

现代通信系统原理

张孝强 主编

人民邮电出版社



登记证号(京)143号

内 容 提 要

本书主要介绍现代通信所涉及的基础理论、通信中常用的信号与噪声分析、通信系统的构成、原理及性能分析。在介绍通信系统时以现代常用的及正在发展的数字通信系统为主。每章附有小结、思考题和习题。

本书可用作高等理工院校通信类专业本科生的教材,也可作为有关专业硕士研究生及从事通信工作的技术人员参考。

0007/15

现代通信系统原理

张孝强 主编

张孝强 董伊令 朱剑 编

责任编辑:荆显英

*

人民邮电出版社出版发行

北京市东长安街27号

南京邮电学院印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 1994年1月 第一版

印张:24.5 页数:196 1994年1月 南京第一次印刷

字数:607千字 印数:1-2000册

ISBN7-115-05277-8/TN·725

定价:19.50元

0010120

前 言

本书是根据电信工程、多路通信、无线电工程、计算机通信、电磁场与微波技术、图像处理与传输等专业近年来的进展和邮电高等院校教学大纲的要求,以及作者多年来从事教学、科研工作的经验编写的。

本书主要介绍现代通信系统所涉及的基础理论、通信中常用的信号与噪声分析、通信系统的构成、原理及性能分析。在介绍通信系统时以现代常用的及正在发展的数字通信系统为主。

为便于读者学习,本书的阐述力求条理清楚、深入浅出,除应用必要的数学工具外,尽量从物理概念上把问题解释清楚。此外,每章附有小结、思考题和习题。

本书可作为通信类有关专业的专业基础教科书,也可供从事通信工作的工程技术人员参考。

本书由张孝强主编;第1~3,5~7,10章由张孝强编写,第8、9章由董伊令编写,第4章及各章小结、思考题、习题以及附录由朱剑编写。

在本书编写过程中,得到了南京邮电学院电信工程系通信系统教研室同仁的鼓励与指导,并参考了国内外出版的有关著作的内容,在此对他们表示衷心的感谢。

限于作者水平,本书错误及疏漏之处,恳望读者赐教、指正。

作 者

1993年10月

目 录

第1章 绪 论

1.1 通信的概念	1
1.2 通信系统的基本模型	1
1.3 通信发展简史	2
1.4 两大通信系统:模拟通信系统和数字通信系统.....	4
1.5 通信系统性能的衡量	5
1.6 本课程的结构	6
小 结.....	7
习 题.....	8

第2章 确定信号及其通过线性系统

2.1 信号的频谱分析	9
2.1.1 信号的描述	9
2.1.2 正交函数与信号分解.....	11
2.1.3 周期信号的傅里叶级数表示.....	13
2.1.4 信号的傅里叶变换.....	16
2.1.5 傅里叶变换的性质.....	16
2.2 相关函数.....	18
2.2.1 相关函数的定义及其性质.....	18
2.2.2 相关定理.....	21
2.3 巴什伐尔定理,能量谱和功率谱	22
2.3.1 巴什伐尔定理.....	22
2.3.2 能量密度谱.....	23
2.3.3 功率密度谱.....	24
2.3.4 功率密度谱与自相关函数的关系.....	25
2.4 确定信号通过线性系统.....	26
2.4.1 信号无失真传输.....	27
2.4.2 理想低通滤波器.....	29
2.4.3 线性系统与相关函数的关系.....	31
2.5 高频限带信号及其通过线性系统.....	32
2.5.1 高频限带信号的描述.....	32
2.5.2 高频限带信号通过带通系统.....	34
2.6 解析信号及希尔伯特变换.....	37
2.6.1 实信号的解析表示法.....	37
2.6.2 希尔伯特变换.....	37

小 结	41
思考题	42
习 题	42
第 3 章 信道与噪声	
3.1 信道分类.....	47
3.1.1 有线信道和无线信道.....	47
3.1.2 调制信道和编码信道.....	48
3.1.3 恒参信道和变参信道.....	49
3.2 信道模型.....	50
3.3 信道噪声.....	52
3.3.1 加性噪声的来源.....	52
3.3.2 加性噪声的种类.....	54
3.4 随机过程和噪声分析.....	54
3.4.1 随机过程和样本函数.....	54
3.4.2 随机过程的统计特性.....	55
3.4.3 平稳随机过程.....	59
3.4.4 各态历经性.....	61
3.4.5 平稳随机过程的频谱特性.....	63
3.4.6 高斯过程和高斯噪声.....	65
3.4.7 限带白噪声.....	67
3.4.8 窄带随机过程和窄带高斯噪声.....	69
3.4.9 正弦信号加窄带高斯噪声.....	75
3.4.10 随机过程通过线性系统	79
3.4.11 随机过程通过乘法器	80
小 结	84
思考题	85
习 题	86
第 4 章 模拟幅度调制系统	
4.1 引 言.....	90
4.1.1 调制的目的.....	90
4.1.2 调制的分类.....	90
4.1.3 线性调制的一般模型.....	91
4.2 常规调幅(AM)	93
4.2.1 AM 信号的波形和频谱.....	93
4.2.2 AM 信号的功率分配和效率.....	95
4.3 抑载双边带调制(DSB/SC)	95
4.3.1 DSB 信号的波形和频谱	96
4.3.2 DSB 信号的功率分配	97
4.4 单边带调制(SSB)	97

4.4.1	产生SSB信号的滤波器法	97
4.4.2	产生SSB信号的相移法	99
4.5	残留边带调制(VSB)	101
4.5.1	用滤波器法产生VSB信号	101
4.5.2	VSB与SSB之间的关系——相移法	103
4.6	模拟调幅信号的相干解调	104
4.6.1	相干解调的一般模型及基本原理	104
4.6.2	AM信号的相干解调	106
4.6.3	DSB信号的相干解调	106
4.6.4	SSB信号的相干解调	107
4.6.5	VSB信号的相干解调	109
4.6.6	线性调幅信号相干解调中同步误差的影响	110
4.7	AM信号的包络解调	113
4.8	抑载已调信号载波重新插入法解调	115
4.9	模拟幅度调制系统相干解调的抗噪声性能	116
4.9.1	解调器抗噪声性能分析的数学模型	116
4.9.2	相干解调器的抗噪声性能	117
4.10	模拟幅度调制系统非相干解调的抗噪声性能	121
4.11	频分多路复用与模拟幅度调制的应用	124
4.11.1	频分多路复用	124
4.11.2	载波电话系统	125
4.11.3	广播电视	127
4.11.4	立体声广播	128
	小结	129
	思考题	131
	习题	131

第5章 角度调制系统

5.1	角度调制的基本概念	137
5.1.1	调相波(PM)的定义	138
5.1.2	调频波(FM)的定义	138
5.2	单音角度调制	139
5.2.1	单音相位调制	139
5.2.2	单音频率调制	140
5.3	窄带角度调制	141
5.3.1	窄带频率调制(NBFM)	141
5.3.2	窄带频率调制及解调方法	145
5.4	单音宽带调频	145
5.4.1	单音宽带调频信号的频谱	145
5.4.2	单音宽带调频信号的功率分布	148

5.5	多音调频	149
5.6	宽带频率调制方法	151
5.6.1	直接调频法	151
5.6.2	间接调频法	151
5.7	调频信号的非相干解调	153
5.8	调频系统的抗噪声性能	155
5.8.1	窄带调频信号相干解调的抗噪声性能	155
5.8.2	宽带调频信号非相干解调的抗噪声性能	157
5.9	调频系统的门限效应	160
5.10	调频的应用	161
5.10.1	调频广播	161
5.10.2	广播电视伴音	161
5.10.3	卫星通信中的频分多址	162
5.10.4	蜂窝式移动电话系统	162
	小 结	163
	思考题	165
	习 题	166
第 6 章 脉冲调制系统		
6.1	取样定理及实际取样方法	170
6.1.1	低通信号取样定理	171
6.1.2	自然取样和平顶取样	175
6.1.3	带通信号的取样	179
6.2	脉幅调制(PAM)	181
6.3	时分复用(TDM)的基本原理	183
6.3.1	时分复用原理	183
6.3.2	PAM 理想信道的带宽	185
6.4	脉幅调制系统的抗噪声性能	188
6.5	脉宽调制(PWM)系统与脉位调制(PPM)系统	191
	小 结	193
	思考题	193
	习 题	194
第 7 章 脉冲数字调制系统		
7.1	脉冲编码调制(PCM)系统	197
7.1.1	PCM 的基本原理	197
7.1.2	PCM 信号的时分多路复用	200
7.1.3	PCM 的噪声分析	202
7.1.4	压缩与扩张	206
7.1.5	信道噪声对 PCM 传输的影响	209
7.2	增量调制(ΔM)系统	210

7.2.1	增量调制的基本原理	211
7.2.2	增量调制的噪声分析	212
7.2.3	信道噪声对 ΔM 传输的影响	215
7.2.4	PCM 与 ΔM 调制方式的比较	216
7.3	自适应增量调制(A ΔM)	217
7.4	增量总和(Δ - Σ)调制	218
7.5	差分脉冲编码调制(DPCM)	219
7.6	自适应差分脉冲编码调制(ADPCM)	221
7.6.1	预测器及自适应预测器	222
7.6.2	自适应量化	225
7.6.3	32kb/s ADPCM 系统举例	225
	小 结	227
	思考题	229
	习 题	229
第 8 章 数字信号的基带传输系统		
8.1	数字基带传输系统及码型	232
8.1.1	数字基带传输系统	232
8.1.2	数字基带信号的码型	232
8.2	数字基带信号的功率密度谱	237
8.2.1	二进制随机脉冲序列的功率密度谱	237
8.2.2	一般随机数字基带信号的功率密度谱	239
8.3	数字基带传输系统无失真传输条件	241
8.3.1	基带传输系统模型	242
8.3.2	奈奎斯特第一准则: 取样值无失真传输	243
8.3.3	理想低通型传输网络无码间干扰的波形	245
8.3.4	具有升余弦滚降特性传输网络的无码间干扰的波形	245
8.3.5	奈奎斯特第二、第三准则	247
8.4	部分响应基带传输系统	249
8.4.1	部分响应波形	249
8.4.2	部分响应基带传输系统的相关编码与预编码	252
8.5	理想数字基带传输系统的抗噪声性能	255
8.6	多电平码基带传输的抗噪声性能	258
8.7	眼图	261
8.8	均衡	263
8.8.1	时域均衡原理	263
8.8.2	预置式均衡器	266
8.8.3	自适应均衡器	267
	小 结	268
	思考题	269

习 题.....	269
第 9 章 数字调制传输系统	
9.1 数字调制传输系统模型	274
9.2 幅移键控(ASK)传输系统	275
9.2.1 ASK 信号的产生及检测	275
9.2.2 ASK 信号非相干检测性能	276
9.2.3 ASK 信号相干检测性能	281
9.3 频移键控(FSK)传输系统	283
9.3.1 FSK 信号的产生及检测	283
9.3.2 FSK 信号非相干检测性能	286
9.3.3 FSK 信号相干检测性能	287
9.4 相移键控(PSK、DPSK)传输系统	288
9.4.1 PSK、DPSK 信号的产生	288
9.4.2 PSK 信号的检测及性能	291
9.4.3 DPSK 信号的检测及性能	293
9.4.4 二进制数字调制系统抗噪声性能比较	294
9.5 匹配滤波器及其在数字调制传输系统中的应用	297
9.5.1 匹配滤波器	297
9.5.2 数字调制传输系统中的匹配滤波器	302
9.6 多进制数字调制系统	309
9.6.1 多进制幅移键控(MASK)系统	309
9.6.2 多进制频移键控(MFSK)系统	311
9.6.3 多进制相移键控(MPSK)系统	312
9.6.4 多进制数字调制传输系统的性能	313
9.7 正交数字调制(QAM、QPSK、QDPSK)传输系统	315
9.7.1 正交幅度调制(QAM).....	315
9.7.2 正交相移键控(QPSK、QDPSK)	318
9.7.3 正交数字调制系统的性能比较	322
9.8 最小频移键控(MSK)系统	323
9.8.1 MSK 的基本原理.....	323
9.8.2 MSK 信号的产生和解调.....	325
9.8.3 MSK 信号的功率谱.....	327
9.8.4 MSK 传输系统的误码率性能.....	327
9.9 MSK 的改进.....	329
9.10 数字调制的比较.....	332
小 结.....	335
思考题.....	337
习 题.....	337
第 10 章 信息论引论	

10.1 引言	341
10.2 离散信源	342
10.2.1 离散信源的描述, 信息量	342
10.2.2 信源熵	343
10.2.3 有记忆离散信源	344
10.2.4 互信息	346
10.3 离散信道与信道容量	347
10.3.1 离散信道的数学描述及有关熵	347
10.3.2 信道容量	348
10.4 信源编码	349
10.4.1 信源编码的基本概念	349
10.4.2 最佳非定长编码的平均长度	350
10.4.3 最佳非定长编码法	351
10.5 信道编码	353
10.5.1 信道编码的一些基本定理和定义	353
10.5.2 一些常用的简单编码	355
10.6 连续消息的传输	359
10.6.1 连续消息的统计特性, 熵, 信息量	360
10.6.2 有噪声连续信道的信道容量	362
10.6.3 现有通信系统的比较及带宽与信噪比互换	364
小结	365
思考题	366
习题	366
附录	
1. 三角公式	370
2. 复数公式	370
3. 常用的傅里叶变换	371
4. 第一类贝塞尔函数 $J_n(x)$	373
5. 概率积分函数和误差函数	375

第1章 绪 论

本章介绍通信系统的一般概念及有关术语,使读者对通信系统的构成、模型、性能评价以及本课程要研究的主要内容有一个初步了解。

1.1 通信的概念

在人类社会中,人与人之间需要经常互通信息,交换消息。从一般意义上讲,这就是通信(communication)。消息(message)是进行通信双方协定的一种信息(information)表现形式。换句话说,信息是消息中对进行通信的收信者有意义的、本质的、使之能获得知识(knowledge)的那一部分内核。

为使消息能在传输媒质中传输,大多数情况下还要将消息变换成适合于传输媒质——信道(channel)中传输的信号。由此可见,通信是传输信号,信号载荷了消息,消息中存在着信息,因此,可以说通信的目的是传递信息,表现形式是传输信号。

最简单的通信方式的例子是人们面对面的交谈,在这里,讲话是表现消息的一种形式。一个人通过语言向对方表达自己的意志、思想、感情以使对方得到消息,从消息中获取信息。这里,讲话人即发信者是消息的来源,本质上是信息的来源,称为信源(source);话音通过空气传到对方,传递话音的空气这一媒质称为信道;对方即收信者听到此话音而获得消息,收信者是消息、本质上是信息的归宿,称为信宿(sink)。除话音通信外,古代以烽火台、金鼓、旌旗、信函等传递消息的方式都是一些简单、原始的通信方式。

随着人类社会的发展与进步,尤其是电的发现及应用于通信,消息的传递出现了许多新的方式,如电话、电报、传真、广播、电视等,这不但丰富了通信方式,还使消息可以在极长的距离上迅速、准确、方便、灵活、可靠地传递。因此,在现代社会里,应用电的方式传递消息的电通信几乎已成了“通信”的同义词。本课程中所研究的通信,实际上是指“电通信”,即“电信”(telecommunication)。

在电子计算机问世及参与通信后,特别是科学技术高度发达的今天,通信不再局限于人与人之间进行。例如,企业的生产数据、科研单位的科学实验数据、金融贸易单位的经济数据的相互传递等,这些通信或许在人与人之间,或许在人与机器之间,或许在机器与机器之间进行。此外,由于电子计算机及微电子技术的广泛应用,通信不但可以传递消息,还可以对消息进行采集、分析处理、存储转发、显示等。本课程中所介绍的通信系统主要是指消息传输的系统。因此,为研究及分析种种通信系统,有必要建立一个基本的通信系统模型。

1.2 通信系统的基本模型

实际上,无论哪一种通信系统都不可能将诸如语声、图像等消息直接送往信道进行消息的传递。在送往信道之前,必须把这些消息变换成适合于信道中传输的信号(这里指的是电信号,

下同)。这种变换通常由变换器来完成,如电话机中的送话器。信号经过信道的传输到达接收方,接收方需要将信号还原成收信者能接受的消息。由信号还原成相对应的消息,这一过程称为反变换,如电话机中的受话器就是用来完成反变换的。

变换还有第二层含义,即把信号再变换成适合于信道上传输的某一速率的信号,这时变换的目的是提高通信的效率或提高通信的可靠性。从广义上说,这种变换也是使消息更适合于在信道中传输。

现以图 1.1 所示的长途电话通信系统引导出通信系统的基本模型。

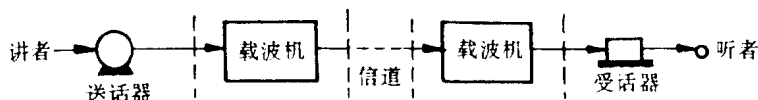


图 1.1 长途电话通信系统

这个系统由下列几部分组成:(1) 发信者,即信源;(2) 第一层含义上的变换器——电话机中的送话器;(3) 第二层含义上的变换器——发信方的载波机,包括调制器、放大器、滤波器等;(4) 信道;(5) 第二层意义上的反变换器——收信方的载波机,包括解调器、放大器、滤波器等;(6) 第一层意义上的反变换器——电话机中的受话器;(7) 收信者,即信宿。由于(2)、(3)两种变换器的目的都是为使消息更适合于在信道中传输,所以可归并为一个变换器;(5)、(6)两种反变换器的目的都是使信号还原为接收者可接受的消息,因此,也可归并为一个反变换器。于是,图 1.1 可简化为图 1.2。任何一种通信系统总含有信源、信宿、变换器、反变换器、信道等。因此,此图可作为不同通信系统共同的基本模型。图中还在信道上增加了噪声源。在实际的通信系统中,各个环节如载波机中的放大器、滤波器、调制解调器、外部线路等,都有可能进入干扰或噪声,这些噪声属于加性噪声,因此,通信系统中多处进入的干扰与噪声都被认为只从信道中进入,这样做并不影响我们对通信系统的研究分析,相反,可使通信系统的研究分析得到简化。

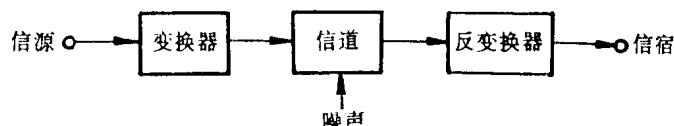


图 1.2 通信系统基本模型

1.3 通信发展简史

人类社会由低级向高级发展,同样,通信也是在人们长期实践中形成,并且随着科学技术的发展而不断地发展。

真正有实用意义的电通信起源于 19 世纪 30 年代,它以莫尔斯实践的有线电报通信方式为标志。当然,在此以前人们已经积累了有关电学和磁学的丰富知识,特别是 1800 年伏特发明了原始电池,为电通信的尝试奠定了基础。

19 世纪 70 年代,由于电磁感应理论的形成和发展,发明了电话,开始形成了有线电话通信。不久,人们对电磁波现象研究日趋深入,19 世纪末利用电磁波辐射原理发明了无线电报,

开辟了无线电通信发展的道路。

20 世纪初,电子管等器件开始出现,为无线电话提供了实现的基础。继后,电报和电话通信获得了迅速的发展,较高水平的有线通信及长波、中波和短波一类的无线通信得到广泛的应用。

从 20 世纪 20 年代开始,随着社会对通信提出更迫切、更高的要求以及科学技术的发展,相继出现了广播、传真以及电视等技术,大大丰富了通信的内容。近代由于微电子技术及计算机的发展,通信不仅存在于人—人之间,还可以在人一机、机—机之间进行。此外,最简单的通信只是一个发信者与一个收信者之间进行,而现代通信则需要在诸多的发信者中任意一个与诸多的收信者中任意一个之间,以及在一个发信者与多个收信者之间进行,如广播、电视;还出现了多个发信者与多个收信者之间通信,如会议电话、会议电视。这样,导致能进行上述通信的通信传输媒质由点—点发展成为一个日趋完善、复杂的通信网。

由于历史的原因及技术上的限制,长期以来,不同的通信业务需要由不同的通信网,如电话网、电报网、数据网、会议电视网等来完成,通信效率不高。因此,近来开发了一种称为综合业务网(ISN)的通信网,使不同的业务在同一个网中运行。在此基础上,对原始消息经过变换后的电信号进行数字化,使 ISN 发展成为综合业务数字网(ISDN)。ISDN 是目前通信技术的一个重要发展方向。

上述各种通信技术的发明与发展,提出了许多急待解决的通信理论问题。从 20 世纪 30 年代开始,人们逐步对通信实践中遇到的问题开展了深入的理论研究,从最早的调制理论为基础,先后形成了“信号与噪声理论”、“滤波与预测理论”、“香农信息论”、“纠错编码理论”以及“信源统计特性与信源编码理论”等等。这些理论的提出与发展不但丰富了理论的本身,推动了理论的深入研究,同时也大大促进了通信技术的发展,出现了许多新的通信方式。

通信技术的重大发现与发明如表 1.1 所示。

表 1.1 通信技术的重大发现与发明一览表

年 份	重 大 发 现 与 发 明
1838	莫尔斯发明有线电报
1876	贝尔发明电话
1896	马可尼发明无线电报
1906	发明真空管
1918	调幅无线电广播、超外差接收机问世
1925	频分多路——明线载波电话系统问世
1936	调频无线电广播问世
1937	脉冲编码调制原理问世
1938	电视问世
1948	晶体管问世,香农提出信息论
1950	时分多路复用电话系统问世
1956	敷设越洋电缆
1957	发射第一颗人造卫星
1958	发射第一颗通信卫星
1960	发明激光
1961	集成电路问世
1960~1970	彩色电视问世,高速数字计算机问世,数字通信迅速发展
1970~1980	大规模集成电路、程控数字交换机、光纤通信系统、微处理机等迅速发展
1980 以后	超大规模集成电路、长波长光纤通信系统、综合业务数字网迅速发展。 同步数字系列、智能网、个人通信及移动卫星通信系统等进入实用阶段

1.4 两大通信系统:模拟通信系统和数字通信系统

对众多的通信系统进行分类有不同的方法。按传输信号是否是在有形的信道中传输,可分为有线通信系统及无线通信系统;按通信网上承载的业务,可分为电话通信系统、电报通信系统和数据通信系统等。由于本课程对通信系统的分析、研究是根据传输信号的特征进行的,因此,我们根据传输信号的特征将通信系统归结为两大类:模拟通信系统和数字通信系统。

我们知道,除计算机等数据终端可以直接向信道送入电量外,众多的消息源发出的消息大多数是非电量,在消息送入信道前必须由变换器转换成电量——电信号。这些信号在时间和与状态取值上的变化与非电量的变化相一致,并且是连续变化的,如图 1.3 所示。这种在时间和状态取值上均为连续变化的消息源,称为连续信源,这种消息称为连续消息。同时,由于电信号与非电量的变化一致,我们称这种信号为模拟信号,并将传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统,如目前的载波电话通信系统等。

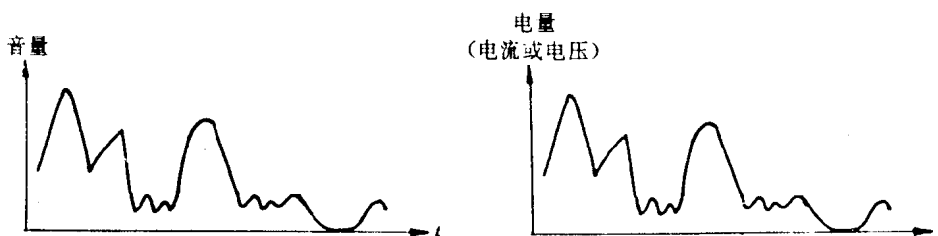


图 1.3 非电量消息与电信号的对应关系

计算机等数据终端本身是一种信源,它们是直接向信道送入电量,并且在时间和状态取值上是不连续的,或者说是离散的,这种信源称为离散信源,这种消息称为离散消息。同时,由于状态取值上是有限可数的,因而这种消息和信号分别称为数字消息及数字信号。传输数字信号的通信系统称为数字通信系统,如目前的分组交换数据通信系统等。

20 世纪 30 年代提出了模拟信号数字化理论。模拟信号经取样、量化、编码等模/数变换后,也可变换成信息不丢失的数字信号。在收信方经解码、滤波等数/模变换,将数字信号反变换成信息不丢失的模拟消息。传送这种模拟消息但实际上传输数字信号的通信系统也称为数字通信系统,如目前的脉冲编码调制(PCM)电话系统。

电报通信系统也是一种数字通信系统。它比电话的发明与应用要早,但长期以来发展缓慢,远远落后于模拟通信系统的发展。60 年代以来,半导体器件、大规模及超大规模集成电路日新月异的发展,给数字通信的装备提供了有利的条件。同时,由于现代计算机和各种数据处理机的广泛应用及计算机网络、计算机通信网的逐步形成,数据传输量急剧增加,对数字通信提出了更多、更高的要求,使数字通信的发展成为当前主要的和十分重要的通信方式。

数字通信所以较模拟通信更适应现代通信越来越高的要求,是由于它具有以下优点:

(1) 数字通信系统有较强的抗干扰能力,通过再生中继技术可以消除噪声的积累;利用信道编码技术,不但可以发现数字信号在传输过程中因干扰而产生的差错,而且可以纠正差错。所以数字通信是改善信息传输可靠性的一个重要途径。

(2) 便于使用现代计算技术及计算机来处理、存储、交换数字信号,使通信系统更加通用、灵活。

(3) 数字信号便于保密处理,易于实现保密通信。

(4) 由于数字集成电路特别是中、大规模集成电路技术日益成熟,设备易于设计制造,也更趋于小型化。

但是,数字通信也有它的不足之处。与模拟通信相比,占据的频带要宽,频带利用率较低。可以认为,数字通信的许多优点正是以牺牲系统频带为代价而获得的。

在本课程中,我们主要研究模拟通信系统和数字通信系统,包括系统构成、原理、信道噪声对传输信号的影响以及传输性能的分析等。

1.5 通信系统性能的衡量

在设计及评价一个通信系统时,必然涉及通信系统的性能指标问题。离开通信系统的性能指标,几乎无法设计通信系统或评价一个通信系统的优劣。然而,通信系统的性能指标是一个十分复杂的问题,它涉及信息传输的有效性、可靠性、适应性、经济性、标准以及维护使用等。如果把所有因素都考虑进去,则系统设计工作和系统性能的评价都将很难进行。但在繁多的各项实际要求中,起主导和决定作用的主要有两个,即通信系统传输信息的有效性和可靠性。有效性是通信系统传输信息在数量上的表征,可靠性是通信系统传输信息在质量上的表征。按照人们的愿望,通信系统信息传输的有效性和可靠性越高越好,然而,有效性和可靠性恰恰是通信系统中两个相互矛盾的问题,很难同时得到满足,通常只能依据实际要求取得相对的统一。例如,在满足一定的可靠性指标下,尽量提高信息的传输速度;或者在维持一定的有效性条件下,使信息传输质量尽可能提高。

模拟通信系统常用有效传输频带来衡量该系统的信息传输的有效性。如果某信道允许的传输频宽已知,它被每路信号的有效传输频带相除,就可确定信道允许同时传输的路数。这个数目越大,则该通信系统的信息传输有效性就越高。

模拟通信系统的信息传输可靠性常用系统输出端的信噪比来衡量。我们知道,在通信过程中,不可避免地有噪声混入系统。这样,接收方收到的不但有信号,而且有噪声,是信号与噪声的混合物。噪声相对于信号的大小,直接影响通信质量。因此,用系统输出端的信号平均功率与噪声的平均功率之比——信噪比来衡量该系统的信息传输可靠性。显然,信噪比高,通信质量好,反之质量就差。信噪比低到一定程度会使通信相当困难。对一般的电话通信,如果信噪比能在 40dB 以上,则可保证听清 95% 以上的通话内容。对一般的电视,如果信噪比在 40~60dB,就可将画面细节看清楚。系统输出端的信噪比与信道中噪声情况有关,与系统采用哪种调制方式也有密切关系。这部分内容将从第 4 章开始详细介绍。通过后面章节的学习,还可知道,通信系统的信息传输有效性的提高往往是由可靠性的下降换取的,反之亦然。这体现了信息传输有效性与可靠性之间的矛盾与统一。

对数字通信系统而言,其性能指标从信息传输的角度综合考虑,仍然是信息传输的有效性和可靠性。

对某一给定的系统,通常用码元传输率 R_B 来衡量系统的信息传输有效性。码元传输率定义为每秒传送的码元数目,单位为波特(Baud),简写为 B。以二进制数字通信系统为例,码元的状态只有“0”和“1”两种,例如每秒传输 2400 个码元,则该系统的码元传输率 $R_B = 2400\text{B}$ 。假定“0”和“1”码元在时间上是等长的,且等于 T 秒,则此时的码元传输率为 $R_B = 1/T$ 波特。

如果数字通信系统传输的不是二进制而是 N 进制码元,一般情况下都把它折算到二进制码元,再评价此系统的信息传输有效性。

设 N 进制的数字通信系统,每秒传 N 进制的码元数为 R_{NB} ,则折算到二进制,此系统的码元传输率 R_{2B} 为:

$$R_{2B} = R_{NB} \log_2 N \quad (\text{波特}) \quad (1.1)$$

上式表明了二进制码元传输率与 N 进制码元传输率的转换关系。码元传输率也称为传码率或数码率。

在数字通信中,传输速率还可以用信息传输率(又称传信率)来表述,记为 R_b 。它定义为每秒传送的信息量,单位是比特/秒(bit/s)。对传输二进制码元来说,当代表二进制码元的两种码元等概率产生时,每个二进制码元就会有 1bit 信息量,此时,传信率与传码率在数值上相等。但是多进制情况就不同,如 N 进制传码率 R_{NB} 与传信率 R_b 之间有如下数值关系:

$$R_b = R_{NB} \log_2 N \quad (\text{bit/s}) \quad (1.2)$$

由上式可见,若采用多进制码元传输,则可以提高传信率。

在数字通信中,信息传输可靠性用差错率来衡量。差错率也有两种表示方法:(1) 误码率;(2) 误信率(或称误比特率)。

误码率是指收方接收到的错误码元数在发方发出的总码元数中所占的比例,或者说是码元在传输系统中错误传输的概率,记为 P_c ,

$$P_c = \frac{\text{错误接收码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1.3)$$

误信率是指收方错误接收到的信息量即比特(bit)数在传输信息总量(总比特数)中所占的比例,或者说是所传码元的信息量在传输系统中被丢失的概率,记为 P_b ,

$$P_b = \frac{\text{错误接收比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1.4)$$

根据每一个二进制码元含有 1bit 信息量,可知在二进制情况下,误码率与误信率是相等的。

误码率或误信率的大小与信道噪声的大小及干扰的形式有关。本课程中在分析数字通信系统时,往往考虑普遍存在的高斯白噪声情况下的误码率。如果在模拟通信系统中传送数字信号,模拟通信系统信噪比较高时,其误码率就较低。数字通信系统在承载不同的业务时,其误码率的要求也不同。如脉冲编码调制(PCM)电话系统,误码率要求 $10^{-2} \sim 10^{-6}$;对传输数据的数字通信系统,误码率要求更高些。

1.6 本课程的结构

前面几节已初步介绍了通信系统的组成部分:信源、变换器、反变换器、信道、信宿等。

假定信源发出的消息都已变换成电信号,因此在本课程中我们首先研究信号。

载荷着信息的信号在时域上出现是非先验的,无法用一个时间函数确定地描述它,即它们具有随机性,但可用分析随机事件的工具进行描述和分析,如同分析具有随机性的噪声一样。这部分内容在第 3 章中介绍,但我们介绍的重点是噪声。

对可用确定的时间函数描述的信号,我们从时域、频域、功率或能量、通过线性系统等角度