

数字通信原理

缪民强 编

电子工业出版社

内 容 简 介

本书讲述数字通信的基本原理。内容包括：数字通信系统的模型、信道与干扰、模拟信号与数字信号的变换、数字基带系统、同步原理和数字调制与解调。

本书自成系统，重视理论与实际的联系，可作为高等学校工科无线电技术专业的教材，也可供通信工程技术人员参考。

数 字 通 信 原 理

缪民强 编

责任编辑 哈利

电子工业出版社出版

北京市万寿路

*

商务印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/16 印张：15.5 字数：358,000

1986年11月第1版 1986年11月第1次印刷

印数：00,001—10,000 定价：2.60元

统一书号：15290·325

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八三年初,由于各有关院校,特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合,共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要,反映国内外电子科学技术水平,达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求,在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上,电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》。中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会,作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二到一九八五年教材编审出版规划,列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量,适当增加教材品种的思想指导下,这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿,主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者,各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材,分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验,这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议,共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本书系高等学校工科电子类无线电技术专业统编教材。

全书共六章。第一章绪论,介绍通信系统的概念和数字通信系统的模型;第二章讨论信道与干扰,介绍了恒参信道和变参信道以及有关干扰和抗干扰的基本知识;第三章为模拟信号与数字信号之间的变换,着重讨论脉码调制和增量调制,并介绍了差分脉码调制的基本原理;第四章为数字基带系统,讨论了数字信号、数字信号的传输、最佳接收的理论和方法以及数字基带系统的最佳化问题;第五章为同步原理,重点讨论位同步和帧同步,并介绍了有关网同步的知识;第六章为数字调制和解调,讨论了振幅键控、相位键控和频率键控的工作原理,分析了它们的噪声性能,并进行了比较。各章附有3题

全书约需讲授80学时。如教学时数不够,可减缩本书目录中有“*”标记的章节或这些章节中的部分内容,可把教授时数压缩到60学时上下,不失其完整性。

本书由上海交通大学缪民强主编,西北电讯工程学院樊昌信担任主审。

本书编写过程中除了广泛参考各种书刊资料外,书中“同步原理”一章的部分内容选自国防工业出版社1980年出版的《通信原理》一书。

在这里,谨向在本书编审过程中给予热忱支持和帮助的同志们表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,望读者批评指正。

编者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 通信与通信系统	1
§ 1.2 通信发展简史	3
§ 1.3 模拟通信和数字通信	5
§ 1.4 通信系统的主要性能要求	6
1.4.1 通信系统的可靠性	6
1.4.2 通信系统的有效性	7
习题	9
第二章 信道与干扰	10
§ 2.1 信道概述	10
2.1.1 信道的定义	10
2.1.2 传输媒质的分类	11
2.1.3 信道模型	11
§ 2.2 恒参信道及其对信号传输的影响	14
2.2.1 恒参信道	14
2.2.2 无畸变条件	14
2.2.3 恒参信道的幅频特性	15
2.2.4 恒参信道的相频特性和群延迟特性	15
*§ 2.3 变参信道及其对信号传输的影响	17
2.3.1 变参信道	17
2.3.2 多径干涉	18
2.3.3 慢衰落与快衰落	20
2.3.4 选择性衰落	24
2.3.5 分集接收	26
§ 2.4 干扰及抗干扰的主要方法	28
2.4.1 干扰源	28
2.4.2 加性干扰的分类	28
2.4.3 通信系统抗干扰的基本途径	30
习题	31
第三章 模拟信号与数字信号的变换	32
§ 3.1 引言	32
§ 3.2 抽样、量化和编码的基本原理	32
3.2.1 模拟信号的抽样	32
3.2.2 模拟信号的量化	42
3.2.3 模拟信号的编码	51
§ 3.3 脉冲编码调制	53
3.3.1 脉冲调制概述	53
3.3.2 脉码调制系统	55
3.3.3 压缩与扩张	56

3.3.4	脉码调制编码器和译码器	64
3.3.5	脉码调制系统的噪声性能	69
3.3.6	差分脉冲编码调制	75
§ 3.4	增量调制	77
3.4.1	增量调制基本原理	77
3.4.2	增量调制系统的失真	79
3.4.3	增量调制系统的噪声性能	84
3.4.4	自适应增量调制	87
	习题	93
第四章	数字基带系统	96
§ 4.1	数字基带系统概述	96
4.1.1	引言	96
4.1.2	信源编码	97
4.1.3	信道编码	99
§ 4.2	数字基带信号	100
4.2.1	信息的数字表示法	100
4.2.2	几种常见基带信号的码型、频谱和变换	104
4.2.3	数字基带信号的波形	115
4.2.4	数字基带信号的功率谱	115
§ 4.3	数字基带信号的传输	120
4.3.1	基本公式	121
4.3.2	矩形脉冲通过理想低通滤波器	122
4.3.3	眼图	126
§ 4.4	数字信号的最佳接收	127
4.4.1	关于最佳接收的准则	127
4.4.2	数字基带传输系统的误码率	129
4.4.3	匹配滤波法接收	131
4.4.4	单个矩形脉冲的匹配滤波装置(积分-清除电路)	134
4.4.5	准匹配滤波器	135
4.4.6	相关接收法	136
*§ 4.5	基带系统的最佳化	141
4.5.1	引言	141
4.5.2	理想基带传输系统(矩形频谱传输特性)	141
4.5.3	升余弦频谱传输特性	145
4.5.4	部分响应系统和相关编码	147
4.5.5	均衡原理	153
	习题	158
第五章	同步原理	161
§ 5.1	引言	161
§ 5.2	位同步	161
5.2.1	位同步概述	161
5.2.2	数字锁相环的基本原理和实际电路举例	163
5.2.3	数字锁相法同步系统的性能和改善措施	168
5.2.4	位同步相位误差对性能的影响	170
*§ 5.3	伪噪声序列与扰码器	171

5.3.1	引言	171
5.3.2	噪声序列	172
5.3.3	伪噪声序列和 m 序列	173
5.3.4	自同步扰码系统	175
§ 5.4	帧同步	177
5.4.1	帧同步概述	177
5.4.2	几种帧同步方法介绍	177
5.4.3	帧同步的性能	183
5.4.4	帧同步的保护	186
*§ 5.5	网同步的基本概念	188
5.5.1	引言	188
5.5.2	主从同步法	189
5.5.3	相互同步法	189
5.5.4	码速调整法	189
5.5.5	水库法	191
	习题	191
第六章	数字调制与解调	193
§ 6.1	引言	193
§ 6.2	振幅键控系统	194
6.2.1	振幅键控信号及其形成	194
6.2.2	振幅键控信号的频谱	195
6.2.3	振幅键控信号的解调	197
6.2.4	二进制振幅键控系统的性能	199
6.2.5	振幅键控信号的最佳接收	205
§ 6.3	相位键控系统	208
6.3.1	绝对移相制与相对移相制	208
6.3.2	二进制相位键控系统的性能	213
6.3.3	多相制相位键控系统及其性能	218
6.3.4	变参信道中的相位键控系统	222
§ 6.4	频率键控系统	223
6.4.1	移频键控信号	223
6.4.2	移频键控信号的解调	230
6.4.3	二进制移频键控系统的性能	230
6.4.4	多进制移频键控系统及其性能	234
§ 6.5	数字调制系统性能的比较	237
	习题	238
	参考资料	246

第一章 绪 论

§ 1.1 通信与通信系统

人类在生产和社会活动中总是伴随着消息的传递,这种传递消息的过程称通信。消息是物质或精神状态的一种反映,它可通过语言(音响)、文字(数据)、图象(图片)等表述。

人类社会发展到现在已经创造了许多通信方法。例如古代的烽火台、金鼓、旌旗;近代的灯光信号、旗语;现代的电话、电报、传真、电视……等都是传递消息的方法。

借助“电”来传递消息的通信方式称电信。这种通信方式具有迅速、准确、可靠等特点,而且几乎不受时间、地点、距离等方面的限制,因而近百年来获得了飞速的发展和广泛的应用。如今,在自然科学中,“通信”一词几乎是“电信”的同义词了,本课程中所说的通信,就是指电信。

通信在军事上占有特别重要的地位,它与战争的胜负有着紧密的联系。因而,军事上的需要也是推动通信发展的重要因素。随着计算机、光纤以及宇航技术的发展,通信技术又有了新的飞跃。

电信系统中,消息的传递是通过电信号来实现的。

消息的发送者或接收者可以是人或者是各种自动机械。也就是说,通信可以在人与人之间进行,也可以在人与机器或机器与机器之间进行。电子计算机之间的通信属于后一种情况。

电信系统传递消息,首先把消息变换成电的信号,对方接收到以后,再把电信号复制为消息。

把消息变换成电信号是在发信设备(话筒、电键、电报机的机电部分或凿孔设备、光电元件、电子束管等)中实现的。依靠该设备中的各种元件,将非电消息变换成初级电信号(原始电信号,也称基带信号),然后送到电的通道中去传输。

传输电信号的通道称信道。信道可以有线的,也可以是无线的。在无线电通信系统中,通信是通过“载负”消息的电磁波的辐射来实现的。为了使这种辐射的振荡波载负消息,在无线电发射机中必须用反映消息的基带信号调制高频振荡。

需要调制的理由主要有下述两点:

第一,在无线电通信中,由于消息频谱中的重要部分(常常是全部频谱)通常包含着很低的、不能以尺寸合理而实用的天线实现有效发射的频谱,利用基带信号来调制高频振荡,就可以把频谱变换到高频范围,从而使“载负”消息的已调信号能有效辐射。同时,由于附带减小了消息所占的相对带宽,设备的设计问题大大简化,传输特性的均匀性也得到显著改善;

第二,为了区分在同一传输媒质中同时传输若干个频谱重迭的不同消息,也必须通过调制来实现。例如,借助于对不同消息分配不同高频范围的方法,就可同时通过同一信道来输送具有重迭基带频谱的不同消息。因此,调制就是将“载负”消息的频谱搬移到预定的高频

信道的过程。

为了进行调制,首先需要有一个高频载波。高频载波的主要属性是:(1)可以相当经济和有效地传输;(2)与其它载波可以区别和分开;(3)具有一些重要的参量,并能方便地改变这些参量。例如,一个正弦载波

$$e(t) = A \cos(2\pi ft + \phi)$$

可以从其振幅 A 、频率 f 或相位 ϕ 来辨别,因而对应地有振幅调制、频率调制或相位调制。多次调制也被广泛应用,特别是在多路通信系统中。在多次调制时,不同的消息以某种合适的形式调制相应的载波(称此为一次调制),然后以这些已调载波之和去调制一个最终载波。中间调制步骤所用的载波,通常称为副载波。副载波也可以是一个脉冲串,通过改变脉冲串的参量可实现一次调制。通常称此为脉冲调制。

接收到的含有消息的高频振荡,通过接收机转换成原始(基带)信号,这一过程称为解调。接收设备(耳机、印字电报机、磁带记录器、显光底片……等)在解调器输出的电信号的作用下,复制消息。

在简单的有线通信系统中,基带信号可以直接在线路中传输。但是,为了提高传输质量,特别是在多路通信系统中,也常常需要引入调制和解调过程。

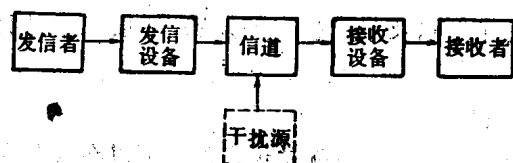


图 1.1 通信系统方框图

早期,信道多半是指传输媒介,而近期常把信道扩大到传输基带信号的整个系统,即从发射机的调制器到接收机的解调器之间的各单元全部包括在信道内。各种通信系统都可以用图 1.1 表示。

数字通信系统习惯于用图 1.2 表示。

实际上,接收端复制出的消息和所要传递的消息并不相同。信号在通信系统中的失真二者相异的原因。失真一方面是由于通信设备本身的不完善或出现故障引起的,另一方面则是由于干扰的作用。

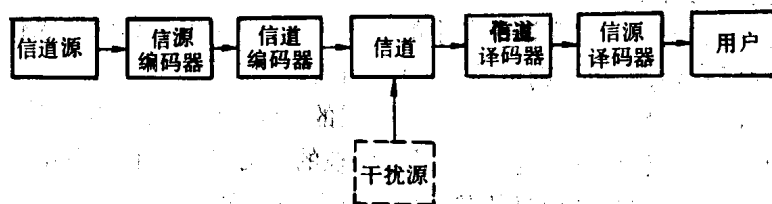


图 1.2 数字通信系统方框图

作用于通信系统的干扰是由各种干扰源产生的,主要有天电干扰、工业干扰、宇宙干扰、热辐射干扰、其它不相关电台发射的干扰以及设备内部的热噪声等。为了便于研究,常把所有干扰(包括内部噪声)看成是由一个接到信道的单一等效干扰源所产生的,也可以把它视为信道的一部分。

设备不完善而引起的失真,原则上可借助于合理的设计,使其降低到最小,而作用于通信系统的干扰则是无法消除的。随着电子技术的发展和设备的不断改善,干扰日益成为影响正常通信的主要因素,因而抗干扰也就上升为通信技术中主要问题之一。

在一定意义上说,通信的发展也就是抗干扰技术的发展。

出现在通信系统中的干扰与噪声，与工作频段有密切的关系，对于无线电通信系统来说，还明显地依赖于电波的传播特性。因而，不同的用途往往与不同的频段相对应。表 1.1 粗略地给出目前使用频段的分配。但根据具体情况和科学技术的不断发展还可以灵活运用。更进一步的频率分配在国际上由专门的组织——国际电信联盟 (ITU) 进行管理。在国内，则由国家无线电管理委员会协调各种用途的频率分配。

表 1.1 不同频段的典型用途

频 带	波 长	名 称*	典 型 用 途
30~300 Hz	$10^4 \sim 10^3$ km	特低频	水下通信; 电报
0.3~3 kHz	$10^3 \sim 10^2$ km	音频	数据终端; 实线电话
3~30 kHz	$10^2 \sim 10$ km	甚低频	远距离导航; 声纳; 电报; 电话; 频率标准
30~300 kHz	10~1 km	低频 (长波)	导航系统; 航标信号; 电报通信
0.3~3 MHz	$10^3 \sim 10^2$ m	中频 (中波)	商用调幅广播; 业余移动通信; 海军无线电通信; 测向; 遇险和呼救
3~30 MHz	$10^2 \sim 10$ m	高频 (短波)	国际定点通信; 军用通信; 商用调幅广播; 飞机和船通信; 岸与船通信
30~300 MHz	10~1 m	甚高频 (超短波)	电视广播; 调频广播; 车辆通信; 航空通信; 导航设备
0.3~3 GHz	$10^2 \sim 10$ cm	超高频 (分米波)	电视广播; 雷达; 遥控遥测; 导航; 卫星通信; 无线电测高
3~30 GHz	10~1 cm	极高频 (厘米波)	卫星通信; 空间通信; 微波接力; 机载雷达; 气象雷达; 陆地机动车
30~300 GHz	10~1 mm	特高频 (毫米波)	雷达着陆系统; 射电天文; 铁路设施; 科学研究

* 30 千赫以下也称超长波, 30 兆赫到 1000 兆赫也称超短波, 1000 兆赫以上也称微波。

§ 1.2 通信发展简史

电信是在人们积累了丰富的电学和磁学知识并在长期实践的基础上建立起来的。但作为一种有实用意义的通信手段，以十九世纪三十年代出现有线电报作为标志。那时的电报机当然是初级的，非常简单，通信速率也很低，但与当时采用的其它通信方式相比较，无疑是先进多了，可以称得上是通信技术的一次革命。随着电磁感应理论的形成和发展，十九世纪七十年代开始有了电话机，在此基础上建立了以金属导线作为传输媒质的简单的有线电话通信。很长时间以来，这种传递语言消息的电话通信和传递文字消息的电报通信，是电信的基本方式，至今仍广泛地采用着。

十九世纪六十年代，人们提出了有关电磁辐射的理论。八十年代人们发现了电磁波现

象,并证实了电磁辐射理论,从而导致十九世纪末期无线电报发送装置和接收装置的问世,这就给电信号插上了“翅膀”,可以自由地在太空飞驰,以光的速度把消息带到远方,为通信开辟了新的道路。

二十世纪初期发明了电子管,从而促进了无线电通信的发展。开始时,主要是利用中波和短波,并采用调幅制。不久,随着超外差接收技术的不断完善,出现了具有高选择性和高灵敏度的超外差式接收机,大大改善了无线电报和无线电话通信的质量,同时也给扩展通信范围、提高通信频率、扩大信号频带创造了条件。本世纪二十年代,相继出现了无线电广播和传真通信,三十年代发明了电视和调频技术,并把广播和通信频段扩展到超短波。

为了提高信道利用率,二十世纪三十年代开始研究多路复用技术。首先是频分多路,出现了多路载波机,与此相适应,通信线路也由原先的架空明线发展到对称电缆和同轴电缆。载波机的复用路数也逐渐增多,在一对电缆上可以同时提供几百个至几千个话路。三十年代中期出现了脉冲编码(PCM)技术,这不仅促进了电话通信技术的高速发展,并促使具有广阔发展前景的数字通信方式的出现。

电报通信所传递的是二进制数据信息,实际上也是数字通信。在采用 PCM 技术后,可以将各种模拟信号数字化,其中包括话音信号数字化和图象信号数字化等。因而,几乎所有的通信都可以在数字通信系统中实现。数字通信技术比较复杂,需要大量的电子元件和器件,所以初期发展速度缓慢。四十年代末出现的晶体管,特别是六十年代和七十年代问世的集成电路及大规模集成化技术,对加速 PCM 的发展具有决定性的意义。现在,大容量的时分多路 PCM 系统已广泛采用,并逐步替代频分多路。同时,在通信传输方式上已由传统的人与人之间的通信,发展到人与机器或机器与机器之间的通信。

最后需要提到的是,本世纪六十年代和七十年代出现的卫星通信、激光通信和光纤通信,均为大容量的综合性的通信系统提供了宽阔的信道。七十年代中期建立的洲际计算机通信网络,标志着计算机与计算机之间的通信已成为通信学科中的重要组成部分,并将在近代通信中占据重要地位。

通信学科的发展,一方面表现在新的电子器件和新的技术不断出现,另一方面反映在通信理论的深入研究和不断完善。例如,本世纪三十年代开始形成的调制理论为有线载波通信和无线电通信的基本理论奠定了基础,给实现频分制和时分制多路复用系统指明了方向。又如,在电信的初期发展阶段,人们就发现了噪声的存在和它对通信的影响,但直到二十世纪四十年代,通过概率统计方法的分析提出了统计信号检测和估计理论,以及在此基础上发展起来的最佳接收理论之后,才为从噪声中提取信号找到了有效的途径。此外,五十年代初期形成的信息论,明确地提出了通信中的一对主要矛盾,即通信的有效性和可靠性的问题,并为最佳解决这对矛盾提出了原则性的定理。在此基础上逐步发展起来的信源编码、纠错编码、扩频技术等理论,为提高通信质量、选择新的信号形式和创立新的通信体制,奠定了基础。

从上述对通信技术和通信理论发展历史的简单回顾中可以看到,通信这门学科是逐渐由低级到高级,由简单到复杂发展起来的。现代通信是研究传递各种信息的科学。电报和电话,只能算作狭义的通信。广义地说,通信还应包括广播、电视、传真以及传递各种信息的数据传输和计算机通信。如果更全面地理解信息的含义,则雷达、导航、遥控遥测、射电天文学、甚至生物工程学等这些与信息处理、信息传输有关的学科,都将与通信联系在一起,并可

把它们综合起来构成一门完整的信息科学，而通信学科则成为其中的一个组成部分。可以期望，信息理论的发展必将进一步促进通信技术的提高。

§ 1.3 模拟通信和数字通信

如前所述，通信系统所传递的消息主要有语音、文字、图象和数据，这些消息按其特性可以分连续的和离散的二种。语音和图象属于连续消息，文字和数据属于离散消息，与这两种消息对应的就有连续信号和离散信号。现在，人们多把连续信号称模拟信号，离散信号称数字信号。所谓模拟信号，是指代表消息的信号参量，随消息(连续消息)连续变化，图 1.3 为其一例。从连续消息到模拟信号的变换，在数学上可以描述为从一连续消息空间到一连续信号空间的映射。在此映射中，消息的微小变化仅使信号有微小变化。因而模拟信号将有无限多个状态。所谓数字信号，是指代表消息的信号参量，是离散取值的，图 1.4 为其一例。由于这种信号在时间上和取值上都是离散的，当最大幅度受限制时，其状态将是有限的，因而每一种状态都可以通过一组确定的数字来表征。例如，若共有 m 个状态，就可用 N 个 l 进制数字来描述，这三者之间具有以下关系：



图 1.3 模拟信号

$$m = l^N \quad (1.1)$$

由此可见，从离散消息到数字信号的变换，在数学上可以描述为从一离散消息集到数字集的映射。

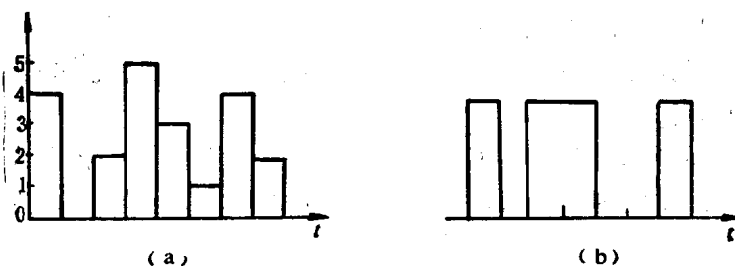


图 1.4 数字信号

由图 1.3 及图 1.4 可见，模拟信号与数字信号有明显差别，但二者之间并不存在不可超越的鸿沟，在一定条件下可以相互转换。例如模拟信号可以通过抽样、分层、编码等步骤转换成数字信号，而数字信号也可以通过解码、平滑等步骤恢复为模拟信号。虽然这种变换会造成一定程度的失真，但是消息的损失完全可以视需要而控制在足够小的范围之内。

通常，根据信道中所传输的信号，通信可分为模拟通信和数字通信二种。模拟通信系统传输的是模拟信号，数字通信系统传输数字信号。对于无线信道或载波信道，由于传输的是已调信号，故还可根据已调信号的种类来区分。普通调幅制广播系统传输的是模拟调制信号，是模拟系统；脉冲编码调制系统传输数字调制信号，则是数字系统。由于模拟基带信号与数字基带信号之间可以相互变换，因而数字通信系统可以用来传输连续消息，模拟通信系统也可以传输离散消息。

在第二节中已经提到, 电信起始于电报通信, 即数字通信, 但其发展不快。近百年中电话通信发展很快, 普遍采用模拟通信。本世纪五十年代以来, 晶体管和集成电路的出现, 大大促进了数字电路技术和数字通信技术的发展。这是因为: 数字信号在传输过程中可以再生和转发, 因而适于远距离传输; 数字信号便于处理(包括加密)、存储和交换, 其设备也便于生产和集成化。随着微处理机的广泛应用和计算机通信的日益发展, 数字通信必将会更加迅速地发展起来。

§ 1.4 通信系统的主要性能要求

在设计或评价一个通信系统时, 往往要涉及系统的性能指标。通信系统的性能指标是十分复杂的, 关系到可靠性、有效性、适应性、标准性、经济性、工艺性以及维护使用等多方面。各方面的要求大多又相互矛盾, 这就增加了设计或评价中的困难。从传递消息的角度来说, 可靠性和有效性是通信系统中的一对主要矛盾。这两者间的矛盾, 又在一定条件下相互转化。通信技术正是在这一对矛盾的转化过程中前进和发展着, 因此, 本节有必要对这两方面进行讨论。

1.4.1 通信系统的可靠性

通信系统的可靠性取决于两个方面: 其一是系统可以信任的程度, 它取决于消息传输的质量, 这一点除了与通信设备的电气性能有关外主要决定于各种干扰的影响; 其二是系统可供利用的程度, 它主要取决于通信设备本身的可靠性, 通常用平均故障间隔时间表示。在通信理论中通常只考虑前一种情况。

通信系统传递消息的质量用传输的准确性表示, 并可通过发送端所发送的消息与接收端所复制的消息之间的误差或这种误差的相对值来描述。在现代技术条件下, 这种误差主要来源于干扰的作用。

模拟通信系统的误差, 通常用所传输的模拟基带信号 $s_T(t)$ 与接收复制的基带信号 $s_R(t)$, 在不计及时延的条件下, 两者之间差值 $\varepsilon(t)$ 的平方平均值 (即均方误差) 表示, 它由下式确定

$$\overline{\varepsilon^2(t)} = \overline{[Ks_T(t) - s_R(t)]^2} \quad (1.2)$$

式中 K 为一确定的系数, 可以把它看成是由信道所引入的一个衰减因子, 如果信号在传输过程中不产生延时和失真, 则误差恒等于零, 即 $\varepsilon(t) \equiv 0$ 。由于误差是随机变量, 因而只有其统计 (或时间) 平均值才有意义。此外, 为了防止在取平均过程中正负误差抵消, 故在计算过程中应取误差的平方值。

如果误差完全来源于干扰的作用, 则式 (1.2) 就代表接收机输出信号中的噪声 (或干扰) 功率, 而

$$P_n = \overline{[Ks_T(t)]^2} \quad (1.3)$$

则为其中有用信号功率, 它也可通过下式来计算

$$P_s = \overline{s_R^2(t)} - \overline{\varepsilon^2(t)} = P_0 - P_n \quad (1.4)$$

这里

$$P_0 = \overline{s_R^2(t)} \quad (1.5)$$

为接收机输出总功率,而

$$P_n = \overline{s^2(t)} \quad (1.6)$$

为接收机输出噪声功率。由于输出信噪比 P_s/P_n 能够更全面地反映出模拟通信系统的质量,因而系统的传输性能多用信噪比表示。例如,商用电话通信常要求 100% 调制时的输出信噪比在 40 dB 以上(或平均信噪比在 30 分贝以上),这时单音清晰度可达到 95% 以上,句子可懂度几乎是 100% 了。对于电视节目,多要求信噪比在 40~60 dB 以上,这样才能把画面的细节分辨清楚。

数字通信系统的质量,取决于接收端复制数据(或文字)的误差,可以用误码率表示。例如,对于一般商用电报通信,数字或文字的误码率大致限制在千分之一以内。在数据传输系统中,往往要求信号码元的误码率不超过 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。众所周知,数字通信系统的误码率主要也取决于信噪比。

提高模拟系统的输出信噪比和降低数字系统的误码率的基本途径有:

- (1) 增大发射信号功率——从而可提高接收机输入信号电平;
- (2) 增大发射信号的频带宽度——从而通过调频、脉冲编码调制等调制技术来获得调制制度的增益和采用纠错编码来减少误码;
- (3) 延长发送信号的持续时间——从而可以缩窄信号的有效带宽和接收机的通频带,以减少干扰噪声的功率。

1.4.2 通信系统的有效性

有效性是通信系统所传递的消息与为此而付出的代价的一种度量。为了进行计算,有必要对消息和所付出的代价提出定量标准。

在通信理论中,消息的多少是用信息量来度量的,这里用 I 表示,单位“比特”(bit),记作“b”。每个二进制数字所携带的信息量在 $(0 \sim 1)b$ 之间,只有在采用最佳编码时,才有可能达到 1b(这点在第四章中将会说明)。但是,目前二进制符号的单位也是比特,例如 4 个二进制码元就称 4b。于是二进制码元的数目和这些码元所携带的信息量就会相互混淆。只有当采用最佳编码时,两者才会等同起来。为了统一,不妨就假设信号是采用最佳编码方式的。以下如果没有说明,我们就按这样的假设来讨论。

根据式(1.1),一个 m 进制数据,可以用 N 个二进制数据来表示,故每个 m 进制数据就包含有

$$I_m = \log_2 m = N \log_2 l = N \quad (1.7)$$

比特信息量。如上所述,这时假设信号已采用最佳编码。

通信系统每秒所传输的信息量称为传信率,用 R_b 表示,单位为比特/秒,或记为 b/s。每秒内所传数字信号的码元数目称为传码率,单位为“波特”(Baud),记作 B,传码率用 R_B 表示。根据式(1.7), m 进制数字信号的传信率与传码率之间具有以下关系:

$$R_b = R_B \log_2 m \quad (1.8)$$

或

$$R_B = \frac{R_b}{\log_2 m} \quad (1.9)$$

如果是二进制信号,那么信号的传信率和传码率在数值上就等同起来了。但是它们的含意是截然不同的。前者指该信号在单位时间内所传输的信息量,后者则是指单位时间内所传

输的码元数。

于是,代表数字通信系统质量指标的误码率又可通过两种方法来表述:误码率和误信率。

所谓误码率,指错误接收的码元数在所传输的总码元数中所占的比例,更确切地说,是码元在传输系统中被错传的概率。

误信率又称误比特率,是指错误接收的信息量在所传输的总信息量中所占的比例,或者说信息量在传输过程中被丢失的概率。

对于二进制数字通信系统,在最佳编码条件下,误码率和误信率在数值上是等同的。

模拟信号的信息量,可以经抽样和量化处理,变换成数字信号后进行计算。

在通信系统中,携带消息的信号必然占有一定频带 ΔF 、一定时间 T 和一定功率 P_s 。通信系统中不可避免地存在着干扰和噪声,而要准确地分辨信号,信号功率 P_s 应比噪声功率 P_n 大一定倍数。通常用信号超越干扰值(简称超扰值)

$$H = \log_2 \frac{P_s}{P_n} \quad (1.10)$$

来表示信号所必须的相对强度。由于信号所携带的信息量与信噪比的对数近似地具有正比的关系,故超扰值取 P_s/P_n 的对数更符合实际情况。通常把 ΔF 、 T 和 H 称为信号的三个广义量度,并把这三个量度的乘积

$$V_s = T \cdot \Delta F \cdot H \quad (1.11)$$

定义为信号体积。根据同上面论述相仿的理由,这里定义

$$V_k = T_k \cdot \Delta F_k \cdot H_k \quad (1.12)$$

为通信系统的信道容积。式中 T_k 表示信道可供使用的时间, ΔF_k 表示信道的频带宽度, H_k 为信道超扰值,它取决于下式。

$$H_k = \log_2 \left(\frac{P_s}{P_n} \right)_k \quad (1.13)$$

这里 $(P_s/P_n)_k$ 为信道所能提供的信号噪声比。

显然,在干扰的条件下,通信系统能够无误地传输消息的必要条件是信道容积应不小于信号体积,即要求

$$V_k \geq V_s \quad (1.14)$$

或

$$T_k \Delta F_k \log_2 \left(\frac{P_s}{P_n} \right)_k \geq T \Delta F \log_2 \frac{P_s}{P_n} \quad (1.15)$$

可以证明,当信号超扰值足够大时,信号可能包含的信息量的最大值 I_{\max} 趋近于其体积 V_s ,即

$$I_{\max} \approx T \Delta F H = V_s \quad (1.16)$$

这样,我们就可以通过单位信道容积所传输的平均信息量来表示实际通信系统的有效度,这里用 J 表示,也称 J 为信道的含量密度,它可通过下式来计算:

$$J = \frac{I}{V_k} \quad (1.17)$$

由上可见,提高系统的有效度,意味着要求能利用较小的信道容积来传输较多的信息。显然,这与提高可靠性形成了尖锐的矛盾。对于数字通信系统来说,系统的可靠性和有效度的矛盾具体表现为误码(信)率与传码(信)率之间的矛盾。由于决定可靠性和有效度的主要

因素是干扰(噪声)的作用,因此,解决这对矛盾的基本途径是提高系统的抗干扰能力,这一点将贯穿于本课程。

习 题

1. 试把书信过程与无线电数字通信过程作比较,并谈谈它们之间的对应关系。
2. 试分别讨论模拟信号和数字信号、模拟通信和数字通信的特点。
3. 通信系统中的可靠性和有效性指的是什么?谈谈它们在通信系统中的重要意义。

第二章 信道与干扰

§ 2.1 信道概述

2.1.1 信道的定义

信号的通道称为信道。

早期,信道是指传输信号的媒质。例如,有线电通信系统的信道是架空明线或电缆,无线电短波通信系统的信道是电波传播途径。这样来定义信道是很直观的,含意也一目了然,因而目前仍广泛采用着。但是,从研究消息传输的观点来说,有时会感到这样的定义太狭窄,所以近期又引入了一些新的、把信道范围扩大了的定义,并称此为广义信道,而称前者为狭义信道。

广义信道把信道扩展到传输基带信号的全系统。其中既包括无线信道,也包括载波信道。具体来说,广义信道通常包括图 2.1 方框内所示的五部分:调制器、发转换器、传输媒质、收转换器和解调器。从传输消息的角度来说,不管消息在信道中间传输的具体过程如何,但都不外乎是把已转换成基带信号的消息进行某种变换。因此,如果我们只关心变换的最终结果而无需了解形成最终结果的详细物理过程的话,采用这种广义信道的定义是方便和恰当的。

在数字通信系统中,调制器和解调器分别接编码器和译码器,所以也称图 2.1 为编码信道。

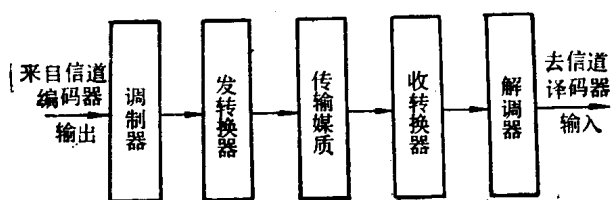


图 2.1 广义信道与编码信道

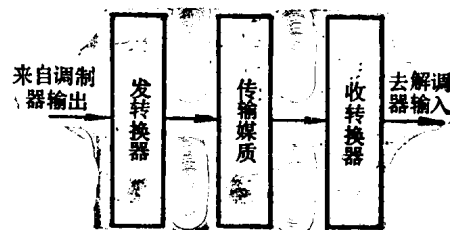


图 2.2 调制信道

在大多数通信系统中,调制器与解调器之间的各种变换装置和传输媒质都可近似地看成是线性的(这里把变频器也视为线性电路)。它们仅仅用来传输已调信号。如果所关心的只限于已调信号的形成和解调,把图 2.1 中发转换器、传输媒质和收转换器三个部分定义为调制信道,也是有一定实用意义的(参阅图 2.2)。调制信道也是广义信道。当然,根据研究的对象和所关心的问题,信道还可以有其它的定义。

应该指出,狭义信道(传输媒质)是广义信道的主要组成部分,通信质量的好坏在很大程度上取决于传输媒质的特性。因而,在研究信道的一般特性时总是着重于传输媒质。

为了便于区分,在以下讨论中,只把广义信道简称为信道,其它形式的信道均加以特别说明。