

全国普通高等院校电子信息规划教材

信息论与编码基础

陈海燕 主编

曹明华 贾科军 副主编

清华大学出版社

清华大学出版社



全国普通高等院校电子信息规划教材

信息论与编码基础

陈海燕 主编

曹明华 贾科军 副主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书全面地介绍了 Shannon 信息论的基本理论:信息的统计度量、Shannon 三大编码定理以及对应的三类编码,无失真信源编码、限失真信源编码及信道编码。全书共分 7 章,主要内容包括绪论,信源和信源熵,无失真信源编码、限失真信源编码,信道及信道容量以及信道编码,信息率失真函数,信息论方法的应用等。

本书深入浅出,概念清晰,系统性强,力求以通俗易懂的语言及大量典型的应用实例使读者快速、高效地学习和掌握信息论与编码的基本理论和技术。

本书适合作为高等院校通信工程、电子与信息技术等相关专业本科生的教材,也可作为低年级研究生的教学参考书,也可供从事信息领域的科技工作者、工程技术人员参考。

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

信息论与编码基础/陈海燕主编;曹明华,贾科军副主编. —北京:清华大学出版社,2015

全国普通高等院校电子信息规划教材

ISBN 978-7-302-37499-2

I. ①信… II. ①陈… ②曹… ③贾… III. ①信息论—高等学校—教材 ②信源编码—高等学校—教材 IV. ①TN911.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 170971 号

责任编辑:白立军 徐跃进

封面设计:常雪影

责任校对:时翠兰

责任印制:刘海龙

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 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13

字 数:302 千字

版 次:2015 年 2 月第 1 版

印 次:2015 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:25.00 元

产品编号:059676-01

信息技术是当今通信、计算机和自动控制界的热门技术。特别是信息技术与微电子、光电子以及计算机技术的不断结合,使现代信息技术的发展充满了生机与活力,人类也逐步迈进高度发展的信息科学时代。而信息论为计算机技术和通信技术的发展奠定了坚实的理论基础。它不仅在方法论的层面上解决了通信的有效性、可靠性和安全性问题,而且在认识论层面上帮助人们认识事物的本质。

信息论是应用近代数理统计的方法研究信息传输、存储和处理的科学,是在长期通信工程实践中发展起来的一门新兴科学,亦称为通信的数学理论。美国科学家香农(C. E. Shannon)1948年在《贝尔电话杂志》上发表的著名论文《通信的数学理论》为信息论的诞生和发展奠定了理论基础。近年来,随着信息理论与编码技术的长足发展,它已发展成为一门综合性的新兴学科。不仅直接应用于通信、计算机、电子信息和自动控制领域,而且还广泛渗透到生物学、医学、语言学、社会学和经济学等领域。因此,越来越多的技术人员渴望学到有关信息论的相关知识,越来越多的高等学校纷纷开设信息论课程。“信息论与编码”已成为我国高等学校的通信工程、计算机、自动化、电子与信息等专业的主干基础课程。选择一本适合本校校情且具有课程特色的教材就显得尤为重要。

本教材在长期的教学实践中,吸取同教材的优点,将“通信原理”、“信息论基础”等课程的教学内容进行重新调整,删除部分重复、陈旧内容,并增加了信息论应用方面的内容;从最基本的信息度量开始,到信息论方法在信号处理中的应用,层层深入,全面介绍信息论与编码的基本理论和技术。考虑到本科生的实际水平,在一些较难理解的地方详细论述,力求用简介、通俗易懂的语言描述物理概念、注重物理概念的理解、弱化公式推导与证明。以便读者在短时间内掌握信息论与编码的精髓。

全书共分7章:第1章为绪论部分,着重介绍信息的基本概念、信息论的形成和发展、信息论的研究范畴以及通信系统的基本模型;第2章为信源和信源熵,着重介绍信源的特性和分类,信息的统计度量、平稳离散信源和连续信源的特性以及信息度量;第3章为信道和信道容量,主要介绍信道的数学模型和分类以及单符号离散信道的信道容量、组合信道,连续信道的信道容量;第4章为信源编码,主要介绍编码的定义和分类、离散无失真信源编码定理以及一些常用的信源编码方法;第5章为信道编码,主要介绍信道编码的

概念以及一些信道编码方法;第6章为信息率失真函数。主要介绍信息率失真函数的概念以及离散信源和连续信源的信息率失真函数;第7章为信息论方法的应用,主要介绍信息论方法在信号处理中的应用,信息论方法在其他学科领域中的应用以及最大熵谱估计和最小误差熵估计。

本书由兰州理工大学计算机与通信学院陈海燕主编,其中,陈海燕编写了第1章、第2章、第4章和第7章;第3章、第6章由曹明华编写;第5章由贾科军编写;全书由陈海燕统稿。

本教材的出版由兰州理工大学校级规划教材编写资金资助;在编写的过程中得到了清华大学出版社的大力支持,白立军编辑做了大量的工作,在此表示衷心的感谢!

本教材的编写,是在同行专家所做的大量工作的基础上,汲取各家之长而成。所借鉴内容已在参考文献中列出,因篇幅限制,不尽周全。在此,向这些作者一并表示感谢!

由于编者水平有限,错误和不当之处在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

编者

2014年12月

第 1 章 绪论	1
1.1 信息的概念	1
1.2 信息论的形成和发展	3
1.3 信息论的研究范畴	4
1.4 通信系统模型	5
1.5 习题	7
第 2 章 信源和信息熵	8
2.1 信源的特性和分类	8
2.2 离散信源的信息度量	11
2.2.1 信息量的定义	11
2.2.2 自信息量	12
2.2.3 联合信息量与条件自信息量	15
2.3 互信息量	16
2.3.1 互信息量的定义	16
2.3.2 互信息的性质	17
2.3.3 条件互信息和联合互信息	18
2.4 信源熵	20
2.5 条件熵和联合熵	21
2.6 熵函数的数学特性	23
2.7 加权熵	27
2.8 平均互信息量	31
2.9 信息不增性原理	40
2.10 平稳离散信源	42
2.10.1 离散平稳无记性信源的扩展信源	43
2.10.2 离散平稳信源的熵	45
2.10.3 马尔可夫信源	49
2.10.4 信源的冗余度	54
2.11 连续信源	56
2.11.1 连续随机变量的熵	57
2.11.2 最大相对熵	60

2.11.3 熵功率	62
2.12 习题	64
第3章 信道及信道容量	67
3.1 信道的数学模型和分类	67
3.1.1 信道的分类	67
3.1.2 单符号离散信道的数学模型	68
3.2 单符号离散信道中的熵速率与信道容量	69
3.2.1 离散无噪声信道的熵速率和信道容量	69
3.2.2 几种特殊离散信道的容量	70
3.2.3 对称离散信道的信道容量	72
3.2.4 离散信道容量的一般计算方法	76
3.3 多符号离散信道及其信道容量	81
3.4 组合信道的信道容量	84
3.4.1 串联信道及其信道容量	85
3.4.2 独立并联信道的信道容量	87
3.5 网络信息理论	87
3.5.1 多址接入信道	87
3.5.2 广播信道	89
3.5.3 相关信源的多用户信道	89
3.6 连续信道及其信道容量	90
3.6.1 连续信道的平均互信息量	90
3.6.2 连续信道的熵速率与信道容量	91
3.6.3 连续信源的香农公式与噪声	93
3.7 信道编码定理	95
3.8 习题	96
第4章 信源编码	98
4.1 编码的定义	99
4.2 码的分类	99
4.3 离散无失真信源编码定理	103
4.4 离散信源编码	107
4.4.1 香农编码	107
4.4.2 费诺编码	108
4.4.3 赫夫曼编码	109
4.4.4 游程编码	114
4.4.5 冗余位编码	117
4.4.6 Lempel-Ziv 编码	119

4.4.7	算术编码	121
4.5	习题	124
第5章	信道编码	127
5.1	数字通信系统	127
5.2	信道编码及编码定理	128
5.3	信道模型	129
5.3.1	二进制对称信道	129
5.3.2	离散无记忆信道	130
5.3.3	离散输入、连续输出信道	130
5.3.4	波形信道	131
5.4	差错控制方式	132
5.5	信道编码的分类及其基本概念	133
5.5.1	信道编码的分类	133
5.5.2	信道编码的基本概念	134
5.6	常见的几种检错码	136
5.6.1	奇偶校验码	136
5.6.2	水平奇偶校验码	137
5.6.3	水平垂直奇偶校验码	137
5.6.4	恒比码	138
5.6.5	群计数码	138
5.7	线性分组码	139
5.7.1	基本概念	139
5.7.2	线性分组码的编码	139
5.7.3	线性分组码的译码	143
5.8	循环码	145
5.8.1	循环码的代数结构	145
5.8.2	循环码的编码	149
5.8.3	循环码的译码	150
5.9	卷积码	151
5.9.1	基本原理	151
5.9.2	卷积码的描述	152
5.9.3	卷积码的译码	155
5.10	Turbo 码	157
5.10.1	Turbo 码的编码	157
5.10.2	Turbo 码的译码	160
5.11	LDPC 码	162
5.11.1	LDPC 码的编码	162

5.11.2	LDPC 码的译码	163
5.12	习题	165
第 6 章	信息率失真函数	167
6.1	基本概念	168
6.1.1	失真函数与平均失真度	169
6.1.2	信息率失真函数的定义	170
6.1.3	信息率失真函数 $R(D)$ 的性质	171
6.2	离散信源的信息率失真函数	173
6.2.1	离散信源信息率失真函数的参量表达式	173
6.2.2	二元信源的信息率失真函数	174
6.2.3	离散信源 $R(D)$ 函数计算	176
6.2.4	信息率失真函数 $R(D)$ 的迭代算法	179
6.3	连续信源的信息率失真函数	180
6.4	限失真信源编码定理	183
6.5	习题	184
第 7 章	信息论方法的应用	186
7.1	信息论方法在信号处理中的应用	186
7.2	信息论在其他学科领域的应用	189
7.2.1	信息论与博弈论	189
7.2.2	信息论与统计学	191
7.2.3	信息论与密码学	191
7.3	最大熵谱与最小误差熵估计	192
7.3.1	最大熵谱估计	192
7.3.2	最小误差熵估计	197
7.4	习题	198
参考文献	199

绪 论

信息论是应用近代数理统计的方法研究信息传输、存储和处理的科学,是在长期通信工程实践中发展起来的一门新兴科学,亦称为通信的数学理论。信息论的奠基人是美国科学家香农(C. E. Shannon)。香农 1948 年发表的著名论文《通信的数学理论》为信息论的诞生和发展奠定了理论基础。随着信息概念的深化,信息论在科学技术上的重要性已超越了狭义通信工程的范畴,渗透到许多科学领域中。

本章首先介绍信息的一般概念,然后讨论信息论的形成和发展以及信息论研究的范畴和通信系统模型。

1.1 信息的概念

物质、能源、信息构成了现代社会生存发展的三大基本支柱。一位美国科学家说:没有物质的世界是虚无的世界,没有能源的世界是死寂的世界,没有信息的世界是混乱的世界。可见,信息的重要性。那么,信息究竟是什么呢?信息是传输系统传输、交换、存储和处理的对象,信息载荷在语言、文字、数据、图像等消息之中。信息自古就有,但是在古代社会文明程度低,信息的传递手段落后,获取信息困难,人们没有意识到信息的存在。随着人类社会的不断进步,人们才意识到信息的存在。对信息的认识随着社会文明程度的提高不断扩大和深入。

人们常认为信息就是一种消息。这是一种最普遍的概念,是目前社会上最流行的概念。例如,当人们收到一份邮件,接到一个电话,收听了广播或看了电视节目以后,就说得到了信息。这个概念好像使人一听就明白,其实不准确。确切地说,这种概念把消息当成了信息。的确,人们从接收到的邮件,电话、广播和电视的消息中能获得各种信息。但是信息和消息并不是一回事,不能等同。在信息论中,信息和消息是紧密相关的两个不同概念。同样一个消息,例如同样一条新闻,对于不同的人从中可获得的信息是不一样的;同样的天气预报“明天天气晴好”,对于干旱地区和雨量充沛地区来说其信息含量也不一样。一张纸写上几个字成为一封家信,对于收信者是家书抵万金,但对旁人可能是废纸一张。

因此信息是一种奇妙的东西,它是有别于物质和能量的一种存在。信息的本质和它的科学定义是当前科学界乃至哲学界热衷研究的课题。

那么,作为一个科学名词,如何来定义信息呢?从最本质的意义上说,信息是人们对客观事物运动规律及其存在状态的认识。从小到一条简单的消息,大到宇宙的基本定律都是信息,它们无不是人们对客观事物变化规律或存在方式的认识和描述。

信息的价值在于:它为人们能动地改造外部世界提供了可能,信息所揭示的事物运动规律为人们应用这些规律提供了可能;而信息所描述的事物状态也为人们推动事物向着有利的方向发展提供了可能,当人们掌握的资源 and 能量越多,则面对同样的信息人们能以改造世界的可能性也越大。今天人们所掌握的物质力量比过去增大了不知多少倍,因此,信息对于当今社会发展和人们生活的重要性较之几百年前、几十年前甚至十几年前都是不可同日而语的,这是信息社会的一个重要特征。

信息运动的一般过程包括信息获取、信息传播、信息利用三个阶段。信息在这三个阶段分别表现为语义信息、语法信息和语用信息等不同的形态。信息获取就是利用各种手段获知事物的运动规律和现存状态,也就是获取信息的语义形态,即语义信息。信息获取的基本手段包括科学研究、调查采访及利用各种传感器等。大量科学定律和重要结论是通过科学研究和实验、利用归纳演绎等科学方法而得出的;而新闻报道是通过新闻采访、调查分析、综合整理得到的;还有大量的信息是利用各种专用传感器获取的,如水位计可测定水位,温度计可计量温度,摄像可获取视频图像等,这些都是获知事物客观状态的有效手段。信息获取过程中还必须克服随机性(“可能是什么”)和模糊性(“好像是什么”),为此原始信息获取后往往要进行相应的信息处理过程,以使语义信息凸现出来。信息传播是指利用各种传播工具使每一条信息能为更多的人所了解,相应的也即是使每一个人能获知更多的信息。从古代的烽火报警到现代的信息高速公路,其目标都是借助于传播过程使每个接收者获得尽可能多的语义信息。而语义信息本身是不能直接传输的,只能通过传输它的某些最基本特征(即语法信息)而使语义信息得到传递。若将语义信息比作一栋楼房,那么可将它分解为图纸、材料、施工技术 etc 语法信息,然后将这些语法信息传送到另一个地方重新组织起来,即可恢复原先的语义信息——楼房。信息传输过程主要克服的是随机性因素,因此,传输过程中的语法信息应是指各种符号出现的随机性及前后符号之间的统计关联性。这种分析方法是与传输信道的噪声效果相匹配的,这也正是香农信息理论取得成功的重要原因之一。信息利用是信息获取、信息传播的根本目的,它以恢复的语义信息为基础,结合接收者所处的特定环境,“取我所需,为我所用”,具有明显的相对性,表现了信息的语用形态,即语用信息。语用信息的这种相对性往往使信息概念表现得主观随意、不易捉摸。如甲、乙二人由于不同的知识结构和社会阅历,他们读同一本书所获取的有用信息可能差别甚大。然而信息利用是信息运动过程的最重要环节,正是对信息的广泛利用,才推动了这个世界日新月异的发展变化。

信息是承载在各种具体信号上的。以各种声、光、电参量表示的信号可承载语法信息。但需注意,信息与信号在本质上是根本区别的,信号仅仅是外壳,信息则是内核,两者互相依存,但属于不同的层次。信息与消息也不完全相同。消息描述了事物的特征和状态,因此,它与语义信息是相同的,但它与语法信息明显不同,与语用信息也不能等价。

在前面的分析过程中,已提到了信息、消息和信号三个名词。信息、消息和信号这三个概念在信息论和信号处理领域既有联系又有区别。下面将它们的定义比较如下。

信息: 信息是指各个事物运动的状态及状态变化的方式。人们从来自对周围世界观察得到的数据中获得信息。信息是抽象的意识或知识,它是看不见、摸不到的,人脑的思维活动产生的一种想法,当它仍存储在脑子中的时候它就是一种信息。

消息: 消息是指包含有信息的语言、文字和图像等,例如人们每天从广播节目、报纸和电视节目中获得各种新闻及其他消息。在通信中,消息是指担负着传送信息任务的单个符号或符号序列。这些符号包括字母、文字、数字和语言等。单个符号消息的情况,例如用J1表示晴天,J2表示阴天,J3表示雨天。还有符号序列消息的情况,例如“今天是晴天”这一消息由5个汉字构成。可见消息是具体的,它虽然载荷信息,但却不是物理性的。

信号: 信号是消息的物理体现,为了在信道上传输消息,就必须把消息加载(调制)到具有某种物理特征的信号上,信号是信息的载荷子或载体,是物理性的,如电信号、光信号等。按照信息论或控制论的观点,在通信和控制系统中传送的本质内容是信息,系统中实际传输的则是测量的信号,信息包含在信号之中,信号是信息的载体。信号到了接收端(信息论里称为信宿)经过处理变成文字、语音或图像,人们再从中得到有用的信息。在接收端将含有噪声的信号经过各种处理和变换,从而取得有用信息的过程就是信息提取,提取有用信息的过程或方法主要有**检测和估计**两类。载有信息的可观测、可传输、可存储及可处理的信号均称为数据。

信息的基本概念在于它的不确定性,任何已确定的事物都不含有信息。其特征有:

- (1) 接收者在收到信息之前,对它的内容是不知道的,所以信息是新知识、新内容;
- (2) 信息是能使认识主体对某一事物的未知性或不确定性减少的有用知识;
- (3) 信息可以产生,也可以消失,同时信息可以被携带、存储及处理;
- (4) 信息是可以量度的,信息量有多少的差别。

1.2 信息论的形成和发展

信息论理论基础的建立,一般来说开始于香农(C. E. Shannon)研究通信系统时所发表的《通信的数学理论》这篇论文。随着研究的深入与发展,信息论具有了较为宽广的内容。

信息在早些时期的定义是由奈奎斯特(Nyquist, H.)和哈特莱(Hartley, L. V. R.)在20世纪20年代提出来的。1924年奈奎斯特解释了信号带宽和信息速率之间的关系;1928年哈特莱最早研究了通信系统传输信息的能力,给出了信息度量方法;1936年阿姆斯特朗(Armstrong)提出了增大带宽可以使抗干扰能力加强。这些工作都给香农很大的影响,他在1941—1944年对通信和密码进行深入研究,用概率论的方法研究通信系统,揭示了通信系统传递的对象就是信息,并对信息给以科学的定量描述,提出了信息熵的概念。指出通信系统的中心问题是在噪声下如何有效而可靠地传送信息以及实现这一目标的主要方法是编码等。这一成果于1948年以《通信的数学理论》(A mathematical theory of communication)为题公开发表。这是一篇关于现代信息论的开创性的权威论文,为信

息论的创立做出了独特的贡献。香农因此成为信息论的奠基人。

20世纪50年代信息论在学术界引起了巨大的反响。1951年美国IRE成立了信息论组,并于1955年正式出版了信息论汇刊。

20世纪60年代信道编码技术有较大进展,使它成为信息论的又一重要分支。它把代数方法引入到纠错码的研究,使分组码技术发展到了高峰,找到了大量可纠正多个错误的码,而且提出了可实现的译码方法。其次是卷积码和概率译码有了重大突破;提出了序列译码和Viterbi译码方法。

信源编码的研究落后于信道编码。香农1959年的文章(Coding theorems for a discrete source with a fidelity criterion)系统地提出了信息率失真理论,它是数据压缩的数学基础,为各种信源编码的研究奠定了基础。

到20世纪70年代,有关信息论的研究,从点对点间的单用户通信推广到多用户系统的研究。1972年盖弗(Cover)发表了有关广播信道的研究,以后陆续有关于多接入信道和广播信道模型的研究,但由于这些问题比较难,到目前为止,多用户信息论研究得不多,还有许多尚待解决的课题。

信息论产生到现在,不到70年的时间,已经在通信、广播、电视、雷达、导航、计算机、自动控制、电子对抗等电子学领域得到了直接应用,还广泛地渗透到诸如医学、生物学、心理学、神经生理学等自然科学的各个方面,甚至渗透到语言学、美学等领域。1977年,美国经济学家马克·波拉特发表了长达九卷的《信息经济》报告,用信息论的基本概念研究经济现象和社会现象,将信息论的研究从自然科学领域正式移植到经济学和社会科学领域。

信息论发展成为涉及范围广泛的广义信息论,即信息科学。

1.3 信息论的研究范畴

信息科学是研究信息产生、获取、传输、存储以及信息识别和利用等有关问题的一门科学。研究的范围极其广泛,包括了许多看来似乎极不相关的领域。而信息论则是信息科学的理论基础。一般,关于信息论的研究有三种理解。

1. 狭义信息论

狭义信息论亦称香农信息论,是应用近代数理统计方法来研究信息传输和处理的基本理论。其主要讨论信息的度量、信源和信道的特性以及有关编码的问题。

2. 一般信息论

一般信息论主要研究通信理论问题,包括噪声理论、信号检测和滤波理论、调制理论以及信息处理等理论问题。

3. 广义信息论

广义信息论通常称为信息科学,是以香农信息论和维纳控制理论作为理论基础,运用信息概念和信息方法来研究自然界和人类社会有关的信息问题的理论。它不仅包括上述两个方面,概括来说,凡是能够用广义通信系统模型描述的过程或系统,都能用信息基本

理论来研究。不仅包括一般信息论的所有研究内容,而且包括所有与信息问题有关的各种领域,如心理学、生物学、遗传工程、语义学等。

本书所研究的范畴是**狭义信息论**,也就是香农信息论。1948年,美国的科学家香农在《贝尔电话》杂志上发表了题为“通信的数学理论”的文章,标志着信息论的诞生。它研究了信源、新宿和信道的统计特性以及有关的编码问题,为设计有效而可靠通信系统提供了理论依据。香农信息论的最大特点是将概率统计的观点和方法引入通信理论的研究中,揭示了通信系统中传输的对象是信息,并对信息给出了科学的、定量的描述,指出通信系统设计的中心问题是在随机噪声的干扰下如何有效而可靠地传输信息,实现这一目标的途径是信源编码和信道编码,并且从理论上证明了可以达到最佳性能的限度。

1.4 通信系统模型

信息论主要应用在通信领域,来研究如何有效而可靠地传输、存储和处理信息。因此,通信系统是信息的传输系统。其他学科领域如果能够用广义通信系统模型描述,也能用信息的基本理论来研究。实际的通信系统虽然形式和用途各不相同,但从信息传输的角度来看,在本质上有许多共同之处,均可以概括为图 1.1 所示的基本模型。

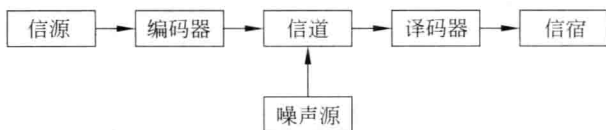


图 1.1 通信系统的基本模型

1. 信源

信源即产生消息的源。信源发出的消息可以有多种形式,可以是字母、符号、文字和数字等离散消息,也可以是语音、图像等连续消息。但都是随机发生的,即在没有收到消息之前不可能确切地知道它们的内容,否则将失去通信的意义。可以用随机变量或随机过程来描述消息。

信源研究的主要问题是信源输出消息的统计特性,信源产生的信息速率和信源的熵。

2. 信宿

信宿是信息的归宿,也就是消息传输的对象,即接收消息的人或者机器。信宿与信源处于不同的地点或存在于不同的时候。通信要使信源输出的消息能为信宿所接受和利用,信宿要对传送来的消息提出可接受的条件,即提出一定的保真度准则,发送端将以此来确定对信源处理时所要保留的最小信息量。

3. 编码器

编码器是将信源发出的消息变换成适合于在信道上传输的信号的设备。通常消息的传送即通信将受到时间或空间的限制,必须对消息进行某种变换、加工处理变成适宜于信道传输的某种随时间变化的物理量。这种随时间变化的物理量称为信号,如声信号、光信

号和电信号等,信号是消息的运载工具,也是信息的载体,编码器除了完成变换功能之外,还要执行提高信息传输有效性和可靠性的两项功能。通信的目的就是为了在接收端精确或者近似地重现发送端所发的消息,就要要求有效而可靠地进行通信。因此,编码器包括信源编码器和信道编码器两部分。

信源编码器的目的在于提高信息传输的有效性,是在一定的保真度准则下对信源输出进行变换。

信道编码是对信源编码器输出进行变换,用以提高信息传输的抗干扰能力。

4. 信道

信道是将载荷着消息的信号从通信系统的发送端传送到接收端的媒质或通道。可以是架空明线、电缆、波导、光纤、无线电波传播的空间等狭义通信系统中的实际信道,也可以是磁盘、磁鼓、书刊等其他传输媒介。信道除了具有传输信号的功能,还具有存储信号的作用。

信道要研究的主要问题是信道的统计特性和它的信息传输能力——信道容量。

5. 噪声源

噪声源是消息在传输过程中受到的干扰的来源。消息在传输过程中会遭受到各种干扰,如器件的热噪声、信道的热骚动、电离层的衰落干扰、天电干扰和人为干扰等。

为了分析简便起见,将整个通信系统中各部分引入的各种干扰都集中于一个噪声源,并直接作用于信道上,噪声源产生的干扰和信道上传输的信号一起成为接收端的接收信号。任何通信系统干扰是限制系统性能的基本因素。通信系统设计中的一个基本问题,就是提高抗干扰能力,以实现可靠通信。噪声源的统计特性是区分信道的重要因素,也是确定信道传输能力的决定因素,因此信息论要对干扰给以数学上的定量描述。

实际的噪声可以分成以下两大类:

(1) 加性噪声。由外界引入的随机噪声,如天电干扰以及设备内部的噪声,它们与信道的输入信号统计无关。信道的输出是输入信号和噪声的和。

(2) 乘性噪声。信号在传播过程中由于物理条件的变化引起信号参量的随机变化而形成的噪声,此时信道的输出信号是输入信号与某些随即参量相乘的结果。

6. 译码器

译码器是编码的逆变换器。它是从受干扰的信道输出信号中最大限度地提取有关信源输出消息的信息,尽可能精确地恢复信源的输出,并将其送给信宿。信宿需要的消息形式不一定都和信源输出的消息形式完全一致。同时,信道译码器是信道编码的逆变换器,信源译码器是信源编码的逆变换器。译码器的中心问题是研究各种可实现的解调和译码方法。在实际的通信系统中,信源、编译码器、信道和信宿将会随着讨论的问题不同而有所变化。

在通信系统模型中,信源的核心问题是它所包含的信息有多少,如何定量表示。而信宿问题是能收到或提取多少信息量。信道的问题主要是它最多能传送多少信息的问题,也就是信道容量的问题。另一类是信源有关的率失真函数的问题,就是在规定失真下所需传送的信息量的问题。最后是编译码的问题,信源编码的主要目标是用尽可能小的平

均码长来代表要传输的消息。信源编码可分为无失真信源编码和限失真信源编码,限失真编码接收端允许一定的失真,这样编码的平均长度可进一步减小,信源编码定理给出了数据压缩的下界。信道编码的主要目标是提高信息传送的可靠性。信道编码的理论基础是信息论中的信道编码定理,该定理指出当传送的信息率低于信道容量时,误码可接近零,这就是说理想的信道编码器能在码率接近信道容量时保证可靠的通信。

有效性和可靠性往往是相互矛盾的,信源编码通常通过压缩信源的输出来提高信息传输的有效性,例如信源输出的消息为“奥林匹克运动会”,在不发生异议的情况下,可以压缩为“奥运会”;信道编码通常通过对信源编码输出消息增加冗余信息来实现消息传输的可靠性,如信源编码输出为“奥运会”,在信道传输中,由于噪声的干扰,发生错误变成了“X运会”,接收端就不能正确译码。可以通过增加冗余信息“林、匹克、动”使信道编码器的输出为“奥林匹克运动会”,即使第一位发生了错误,接收端也可以通过冗余信息,进行自动纠错。

为了分析方便和突出问题的重点,通常在讨论信源编码问题时,将信道编码器和信道译码器都看作信道的一部分,使信源编码的研究主要和信源、信宿发生联系,而集中于解决在满足信宿要求的有效性问题上;当讨论信源编码时,则通常将信源编码和信源译码分别为信源和信宿的一部分,使信道编码的研究和信源、信宿无关,而只和信道有关,将集中解决抗干扰和失真问题。

1.5 习题

- 1.1 简述信息的概念和特点。
- 1.2 简述信息、消息以及信号之间的区别与联系。
- 1.3 简述通信系统的基本模型以及各部分的功能。
- 1.4 举例说明日常生活中的大信息量事件和小信息量事件。

信源和信息熵

2.1 信源的特性和分类

信源是消息的来源,可以是人、生物、机器或其他事物。信息论是研究信源以符号的形式输出各种可能消息的不确定性。信源发出的消息对于接收者来说存在不确定性,只有当消息符号出现是随机的,预先无法确定时,该符号的出现才能提供信息。消息符号的出现在统计上具有某些规律性,因此可以用随机变量或随机矢量来描述信源。也就是说,可以用概率空间来描述信源。

描述信源输出消息的随机变量,可以在某一离散集合内取值,也可以在某一连续区间内取值,相应的信源分别称为离散信源和连续信源。

信源输出的消息符号以离散符号的形式出现,例如,文字、字母、数字等,而且这些符号的个数都是有限的或可数无限值(可按自然数编号的无限称为可数无限,不可按自然数编号的无限称为不可数无限),这种信源就属于离散信源。

离散信源的数学模型是离散型概率空间:

$$\begin{bmatrix} X \\ p(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1, & a_2, & a_3, & \dots, & a_n \\ p(a_1), & p(a_2), & p(a_3), & \dots, & p(a_n) \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

其中, $X \in \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$, 为离散的随机变量, n 为正整数或者可数的无限值。

$p(a_i) = p(X=a_i)$ 是信源输出消息符号 $a_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 的概率, $p(a_i)$ 应满足

$$0 \leq p(a_i) \leq 1, \quad \sum_{i=1}^n p(a_i) = 1 \quad (2-2)$$

式 $p(a_i) = p(X=a_i)$ 表示信源可能输出的消息符号只能取 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 这 n 个符号中的一个。或者说,随机变量 X 的取值集合是一个完备的、两两不相容的基本随机事件集。

信源输出的消息符号的取值是连续的,即可能出现的消息符号数是不可数的无限值,例如语音、电视图像、遥感器测得的连续数据等。这样的信源就属于连续信源。

连续信源的数学模型为连续型概率空间: