

 中国电子教育学会高教分会推荐
普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

现代通信原理

主编 乔延华 杜青
主审 刘正光 赵琳



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国电子教育学会高教分会推荐

普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

现代通信原理

主编 乔延华 杜 青

参编 苗艳华 李建娜

郝张红 沈振惠

主审 刘正光 赵 琳

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了现代通信的基本原理、基本技术,并结合实际应用及 MATLAB 仿真实例更进一步地阐释了通信的相关技术。

全书共 9 章:绪论、信号分析基础和信道、模拟调制传输系统、信源编码、数字基带传输系统、数字调制传输系统、同步原理、信道编码、现代数字调制技术。每章均有习题。

本书可作为应用型本科学校通信、电子等相关专业的本科生教材,也可作为高等职业技术学院学生教材,还可作为通信工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信原理/乔延华,杜青主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.2
普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材
ISBN 978 - 7 - 5606 - 4322 - 9

I. ① 现… II. ① 乔… ② 杜 III. ① 通信原理
IV. ① TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 020841 号

策 划 毛红兵

责任编辑 王 静

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

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 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 2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 19.5

字 数 475 千字

印 数 1~3000 册

定 价 35.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4322 - 9/TN

XDUP 4614001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *



前言

“现代通信原理”一直都是高等学校电子、通信与信息类各专业的一门重要的学科基础课,该课程既要为后续专业技术课程提供必要的通信系统的基础知识和理论依据,又要为提高学生的专业素质和毕业后的继续学习、更新知识打好基础,所以其一直是电子信息类专业非常重要的核心课程。很多高校都把“现代通信原理”课程设为考研的专业课,也足以证明该课程的核心基础地位。

目前,有很多经典的现代通信原理教材被广大高校所选用,但这些教材内容上的复杂性和枯燥性决定了它们并不太适用于应用型本科院校的学生。为了适应应用型本科的培养目标,帮助学生深入理解概念,提高学生分析问题、解决问题的能力,多位应用型本科院校的资深教师通过一年多时间的反复商讨,编撰了此书。

本书系统全面地介绍了通信系统中的基本概念、工作原理、主要技术及分析方法,并引入实际应用和仿真实例,能提高学生学习的兴趣,帮助学生加深对通信理论的理解和分析。本书与同类书相比,具有如下特色:

(1) 本书以培养应用型人才为目的,以“实用、够用”为度,以讲清概念、强化应用为教学重点,内容体系更趋合理,力求科学性、先进性、系统性和实用性的统一。

(2) 本书语言通俗易懂,由浅入深,简明透彻,概念清晰,重点突出,尽量简化或省略复杂的数学推导。

(3) 本书内容既包括经典内容,又力求充分反映国内外通信技术的最新发展。

(4) 在每一章的开始章节引入了本章理论所对应实际中的应用,提高学生学习本章内容的兴趣。

(5) 在每一章结尾补充了相关章节的 MATLAB 编程及仿真实例,可以帮助学生加深对通信理论的理解和分析,并可借助书本所学知识用仿真的手段解决通信系统中出现的实际问题。

(6) 本书每一章都配有适量的例题、习题,加强学生对理论的理解。

本书由乔延华、杜青担任主编,由刘正光、赵琳担任主审。苗艳华编写了第1章,李建娜编写了第2章,郝张红编写了第3章,乔延华编写了第4、5、7章,杜青编写了第6、8章,沈振惠编写了第9章。

本书可作为通信工程、电子信息工程、计算机等电子信息类专业“通信原理”、“现代通信理论”、“数字通信”等课程的教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。另外,

本书配有《现代通信原理习题解析》(西安电子科技大学出版社,2017)一书,可帮助读者自学。

在本书的编写过程中,得到了学校各位领导的大力支持,刘正光教授、戴冬冰副院长、赵琳老师更为本书提出了很多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢;此外,还要感谢天津理工大学中环信息学院贺艳老师的大力支持;本书的编写也参考了一些国内外优秀教材,在此对原作者表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,希望读者批评指正。

编 者

2016年9月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.3 信道	23
1.1 通信概述	1	2.3.1 信道的定义	24
1.1.1 通信的实际应用	1	2.3.2 信道的分类	24
1.1.2 通信的定义	2	2.3.3 信道的模型	24
1.2 通信系统的组成	2	2.3.4 恒参信道	26
1.2.1 通信系统的一般组成	2	2.3.5 变参信道	27
1.2.2 模拟通信系统的组成	3	2.4 信道中的噪声	29
1.2.3 数字通信系统的组成	4	2.5 信道容量	31
1.2.4 数字通信系统的优、缺点	5	2.6 本章 MATLAB 仿真实例	32
1.3 通信系统的分类与通信方式	5	本章小结	36
1.3.1 通信系统的分类	5	习题	37
1.3.2 通信方式	6	第 3 章 模拟调制传输系统	38
1.4 信息及其度量	6	3.1 模拟调制传输系统的实际应用	38
1.5 通信系统的主要性能指标	8	3.1.1 调幅广播	38
1.5.1 一般通信系统的性能指标	8	3.1.2 调频广播	39
1.5.2 模拟通信系统的性能指标	8	3.1.3 地面广播电视	40
1.5.3 数字通信系统的性能指标	9	3.1.4 载波电话系统	41
1.6 MATLAB 在通信仿真中的应用	10	3.2 调制的基本概念	42
1.6.1 MATLAB 软件的使用方法	11	3.2.1 调制的概念	42
1.6.2 Simulink 在通信仿真中的应用	12	3.2.2 调制的分类	42
本章小结	17	3.3 幅度调制系统及其抗噪声性能	42
习题	18	3.3.1 幅度调制	42
第 2 章 信号分析基础和信道	19	3.3.2 调幅系统的解调	47
2.1 实际应用中的传输介质	19	3.3.3 调幅系统的抗噪声性能	50
2.2 信号分析基础	20	3.4 角度调制系统及其抗噪声性能	55
2.2.1 信号的分类	20	3.4.1 角度调制的概念	55
2.2.2 功率谱密度、能量谱密度和相关概念	22	3.4.2 窄带调频	57
		3.4.3 宽带调频	57
		3.4.4 调频信号的产生	59

3.4.5 调频信号的解调	60
3.4.6 调频系统的抗噪声性能	61
3.4.7 调频系统的加重技术	64
3.5 频分复用技术	66
3.6 本章 MATLAB 仿真实例	67
本章小结	72
习题	73
第 4 章 信源编码	75
4.1 信源编码的实际应用	75
4.2 抽样	77
4.2.1 抽样定理	77
4.2.2 脉冲幅度调制	80
4.3 抽样信号的量化	83
4.3.1 均匀量化	84
4.3.2 非均匀量化	85
4.4 脉冲编码调制	88
4.4.1 常用的二进制编码码型	89
4.4.2 A 律 13 折线的码位安排	91
4.4.3 编、译码原理	93
4.4.4 PCM 信号的码元速率和带宽	95
4.4.5 PCM 系统的抗噪声性能	96
4.5 增量调制	97
4.5.1 增量调制原理	98
4.5.2 一般量化噪声和过载噪声	100
4.5.3 增量调制系统的抗噪声性能	101
4.6 其他的脉冲数字调制	102
4.6.1 差分脉冲编码调制	102
4.6.2 自适应差分脉冲编码调制	103
4.7 时分复用和多路数字电话系统	104
4.7.1 时分复用原理	104
4.7.2 多路数字电话系统	105
4.8 本章 MATLAB 仿真实例	107
本章小结	115
习题	115

第 5 章 数字基带传输系统	117
5.1 数字基带传输系统的实际应用	117
5.2 数字基带传输系统的常用码型	118
5.2.1 码型的概念及设计原则	118
5.2.2 数字基带信号的常用码型	118
5.3 数字基带信号的功率谱密度	124
5.4 无码间串扰的基带传输	127
5.4.1 数字基带传输系统模型	127
5.4.2 基带传输系统的码间串扰	128
5.4.3 无码间串扰的基带传输特性	129
5.4.4 无码间串扰的基带传输系统	131
5.5 部分响应系统	135
5.6 基带传输系统的性能分析	137
5.7 眼图	140
5.7.1 眼图的概念	140
5.7.2 眼图形成原理及模型	140
5.8 均衡	142
5.8.1 均衡的概念	142
5.8.2 时域均衡的基本原理	142
5.8.3 有限长横向滤波器	143
5.9 本章 MATLAB 仿真实例	145
本章小结	151
习题	152
第 6 章 数字调制传输系统	154
6.1 数字调制传输系统的实际应用	154
6.2 二进制数字调制及其抗噪声性能分析	156
6.2.1 二进制数字幅移键控(2ASK)	156
6.2.2 二进制数字频移键控(2FSK)	158
6.2.3 二进制绝对相移键控(2PSK)	162
6.2.4 二进制差分相移键控(2DPSK)	165
6.2.5 二进制数字调制系统的抗噪声性能	168
6.2.6 二进制数字调制系统的性能比较	182

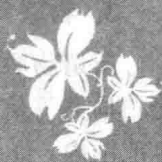
6.3 数字信号的最佳接收	185	本章小结	236
6.3.1 最佳接收准则	185	习题	237
6.3.2 匹配滤波器	186	第8章 信道编码	238
6.3.3 相关法接收	190	8.1 信道编码的实际应用	238
6.3.4 二进制数字信号的最佳接收	192	8.2 信道编码的基础	239
6.3.5 二进制最佳接收的噪声性能	193	8.2.1 差错类型	240
6.4 多进制数字调制	195	8.2.2 差错控制方式	240
6.4.1 多进制数字幅移键控(MASK)		8.2.3 差错控制编码分类	241
.....	196	8.2.4 差错控制编码原理	242
6.4.2 多进制数字频移键控(MFSK)		8.2.5 码重、码距及检错、纠错能力	243
.....	199	8.3 几种常用的检错码	244
6.4.3 多进制数字相移键控(MPSK)		8.3.1 奇偶监督码	244
.....	201	8.3.2 二维奇偶监督码	246
6.4.4 多进制数字调制系统的误码率		8.3.3 恒比码	246
.....	207	8.3.4 群计数码	247
6.5 本章 MATLAB 仿真实例	208	8.4 线性分组码	247
本章小结	215	8.4.1 基本概念	247
习题	218	8.4.2 监督矩阵	249
第7章 同步原理	220	8.4.3 生成矩阵	250
7.1 同步的实际应用	220	8.4.4 校验子	251
7.2 载波同步	221	8.4.5 汉明码	252
7.2.1 直接法	221	8.5 循环码	253
7.2.2 插入导频法	223	8.5.1 循环码的特点	253
7.3 位同步	224	8.5.2 循环码的生成多项式和生成矩阵	
7.3.1 直接法	224		255
7.3.2 插入导频法	226	8.5.3 循环码的编、译码方法	256
7.4 帧同步	227	8.5.4 BCH 码	259
7.4.1 对帧同步系统的要求	227	8.6 卷积码	261
7.4.2 起止式同步法	228	8.6.1 基本概念	261
7.4.3 集中插入同步法	228	8.6.2 编码原理	261
7.4.4 分散插入同步法	229	8.6.3 卷积码的图解表示	262
7.5 网同步	230	8.6.4 维特比译码	264
7.5.1 准同步方式	230	8.7 本章 MATLAB 仿真实例	266
7.5.2 同步方式	231	本章小结	271
7.6 本章 MATLAB 仿真实例	231	习题	272

第 9 章 现代数字调制技术	274	9.5 正交幅度调制	284
9.1 现代调制技术的应用	274	9.6 正交频分复用	287
9.1.1 现代数字调制技术在非对称数字式 用户电路(ADSL)上的应用	274	9.6.1 概述	287
9.1.2 数字调制技术在数字电视(DTV) 上的应用	275	9.6.2 OFDM 的基本原理	288
9.2 偏移四相相移键控	275	9.7 本章 MATLAB 仿真实例	290
9.3 $\pi/4$ 四相相移键控	278	本章小结	298
9.4 最小频移键控与高斯最小频移键控	280	习题	299
9.4.1 MSK 信号的正交性	280	附录	300
9.4.2 MSK 信号的相位连续性	281	附录一 常用三角公式	300
9.4.3 MSK 信号的产生与解调	282	附录二 傅里叶变换	300
9.4.4 高斯最小频移键控	284	附录三 误差函数、互补误差函数表	302
		参考文献	303

第1章 绪论

基本要求

- ◆ 熟悉通信、通信系统的概念。
- ◆ 掌握通信系统的组成、信息及其度量。
- ◆ 掌握衡量通信系统的性能指标。
- ◆ 熟悉 MATLAB 软件。



1.1 通信概述

1.1.1 通信的实际应用

随着信息技术的不断发展,通信技术也有了极大的提高和改善。目前,通信的发展主要在于通信网络技术逐渐成熟,更多地进入到千家万户。我国的通信网络技术可以从三个方面来进行说明,分别是通信介质、通信模块和数据通信。通信介质是网络进行通信的媒介,是传输信息的载体,例如日常生活中常用的双绞线、同轴电缆、光缆、红外线、微波和卫星通信等。通信介质对网络信息的传输有一定的影响,如果通信介质的特性较差的话,就可能使网络通信的传输效果和质量得不到保证。通信模块可以使客户迁移至一个全融合园区网络,将语音、视频和数据信息有机地结合在一起,从整体上提高通信的质量,降低通信基础设施的投入和运行成本,为新的应用环境提供了可能。数据通信是指对两个通信实体进行数据的传输和交换,传输数据的信号是数字信号。

通信技术的快速发展方便了人们的学习、工作和生活。近些年,一些边远地区也建设了地面网络,提高了通信线路的质量,从而能够传输高速数据。在当前科学技术发展的新形势下,通信技术未来的发展及实际应用,受到了人们的广泛关注。下面对于通信技术未来的发展及实际应用进行详细的阐述。

1. 多种形式的通信技术得到了互补发展

第二代、第三代、第四代移动通信技术和无线局域网、超宽带等技术得到了互补的发展。第四代移动通信技术能够满足高速率的需求,第三代移动通信技术能够满足广域无缝覆盖和强漫游的移动性需求,第二代移动通信技术能够满足日常通信电话及低速无线网络的需求,无线局域网能够满足中距离的较高速数据接入的需求,而超宽带能够满足近距离的超高速无线接入的需求。目前,可视电话和数字电视都已经实现,它们是对实时性要求

很高的多媒体通信技术,对带宽也有很高的要求。其中,数字电视需要实时传输高质量的电视节目,对带宽的要求最高。未来将会出现更多的通信技术,人们可以综合利用这些技术实现更多的功能和实际应用。通过多种形式的通信技术的互补发展,有利于促进通信技术的均衡全面发展。

2. 多种形式的通信技术会为用户提供更加个性化的服务方式

政府为各种企业提供了更多的无线频率资源,推进不同技术相关频谱的规划和应用工作,有利于各种企业按照各自的发展策略和市场需求,对自身的无线通信网络进行综合规划,这对于企业实现自身资源的优化配置,起着举足轻重的作用。

3. 物联网的应用为通信技术注入新的活力

所谓物联网,就是将所有物品通过射频识别(RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备与互联网进行无缝连接,从而能够进行智能化识别和管理。在世界范围内,许多市场上的移动通信业务增长量都已经逐渐减缓,与此同时,物联网技术飞速发展。物联网的发展,毫无疑问会带动通信技术更快的发展,并且能够扩大通信技术的实际应用范围。由于物联网是物体和物体之间连接起来的网络,因此,广泛应用于图书馆的条码扫描、智能大厦的门禁卡以及超市的商品识别等,都促进了通信技术应用范围的扩大。

随着社会经济的快速发展以及通信技术的广泛应用,人们的工作、学习和生活也变得更加便利。未来通信技术将具有更广阔的发展前景,它正在从单一窄带业务的通信技术网,发展成为一个将电信、广播、计算机融合起来的宽带通信技术网络。

1.1.2 通信的定义

通信就是把消息从一地传送到另一地。譬如说从甲地传送消息到乙地,那么甲地称为发信端,乙地称为接收端。以最简单的通信方式——面对面交谈为例,讲话是传达消息的一种方式,发话人是消息的来源,称为信源,语音通过空气传到对方,而传递消息的媒介称为信道,听话者听到后获得消息,是消息的归宿,称为信宿,这样就完成了消息的传递。电通信(电信)是指利用“电”来传递信息的方式,即指利用有线电、无线电、光和其他电磁系统,对于消息、情报、指令、文字、图像、声音或任何性质的消息进行传输。通信系统是指完成信息传输过程的全部设备和传输媒介的总和。

1.2 通信系统的组成

1.2.1 通信系统的一般组成

通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

信源:消息的产生地,其作用是把各种消息转换成原始电信号。

发送设备:将原始电信号转换为适于在信道中传输的信号,一般包括变换、编码和调制过程。

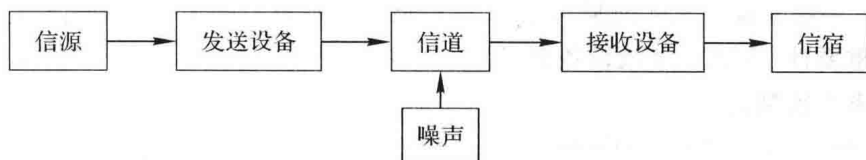


图 1-1 通信系统的基本模型

信道：将信号由发送设备传输到接收设备的媒介或途径。信道可分为有线信道和无线信道，例如自由空间的短波无线电信道、双绞线、电缆或光纤，以及卫星或微波等，都是常见的实际信道。

接收设备：将信号转换为原始电信号，一般包括解调、译码等过程。

信宿：信息的归宿点，其作用是将接收设备恢复出的电信号转换成相应的消息。

噪声：它与上述组成部件不同，它不是有意加入设备的，而是通信系统中各种设备以及信道中固有的，并且是不希望存在的。在通信系统中，某些噪声与信号相比可以忽略（如发信机中），所以不考虑噪声的影响。然而有些噪声与信号功率相当，甚至超过信号，这样的噪声将严重降低通信系统的性能，通信系统设计的主要任务就是减弱噪声的影响。通信系统中的噪声从来源来看，包括系统中各部件自身产生的内部噪声和外部噪声源对系统的作用而引起的外部噪声。由于信道对传输信号有衰减，在信道输出端，信号常常被减弱，同时外部噪声往往从信道引入，加之有内部噪声，在这里噪声的影响最为严重。因此把噪声抽象为从信道加入，对分析通信系统性能是合适的，而且这样处理噪声也为分析问题带来了方便。

通信系统的组成，反映了通信系统的共性，通常也把它称为通信系统的基本模型。对通信系统原理的研究，通常就是以通信系统的模型为基础而展开的。通信系统中待传输的消息形式是多种多样的，它可以是符号、文字、语音或图像等。为了实现消息的传输和交换，首先需要把消息转换为相应的电信号（以下简称信号）。通常，这些信号是以它的某个参量的变化来表示消息的。按照信号参量的取值方式不同，信号可分为两类，即模拟信号与数字信号。模拟信号的某个参量与消息相对应而连续取值，例如电话机话筒输出的语音信号、电视摄像机输出的电视图像信号等都属于模拟信号。数字信号的参量是离散取值的，例如计算机、电传机输出的信号就是数字信号。

这样，根据通信系统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与数字通信系统。也就是说，信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统，信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统。当然，以上的分类方法是以信道传输信号的差异为标准的，而不是根据信源输出的信号来划分的。如果在发送端先把模拟信号变换成数字信号，即进行模/数(A/D)转换，然后就可利用数字方式进行传输，在接收端再进行相反的变换——数/模(D/A)转换，以还原出模拟信号。

模拟信号和数字信号通常都要经过调制形成模拟调制信号和数字调制信号，以适应信道的传输特性。在短距离的有线传输场合，也可以用基带传输的方式。本书将按以上分类方法对通信系统的组成、基本工作原理及性能进行深入的讨论。

1.2.2 模拟通信系统的组成

模拟通信系统的模型与图 1-1 所示相仿，其方框图如图 1-2 所示。对应于图 1-2 中

的发送设备，一般来说应包括调制、放大、天线等，但这里只画了一个调制器，目的是为了突出调制的重要性。同理，接收设备也只画了一个解调器。这样，图 1-2 就是一个最简化的模拟通信系统模型。

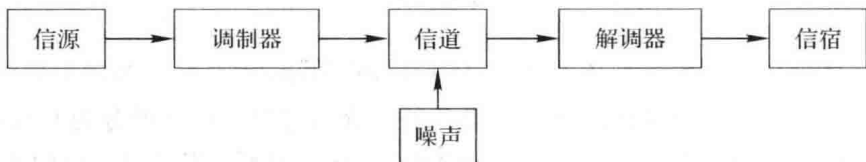


图 1-2 模拟通信系统模型

调制器：将具有低频分量的原始信号进行频谱搬移，变换成适合在信道传输的频带信号，这种变换过程称为调制，变换后的信号称为已调信号，又称频带信号，其频谱具有带形式且中心频率远离零频。未经过调制的原始信号又称基带信号，其频谱从零频附近开始，如语音信号为 300~3400 Hz，图像信号为 0~6 MHz。

解调器：将频带信号恢复成基带信号。

1.2.3 数字通信系统的组成

凡是信号的某一参量只能取有限个值，并且常常不直接或者不准确地与消息对应的信号称为数字信号。例如：莫尔斯电报信号，该信号的幅度只能取 0 V 和 ΔV 两个值，它是靠取值变化的排列表示消息的，因此它只能间接地与消息发生联系，它是数字信号。

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统，系统模型如图 1-3 所示。

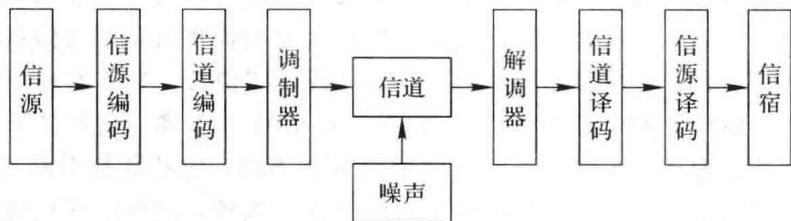


图 1-3 数字通信系统模型

信源编码：包括 A/D 转换和数据压缩，主要目的是提高数字信号传输的有效性。接收端信源译码则是信源编码的逆过程。信源编码是指用适当的编码方法降低数字信号的码元速率，以提高数字信号传输的有效性。另外，如果信源是数据处理设备，还要进行并/串变换；如果信源产生的是模拟信号，则先要进行 A/D 转换。此外，数据扰乱、数据加密等都是在信源编码器内完成的。

信道编码：增加系统的冗余度，目的是提高数字信号传输的可靠性。接收端信道译码是其相反的过程。信道编码是指在信息码组中按一定的规则附加一些码，接收端根据相应的规则进行检错和纠错，以提高数字信号传输的可靠性。信道编码又称差错控制编码。

但是有的实际数字通信系统并非包括所有环节，如图 1-3 所示的通信系统称为数字频带传输系统，图中如果不包括调制器和解调器，则称为数字基带传输系统；图中如果包括 A/D 转换环节，则称为模拟信号的数字化传输系统。



1.2.4 数字通信系统的优、缺点

与模拟通信相比,数字通信有如下优点:

(1) 抗干扰能力强,尤其在中继时,数字信号还可以再生,从而消除噪声的积累。

(2) 由于数字集成电路,特别是大、中规模集成电路技术日益成熟,数字通信设备越来越易于制造,且成本低、体积小、可靠性高。

(3) 可以设法控制传输中的差错,不但可以发现而且还能纠正传输中的差错,因而大大提高了传输质量。

(4) 便于同计算机连接,采用现代计算机技术对数字信息进行处理,以便实现通信现代化、自动化。

(5) 数字信息易于加密且保密性强。

(6) 与模拟通信相比,数字通信可以传输种类更多的消息,使通信系统变得通用、灵活。

但是数字通信也有它的不足之处,就是目前它比模拟通信要占据更宽的频带。比如一路模拟电话通常只占据 4 kHz 带宽,但一路数字电话可能要占据几十千赫兹带宽,可以认为数字通信的许多优点是以信号频带为代价而换取的。本书的重点为数字通信,但考虑到目前还存在大量模拟通信系统,因此对模拟通信的内容也会适当兼顾。

1.3 通信系统的分类与通信方式

1.3.1 通信系统的分类

通信系统的分类方法很多,这里仅讨论由通信系统模型所引出的分类。

按消息的物理特征分类:通信系统通常可以分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等。这些通信系统可以是专用的,但通常是兼容的或并存的。由于电话通信最为发达,因而其他通信系统常借助于公共的电话通信系统进行。

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传输系统。基带传输系统是将未经调制的信号直接传送,如音频市内电话等;频带传输系统是对各种信号调制后传输的总称。

按信号特征分类:按信道中传输的是模拟信号还是数字信号,相应地通信系统可分成模拟通信系统与数字通信系统两类。

按传输媒介分类:按传输媒介不同,通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统两类。

按信号复用方式分类:传送多路信号有三种常用的复用方式,即频分复用、时分复用、码分复用等。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;码分复用则是用一组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。码分复用多用于空间扩频通信系统中,目前广泛用于移动通信系统中。

1.3.2 通信方式

1. 按消息传送的方式与时间的关系分类

按消息传送的方式与时间的关系分类,通信方式可分为单工通信、双工通信、半双工通信三种。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式,例如遥控、遥测、广播、电视等。

双工通信是指通信双方可同时进行收、发消息的工作方式,例如电话、手机等。

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、发的工作方式,例如使用同一载频工作的无线电对讲机就是按这种通信方式工作的。

2. 按数字信号码元排列方法分类

按数字信号码元排列方法分类,通信方式可分为串行传输和并行传输。

串行传输是指数字信号码元序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输。一般的远距离数字通信大多采用串行传输方式,因为这种方式只需占用一条通路。

并行传输是指将数字信号码元序列分割成两路或者两路以上的数字信号,码元序列同时在信道中传输。一般的近距离数字通信可采用并行传输方式。

1.4 信息及其度量

前面已经提到,按照参量取值的特点可将电信号分为模拟信号和数字信号。能用连续的函数值表示的电信号为模拟信号,只能用离散的函数值表示的信号为数字信号。例如常见的文字和数字,它们只具有有限个不同的符号,通常用一组二进制数表示这些符号,符号的组合就组成了消息。

通信系统通过传输信号而传递了消息,其传输能力该如何度量呢?通信系统传输的具体对象是消息,其最终的目的在于通过消息的传送使收信者获知信息。这里所说的信息,指的是收信者在收到消息之前对消息的不确定性。消息是具体的,而信息是抽象的。为了对通信系统的传输能力进行定量的分析和衡量,就必须对一信息进行定量的描述。不同的消息含有不同数量的信息,同一个消息对不同的接收对象来说,信息的多少也不同,所以对信息的度量应当是客观的。

衡量信息多少的物理量称为信息量。首先,信息量的大小与消息所描述事件的出现概率有关。若某一消息的出现概率很小,当收信者收到时就会感到很突然,那么该消息的信息量就很大。若消息出现的概率很大,收信者事先已有所估计,则该消息的信息量就较小。若收到完全确定的消息则没有信息量。因此,信息量应该是消息出现概率的单调递减函数。其次,如果收到的不只是一个消息,而是若干个互相独立的消息,则总的信息量应该是每个消息的信息量之和,这就意味着信息量还应满足相加性的条件。再者,对于由有限个符号组成的离散信源来说,随着消息长度的增加,其可能出现的消息数目却是按指数增加的。基于以上的认识,对信息量作如下定义:若一个消息 x 出现的概率为 $P(x)$,则这一消息所含的信息量为

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

当上式中的对数以 2 为底时，信息量的单位为比特(bit)，简记为 b；对数以 e 为底时，信息量的单位为奈特(nit)；对数以 10 为底时，信息量单位为哈特莱(hartley)。目前应用最广泛的单位是比特。

消息是用符号表达的，所以消息所含的信息量即符号所含的信息量。

例 1-1 表 1-1 给出英文字母出现的概率，求字母 e 和 q 的信息量。

表 1-1 英文字母出现的概率

符号	概率	符号	概率	符号	概率
空格	0.2	s	0.052	y, w	0.012
e	0.105	h	0.047	g	0.011
t	0.072	d	0.035	b	0.0105
o	0.0654	i	0.029	v	0.008
a	0.063	c	0.023	k	0.003
n	0.059	f, u	0.0225	x	0.002
l	0.055	m	0.021	j, q, z	0.001
r	0.054	p	0.0175		

解：由表 1-1 可知，e 的出现概率为 $P(e)=0.105$ ，可计算其信息量 $I(e)$ ，即有

$$I(e)=-\lg P(e)=-\lg 0.105=3.25(\text{b})$$

q 的出现概率 $P(q)=0.001$ ，其信息量为

$$I=-\lg P(q)=-\lg 0.001=9.97(\text{b})$$

在通信系统中，当传送 M 个等概率的消息之一时，每个消息出现的概率为 $1/M$ ，任一消息所含的信息量为

$$I=-\log_a \frac{1}{M}=\log_a M \tag{1-2}$$

若 $M=2^k$ ，则

$$I=\lg 2^k=k(\text{b}) \tag{1-3}$$

对于二进制数字通信系统($M=2$)，当二进制信号 0 和 1 的出现概率相等时，则每个二进制信号都有 1 b 的信息量。

上述是等概率条件下的信息量，下面讨论非等概率条件下的信息量。设信息源中包含有 n 个信息符号，每个消息 x_i 出现的概率为 $P_i(x)$ ，则各消息出现的概率为

$$\left[\begin{matrix} x_1, x_2, \dots, x_n \\ P_1(x), P_2(x), \dots, P_n(x) \end{matrix} \right], \text{ 且有 } \sum_{i=1}^{\infty} P_i(x) = 1$$

则 $x_1, x_2, x_3 \cdots x_n$ 所包含的信息量分别为 $-\lg P_1(x), -\lg P_2(x), \dots, -\lg P_n(x)$ 。于是，每个符号所包含的信息量的统计平均值，即平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= P_1(x)[-\lg P_1(x)] + P_2(x)[-\lg P_2(x)] + \cdots + P_n(x)[-\lg P_n(x)] \\ &= \sum_{i=1}^n P_i(x)[-\lg P_i(x)] \text{ (b/符号)} \end{aligned} \tag{1-4}$$

由于式中 $H(x)$ 与热力学中熵的定义式相类似，故在信息论中又通常称为信息源的熵，其单位为 b/符号。

例 1-2 一信息源由 4 个符号 0、1、2、3 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。若消息序列长为 57 个符号，其中 0 出现 23 次，1 出现 14 次，2 出现 13 次，3 出现 7 次。试求该消息序列所包含的信息量和平均信息量。

解：由于消息序列中出现符号 x_i 的信息量为 $-n_i \lg P_i(x)$ (n_i 和 $P_i(x)$ 分别为消息序列中符号 x_i 出现的次数和概率)，消息序列所包含的信息量为每个符号出现信息量的和，即

$$I = \sum_{i=1}^n n_i [-\lg P_i(x)] = -23 \lg \frac{3}{8} - 14 \lg \frac{1}{4} - 13 \lg \frac{1}{4} - 7 \lg \frac{1}{8} \\ = 32.55 + 28 + 26 + 21 = 107.55 \text{ (b)}$$

消息序列的平均信息量为

$$H(x) = \sum_{i=1}^n P_i(x) [-\lg P_i(x)] \\ = -\frac{3}{8} \lg \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \lg \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \lg \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \lg \frac{1}{8} = 1.906 \text{ (b/符号)}$$

上述介绍的离散消息的分析方法也可用于对连续消息进行分析。因为抽样定理告诉我们，对于一个频带有限的连续信号，可用每秒一定数目的离散抽样值代替。这就是说一个连续消息经抽样后成为离散消息，这样我们就可以利用分析离散消息的方法来处理连续消息。

1.5 通信系统的主要性能指标

1.5.1 一般通信系统的性能指标

在设计或评估通信系统时，往往要设计通信系统的主要性能指标，否则就无法衡量其质量的好坏。通信系统的性能指标即通信系统的有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性 & 维护使用等。如果考虑所有这些因素，那么通信系统的设计就要包括很多项目，系统性能的评价也就很难进行。尽管对通信系统可以有很多的实际要求，但是，从消息传输的角度来说，通信的有效性与可靠性将是主要的性能指标。这里所说的有效性主要是指消息传输的“数量”和“速度”问题，而可靠性主要是指消息传输的“质量”问题。然而，这是两个相互矛盾的问题，这对矛盾通常只能根据实际要求取得相对的统一。例如，在满足一定可靠性指标下，尽量提高消息的传输速度；或者在维持一定的有效性指标下，使消息传输质量尽可能提高。由于模拟通信系统和数字通信系统所传输的信号不同，这两个指标的具体内容是不同的。

1.5.2 模拟通信系统的性能指标

1. 有效性

模拟通信系统的有效性用有效传输带宽来度量，同样的消息采用不同的调制方式时，需要不同的频带宽度。频带宽度越窄，则有效性越好。如传输一路模拟电话，单边带信号只需要 4 kHz 带宽，而标准调幅或双边带信号则需要 8 kHz 带宽，因此在一定频带内用单边带信号传输的路数比常规调幅信号多一倍，也就是可以传输更多的消息。显然，单边带系统的有效性比标准调幅系统要好。