

通信原理简明教程

(第3版)

南利平 李学华 王亚飞 李振松 编著



清华大学出版社



通信原理简明教程

(第3版)

南利平 李学华 王亚飞 李振松 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以现代通信系统为背景,全面地介绍通信系统的一般模型和通信技术的基本原理。

全书共9章,内容包括绪论、基础知识、模拟调制系统、模拟信号的数字化、数字信号的基带传输、数字信号的调制传输、现代数字调制技术、差错控制编码、同步技术。

本书内容简练,理论联系实际,对基本原理的分析深入浅出,并注重应用和吸收新的技术成果。文中配有大量的典型例题和习题,并附有大部分习题答案,便于教学与自学。

本书可作为高等院校通信工程专业和电子类相关专业的本科生教材,也可作为双学位的教材,还可作为相关领域的科技人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

通信原理简明教程/南利平等编著.—3版.—北京:清华大学出版社,2014

ISBN 978-7-302-34668-5

I. ①通… II. ①南… III. ①通信原理—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第290832号

责任编辑:文 怡

封面设计:傅瑞学

责任校对:白 蕾

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:21.25 字 数:493千字

版 次:2000年3月第1版 2014年1月第3版 印 次:2014年1月第1次印刷

印 数:1~2800

定 价:36.00元

产品编号:057460-01

前言

Foreword

本书是2007年出版的《通信原理简明教程》(第2版)的修订版。

考虑到21世纪信息科学的发展趋势,现代通信技术已经取得了许多新的重大发展,本次修订充实了许多新内容,并调整了部分章节的安排,进一步深入体现科学而合理的认知规律,引导读者进行高效率的学习。

还考虑到作者一贯提倡的编书原则,要为学生提供一本值得读和容易读得懂的教材,本次修订除了进一步加强物理概念的阐述以外,在图表、例题和习题等方面还作了一些调整,附录给出大部分的习题答案。这些手段都会有助于不同层次的学生进行自学。本书内容可以满足50~80学时的教学。

全书内容共分为9章。第1章绪论初步介绍通信和通信系统的基本概念,提出本书的使用方法和建议。第2章基础知识对本书所涉及的部分基础知识作简要说明,未学过“信号与系统”和“随机过程”这两门课程的读者可通过该章的内容了解有关的概念和结论。第3章为模拟通信部分,包括模拟调制的原理及方法,抗噪声性能的分析模型及方法,模拟通信系统的应用举例。第4~8章为数字通信部分。第4章的内容为模拟信号的数字化,在数字化的基础上介绍时分复用的原理及数字电话的应用体制。第5章讨论数字信号的基带传输,包括传输方式及基带系统传输错误率的分析和计算。第6章讨论数字信号的调制传输,包括各种调制方法及调制系统传输差错率。第7章讨论现代数字调制方法,介绍近年来得到广泛应用的新型调制技术。第8章的内容为差错控制编码,介绍差错控制的基本概念,讨论线性码的编译码方法及纠错性能,介绍几种新型的信道编码方法。第9章介绍同步技术。

本书第1、3、4、5章由南利平编写,第2、8章由王亚飞编写,第6、7章由李学华编写,第9章由李振松编写,各章的习题由他们共同演算及核对。全书由南利平和李学华统编定稿。为了便于各校的教学,本书编者精心制作了电子教学课件,各校的任课教师均可以从出版社网站免费

II

索取。

作者感谢清华大学朱雪龙和北京邮电大学乐光新老师对本书第1版的审阅,感谢清华大学出版社王仁康、陈国新、文怡等编辑的帮助,感谢汪毓铎、刘南、杨曙辉、吕淑琴等老师在长期教学工作中的合作和支持。对本书所列文献作者,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中难免有不当之处,欢迎读者批评指正。

编者

2013年10月

tongxinyuanli@sina.com

目 录

Contents

1 绪论	1
1.1 通信和通信系统的一般概念	1
1.2 模拟通信与数字通信	3
1.3 通信发展简史	4
1.4 信息及其度量	5
1.4.1 信息量	6
1.4.2 平均信息量	7
1.5 通信系统的质量指标	8
1.5.1 模拟通信系统的质量指标	8
1.5.2 数字通信系统的质量指标	8
1.6 本书的结构和使用方法	9
习题	11
2 基础知识	12
2.1 信号和系统的分类	12
2.1.1 信号的分类	12
2.1.2 系统的分类	13
2.2 确定信号的分析	13
2.2.1 周期信号	13
2.2.2 信号的傅里叶变换	14
2.2.3 信号的能量谱与功率谱	17
2.2.4 波形的互相关和自相关	19
2.2.5 卷积	22
2.3 随机信号的分析	23
2.3.1 概率及随机变量	23
2.3.2 随机过程和它的统计特性	27
2.3.3 平稳随机过程	29

2.4	高斯随机过程	33
2.4.1	高斯随机过程的定义和性质	33
2.4.2	一维高斯分布	33
2.4.3	高斯白噪声	35
2.5	平稳随机过程通过系统的分析	36
2.5.1	平稳随机过程通过线性系统	36
2.5.2	平稳随机过程通过乘法器	39
2.6	窄带随机过程	40
2.6.1	窄带随机过程的概念	40
2.6.2	窄带随机过程的统计特性	41
2.6.3	正弦波加窄带高斯过程	44
2.7	信道	45
2.7.1	信道的定义和分类	45
2.7.2	信道数学模型	46
2.7.3	恒参信道和随参信道	48
2.7.4	信道容量	52
	习题	53
3	模拟调制系统	55
3.1	引言	55
3.2	模拟线性调制系统	56
3.2.1	常规调幅	56
3.2.2	抑制载波双边带调幅	60
3.2.3	单边带调制	62
3.2.4	残留边带调制	69
3.3	线性调制系统的抗噪声性能	72
3.3.1	通信系统抗噪声性能的分析模型	72
3.3.2	线性调制相干解调的抗噪声性能	74
3.3.3	常规调幅包络检波的抗噪声性能	77
3.4	模拟非线性调制系统	81
3.4.1	角调制的基本概念	81
3.4.2	调频信号	83
3.4.3	调频信号的产生与解调	90
3.5	调频系统的抗噪声性能	94
3.5.1	非相干解调的抗噪声性能	94
3.5.2	调频系统中的门限效应	99
3.5.3	相干解调的抗噪声性能	100
3.5.4	调频系统中的加重技术	100

3.6	各种模拟调制系统的比较	102
3.7	频分复用	103
3.7.1	频分复用原理	104
3.7.2	复合调制	104
3.8	模拟通信系统的应用举例	105
3.8.1	调幅广播	105
3.8.2	调频广播	105
3.8.3	地面广播电视	106
3.8.4	卫星直播电视	107
	习题	108
4	模拟信号的数字化	115
4.1	引言	115
4.2	模拟信号的抽样	116
4.2.1	理想抽样	116
4.2.2	实际抽样	120
4.3	模拟信号的量化	124
4.3.1	量化的原理	124
4.3.2	均匀量化和线性 PCM 编码	127
4.3.3	非均匀量化	132
4.4	A 律 PCM 编码	136
4.4.1	常用的二进制码组	136
4.4.2	A 律 PCM 编码规则	137
4.5	脉冲编码调制系统	138
4.5.1	脉冲编码调制系统原理	138
4.5.2	PCM 系统的抗噪声性能分析	139
4.5.3	PCM 信号的码元速率和带宽	141
4.6	差分脉码调制	142
4.6.1	压缩编码简介	142
4.6.2	差分脉码调制原理	143
4.6.3	自适应差分脉码调制	145
4.7	增量调制	146
4.7.1	简单增量调制	146
4.7.2	自适应增量调制	148
4.8	时分复用	150
4.8.1	时分复用原理	150
4.8.2	数字复接系列	151
	习题	155

5 数字信号的基带传输	159
5.1 引言	159
5.2 数字基带信号的码型	159
5.2.1 数字基带信号的码型设计原则	159
5.2.2 二进码	160
5.2.3 三进码	162
5.2.4 多元码	165
5.3 数字基带信号的功率谱	165
5.4 无码间串扰的传输波形	171
5.4.1 无码间串扰的传输条件	172
5.4.2 无码间串扰的传输波形	174
5.5 部分响应基带传输系统	179
5.5.1 第 I 类部分响应波形	179
5.5.2 部分响应系统的一般形式	183
5.6 数字信号基带传输的差错率	185
5.6.1 二进码的误比特率	185
5.6.2 多元码的差错率	191
5.7 扰码和解扰	192
5.7.1 m 序列的产生和性质	192
5.7.2 扰码和解扰原理	196
5.7.3 m 序列在误码测试中的应用	198
5.8 眼图	198
5.9 均衡	200
5.9.1 时域均衡原理	200
5.9.2 均衡器构成	203
习题	204
6 数字信号的调制传输	208
6.1 二进制数字调制	208
6.1.1 二进制幅度键控	208
6.1.2 二进制频移键控	212
6.1.3 二进制相移键控	215
6.1.4 二进制差分相移键控	217
6.2 二进制数字调制的抗噪声性能	220
6.2.1 2ASK 的抗噪声性能	220
6.2.2 2FSK 的抗噪声性能	224
6.2.3 2PSK 和 2DPSK 的抗噪声性能	226

6.2.4	二进制数字调制系统的性能比较	228
6.3	数字信号的最佳接收	230
6.3.1	使用匹配滤波器的最佳接收机	230
6.3.2	相关接收机	236
6.3.3	应用匹配滤波器的最佳接收性能	237
6.3.4	最佳非相干接收	242
6.3.5	最佳系统性能比较	243
6.4	多进制数字调制	245
6.4.1	多进制幅度键控	245
6.4.2	多进制相移键控	247
6.4.3	多进制频移键控	251
	习题	254
7	现代数字调制技术	258
7.1	偏移四相相移键控	258
7.2	$\pi/4$ 四相相移键控	261
7.3	最小频移键控	264
7.3.1	MSK 信号的正交性	264
7.3.2	MSK 信号的相位连续性	265
7.3.3	MSK 信号的产生与解调	267
7.3.4	MSK 信号的功率谱特性	267
7.4	高斯最小频移键控	269
7.5	正交幅度调制	269
7.6	正交频分复用	272
7.6.1	多载波调制技术	272
7.6.2	正交频分复用技术	273
	习题	276
8	差错控制编码	277
8.1	差错控制编码的基本概念	277
8.1.1	差错控制方式	277
8.1.2	差错控制编码分类	279
8.1.3	几种简单的检错码	279
8.1.4	检错和纠错的基本原理	281
8.2	线性分组码	283
8.3	循环码	288
8.3.1	循环码的描述	288
8.3.2	循环码的生成多项式	289

8.3.3 循环码的编码和译码	291
8.4 卷积码	293
8.4.1 卷积码的编码及描述	293
8.4.2 卷积码的译码方法	296
8.5 Turbo 码	296
8.6 低密度校验码	298
8.7 差错控制编码对系统性能的改善	299
习题	301
9 同步技术	303
9.1 载波同步	303
9.1.1 插入导频法	303
9.1.2 直接法	304
9.2 位同步	307
9.2.1 外同步法	307
9.2.2 自同步法	308
9.3 帧同步	309
9.3.1 连贯式插入法	309
9.3.2 间歇式插入法	310
习题	311
部分习题答案	312
附录 A 常用三角公式	321
附录 B Q 函数表和误差函数表	322
附录 C 第一类贝塞尔函数表	325
附录 D 缩写词表	327
参考文献	329

1

绪论

1.1 通信和通信系统的一般概念

通信的目的是传递消息中所包含的信息,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。通信能跨越距离的障碍完成信息的转移和交流。

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介。按媒介的不同,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介的通信方式,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 所示意的是普通的有线电话系统。图中,电话机完成话音信号与音频电信号之间的变换,电端机完成音频电信号与数字信号之间的变换,光端机完成数字信号与光信号之间的变换,两地的光端机之间用光缆连接。

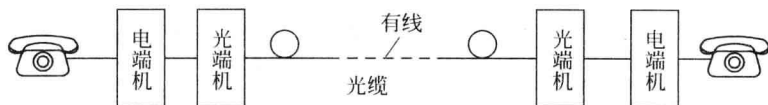


图 1-1 有线电话系统示意图

无线通信则不需要通过有线传输,而是利用无线电波在空间的传播来传递消息。例如图 1-2 所示意的是移动电话系统。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。

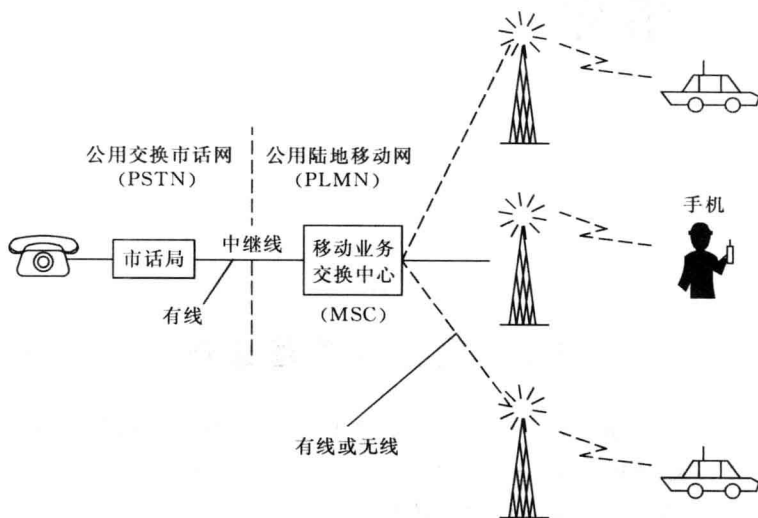


图 1-2 移动电话系统示意图

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媒介。为完成通信任务所需要的一切技术设备和传输媒介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、传真机和计算机等。为了传输基带信号,须经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介称为信道。在接收端,接收设备的功能与发送设备的相反,其作用是对接收的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的噪声的集中表示。

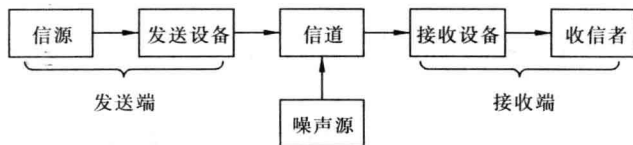


图 1-3 通信系统的一般模型

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,通常称为通信系统的一般模型。根据所要研究的对象和所关心的问题不同,还要使用不同形式的较具体

的通信系统。对通信系统及其基本理论的讨论,就是围绕通信系统的模型而展开的。

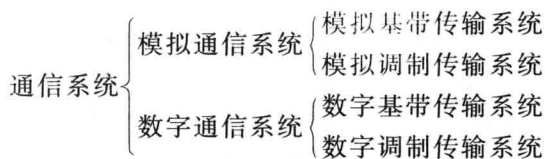
1.2 模拟通信与数字通信

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——D/A 变换,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如下:



本课程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。

模拟通信系统的模型大体上与图 1-3 所示相仿,其方框图如图 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。

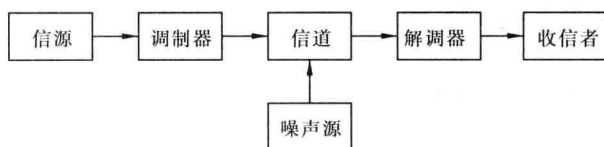


图 1-4 模拟通信系统模型

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、信道编码和调制器三个部分。信源编码是对模拟信号进行编码,得到相应的数字信号;而信道编码则是

对数字信号进行再次编码,使之具有自动检错或纠错的能力。数字信号对载波进行调制形成数字调制信号。高质量的数字通信系统才有信道编码部分。

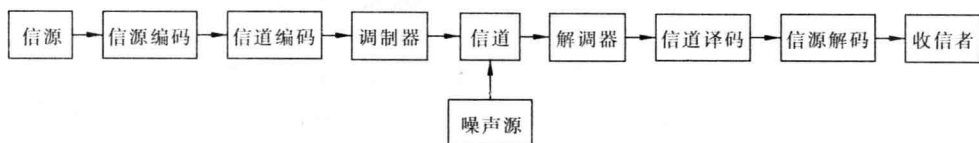


图 1-5 数字通信系统模型

图 1-3 至图 1-5 所表示的均为单向通信系统,但在绝大多数场合,通信的双方互通信息,因而要求双向通信。单向通信称为单工方式,双向通信称为双工方式。

就目前来说,不论是模拟通信还是数字通信,在通信业务中都得到了广泛应用。但是,20 多年来,数字通信发展十分迅速,在整个通信领域中所占比重日益增长,在大多数通信系统中已替代模拟通信,成为当代通信系统的主流。这是因为与模拟通信相比,数字通信更能适应对通信技术越来越高的要求。数字通信的主要优点如下:

(1) 抗干扰能力强。在远距离传输中,各中继站可以对数字信号波形进行整形再生而消除噪声的积累。此外,还可以采用各种差错控制编码方法进一步改善传输质量。

(2) 便于加密,有利于实现保密通信。

(3) 易于实现集成化,使通信设备的体积小、功耗低。

(4) 数字信号便于处理、存储、交换,便于和计算机连接,也便于用计算机进行管理。

当然,数字通信的许多优点都是以比模拟通信占据更宽的频带为代价的。以电话为例,一路模拟电话通常只占据 4kHz 带宽,但一路数字电话要占据 20kHz~60kHz 的带宽。随着社会生产力的发展,有待传输的数据量急剧增加,传输可靠性和保密性要求越来越高,所以实际工程中宁可牺牲系统频带而要采用数字通信。至于在频带富裕的场合,比如毫米波通信、光通信等,当然都唯一地选择数字通信。

1.3 通信发展简史

电通信的历史并不长,至今只有 170 多年的时间。一般把 1838 年有线电报的发明作为开始使用电通信的标志,但那时的通信距离只有 70km。1876 年发明的有线电话被看作现代电通信的开端。1878 年世界上的第一个人工交换局只有 21 个用户。无线电报于 1896 年实现,它开创了无线电通信发展的道路。1906 年电子管的发明迅速提高了无线通信及有线通信的水平。

伴随着通信技术的发展,通信科学自 20 世纪 30 年代起获得了突破性的进展,先后形成了脉冲编码原理、信息论、通信统计理论等重要理论体系。而 20 世纪 50 年代以来,晶体管和集成电路的问世,不仅使模拟通信获得了高速发展,而且促成了具有广阔前景的数字通信方式的形成。在通信种类上,相继出现了脉码通信、微波通信、卫星通信、光纤通

信、计算机通信等。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之间的范畴,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、电报网以外,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。先进的通信网络使通信不断朝着综合化、宽带化、自动化和智能化的方向发展。为人类提供方便快捷的服务是通信技术追求的目标。

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。

国际电报电话咨询委员会(CCITT)推荐的 2 号国际电码是数字信号的一个典型例子。电码由字符组成,字符包括文字、数字和控制符等。如表 1-1 所示,电码表是一种 5 单位代码,各个字符用 5 位二进制数表示,一共可以表示 32 种不同字符。采用“字母换档”和“数字换档”两个专用字符后,可表示的字符数扩大近一倍。

表 1-1 2 号国际电码表

字母	数字	5 单位代码					字母	数字	5 单位代码				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
A	—	1	1	0	0	0	Q	1	1	1	1	0	1
B	?	1	0	0	1	1	R	4	0	1	0	1	0
C	:	0	1	1	1	0	S	!	1	0	1	0	0
D	⊕	1	0	0	1	0	T	5	0	0	0	0	1
E	3	1	0	0	0	0	U	7	1	1	1	0	0
F	%	1	0	1	1	0	V	=	0	1	1	1	1
G	@	0	1	0	1	1	W	2	1	1	0	0	1
H	£	0	0	1	0	1	X	/	1	0	1	1	1
I	8	0	1	1	0	0	Y	6	1	0	1	0	1
J	铃	1	1	0	1	0	Z	+	1	0	0	0	1
K	(1	1	1	1	0	<回车		0	0	0	1	0
L)	0	1	0	0	1	≡换行		0	1	0	0	0
M	·	0	0	1	1	1	↓字母		1	1	1	1	1
N	,	0	0	1	1	0	↑数字		1	1	0	1	1
O	9	0	0	0	1	1	间隔		0	0	1	0	0
P	0	0	1	1	0	1	空格		0	0	0	0	0

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?

1.4.1 信息量

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为信息量。以我们的直观经验,已经对信息量有了一定程度的理解。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。再次,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_i 出现的概率为 $P(x_i)$,则这一消息所含的信息量为

$$I(x_i) = \log \frac{1}{P(x_i)} = -\log P(x_i) \quad (1-1)$$

当上式中的对数以 2 为底时,信息量的单位为比特(bit);对数以 e 为底时,信息量的单位为奈特(nit)。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 1-2 给出英文字母出现的概率。求字母 e 和 q 的信息量。

表 1-2 英文字母出现的概率

符号	概率	符号	概率	符号	概率
空隙	0.20	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 1-2 可知 e 的出现概率为 $P(e) = 0.105$,可计算其信息量 $I(e)$,即有

$$I(e) = -\log_2 P(e) = -\log_2 0.105 = 3.24(\text{bit})$$

q 的出现概率 $P(q) = 0.001$,其信息量为

$$I(q) = -\log_2 P(q) = -\log_2 0.001 = 9.97(\text{bit})$$