



普通高等院校电子信息类应用型规划教材

通信原理

王素珍 贺英 汪春梅 编著
王涛 李改梅

TONGXIN
YUANLI



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

普通高等院校电子信息类应用型规划教材

通信原理

王素珍 贺英 汪春梅 编著
王涛 李改梅

北京邮电大学出版社
·北京·

内容简介

本书介绍了通信系统的基本原理与技术。全书共分 10 章,内容包括绪论、信号与分析、模拟调制系统、数字信号的基带传输系统、正弦载波数字调制系统、模拟信号的数字传输、同步原理、差错控制编码、先进的数字带通调制与解调、信道复用与通信网等内容。

在保持一定理论深度的基础上,本书尽可能地简化数学分析过程,突出对概念、新技术的介绍,增进与实际系统的联系。本书可作为高等院校通信、电子信息等相关专业本科生的教材,也可作为相关专业和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/王素珍等编著. —北京:北京邮电大学出版社,2010.2

ISBN 978-7-5635-2131-9

I. ①通… II. ①王… III. ①通信理论 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 015764 号

书 名: 通信原理

作 者: 王素珍 贺英 汪春梅 王涛 李改梅

责任编辑: 崔 珺

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 20.75

字 数: 502 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2131-9

定 价: 35.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •



P R E F A C E

21 世纪的科学技术突飞猛进、日新月异,通信技术也不例外,正向着数字化、智能化、综合化和个人化等方向不断迈进。通信技术领域的更新与发展都是以通信基本原理为基础的,因此,作为通信行业的工程技术人员,只有掌握了通信系统的基本原理和基础理论,才能适应通信技术的飞速发展。

“通信原理”属于电子信息类各专业的专业基础课程,它不仅是通信工程、电子信息工程专业学生的必修课,还是相关专业硕士研究生入学考试的科目之一。随着现代通信技术的发展和深入,计算机科学与技术、自动控制以及光电子等专业也纷纷开设通信原理课程。“通信原理”课程涉及概率与统计、随机过程、信号与系统分析、数字电路、模拟电路、通信电路等多门先修的课程,具有理论性强、知识面广的特点。随着知识的不断膨胀和更新,学习者的压力也越来越大。如何花费较少的时间获得较多的知识,是一个值得探讨的问题。任何一个层次的学习,都应以学习者为主体。一本合适的教材不仅要有明确而具体的目标,还要立足于读者的基础和需求,按照一定的认知规律引导读者循序渐进的学习知识。作为一门专业基础课,通信原理是学习其他后续专业课程的基础,因此学好通信原理课程对于专业学习来说具有非常重要的意义。

笔者基于“通信原理”的专业基础课程的思想出发,同时考虑到大学生的基础和学习需求,教材在内容的安排上和知识点的组织方面做了相应的调整。目的是培养学生掌握通信基础背景和通信的基本理论知识,便于在相关领域中应用通信原理知识及技术解决实际问题。

为此,我们根据多年的教学反馈,考虑到电子信息类各专业学生的基础和学习需求的不同,从知识的应用角度出发,教材做了如下调整。

(1) 学生对信号的能量及功率密度的理解比较困难,为此,在内容的安排上增加了确定信号的分析。因为随机过程的知识比较难理解,弱化了随机过程理论的推导,尽量用确定信号分析结论来类比随机过程的分析结论。

(2) 为了加强学生对通信系统的基本理论和背景的学习,在分析通信系统信噪比的环节方面,我们强化模拟通信系统、数字基带系统、基本数字调制系统的信噪比分析,弱化了其他信噪比环节的理论推导,如多进制数字调制、PCM、DPCM 等方面的信噪比分析被略掉,只给出定性的分析。

(3) 许多专业的学生缺乏随机过程及统计方面知识,为此,我们将最佳接收、伪随机序列等相关知识穿插在某些章节讲解,而不再以独立的章节出现。例如,最佳接收思想放在第5章频带传输一章讲解;伪随机序列以 m 序列为例安排在第4章基带传输系统中,结合扰码及解扰码进行讲解。

(4) 在对通信系统基本知识和基本理论讲解的基础上,对某些比较新的通信技术也给予了足够的重视。如正交频分复用 OFDM、网格编码调制、扩频技术、多址技术等也进行了较详细的讲解。

所做的这些调整,目的是加强学生对通信系统基本知识和基本理论的掌握,强调实际应用,避免较复杂的数学理论推导。

本书共分 10 章。第 1 章绪论,讨论通信系统的组成、分类、通信方式,信息及其度量,通信系统的主要性能指标等;第 2 章信号分析与信道,讨论确定信号及随机信号的特点,信道的分类,分析信道对信号的影响,信道中的加性噪声、信道容量等;第 3 章模拟调制系统,主要分析线性模拟调制系统及非线性模拟调制系统的原理及抗噪声性能,频分复用及多级调制;第 4 章数字信号的基带传输系统,讨论数字基带信号的波形、码形及功率谱密度,能实现无码间串扰传输的几种系统,无码间串扰传输系统的抗噪声性能、眼图、时域均衡器等;第 5 章数字信号的频带传输系统,讨论二进制数字调制原理及抗噪声性能,多进制数字调制系统,匹配滤波原理等;第 6 章模拟信号的数字传输,主要讨论抽样、量化、各种信源编码及时分复用;第 7 章同步原理,讨论载波同步、位同步、群同步的方法、性能及对解调的影响;第 8 章差错控制编码,讨论差错控制编码原理、各种差错控制编码方法;第 9 章先进的数字带通调制和解调,主要讨论正交振幅调制 QAM、最小频移键控 MSK、正交频分复用 OFDM、扩频技术等;第 10 章信道复用与通信网,主要讨论多址通信,按复用方式分,主要有频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)、码分多址(CDMA)等,通信网,主要讨论电话通信网、计算机通信网、数据通信网、综合业务数字网等。

每章后面附有习题,书末附有常用三角公式、傅里叶变换、误差函数、互补误差函数等。

本书可作为高等院校通信、电子信息等相关专业本科生的教材,也可作为相关专业和通信工程技术人员的参考书。

本书的第 3、4、5、6、9 章由王素珍、汪春梅编写;第 7 章由贺英、王素珍编写;第 8、10 章由贺英、李改梅编写;第 1、2 章由王素珍、王涛编写,同时在参考资料的收集方面王涛、李改梅也做了大量工作;全书由王素珍修改定稿。为了便于各校的教学工作,本书的编者还做了相应的教学课件,需要者可从北京邮电大学出版社网站下载。

鉴于编者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者



CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 通信系统	1
1.2 信息及其度量	5
1.3 通信系统主要性能指标	8
1.4 通信系统的分类及通信方式	9
习题	13
第 2 章 信号与分析	14
2.1 确定信号的分析	14
2.2 随机变量分析	23
2.3 随机过程及其统计特性	26
2.4 平稳随机过程	28
2.5 高斯随机过程	31
2.6 通信系统中常见的几种高斯随机信号	33
2.7 平稳随机过程通过线性系统	37
2.8 信道	39
2.8.1 信道的分类	40
2.8.2 信道的容量	42
2.8.3 有线信道	43
2.8.4 无线信道	44
习题	45
第 3 章 模拟调制系统	47
3.1 模拟线性调制	47
3.1.1 模拟线性调制系统	47

3.1.2	常规调幅(AM)	48
3.1.3	抑制载波双边带调幅(DSB-SC)	50
3.1.4	单边带调制(SSB)	52
3.1.5	残留边带调制(VSB)	56
3.2	线性调制系统的抗噪声性能	58
3.2.1	线性调制系统的抗噪声性能分析模型	58
3.2.2	双边带调制 DSB 系统抗噪声性能分析	59
3.2.3	单边带调制 SSB 系统抗噪声性能分析	60
3.2.4	常规调幅系统抗噪声性能分析	62
3.3	非线性调制原理	65
3.3.1	角调制基本概念	65
3.3.2	窄带调频	67
3.3.3	宽带调频	69
3.3.4	调频信号的产生	73
3.3.5	调频信号的解调	76
3.4	调频系统的抗噪声性能	78
3.5	频分复用	82
3.6	模拟通信系统的应用举例	84
	习题	88
第 4 章 数字信号的基带传输系统		92
4.1	数字基带信号的码型	92
4.1.1	数字基带信源码	92
4.1.2	基带传输的常用码型	94
4.2	数字基带信号的功率谱特性	97
4.3	基带系统无码间串扰的传输条件	103
4.3.1	数字基带传输系统模型	103
4.3.2	数字基带无码间串扰的传输特性	106
4.3.3	常见满足无码间串扰传输条件的基带系统	108
4.4	部分响应基带系统	112
4.4.1	第 1 类部分响应系统特性及其对应的传输波形	112
4.4.2	第 1 类部分响应系统传输波形的实现	114
4.4.3	部分响应系统的一般形式	116
4.5	基带系统的抗噪声性能	119
4.5.1	传输双极性基带信号的误码率	120
4.5.2	传输单极性基带信号的误码率	121
4.6	眼图	122

4.7	时域均衡器	123
4.8	扰码和解扰	128
4.8.1	m 序列的产生和性质	128
4.8.2	扰码和解扰原理	132
	习题	134
第 5 章 正弦载波数字调制系统		137
5.1	二进制振幅键控 (2ASK)	139
5.2	二进制移频键控 (2FSK)	142
5.3	二进制相移键控 (2PSK)	147
5.4	二进制差分相移键控 (2DPSK)	151
5.5	二进制数字调制系统的抗噪声性能	154
5.5.1	2ASK 系统的抗噪声性能	154
5.5.2	二进制移频键控 (2FSK) 系统的噪声分析	159
5.5.3	2PSK 和 2DPSK 系统的噪声分析	163
5.5.4	二进制数字调制系统的性能比较	165
5.6	匹配滤波器	166
5.7	相关接收机	172
5.8	多进制数字调制系统	174
5.8.1	多进制数字振幅调制的原理 (MASK)	175
5.8.2	多进制数字频率调制的原理 (MFSK)	176
5.8.3	多进制数字相位调制的原理 (MPSK)	178
5.8.4	多进制差分相位调制的原理 (MDPSK)	182
	习题	191
第 6 章 模拟信号的数字传输		193
6.1	采样定理	194
6.1.1	理想采样	194
6.1.2	实际采样	196
6.1.3	带通采样定理	199
6.2	采样信号的量化	200
6.2.1	量化的概念	200
6.2.2	均匀量化	201
6.2.3	非均匀量化	203
6.3	脉冲编码调制 (PCM)	208
6.3.1	PCM 通信系统	208
6.3.2	PCM 编码	209

6.4	简单增量调制(ΔM)	212
6.4.1	简单增量调制的概念	213
6.4.2	简单增量调制的原理	213
6.4.3	简单增量调制的量化噪声	215
6.5	差分脉冲编码调制(DPCM)	216
6.5.1	差分脉冲编码调制的概念	216
6.5.2	差分脉冲编码调制系统	217
6.6	时分复用和复接(TDM)	218
6.6.1	时分多路复用的概念	218
6.6.2	PCM基群帧结构	219
6.6.3	准同步数字系列(PDH)	221
6.6.4	同步数字体系(SDH)	223
	习题	224
第7章	同步原理	226
7.1	引言	226
7.2	载波同步	227
7.2.1	直接法提取同步信号	228
7.2.2	插入导频法	230
7.2.3	载波相位误差对解调性能的影响	231
7.3	位同步	232
7.3.1	插入导频法	232
7.3.2	自同步法	233
7.4	群同步	237
7.4.1	群同步码组的传递	237
7.4.2	接收端提取集中插入同步码组的方法	239
7.4.3	接收端提取分散插入同步码的方法	241
7.5	网同步	243
	习题	245
第8章	差错控制编码	247
8.1	差错控制的基本原理	247
8.1.1	码重和码距	248
8.1.2	编码效率	249
8.1.3	最小距离 d_0 与检错纠错能力的关系	249
8.1.4	常用的简单编码	250
8.2	线性分组码	252

8.3	循环码	256
8.3.1	循环码的生成多项式	257
8.3.2	循环码的监督矩阵	259
8.3.3	循环码的编码及解码	260
8.4	卷积码	262
8.4.1	卷积码概述	262
8.4.2	卷积码的编码原理	263
8.4.3	卷积码的图解表示	264
8.4.4	卷积码的译码	267
8.5	网格编码调制(TAM)	269
	习题	270
第9章	先进的数字带通调制与解调	272
9.1	正交振幅调制(QAM)	272
9.1.1	正交振幅调制信号的表示	272
9.1.2	16QAM 调制与解调	273
9.1.3	16QAM 与 16PSK 信号的比较	274
9.2	最小频移键控及高斯最小频移键控	275
9.2.1	正交 2FSK 信号的最小频率间隔	276
9.2.2	MSK 信号的基本原理	277
9.2.3	MSK 信号的正交表示法	280
9.2.4	MSK 信号的调制与解调	281
9.2.5	MSK 信号的功率谱	283
9.2.6	GMSK 信号	284
9.3	正交频分复用(OFDM)	285
9.3.1	概 述	285
9.3.2	OFDM 的正交性	286
9.3.3	OFDM 的基本原理	286
9.3.4	OFDM 信号的实现	288
9.4	扩展频谱技术	290
9.4.1	概 述	290
9.4.2	直接序列扩谱	290
9.4.3	跳频扩谱	292
	习题	293
第10章	信道复用与通信网	294
10.1	引言	294

10.2	频分复用(FDM)	294
10.3	时分复用(TDM)	295
10.4	码分复用(CDM)	296
10.5	多址通信方式	298
10.5.1	频分多址方式(FDMA)	299
10.5.2	时分多址方式(TDMA)	300
10.5.3	码分多址方式(CDMA)	300
10.6	CDMA 蜂窝移动通信系统	301
10.6.1	CDMA 移动通信系统分类	301
10.6.2	CDMA 移动通信系统的特点	302
10.6.3	CDMA 移动通信系统的关键技术	302
10.7	通信网	303
10.7.1	通信网概述	303
10.7.2	电话网	304
10.7.3	计算机网络	307
10.7.4	IP 电话	308
	习题	311
附录 1	常用三角公式	312
附录 2	Q 函数表和误差函数表	313
附录 3	第一类贝塞尔函数表	317
	缩写词表	319



绪 论

消息是物质或精神状态的一种反映。例如,话音、文字、音乐、数据、图片或图像等都是消息。人们接收消息时,所关心的是消息之中包含的有效内容,即信息。通信就是进行信息的时空转移,即把消息从一方传输到另一方。所以通信就是信息的传输或消息的传输。

电通信的历史并不长,至今只有 170 年的时间。一般把 1837 年莫尔斯发明的有线电报标志着人类开始使用电通信,尽管那时的通信距离只有 70 km。1876 年贝尔发明的有线电话被称为现代通信的开端。1918 年,调幅无线广播、超外差接收机问世;1936 年,商业电视广播开播;……伴随着科学技术的发展,电信技术也以一日千里的速度发展。先后形成了脉冲编码理论、信息论、通信统计理论等重要的理论体系。而自 20 世纪 60 年代以来,由于晶体管和集成电路的问世,特别是大规模和超大规模集成电路的发展,不仅使模拟通信电路获得了高速发展,而且促成了具有广阔前景的数字通信的形成和发展。在通信种类上,相继出现了脉冲编码通信、微波通信、卫星通信、光纤通信、计算通信等。计算机和通信技术的密切结合,使通信的对象突破了人与人的范畴,实现了人与机器或机器与机器之间的通信。

进入 20 世纪 80 年代以来,除了传统的电话网以外,各种先进的通信网蓬勃发展。例如,移动通信网、综合业务数字网、公用数据网、智能网、宽带交换网等等。先进的通信技术使通信不断地朝着综合化、宽带化、自动化和智能化方向发展,为人类提供更方便快捷的服务。

1.1 通信系统

1. 通信系统的组成

通信的目的是传递消息,例如把地点 A 的消息传输到地点 B,或者把地点 A 和地点 B 的消息双向传输。消息的表达形式有语言、文字、图像、数据等。

实现通信的方式很多。随着现代科学技术的发展,目前使用最广泛的方式是电通信方式,即用电信号携带所要传递的消息,然后经过各种电信道进行传输,达到通信的目的。之所以使用电通信方式是因为这种方式能使消息几乎在任意的通信距离上实现迅速而又准确的传递。如今,在自然科学领域涉及“通信”这一术语时,一般指的就是电通信。就广泛的意义上来说,光通信也属于电通信,因为光也是一种电磁波。

电信号由一地向另一地传输需要通过媒质。按媒质的不同通信方式可分为两大类:一类称为有线通信,另一类称为无线通信。有线通信是用导线作为传输媒质的通信方式,这里的导线可以是架空明线、各种电缆、波导以及光纤。例如图 1-1 所示的是普通的有线长途电话系统,图中,电话机完成话音信号与音频电信号之间的变换,载波机完成音频电信号与高频电信号之间的变换。两地的载波机之间用电缆连接。无线通信则不需要架设导线,而是利用无线电波在空间的传播来传递消息。例如图 1-2 所示的是移动电话系统,图中,各基站与移动交换局用有线或无线相连,各基站与移动电话之间用无线方式进行通信联络。移动电话把电话信号转换成相应的高频电磁波,通过天线发往基站。同理,基站也通过天线将信号发往移动电话,最终实现移动电话与其他电话之间的通信。

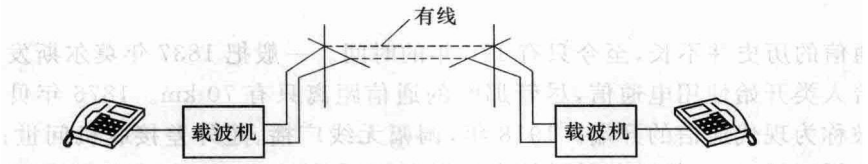


图 1-1 有线载波电话系统示意图

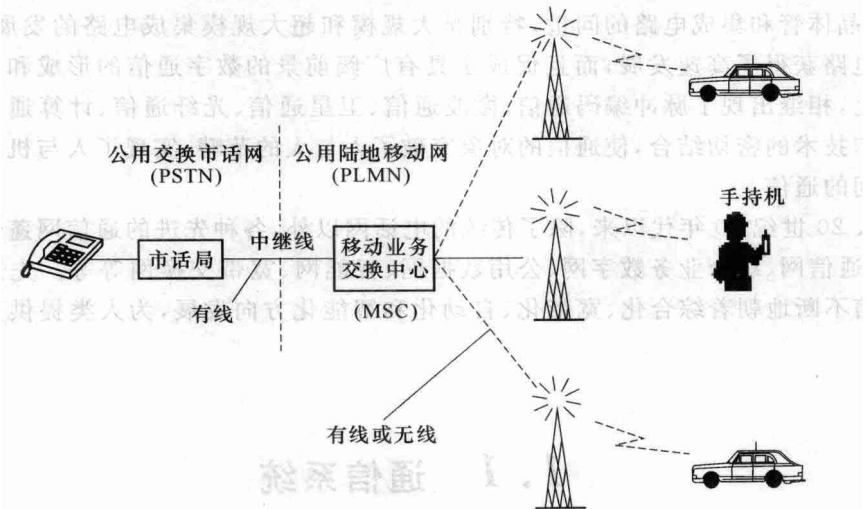


图 1-2 移动电话系统示意图

无论是有线通信还是无线通信,为了实现消息的传递和交换,都需要一定的技术设备和传输介质。为完成通信任务所需要的一切技术设备和传输介质所构成的总体称为通信系统。通信系统的一般模型如图 1-3 所示。图中,信源即原始电信号的来源,它的作用是将原

始消息转换为相应的电信号。这样的电信号通常称为消息信号或基带信号。常用的信源有电话机的话筒、摄像机、传真机等。为了传输基带信号,发送设备对基带信号进行各种处理和变换,以使它适合于在信道中传输。这些处理和变换通常包括调制、放大和滤波等。在发送设备和接收设备之间用于传输信号的媒质称为信道。在接收端,接收设备的功能与发送设备的相反,其作用是对接收信号进行必要的处理和变换,以便恢复出相应的基带信号。受信者的作用是将恢复出来的原始电信号转换成相应的消息,例如电话机的听筒将音频电信号转换成声音,提供给最终的消息接收对象。图 1-3 中的噪声源,是信道中的噪声以及分散在通信系统其他各处噪声的集中表示。

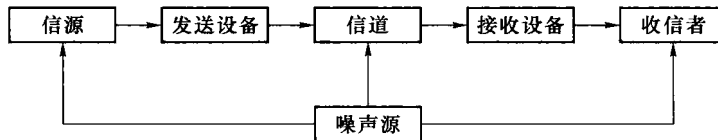


图 1-3 通信系统的一般模型

图 1-3 概括地描述了通信系统的组成,它反映了通信系统的共性,通常把它称为通信系统的一般模型。根据所要研究的对象和所关心问题的不同,还要使用不同形式的较具体的通信系统。

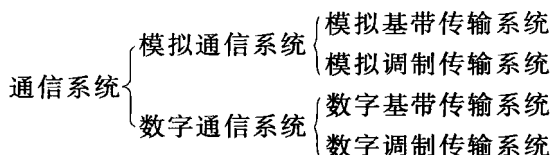
2. 模拟通信与数字通信系统模型

通信系统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可将信号分为两类,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 A/D 变换,然后就可用数字方式进行传输,在接收端再进行相反的变换,即 D/A 变换,以还原出模拟信号,这便是模拟信号的数字传输。

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,也使用基带传输的方式。

综合以上情况,通信系统的分类可表示为



模拟通信系统的模型方框图如图 1-4 所示。对应于图 1-3 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。同样接收设备只画了一个解调器。这样,图 1-4 就是一个最简化的模拟通信系统模型。

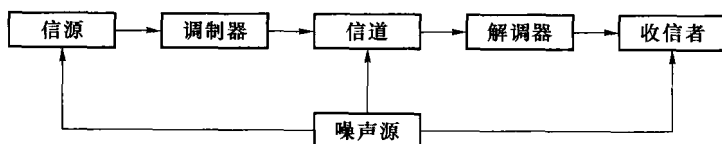


图 1-4 模拟通信系统模型

数字通信系统是利用离散的数字信号来传递信息的系统,数字通信系统模型如图 1-5 所示。这里的发送设备包括信源编码、信道编码和调制三个部分。信源编码是对模拟信号进行编码,得到相应的数字信号;信道编码是为了克服数字信号在信道传输时,有噪声、衰落以及人为引起的差错等。信道编码器将传输的信息码元按一定的规则加入监控码元,接收端的信道译码器按照相应的逆规则进行解码,从中发现错误或纠正错误,提高通信系统的抗干扰能力。数字调制是把传输的数字序列的频谱搬移到适合在信道中传输的频带上。基本的数字调制方式有振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)、绝对相移键控(PSK)、相对(差分)相移键控(DPSK)。在接收端可以采用相干解调或非相干解调还原数字序列。为了保密通信,给被传输的数字序列加上密码,即扰乱,这个过程称为加密。在接收端利用相应的逆规则对收到的数字序列进行解密,恢复原来的信息。

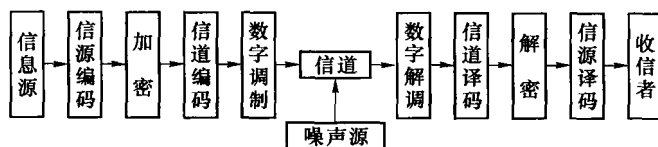


图 1-5 数字通信系统模型

模拟和数字通信的应用都很广泛,尤其是数字通信已成为现代通信技术的主流。与模拟通信相比,数字通信有以下优点。

(1) 数字传输的抗噪声(或干扰)的能力强,尤其在中继时,数字信号还可以再生而消除噪声的积累,而模拟通信则会把噪声干扰和信号一起放大,增大噪声干扰。

(2) 传输中的差错可以设法控制,不但可以发现而且还能改正,因而大大提高了传输质量。

(3) 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。

(4) 数字信息易于加密且保密性强。

(5) 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,数字设备越来越易于制造,而且成本低、体积小、可靠性高。

(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。但是数字通信也有不足之处,就是目前它比模拟通信占据更多的频带。比如一路模拟电话通常只占用 4 kHz 带宽,但一路数字电话可能占据几十千赫兹带宽,可以认为数字通信的许

多优点是以信号带宽为代价换取的。

1.2 信息及其度量

1. 信息量的定义

信息一词在概念上与消息的意义相似,但它的含义却更普遍化、抽象化。信息可被理解为消息中包含的有意义的内容。这就是说,不同形式的消息,可以包含相同的信息。例如,分别用话音和文字发送的天气预报,所含信息内容相同。如同运输货物多少采用“货运量”来衡量一样,传输信息的多少使用“信息量”去衡量。

消息是多种多样的。因此度量消息中所含的信息量的方法,必须能够用来度量任何消息的信息量,而与消息种类无关。另外,消息中所含信息量的多少也应与消息的重要程度无关。

在一切有意义的通信中,虽然消息的传递意味着信息的传递,但对于接收者而言,某些消息比另外一些消息却含有更多的信息。例如,若一方告诉另一方一件非常可能发生的事件:“今年冬天的气候要比去年冬天的更冷些”,比起告诉另一方一件很不可能发生的事件:“今年冬天的气候将与去年夏天的一样热”来说,前一消息包含的信息显然要比后者少些。因为在接收者看来,前一事件很可能发生,不足为奇,但后一事件却极难发生,听后使人惊奇。这表明消息确实有量值的意义。而且可以看出,对接收者来说,事件越不可能,越是使人感到意外和惊奇,信息量就越大。

概率论告诉人们,事件的不确定程度,可以用其出现的概率来描述。亦即事件出现的可能性越小,则概率就越小;反之,则概率就越大。据于这种认识,消息中的信息量与消息发生的概率紧密相关,消息出现的概率越小,则消息中包含的信息量就越大。如果事件是必然的(概率为1),则它传递的信息量应为零;如果事件是不可能的(概率为0),则它将有无穷的信息量。如果得到的不是由一个事件构成而是由若干个独立事件构成的消息,那么这时得到的总的信息量,就是若干个独立事件的信息量的总和。

综上所述可以看出,为了计算信息量,消息中所含的信息量 I 与消息 x 出现的概率 $P(x)$ 间的关系如下

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

式(1-1)表示消息中所含的信息量 I 是出现该消息的概率 $P(x)$ 的函数;同时也反映了消息出现概率越小,它所含的信息量越大,反之信息量越小,且当 $P(x)=1$ 时, $I=0$ 。

如果一个消息由若干个互相独立事件构成,则该消息所含的总信息量等于各独立事件信息量的和,即

$$\begin{aligned} I &= I[P(x_1)P(x_2)\cdots P(x_n)] = -\log_a P(x_1) - \log_a P(x_2) - \cdots - \log_a P(x_n) \\ &= -\sum_{i=1}^n \log_a P(x_i) \end{aligned} \quad (1-2)$$

信息量单位的确定取决于式(1-1)中对数底 a 的确定。如果取对数的底 $a=2$, 则信息量的单位为比特(bit); 如果取 e 为对数的底, 则信息量的单位为奈特(nit); 若取 10 为底, 则信息量的单位称为十进制单位, 或叫哈特莱。上述三种单位的使用场合, 应根据计算及使用的方便来决定。通常广泛使用的单位为比特。

2. 等概率离散消息的信息量

下面先来讨论等概率出现的离散消息的度量。若需要传递的离散消息是在 M 个消息之中独立地选择一个, 且认为每一个消息的出现概率是相同的。则任一个消息的概率为

$$P(x_1) = P(x_2) = \dots = P(x_M) = 1/M$$

由式(1-1)可知, M 个等概率的离散消息中, 任一个消息的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{\frac{1}{M}} = \log_2 M \quad (1-3)$$

在实际通信系统中, 传递 M 个离散消息等价于传递 M 个状态, M 个状态又可用 M 进制的波形来表现。显然, 为了传递 M 个离散状态中任一个消息, 只需传送 M 进制的任一个波形。 M 进制中最简单的情况是 $M=2$, 即二进制, 由两个状态构成的消息。如高电平为一个状态, 低电平为另一个状态。在等概率出现时, 任意一个消息的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{\frac{1}{2}} = \log_2 2 = 1 \text{ bit} \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知, 一个二进制波形的信息量恰是 1bit。在工程应用中, 习惯把一个二进制码元称作 1 比特码元。同理传递等概率的 4 个离散状态采用四进制波形, 每一个波形的信息量为 2bit; 传递等概率的 8 个离散状态采用八进制波形, 每一个波形的信息量为 3bit。图 1-6 是代表 4 个状态的四进制波形图, 由图可知 4 个电平中的任一个波形的信息量为 2bit。

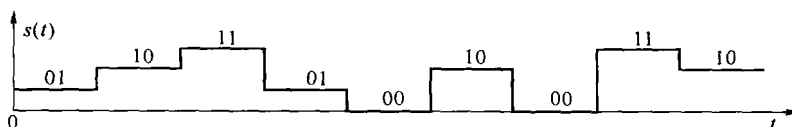


图 1-6 四进制电平信号

若 M 是 2 的整幂次, 比如 $M=2^k$ ($k=1, 2, 3, \dots$), 则等概率的任一个波形的信息量为

$$I = \log_2 M = \log_2 2^k = k \quad (1-5)$$

式(1-5)表明, M ($M=2^k$) 进制的每一波形包含的信息量, 恰好是二进制每一波形包含信息量的 k 倍。

但应强调指出, 上述结论仅在每一波形独立等概率传送的条件下才是成立的。

例 1-1 已知二元离散信源只有“0”、“1”两种符号, 若“0”出现的概率为 $1/3$, 求出现“1”的信息量。