带调制(SSB)	87
4.1.4	残留边带调制	90
4.1.5	线性调制与解调的一般模型	93

4.2	线性调制系统的抗噪声性能	96
4.2.1	分析模型	96
4.2.2	线性调制相干解调的抗噪声性能	98
4.2.3	调幅信号包络检波的抗噪声性能	101
4.3	非线性调制(角度调制)原理	104
4.3.1	角调制的基本概念	104
4.3.2	窄带调频与宽带调频	106
4.3.3	调频信号的产生与解调	110
4.4	调频系统的抗噪声性能	116
4.5	各种模拟调制系统的性能比较	119
	思考题与习题	121
第5章	数字基带传输系统	125
5.1	数字基带传输概述	125
5.2	数字基带信号及其频谱特性	127
5.2.1	数字基带信号	127
5.2.2	基带信号的频谱特性	129
5.3	基带传输的常用码型	137
5.4	基带脉冲传输与码间串扰	141
5.5	无码间串扰的基带传输特性	143
5.6	无码间串扰基带系统的抗噪声性能	148
5.7	眼图	152
5.8	均衡技术	155
5.8.1	时域均衡原理	155
5.8.2	均衡效果的衡量	158
5.8.3	均衡器的实现与调整	161
5.9	部分响应系统	164
5.9.1	第Ⅰ类部分响应波形	164
5.9.2	部分响应的一般形式	168
	思考题与习题	170
第6章	模拟信号的数字传输	176
6.1	抽样定理	177
6.1.1	低通抽样定理	177
6.1.2	带通抽样定理	180
6.2	脉冲幅度调制	183
6.3	脉冲编码调制	187
6.3.1	量化	188

6.3.2	编码和译码	201
6.3.3	PCM 系统的抗噪声性能	211
6.4	自适应差分脉冲编码调制	213
6.4.1	DPCM	213
6.4.2	ADPCM	215
6.5	增量调制	215
6.5.1	简单增量调制	216
6.5.2	增量调制的过载特性与动态编码范围	219
6.5.3	增量调制系统的抗噪声性能	221
6.5.4	PCM 与 ΔM 系统的比较	222
	思考题与习题	224
第 7 章	数字频带传输系统	228
7.1	二进制振幅键控	228
7.1.1	二进制振幅键控信号的调制与解调	228
7.1.2	2ASK 信号的功率谱密度	231
7.1.3	2ASK 系统的抗噪声性能	232
7.2	二进制移频键控	239
7.2.1	2FSK 信号的调制与解调	239
7.2.2	2FSK 信号的功率谱密度	241
7.2.3	2FSK 系统的抗噪声性能	244
7.3	二进制移相键控及二进制差分相位键控	248
7.3.1	2PSK 信号的调制与解调	248
7.3.2	2DPSK 信号的调制与解调	250
7.3.3	2PSK 及 2DPSK 信号的功率谱密度	253
7.3.4	2PSK 和 2DPSK 系统的抗噪声性能	254
7.4	二进制数字调制系统的性能比较	259
7.5	多进制数字相位调制系统	262
7.5.1	多进制数字相位调制信号的产生形式	262
7.5.2	4PSK 信号的产生与解调	264
7.5.3	4DPSK 信号的产生与解调	266
7.5.4	4PSK 及 4DPSK 系统的误码率性能	268
7.6	正交振幅调制	269
7.6.1	MQAM 调制原理	269
7.6.2	MQAM 解调原理	272
7.6.3	MQAM 抗噪声性能	272
7.7	最小移频键控	272

7.7.1	MSK 的基本原理	273
7.7.2	MSK 调制解调原理	276
7.7.3	MSK 的性能	278
	思考题与习题	280
第 8 章	数字信号的最佳接收	285
8.1	匹配滤波器	285
8.2	最小差错概率接收准则	290
8.2.1	数字信号接收的统计模型	290
8.2.2	最佳接收准则	293
8.3	确知信号的最佳接收机	295
8.3.1	二进制确知信号最佳接收机结构	296
8.3.2	二进制确知信号最佳接收机误码性能	298
8.4	随相信号的最佳接收机	302
8.4.1	二进制随相信号最佳接收机结构	303
8.4.2	二进制随相信号最佳接收机误码性能	307
8.5	最佳接收机性能比较	309
8.6	最佳基带传输系统	311
8.6.1	最佳基带传输系统的组成	311
8.6.2	最佳基带传输系统的误码性能	313
	思考题与习题	316
第 9 章	复用和数字复接技术	322
9.1	频分复用	322
9.1.1	频分复用原理	322
9.1.2	模拟电话多路复用系统	323
9.1.3	调频立体声广播	323
9.2	时分复用	326
9.2.1	时分复用原理	326
9.2.2	PCM 基群帧结构	327
9.2.3	PCM 高次群	329
9.3	数字复接技术	331
9.3.1	数字复接原理	331
9.3.2	正码速调整复接器	332
9.4	SDH 复用原理	334
9.4.1	SDH 的特点	334
9.4.2	STM-N 帧结构	335
9.4.3	SDH 复用原理	337

思考题与习题	338
第 10 章 差错控制编码	341
10.1 概述	341
10.2 差错控制编码的基本原理	345
10.2.1 纠错编码的基本原理	345
10.2.2 纠错编码的基本概念	347
10.3 常用的简单编码	349
10.4 线性分组码	353
10.4.1 线性分组码原理	354
10.4.2 监督矩阵与生成矩阵	356
10.4.3 伴随式与错误图样	359
10.4.4 汉明码	360
10.5 循环码	360
10.5.1 循环码的基本原理	360
10.5.2 循环码的生成多项式和生成矩阵	362
10.5.3 循环码的编码和译码方法	364
10.5.4 BCH 码	367
10.5.5 Reed-Solomon 码	370
10.6 卷积码	371
10.6.1 生成矩阵	371
10.6.2 卷积码的结构特点	374
10.6.3 卷积码的 Viterbi 译码	377
思考题与习题	385
第 11 章 同步原理	389
11.1 同步的功用与分类	389
11.2 载波同步	390
11.2.1 插入导频法	390
11.2.2 直接法	393
11.2.3 载波同步系统的性能及相位误差对解调性能的影响	398
11.3 位同步	399
11.3.1 插入导频法	400
11.3.2 直接法	401
11.3.3 位同步系统的性能及其相位误差对性能的影响	409
11.4 群同步	412
11.4.1 起止式同步法	412
11.4.2 连贯式插入法	412

11.4.3	间隔式插入法	415
11.4.4	群同步系统的性能	417
11.4.5	群同步的保护	418
11.5	网同步	419
11.5.1	全网同步系统	420
11.5.2	准同步系统	421
	思考题与习题	423
第 12 章	典型通信系统介绍	426
12.1	GSM 数字蜂窝移动通信系统	426
12.1.1	GSM 系统的主要性能和特点	427
12.1.2	GSM 系统的结构及功能	428
12.1.3	GSM 的信道类型	431
12.1.4	GSM 的帧结构	434
12.1.5	GSM 系统研究新进展	438
12.2	码分多址蜂窝移动通信系统	439
12.2.1	CDMA 系统原理及特点	439
12.2.2	CDMA 系统的关键技术	441
12.2.3	CDMA 系统的无线链路	446
12.2.4	第三代移动通信系统(3G)	451
12.3	卫星通信系统	453
12.3.1	INTELSAT(国际通信卫星组织)卫星通信系统	455
12.3.2	INMARSAT(国际移动卫星组织)卫星通信网	457
12.3.3	VSAT 卫星通信网	461
12.3.4	铱系统	464
	思考题与习题	466
	参考文献	468

第 1 章 绪 论

当您开始阅读本书时,人类已经迈入了飞速发展的信息时代。随着数字通信技术和计算机技术的快速发展以及通信网与计算机网络的相互融合,信息科学技术已成为 21 世纪国际社会和世界经济发展的强大推动力。信息作为一种资源,只有通过广泛地传播与交流,才能产生利用价值、促进社会成员之间的合作、推动社会生产力的发展、创造出巨大的经济效益。而信息的传播与交流,是依靠各种通信方式和技术来实现的。学习和掌握现代通信原理和技术是信息社会每一位成员,尤其是未来的通信工作者的迫切要求。

本书讨论信息的传输、交换及通信网的基本原理,但侧重信息传输原理。为了使读者在学习各章内容之前,对通信和通信系统有一个初步的了解与认识,本章将简要介绍通信系统的组成和分类、通信方式、信息的度量以及评价通信系统性能指标,并对通信的发展趋势进行展望。

1.1 通信系统的组成

通信就是从一地 toward 另一地传递消息。通信的目的是传递消息中所包含的信息。人们可以用语言、文字、音乐、数据、图片或活动图像等不同形式的消息来表达信息。信息是消息的内涵,即消息中所包含的人们原来不知而待知的内容。因此,通信的根本目的在于传输含有信息的消息,否则,就失去了通信的意义。基于这种认识,“通信”也就是“信息传输”或“消息传输”。

实现通信的方式很多,如手势、语言、旌旗、消息树、烽火台、金鼓和驿马传令,以及现代社会的电报、电话、广播、电视、遥控、遥测、因特网、数据和计算机通信等,这些都是消息传递的方式和信息交流的手段。随着社会的进步和科学技术的发展,目前使用最广泛的通信方式是电通信。由于电通信迅速、准确、可靠且不受时间、地点、距离的限制,因而一百多年来得到了迅速发展和广泛应用。如今,在自然科学领域凡是涉及“通信”这一术语时,一般均指“电通信”。广义来讲,光通信也属于电通信,因为光也是一种电磁波。本书中讨论的通信均指电通信。

1.1.1 通信系统的一般模型

通信就是传输信息。通信系统的作用就是将信息从信源传送到一个或多个目的地。实现信息传递所需的一切技术设备(包括信道)的总和称为通信系统。通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

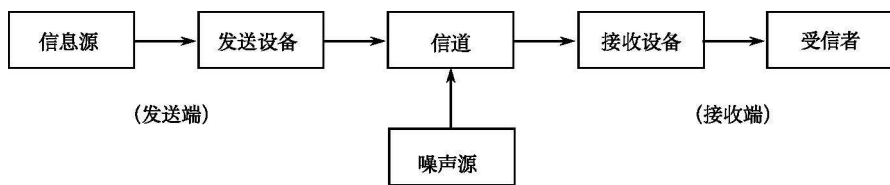


图 1-1 通信系统的一般模型

图中各部分的功能简述如下：

信息源（简称信源）是消息的发源地，其作用是把各种消息转换成原始电信号。根据消息种类的不同，信源可分为模拟信源和数字信源。模拟信源送出的是模拟信号，如麦克风（声音→音频信号）、摄像机（图像→视频信号）；数字信源输出离散的数字信号，如电传机（键盘字符→数字信号）、计算机等各种数字终端。并且，模拟信源送出的信号经数字化处理后也可送出数字信号。

发送设备的功能是将信源和信道匹配起来，即将信源产生的消息信号变换成适合在信道中传输的信号。因此，发送设备涵盖的内容很多，可以是不同的电路和变换器，如放大、滤波、编码、调制等。例如，在需要频谱搬移的场合，调制是最常见的变换方式。

信道是指传输信号的物理媒质。在无线信道中的，信道可以是大气（自由空间），在有线信道中，可以是明线、电缆、光纤。有线和无线信道均有多种物理媒质。信道在给信号提供通路的同时，也会对信号产生各种干扰。信道的固有特性及介入的干扰与噪声将直接关系到通信的质量。

图中的**噪声源**不是人为加入的设备，而是信道中的噪声及分散在通信系统其他各处的噪声的集中表示。噪声通常是随机的，其形式是多种多样的，它的存在干扰了正常信号的传输。关于信道与噪声的内容将在第 3 章中讨论。

接收设备的功能是放大和反变换（如滤波、译码、解调等），其目的是从受到干扰和减损的接收信号中正确恢复出原始电信号。

受信者（信宿）是传送消息的目的地。其功能与信源相反，即将复原的原始电信号还原成相应的消息，如扬声器等。

图 1-1 概括地描述了一个通信系统的组成，它反映了通信系统的共性，因此称之为通信系统的一般模型。根据研究的对象以及所关注的问题不同，图 1-1 模型中的各小方框的内容和作用将有所不同，因而相应有不同形式的更具体的通信模型。今后的讨论就是围绕着通信系统的模型而展开的。

1.1.2 模拟通信和数字通信模型

在图 1-1 中，信源发出的消息有多种形式，可以是语音、文字、符号、音乐、数据、图片或活动图像等。各种不同的消息可分成两大类：一类称为连续消息；另一

类称为离散消息。连续消息是指消息的状态连续变化或不可数的,如语音、活动图片等。离散消息是指消息的状态是可数的或离散的,如符号、数据等。

消息的传递是通过它的物质载体——**电信号**来实现的,即把消息寄托在电信号的某一参量上(如连续波的幅度、频率或相位;脉冲波的幅度、宽度或位置)。按信号参量的取值方式不同可把信号分为两类,即模拟信号和数字信号。

若信号的参量取值连续(不可数、无穷多),则称之为**模拟信号**。如电话机送出的语音信号、电视摄像机输出的图像信号等。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连续变化,或者说在某一取值范围内可以取无穷多个值,而不一定在时间上也连续,如图 1-2(b)中所示的抽样信号。

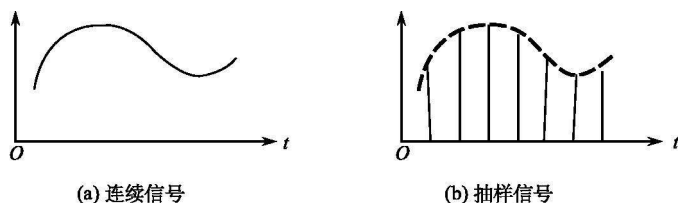


图 1-2 模拟信号波形

若信号的参量只可能取有限个值,则称之为**数字信号**。如电报信号、计算机输入输出信号、PCM 信号等。数字信号有时也称离散信号,这个离散是指信号的某一参量是离散变化的,而不一定在时间上也离散,如图 1-3(b)中所示的 2PSK 信号。

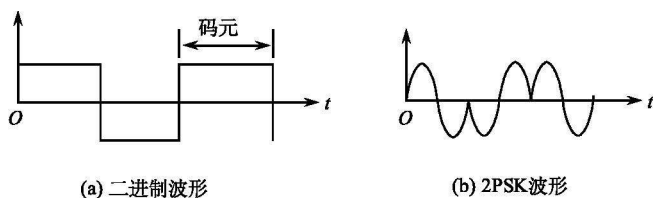


图 1-3 数字信号波形

通常,按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

1. 模拟通信系统模型

模拟通信系统是利用模拟信号来传递信息的通信系统,如图 1-4 所示。通常,我们把信源发出的原始电信号称为**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 $300 \sim 3400\text{Hz}$,图像信号为 $0 \sim 6\text{MHz}$ 。有些信道可以直接传输基带信号,而以自由空间作为信道的无线电传输却无法直接传输这些信号。

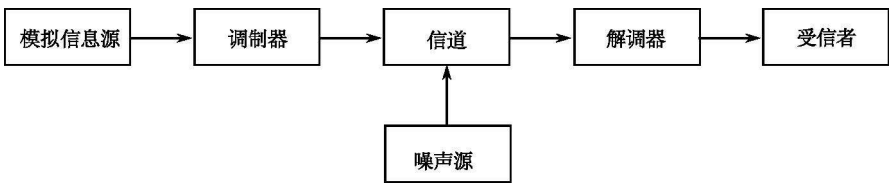


图 1-4 模拟通信系统模型

这就需要把基带信号变换成适合在信道中传输的信号,并在接收端进行反变换。完成这种变换和反变换的通常是调制器和解调器。经过调制以后的信号称为**已调信号**。已调信号有三个基本特征:一是携带有信息,二是适合在信道中传输,三是信号的频谱通常具有带通形式,因而已调信号又称**带通信号**或**频带信号**。

需要指出,消息从发送端到接收端的传递过程中,不仅仅只有信息与基带信号,基带信号与频带信号之间的两种变换,实际通信系统中可能还有滤波、放大、天线辐射等过程。由于以上两种变换对信号的变化起决定性作用,而其他过程对信号不会发生质的变化,只是对信号进行了放大和改善等,在通信系统模型中一般被认为是理想的而不予讨论。因此,本书中关于模拟通信系统的研究重点是:调制与解调原理以及噪声对信号传输的影响(详见第 4 章)。

2. 数字通信系统的模型

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统,如图 1-5 所示。数字通信涉及的技术问题很多,其中主要有信源编码/译码、信道编码/译码、数字调制/解调、数字复接、同步以及加密等。下面对这些技术作简要介绍。

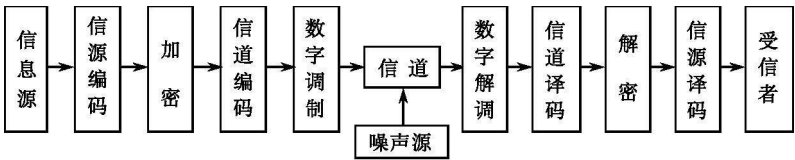


图 1-5 数字通信系统模型

(1) 信源编码与译码。信源编码的作用之一是提高信息传输的有效性,即通过某种数据压缩技术来减少信息的冗余度(减少信息码元数目)和降低数字信号的码元速率。因为码元速率将直接影响传输带宽,而传输带宽反映了通信的有效性。作用之二是完成模/数(A/D)转换,即把来自模拟信源的模拟信号转换成数字信号,以实现模拟信号的数字化传输(详见第 6 章)。信源译码是信源编码的逆过程。

(2) 信道编码与译码。数字信号在信道传输时,由于噪声、衰落以及人为干扰等,将会引起差错。为了减小差错,信道编码器对传输的信息码元按一定的规则加

入保护成分(监督元),组成所谓“抗干扰编码”。接收端的信道译码器按一定规则进行解码,在解码过程中发现错误或纠正错误,从而提高通信系统的抗干扰能力。

(3) 加密与解密。在实现保密通信的场合,为了保证所传信息的安全,需要人为将被传输的数字序列扰乱,即加上密码,这种处理过程叫加密。在接收端利用与发送端相同的密码复制品(密钥)对收到的数字序列进行解密,恢复原来信息。

(4) 数字调制与解调。数字调制就是把数字基带信号的频谱搬移到高频处,形成适合在信道中传输的频带信号。基本的数字调制方式有振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)、相对(差分)相移键控(DPSK)。对这些信号可以采用相干解调或非相干解调还原为数字基带信号。对高斯噪声下的信号检测,一般用相关器接收机或匹配滤波器。数字调制是本教材的重点内容之一,将分别在第7、9章中讨论。

(5) 同步与数字复接。同步是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的不可缺少的前提条件。同步是使收发两端的信号在时间上保持步调一致。按照同步的功用不同,分为载波同步、位同步、群同步和网同步,这些问题将集中在第11章中讨论。

数字复接就是依据时分复用基本原理把若干个低速数字信号合并成一个高速的数字信号,以扩大传输容量和提高传输效率。复用与复接概念将在第10章中介绍。

需要说明的是,图1-5是数字通信系统的一般化模型,实际的数字通信系统不一定包括图1-1中的所有环节,如在某些有线信道中,数字基带信号无需调制,可以直接传送,称之为数字信号的基带传输,其模型中就不包括调制与解调环节,详见第5章。

应该指出的是,模拟信号经过数字编码后可以在数字通信系统中传输,数字电话系统就是以数字方式传输模拟话音信号的例子。当然,数字信号也可以在模拟通信系统中传输,如计算机数据可以通过传统的电话网来传输,但这时必须使用调制解调器(modem),以适应模拟信道的传输特性。

3. 数字通信的主要特点

目前,无论是模拟通信还是数字通信,在不同的通信业务中都得到了广泛的应用。但是,数字通信的发展速度已明显超过模拟通信,成为当代通信技术的主流。与模拟通信相比,数字通信更能适应现代社会对通信技术越来越高的要求,其特点是:

(1) 抗干扰能力强,且噪声不积累。以二进制为例,数字信号的取值只有两个,这样接收端只需判别两种状态。信号在传输过程中受到噪声的干扰,必然会发生波形畸变,接收端对其进行抽样判决,以辨别是两个状态中的哪一个,只要噪声的大小不足以影响判决的正确,就能正确接收。而模拟通信系统中传输的是连续

变化的模拟信号,它要求接收机能够高度保真地重现信号波形,如果模拟信号叠加上噪声后,即使噪声很小,也很难消除它。此外,在远距离传输,如微波中继通信时,各中继站可利用数字通信特有的判决再生接收方式,消除噪声积累。

(2) 传输差错可控。可以采用信道编码技术使误码率降低,提高传输的可靠性。

(3) 便于与各种数字终端接口,用现代计算技术对信号进行处理、加工、变换、存储,形成智能网。

(4) 易于集成化,从而使通信设备微型化、且重量轻。

(5) 易于加密处理,且保密强度高。

但是,数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的系统频带为代价来换取的。以电话为例,一路模拟电话通常只占据 4kHz 带宽,但一路接近同样语音质量的数字电话可能要占据 20~60kHz 的带宽,因此数字通信的频带利用率不高。另外,由于数字通信对同步要求高,因而系统设备比较复杂。不过,随着新的宽带传输信道(如光导纤维)的采用、窄带调制技术和超大规模集成电路的发展,数字通信的这些缺点已经弱化。随着微电子技术和计算机技术的迅猛发展及广泛应用,数字通信在今后的通信方式中必将逐步取代模拟通信而占主导地位。

1.2 通信系统分类与通信方式

1.2.1 通信系统的分类

1. 按通信业务分类

按通信业务的类型不同,通信系统可以分为话务通信和非话务通信。电话业务在电信领域中一直占主导地位,它属于人与人之间的通信。近年来,非话务通信发展迅速,主要有计算机通信、数据通信、数据库检索、电子信箱、电子数据交换、传真存储转发、可视图文及会议电视、图像通信等。由于电话通信最为发达,因而其他一些通信业务常常借助于公共的电话通信网进行,如电报通信和远距离数据通信都可通过电话信道传输。综合业务数字通信网适用于各种类型业务的消息传输。此外,还有遥测、遥控、遥信和遥调等控制通信业务。

2. 按调制方式分类

根据是否采用调制,可将通信系统分为基带传输和频带(调制)传输。基带传输是将未经调制的信号直接传送,如市内电话、有线广播;频带传输是对各种信号调制后传输的总称。调制方式很多,表 1-1 列出了一些常见的调制方式。

表 1-1 常见调制方式及用途

		调制方式	用途举例
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 AM	广播
		双边带调幅 DSB	立体声广播
		单边带调幅 SSB	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅 VSB	电视广播、数传、传真
	非线性调制	频率调制 FM	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制 PM	中间调制方式
	数字调制	振幅键控 ASK	数据传输
		频移键控 FSK	数据传输
		相移键控 PSK、DPSK、QPSK	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 QAM、MSK	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制 PAM	中间调制方式、遥测
		脉宽调制 PDM(PWM)	中间调制方式
		脉位调制 PPM	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	市话、卫星、空间通信
		增量调制 DM(ΔM)	军用、民用数字电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图像编码
		其他语音编码方式 ADPCM	中速数字电话

3. 按信号特征分类

按信道中所传输的是模拟信号还是数字信号,相应地把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。

4. 按传输媒质分类

按传输媒质分,通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。所谓有线通信是用导线(如架空明线、同轴电缆、光导纤维、波导等)作为传输媒质完成通信的,如市内电话、有线电视、海底电缆通信就是有线通信例子。所谓无线通信是依靠电磁波在空间传播达到传递消息的目的,如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

5. 按工作波段分类

按通信设备的工作频率不同,可分为长波通信、中波通信、短波通信、远红外线通信等。表 1-2 列出了通信使用的频段、常用的传输媒质及主要用途。

表 1-2 通信波段与常用传输媒质

频率范围	波长	名称	传输媒质	典型用途
3 Hz~30 kHz	$10^4 \sim 10^8$ m 超长波	甚低频 VLF	有线线对 长波无线电	音频,电话,远距离导航,海底通信/声呐
30~300 kHz	$10^3 \sim 10^4$ m 长波	低频 LF	有线线对 长波无线电	导航,海底通信,无线信标,电力线通信
300~3000 kHz	$10^2 \sim 10^3$ m 中波	中频 MF	同轴电缆 短波无线电	AM 广播,海事通信,定位搜索,海岸防护通信
3~30 MHz	$10 \sim 10^2$ m 短波	高频 HF	同轴电缆 短波无线电	业余无线电,国际广播,飞机与船舶之间通信,军事通信,电话、电报及传真
30~300 MHz	1~10 m 超短波	甚高频 VHF	同轴电缆 米波无线电	VHF 电视,FM 广播,飞行器辅助导航
0.3~3 GHz	10~100 cm 分米波	特高频 UHF	波导 分米波无线电	UHF 电视,微波通信,卫星通信,雷达监视,个人通信系统,蜂窝电话
3~30 GHz	1~10 cm 厘米波	超高频 SHF	波导 厘米波无线电	微波通信,卫星通信,雷达,陆地移动通信
30~300 GHz	1~10 mm	极高频 EHF	波导 毫米波无线电	雷达着陆系统,铁路服务,实验
300 GHz~3 THz	0.1~1 mm	亚毫米波		实验
43~430 THz	$7 \sim 0.7 \mu\text{m}$	红外	光纤 激光空间传播	光通信
430~750 THz	$0.7 \sim 0.4 \mu\text{m}$	可见光		
750~3000 THz	$0.4 \sim 0.1 \mu\text{m}$	紫外		

注:1GHz=1×10⁹ Hz,1THz=1×10¹² Hz,1mm=1×10⁻³ m,1μm=1×10⁻⁶ m。

工作波长和频率的换算公式为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 (\text{m/s})}{f (\text{Hz})} \quad (1.2.1)$$

式中, λ 为工作波长, f 为工作频率, c 为光速。

6. 按信号复用方式分类

传输多路信号有三种常用的复用方式,即频分复用、时分复用、码分复用。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围;时分复用是用脉冲调制的方法使不同信号占据不同的时间区间;码分复用是用正交的脉冲序列分别携带不同信号。传统的模拟通信中都采用频分复用,随着数字通信的发展,时分复用通信系统的应用越来越广泛,码分复用主要用于空间通信的扩频通信中。

1.2.2 通信方式

上述通信系统是单向通信系统,但在多数场合下,信源兼为信宿,需要双向通信,电话就是一个最好的例子,这时通信双方都要有发送和接收设备,并需要各自的传输媒质,如果通信双方共用一个信道,就必须用频率或时间分割的方法来共享信道。因此,通信过程中涉及通信方式与信道共享问题。下面只对通信方式作一简单介绍。

1. 按消息传递的方向与时间关系分

对于点与点之间的通信,按消息传递的方向与时间关系,通信方式可分为单工、半双工及全双工通信三种。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式,因此只占用一个信道,如图 1-6(a)所示。广播、遥测、遥控、无线寻呼等就是单工通信方式的例子。

半双工通信是指通信双方都能收发消息,但不能同时进行收和发的工作方式,如图 1-6(b)所示。例如,使用同一载频的对讲机,收发报机以及问询、检索、科学计算等数据通信都是半双工通信方式。

全双工通信是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式。一般情况全双工通信的信道必须是双向信道,如图 1-6(c)所示。普通电话、手机都是最常见的全双工通信方式,计算机之间的高速数据通信也是这种方式。

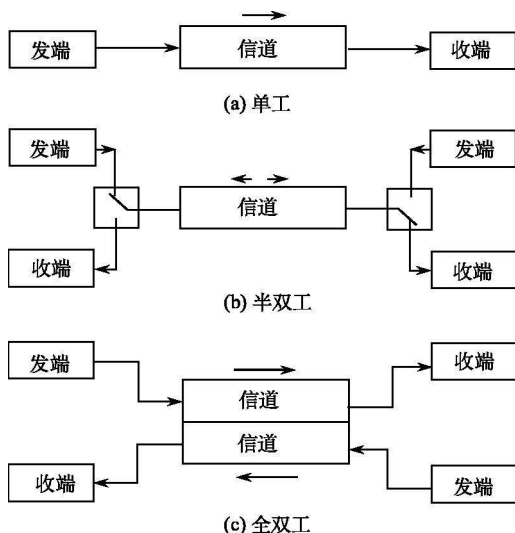


图 1-6 单工、半双工和全双工通信方式示意图

2. 按数字信号排列顺序分

在数字通信中,按数字信号代码排列的顺序可分为并行传输和串行传输。

并行传输是将代表信息的数字序列以成组的方式在两条或两条以上的并行信道上同时传输。例如,8 比特代码字符可以用 8 条信道并行传输,如图 1-7 所示。

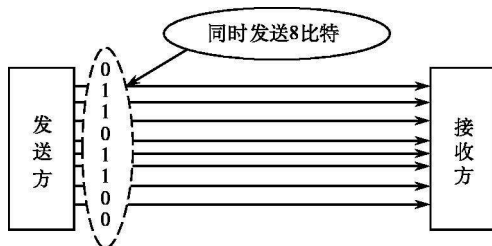


图 1-7 并行传输

并行传输的优点是节省传输时间,但需要传输信道多,设备复杂,成本高,故较少采用,一般适用于计算机和其他高速数字系统,特别适用于设备之间的近距离通信。

串行传输是将数字信号码元序列以串行方式一个码元接一个码元地在一条信道上传输,见图 1-8。通常,远距离的数字通信都采用这种传输方式。

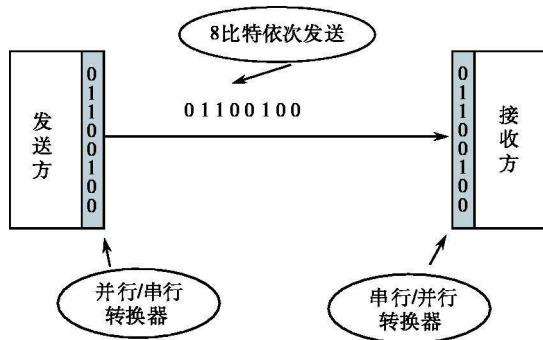


图 1-8 串行传输

串行传输的优点是只需一条通信信道,所需线路铺设费用只是并行传输的 $1/n$ 。缺点是速度慢,需要外加同步措施以解决收、发双方码组或字符的同步问题。

此外,还可以按通信的网络形式划分。由于通信网的基础是点与点之间的通信,所以本书的重点放在点与点之间的通信上。

1.3 信息及其度量

前已指出,信号是消息的载体,而信息是消息的内涵。通信的目的在于传输消息中所包含的信息,而传输信息的多少可以采用“信息量”来衡量。我们如何度量

消息中所包含的信息量呢?

消息是多种多样的。因此,度量消息中所含信息量的方法,必须能够用来度量任何消息,而与消息的种类无关。同时,这种度量方法也应该与消息的重要程度无关。

现在,让我们从常识的角度来感觉三条消息:①太阳从东方升起;②太阳比往日大两倍;③太阳将从西方升起。第一条几乎没有带来任何信息,第二条带来了大量信息,第三条带来的信息多于第二条。究其原因,第一事件是一个可能事件,人们不足为奇。第三事件几乎不可能发生,它使人感到惊奇和意外,也就是说,它带来更多的信息。这表明,对接收者来说,只有消息中不确定的内容才构成信息。而且,消息所表达的事件越不可能发生,越不可预测,就会越使人感到惊讶和意外,信息量就越大。因此,信息量就是对消息中这种不确定性的度量。

概率论告诉我们,事件的不确定程度可用其出现的概率来描述。因此,消息中包含的信息量与消息发生的概率密切相关。消息出现的概率越小,则消息中包含的信息量就越大。假设 $P(x)$ 表示消息发生的概率, I 表示该消息所含的信息量,则根据上面的认知, I 与 $P(x)$ 之间的关系应当反映如下规律:

(1) 消息 x 中所含的信息量是该消息出现的概率的函数,即

$$I = f[P(x)]$$

(2) $P(x)$ 越小, I 越大;反之, I 越小,且

$$P(x) = 1 \text{ 时, } I = 0$$

$$P(x) = 0 \text{ 时, } I = \infty$$

(3) 若干个互相独立事件构成的消息,所含的信息量等于各独立事件信息量之和,也就是说,信息具有相加性,即

$$I[P(x_1)P(x_2)\cdots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \cdots$$

综上所述, I 与 $P(x)$ 之间的关系式应为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.3.1)$$

信息量的单位和上式中对数的底 a 有关。如果 $a=2$,则信息量的单位为比特(bit);如果 $a=e$,则信息量的单位为奈特(nit);如果 $a=10$,则信息量的单位为哈特莱(Hartley)。通常广泛使用的单位为比特,这时有

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \quad (\text{bit}) \quad (1.3.2)$$

下面,我们来讨论等概率出现的离散消息的度量。先看一个简单例子。

例 1-1 设二进制离散信源,以相等的概率发送数字 0 或 1,则信源每个输出的信息含量为

$$I(0) = I(1) = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1 \quad (\text{bit}) \quad (1.3.3)$$

可见, 传送等概率的二进制波形之一 ($P=1/2$) 的信息量为 1 比特。同理, 传送等概率的四进制波形之一 ($P=1/4$) 的信息量为 2 比特, 这时每一个四进制波形需要用 2 个二进制脉冲表示; 传送等概率的八进制波形之一 ($P=1/8$) 的信息量为 3 比特, 这时至少需要 3 个二进制脉冲。

综上所述, 对于离散信源, M 进制波形等概率 ($P=1/M$) 发送, 且每一个波形的出现是独立的, 即信源是无记忆的, 则传送 M 进制波形之一的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P} = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \quad (\text{bit}) \quad (1.3.4)$$

式中, P 为每一个波形出现的概率, M 为传送的波形数。

若 M 是 2 的整幂次, 即 $M=2^K$ ($K=1, 2, 3, \dots$), 则式 (1.3.4) 可改写为

$$I = \log_2 2^K = K \quad (\text{bit}) \quad (1.3.5)$$

式中, K 是二进制脉冲数目, 也就是说, 传送每一个 M ($M=2^K$) 进制波形的信息量就等于用二进制脉冲表示该波形所需的脉冲数目 K 。

如果是非等概情况, 设离散信源是一个由 M 个符号组成的集合, 其中每个符号 x_i ($i=1, 2, 3, \dots, M$) 出现的概率为 $P(x_i)$, 且有 $\sum_{i=1}^M P(x_i) = 1$, 则 x_1, x_2, \dots, x_M 所包含的信息量分别为

$$-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_M)$$

于是, 每个符号所含信息量的统计平均值, 即平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= P(x_1)[- \log_2 P(x_1)] + P(x_2)[- \log_2 P(x_2)] + \dots \\ &\quad + P(x_M)[- \log_2 P(x_M)] \\ &= - \sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit/符号}) \end{aligned} \quad (1.3.6)$$

由于 H 同热力学中的熵形式一样, 故通常又称它为信息源的熵, 其单位为 bit/符号。显然, 当信源中每个符号等概独立出现时, 式 (1.3.6) 即成为式 (1.3.4), 此时信源的熵有最大值。

例 1-2 一离散信源由 0, 1, 2, 3 四个符号组成, 它们出现的概率分别为 3/8, 1/4, 1/4, 1/8, 且每个符号的出现都是独立的。试求某消息 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 的信息量。

解 此消息中, 0 出现 23 次, 1 出现 14 次, 2 出现 13 次, 3 出现 7 次, 共有 57 个符号, 故该消息的信息量

$$I = 23 \log_2 8/3 + 14 \log_2 4 + 13 \log_2 4 + 7 \log_2 8 = 108 \quad (\text{bit})$$

每个符号的算术平均信息量为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号数}} = \frac{108}{57} = 1.89 \quad (\text{bit/符号})$$

若用熵的概念来计算,由式(1.3.5)得

$$\begin{aligned} H &= -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \\ &= 1.906 \quad (\text{bit/符号}) \end{aligned}$$

则该消息的信息量

$$I = 57 \times 1.906 = 108.64 \quad (\text{bit})$$

可见,两种算法的结果有一定误差,但当消息很长时,用熵的概念来计算比较方便。而且随着消息序列长度的增加,两种计算误差将趋于零。

以上我们介绍了离散消息所含信息量的度量方法。对于连续消息,信息论中有一个重要结论,即任何形式的待传信息都可以用二进制形式表示而不失主要内容。抽样定理告诉我们:一个频带受限的连续信号,可以用每秒一定数目的抽样值代替。而每个抽样值可以用若干个二进制脉冲序列来表示。因此,以上信息量的定义和计算同样适用于连续信号。

1.4 主要性能指标

通信的任务是快速、准确地传递信息。因此,评价一个通信系统优劣的主要性能指标是系统的有效性和可靠性。有效性是指在给定信道内所传输的信息内容的多少,或者说是传输的“速度”问题;而可靠性是指接收信息的准确程度,也就是传输的“质量”问题。这两个问题相互矛盾而又相对统一,通常还可以进行互换。

模拟通信系统的有效性可用有效传输频带来度量,同样的消息用不同的调制方式,则需要不同的频带宽度。可靠性可用接收端最终输出信噪比来度量。不同调制方式在同样信道信噪比下所得到的最终解调后的信噪比是不同的。如调频信号抗干扰能力比调幅好,但调频信号所需传输频带却宽于调幅。

数字通信系统的有效性可用传输速率和频带利用率来衡量。

(1) 码元传输速率 R_b , 简称传码率, 又称符号速率等。它表示单位时间内传输码元的数目, 单位是波特(Baud), 记为 B。例如, 若 1 秒内传 2400 个码元, 则传码率为 2400B。

注意, 数字信号虽有多进制和二进制之分, 但码元速率仅仅表征单位时间传送码元的数目, 而没有限定这时的码元是何种进制。根据码元速率的定义, 若每个码元的时间长度为 T_s (秒), 则有

$$R_b = \frac{1}{T_s} \quad (\text{B}) \quad (1.4.1)$$

(2) 信息传输速率 R_b , 简称传信率, 又称比特率等。它表示单位时间内传递的平均信息量或比特数, 单位是比特/秒, 可记为 bit/s 或 b/s 或 bps。

由于每个码元或符号都含有一定比特数的信息量, 因此码元速率和信息速率

有如下确定的关系,即

$$R_b = R_B \cdot H \quad (\text{bit/s}) \quad (1.4.2)$$

式中, H 为信源中每个符号所含的平均信息量(熵)。等概传输时,熵有最大值 $\log_2 M$, 信息速率也达到最大,即

$$R_b = R_B \log_2 M \quad (\text{bit/s}) \quad (1.4.3)$$

或

$$R_B = \frac{R_b}{\log_2 M} \quad (\text{B}) \quad (1.4.4)$$

式中, M 为符号的进制数。例如,码元速率为 1200B,采用八进制($M=8$)时,信息速率为 3600bit/s;采用二进制($M=2$)时,信息速率为 1200bit/s,可见,二进制的码元速率和信息速率在数量上相等,有时简称它们为数码率。

(3) 频带利用率 η 。在比较不同通信系统的有效性时,不能单看它们的传输速率,还应考虑所占用的频带宽度,因为两个传输速率相等的系统其传输效率并不一定相同。所以,真正衡量数字通信系统的有效性指标是频带利用率,它定义为单位带宽内的传输速率,即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (\text{B/Hz}) \quad (1.4.5)$$

或

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (1.4.6)$$

数字通信系统的可靠性可用差错率来衡量。差错率常用误码率和误信率表示。

(4) 误码率(码元差错率) P_e ,是指发生差错的码元数在传输总码元数中所占的比例,更确切地说,误码率是码元在传输系统中被传错的概率,即

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1.4.7)$$

误信率(信息差错率) P_b ,是指发生差错的比特数在传输总比特数中所占的比例,即

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1.4.8)$$

显然,在二进制中有

$$P_b = P_e$$

1.5 通信发展趋势

在过去三四十年间,对数据传输需求的增长以及大规模集成电路的发展,促进

了数字通信的发展。目前数字通信在卫星通信、光纤通信、移动通信、微波通信等领域有了新的进展。下面我们就从这几个方面来了解通信的现状和未来发展趋势。

1. 卫星通信系统

卫星通信系统是将通信卫星作为空中中继站,它能够将地球上某一地面站发射来的无线电信号转发到另一个地面站,从而实现两个或多个地域之间的通信。根据通信卫星与地面之间的位置关系,可以分为静止通信卫星(或同步通信卫星)和移动通信卫星。静止通信卫星是轨道在赤道平面上的卫星,它离地面高度为35780km,采用三个相差 120° 的静止通信卫星就可以覆盖地球的绝大部分地域(两极盲区除外)。卫星通信系统由通信卫星、地球站、上行线路及下行线路组成。上行线路和下行线路是地球站至通信卫星及通信卫星至地球站的无线电传播路径,通信设备集中于地球站和通信卫星中。

卫星通信的特点是:通信距离远、覆盖地域广、不受地理条件限制、通信容量大、可靠性高等。自从1960年第一颗卫星发射成功以来,作为一种重要的通信手段广泛用于国际、国内和区域通信。21世纪的卫星通信将向更高频段、更大容量方向发展。卫星间的通信将采用速度快、频带宽、保密性强的激光通信。预计到2010年前,星间激光通信的传输速率将达到40Gbit/s,地面终端设备将日益小型化,甚小天线卫星地球站(VSAT)将会继续发展。

2. 光纤通信系统

光纤通信是以光导纤维(简称光纤)作为传输媒质、光波为运载工具(载波)的通信方式。光纤通信具有容量大、频带宽、传输损耗小、抗电磁干扰能力强、通信质量高等优点,且成本低,与同轴电缆相比可以大量节约有色金属和能源。自从1977年世界上第一个光纤通信系统投入运营以来,光纤通信发展迅速,已成为各种通信干线主要传输手段。

目前,单波长光通信系统速率已达10Gbit/s,其潜力已不大,采用密集波分复用(DWDM)技术来扩容是当前实现超大容量光传输的重要技术。近年来,DWDM技术取得了较大的进展,美国AT&T实验室等机构已成功地完成了Tbit/s的传输实验。

光传送网是通信网未来的发展方向,它可以处理高速率的光信号,摆脱电子瓶颈,实现灵活动态的光层联网,透明地支持各种格式的信号以及实现快速网络恢复。因此,世界上许多国家纷纷进行研究、试验,验证由波分复用、光交叉连接设备及色散位移光纤组成的高容量通信网今后的可行性。

3. 数字蜂窝移动通信系统

数字蜂窝移动通信系统是将通信范围分为若干相距一定距离的小区,移动用户可以从一个小区运动到另一个小区,依靠终端对基站的跟踪,从而使通信不中断。移动用户还可以从一个城市漫游到另一个城市,甚至到另一个国家与原注册地的用户终端通话。数字蜂窝移动通信系统主要由三部分组成:控制交换中心、若干基地台、诸多移动终端,通过控制交换中心进入公用有线电话网,从而实现移动电话与固定电话、移动电话与移动电话之间的通信。

目前广泛应用的是第二代移动通信系统,采用窄带时分多址(TDMA)和窄带码分多址(CDMA)数字接入技术,已形成的国家和地区标准有欧洲的 GSM 系统、美国的 IS-95 系统、日本的 PDC 系统。我国主要采用欧洲的 GSM 系统。

第二代移动通信系统实现了区域内制式的统一,覆盖了大中小城市,为人们的信息交流提供了极大的便利。随着移动通信终端的普及,移动用户数量成倍地增长,第二代移动通信系统的缺陷也逐渐显现,如全球漫游问题、系统容量问题、频谱资源问题、支持宽带业务问题等。为此,从 20 世纪 90 年代中期开始,各国和世界组织又开展了对第三代移动通信系统的研究,它包括地面系统和卫星系统,移动终端既可以连接到地面的网络,也可以连接到卫星的网络。第三代移动通信系统工作在 2000MHz 频段,预期在 2002 年左右投入商用,为此国际电信联盟正式将其命名为 IMT-2000。IMT-2000 的目标和要求是:统一频段、统一标准,达到全球无缝隙覆盖,提供多媒体业务,传输速率最高应达到 2Mbit/s,其中车载为 144kbit/s、步行为 384kbit/s、室内为 2Mbit/s;频谱利用率高、服务质量高,保密性能好;易于向第二代系统的过渡和演进;终端价格低。目前第三代移动通信系统有多个标准,我国所提出的 TD-SCDMA 标准也是其中之一。这充分体现了我国在移动通信领域的研究已达到国际领先水平。

人类对新技术的追求是无止境的,对新的通信系统和通信技术的研究仍在不断进行,新的通信系统和通信技术也将会不断服务于人类。

思考题与习题

- 1.1 什么是数字信号和模拟信号? 两者的区别是什么?
- 1.2 何谓数字通信? 简述数字通信系统的主要优缺点。
- 1.3 画出数字通信系统的一般模型,并简述各小方框的主要功能。
- 1.4 在数字通信系统中,其可靠性和有效性指的是什么? 各有哪些重要指标?
- 1.5 按信号的流向和时间分类,通信方式有哪些?
- 1.6 何谓码元速率和信息速率? 它们之间的关系如何?
- 1.7 简述未来通信的发展趋势。
- 1.8 已知英文字母 e 和 v 出现的概率分别为 0.105 和 0.008,试求 e 和 v 的信息量各为多少?