

高等学校“十一五”规划教材



电子与通信工程系列

信息论理论基础

(第3版)

贾世楼 编著

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材



电子与通信工程系列

雷达成像技术	定价 28.00 元
VXI 总线雷达自动测试系统集成和模块设计范例	定价 20.00 元
VXI 总线即插即用规范	定价 200.00 元
金属天线与散射体分析 (译)	定价 20.00 元
天线技术	定价 18.00 元
空间交会对接技术	定价 55.00 元
ATM 技术与宽带综合业务网	定价 12.80 元
计算机通信与网络技术	定价 42.00 元
光纤测量与传感技术	定价 20.00 元
信息论理论基础 (第 3 版)	定价 16.80 元
电磁场与电磁波	定价 22.00 元
光通信技术	估价 20.00 元
信号检测理论	估价 18.00 元
数字逻辑电路	估价 20.00 元
卫星数字通信	估价 25.00 元
移动通信系统	估价 25.00 元
程控数字交换技术	估价 20.00 元
RF 与微波电路	估价 20.00 元
现代微波技术	估价 20.00 元
自动测试系统	估价 25.00 元

责任编辑 王超龙

封面设计 卞秉利

ISBN 978-7-5603-1601-7



9 787560 316017 >

定价 16.80 元

高等学校“十一五”规划教材/电子与通信工程系列

信息论理论基础

(第3版)

贾世楼 编著

哈尔滨工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

信息论理论基础/贾世楼编著. — 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.1(2007.7.3 版)

电子、通信工程研究生系列教材

ISBN 978 - 7 - 5603 - 1601 - 7

I . 信… II . 贾 III . 通信理论: 信息论 - 研究生 - 教材
IV . TN911.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 86283 号

责任编辑 王超龙

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂

开 本 850mm × 1168mm 1/32 印张 10.375 字数 266 千字

版 次 2001 年 1 月第 2 版 2007 年 7 月第 3 版

2007 年 7 月第 7 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 1601 - 7

印 数 26 001 ~ 30 000

定 价 16.80 元

(如因印装质量问题影响阅读, 我社负责调换)

再版序言

信息论近年来无论从理论和实际应用等方面都取得了很大的发展,在再版过程中基本上保留了原版的整体结构,在山农基本信息论的基础上保留了有关抗干扰编码和信息检测的基本内容,同时又增加了近代信息论一些基本内容。其中包括信息率失真函数和多用户信息论等内容。

在修订再版过程中,得到了哈尔滨工业大学通信工程教研室和通信技术研究所以许多同志的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

作 者

2001年1月

前 言

信息科学是一门涉及面极广的新兴的边缘科学。其任务是研究信息的性质、获取、传输、检测、存储、处理、控制的基本原理和方法。它的理论基础是从通信科学发展起来的信息论。

本书就是介绍信息论的基本理论和技术性问题。由于信息论涉及的领域十分广泛而发展又异常迅速,因此它有着丰富的内容。所以,本书不可能包括信息论的全部内容,本书共分六章:第一章引论,主要从通信系统的基本模型出发,讨论信息论的主要研究范畴和研究方法;第二章,基本信息论,主要以山农理论为基础,研究信息度量方法,信源熵和信道容量以及信源的匹配编码;第三章,理想通信系统,以通信系统的多维模型为基础,证明了理想系统的编码定理与实现,并对伪噪声编码通信的基本概念作了介绍;第四章,抗干扰二元编码,介绍了抗干扰编码的基本原理,并重点介绍了纠正独立错误的分组码——汉明码、循环码和卷积码的基本原理和编译码方法,对纠正突发错误的编码也作了介绍;第五章,信息检测基本原理,主要讨论了各种统计检测的最佳准则和最佳检测器的实现,对连续参量的估计也作了介绍;第六章,主要介绍了信息率失真函数以及它在信息价值和确定通信系统性能指标界方面的应用,对多用户信息论也作了介绍。

本书可作高等院校电子与通信工程类专业研究生教材,也可作为与信息科学相关专业研究生或通信专业高年级本科生的教学参考书,对工程技术人员也有参考价值。

本书由哈尔滨工业大学张乃通教授审阅并提出了宝贵意见,在编写过程中哈尔滨工业大学无线电通信教研室许多同志给予支持,并提出了宝贵意见,在此表示感谢。

作者

1985年3月

本书主要介绍机械识图和建筑施工现场常用的中小型起重机械、混凝土机械、钢筋机械、木工机械及其他机械的原理、构造、主要性能参数、维修、保养、使用方法、安全操作规程、故障检查、排除等。

本书适合于建筑施工现场机械设备管理、操作、维修人员作为培训教材和自学、参考书。

* * *

责任编辑：朱首明 王美玲

责任设计：赵明霞

责任校对：刘 钰 王雪竹

建筑业农民工业余学校培训教材

审定委员会

主 任：黄 卫

副主任：张其光 刘 杰 沈元勤

委 员：(按姓氏笔画排序)

占世良 冯可梁 刘晓初 纪 迅

李新建 宋瑞乾 袁湘江 谭新亚

樊剑平

目 录

第一章 引论

§ 1.1 通信系统基本模型	1
1.1.1 通信基本模型	1
1.1.2 对通信的基本要求	4
1.1.3 通信理论的研究方法	5
§ 1.2 信息论的研究范畴	5
1.2.1 信息论的研究内容	5
1.2.2 信息论的发展简史	8

第二章 基本信息论

§ 2.1 信息度量	10
2.1.1 研究信息度量的必要性	10
2.1.2 信源的不肯定性	10
2.1.3 信息量	15
§ 2.2 离散信源的熵	20
2.2.1 定义	20
2.2.2 离散信源提供的平均信息量——熵	20
2.2.3 熵函数 $H(x)$ 的性质	23
§ 2.3 二元联合信源的共熵与条件熵	24
2.3.1 二元联合信源的共熵	24
2.3.2 条件熵	26
2.3.3 $H(x, y) \leq H(x) + H(y)$ 的证明	27
2.3.4 消息的剩余度	35
§ 2.4 连续信源的熵	39

2.4.1	连续信源熵的定义	39
2.4.2	连续信源的最大熵	42
2.4.3	熵功率	48
2.4.4	二元联合信源的共熵	49
§ 2.5	熵速率和信道容量	50
2.5.1	信源熵速率	50
2.5.2	信道容量	51
§ 2.6	离散有噪信道中的熵速率和信道容量	53
2.6.1	接收熵速率	53
2.6.2	可疑度	57
2.6.3	信道容量	60
§ 2.7	连续有噪信道的熵速率与信道容量	60
2.7.1	接收熵速率	60
2.7.2	信道容量	62
§ 2.8	使信源与信道匹配的编码	63
2.8.1	编码定理	63
2.8.2	信源最佳化	65
2.8.3	符号独立化	66
2.8.4	概率均匀化——最佳编码	69
习 题		81

第三章 理想通信系统

§ 3.1	多维空间	86
3.1.1	物体的多维空间模型	86
3.1.2	多维空间的两个重要公式	87
§ 3.2	通信系统的多维模型	89
3.2.1	信号的多维模型	89
3.2.2	信号平均功率 p 与多维模型中原点到信号点距离 d 的关系	90
3.2.3	所有高维球的体积都集中在它的表面上	91

§ 3.3	理想通信系统的最大传信率和错误概率	92
3.3.1	理想通信系统	92
3.3.2	编码定理的证明	93
§ 3.4	理想通信系统的信噪比、带宽和时间的互换	96
3.4.1	互换关系式	96
3.4.2	信噪比改善与信道对消息带宽比的关系	97
3.4.3	信道临界带宽	99
§ 3.5	理想通信系统的实现方法	101
3.5.1	理想通信系统模型	101
3.5.2	现实系统的潜力	102
§ 3.6	理想接收机	104
3.6.1	相关接收机	104
3.6.2	匹配滤波器	107
§ 3.7	伪噪声编码通信	109
3.7.1	引言	109
3.7.2	伪噪声编码信号	110
3.7.3	伪噪声编码通信的基本原理	126
§ 3.8	扩频通信	130
3.8.1	引言	130
3.8.2	扩频系统的基本原理	130
习 题		133
第四章 抗干扰二元编码		
§ 4.1	抗干扰编码的基本概念	135
4.1.1	抗干扰编码基本思想	135
4.1.2	几个定义	137
4.1.3	码距 $d_{\min}$ 与纠错能力的关系	138
4.1.4	抗干扰编码的基本原理	139
§ 4.2	检错码	142
4.2.1	一致监督检错码	142

4.2.2	定比码	145
4.2.3	ARQ 系统	149
§ 4.3	用于单向信道的简单纠错码	151
4.3.1	简单重复码	151
4.3.2	正反码	152
§ 4.4	纠一位错误的汉明码	155
4.4.1	编码原理和监督矩阵	155
4.4.2	译码和检验矩阵	157
4.4.3	汉明码举例	159
4.4.4	汉明码的错误概率	164
4.4.5	汉明码效率	165
4.4.6	增余汉明码	165
4.4.7	生成矩阵	168
§ 4.5	循环码	172
4.5.1	定义	172
4.5.2	生成多项式	172
4.5.3	校验子	177
4.5.4	编译码方法	179
4.5.5	截短循环码	186
4.5.6	BCH 码	188
§ 4.6	纠正独立错误的卷积码	195
4.6.1	卷积码的基本监督矩阵	195
4.6.2	卷积码的一致监督矩阵	198
4.6.3	卷积码的生成矩阵	202
4.6.4	卷积码的编码方法	205
4.6.5	卷积码的译码方法	208
4.6.6	序列译码	209
4.6.7	维特比译码	215
§ 4.7	纠正突发错误的编码	216

4.7.1 纠正突发错误的必要性	216
4.7.2 交织法	217
4.7.3 纠正突发错误的卷积码	218
§ 4.8 有限域的基本知识	221
4.8.1 有限域的基本概念	221
4.8.2 有限域举例	223
4.8.3 有限域的乘法群	225
4.8.4 多项式域 $GF(2^n)$ 中元素间关系	226
4.8.5 一个有关多项式的定理	229
4.8.6 最小多项式(或称极小多项式)	230
习 题	233
第五章 信号的统计检测与参量估计	
§ 5.1 基本检测理论	236
5.1.1 假设检验	237
5.1.2 最佳检测的基本原理	239
§ 5.2 贝叶斯检测准则	245
§ 5.3 最大后验概率检测准则	246
§ 5.4 最大似然检测准则	247
§ 5.5 奈曼——皮尔逊准则	247
§ 5.6 极小极大检测准则	247
§ 5.7 高斯噪声信道的最佳检测器	251
§ 5.8 连续参量的估计	252
§ 5.9 贝叶斯估计	255
§ 5.10 其它估计算子	257
5.10.1 最大似然估计	257
5.10.2 条件最大似然估计	258
习 题	258
第六章 信息率失真函数与多用户信道	
§ 6.1 信息率失真函数	260

6.1.1	信息率失真函数的一般概念	260
6.1.2	$R(D)$ 函数的性质	266
§ 6.2	离散信源的 $R(D)$ 函数的计算	270
6.2.1	$R(D)$ 的参量表达式	271
6.2.2	二元信源的 $R(D)$ 函数	274
6.2.3	对称信源的 $R(D)$ 函数	279
6.2.4	$R(D)$ 函数的计算方法	280
§ 6.3	连续信源的 $R(D)$ 函数	283
6.3.1	定义和一般公式	283
6.3.2	$d(x, y)$ 只与 (x, y) 有关的情况	286
§ 6.4	信息价值	291
§ 6.5	通信系统性能指标的界	294
§ 6.6	一般化信息函数和信息率失真函数	297
§ 6.7	多用户信道	302
6.7.1	多用户信道的信道容量	303
6.7.2	多用户信道的编码定理	312
主要参考文献		313
附录 1		315
附录 2		316
附录 3		317

第一章 引 论

这一章主要通过对通信系统基本模型的讨论,给出信息论的研究范畴和主要内容。

§ 1.1 通信系统的基本模型

1.1.1 通信基本模型

在人类社会中,人与人之间要经常互通情报,交换消息,从一般意义上讲这就是通信。因此,简单地说,通信就是互通信息。而传递信息就是通信的根本目的。

通信系统的一般模型如图 1.1 所示。

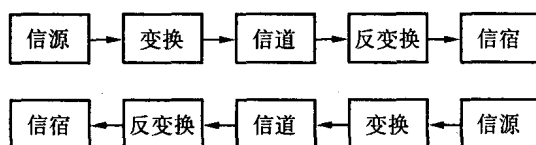


图 1.1 通信系统的一般模型

从图 1.1 可以看出,信息从信源(也称发信者)发出,通过信道来传递,信道就是沟通信源(发信者)与信宿(也称收信者)的通路或通道。因此,图 1.1 中信源、信道、信宿就可以构成通信系统的简单模型,从而完成信息传递的任务。

在通常情况下,为了使信息在信道中有效地传递,往往在发端要对信息进行必要地加工或处理,统称为变换。在收端,为了还原

信息,相应地要进行反变换。最简单的情况,如人与人面对面的讲话,这是一种直接通信方式,不需要任何变换与反变换过程,但通信距离小,人们早已大量使用了电报、电话、传真、电视等方式来实现通信,克服了时间和空间的限制,它们都属于间接的通信方式,信息都需要进行适当地变换和反变换,并借助于电信号来实现信息传递,这就是近代通信方式,通常称为电信。在现代通信中,信源和信宿可以是人,也可以是机器(如计算机等),它们分别为信息的发出者和接收者。

信息的变换和反变换则包括各种各样的终端处理设备,通常包括能量变换、编码与译码、调制和解调等过程。在近代通信中,要传递的信息形式是多种多样的,如文字、语言、传真图片、图像及各种数据等。近代通信的主要方式几乎大多采用电信方式,即用电信号来传递信息。这就需要将非电量的信息变成电信号,然后利用电信号的传递实现通信的目的。这需要能量变换,完成能量变换的设备通常称为换能器,例如电话通信中的话筒、耳机或喇叭就是完成声电变换的换能器,图像通信中的摄像管和显像管就是完成光电变换的换能器。变换前后两种能量形式变化状况要相互完全对应,也就是不失真变换。把由声能或光能变换成的电振荡(或电能)统称为电信号,或简称为信号。这种信号充分代表了原始信息,因此在考察和分析信源时,可以不去分析真正的原始信源,而只分析和研究由它变换过来的信号(源)就可以了。

模数变换是数字或数据通信中特有的变换形式。它是对电信号实行的一种变换。由换能器得到的信号是对原始信号的逼真摹写,因此常称为模拟信号,传递模拟信号的通信系统通常称为模拟通信系统。这种模拟信号在任意时刻的取值是任意的,它是时间的连续函数。在数字通信中,信号只能取有限个离散值,而且出现的时间也是离散的。但是模拟信号和数字信号是可以互相转换的,例如数字电话通信中,就是把模拟话音信号变换成数字信号进行传送,在接收端再把数字信号还原成模拟信号,这两种变换过

程,就称模数变换和数模变换。

编码也是一种变换过程,通常是用来对数字信号进行处理,广义上讲,也包括对模拟信号的处理。

电信系统的编码主要有两种目的:一种是为了改善信息的传输效率,一种是为了提高信息传输的可靠性。前者称为有效性编码,主要是针对信源特性进行处理,所以有时也称为信源编码。后者称为可靠性编码或抗干扰编码,它主要是针对信道特性进行处理,所以有时也称为信道编码。

信号的调制也是一种变换过程,它的主要作用是使信号宜于在给定的信道上的传输。例如,当用微波信道传送信号时,就需要把信号的频谱搬移到指定的微波频段上。这种信号频谱搬移的过程,就是调制。模拟信号的调制方式通常有:调幅(AM),单边带调制(SSB),调频(FM),调相(PM)等;数字信号的调制方式通常有:幅度键控(ASK),频移键控(FSK),相移键控(PSK),以及一些新的数字调制方式,如参差正交相移键控(SQPSK),连续相位频移键控(CPFPSK)及最小键控(MSK)等。

在近代通信中,信道就是电信号传输的通道和媒介。可以按不同的分类方法对信道进行分类:

1. 按传输媒质不同信道可分为

(1) 有线信道:这种信道是利用导体来传输电信号。常用的有线信道有架空明线,电缆、波导等,光纤通信中的导光纤维也是有线信道。

(2) 无线信道:这种信道是利用电磁波的传播来传输电信号。根据电磁波的传播特点,常用的无线信道可分为:短波电离层反射信道,微波接力信道,卫星中继信道,微波散射信道等。

2. 按信道特性可分为

(1) 恒参信道:这种信道,其特性不随时间变化。常见的恒参信道有:有线信道,微波接力信道,卫星中继信道等。

(2) 变参信道:这种信道,其特性随时间变化。有时也称时变