

21 世纪信息通信系列教材



工程信息论

G O N G C H E N G X I N X I L U N

田宝玉 编著

周炯槃 吴伟陵 审



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

1.2

00

工程信息论

田宝玉 编著
周炯槃 吴伟陵 审

北京邮电大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书以信息熵为基本概念,以仙农的三个基本定理为核心,系统地讲述了仙农信息论的基本理论,主要包括:离散信息和连续信息的度量,离散信道和连续信道的容量,无失真信源编码定理,有噪信道编码定理,信息率失真函数,有约束信道的容量与编码,空时信道的容量等。

本书注重信息论基本知识的理解和基本运算技能的掌握,并强调理论的实际应用,同时还兼顾到该领域的某些最新进展,可作为电子信息与通信类专业本科生的教材和研究生的参考书,还可供相关专业教学,科研以及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程信息论/田宝玉编著. —北京:北京邮电大学出版社,2004

ISBN 7-5635-0703-5

I. 工... II. 田... III. 信息论—高等学校—教材
IV. G201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 044509 号

书 名:工程信息论

编 著:田宝玉

责任编辑:方 瑜

出 版 者:北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号)

邮编:100876 发行部电话/传真:62282185/62283578

网址:<http://www.buptpress.com>

经 销:各地新华书店

印 刷:北京源海印刷有限责任公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:20.75

字 数:453 千字

印 数:1—5000 册

版 次:2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-0703-5/TN·328

定价:29.80 元

如有印装质量问题请与北京邮电大学出版社发行部联系

前 言

50 多年前(1948 年)经典信息论,即仙农信息论的诞生标志着人们对客观世界认识的飞跃。当前,经典信息论已渗透到多个技术领域,而飞速发展的信息技术也已成为推动世界生产力发展的重要因素。因此,人们越来越认识到信息论的基本原理是从事信息领域研究或管理所必须具备的知识。

20 世纪 80 年代,北京邮电大学周炯槃院士出版的《信息理论基础》是我国第一部系统介绍仙农信息论的专著,开创了我国信息论教学的新阶段,该书曾获教育部优秀教材特等奖。20 世纪末,北京邮电大学吴伟陵教授的《信息处理与编码》一书,作为国家 95 重点教材,全面介绍了通信中的三大基本技术问题,即传输的有效性、传输的可靠性以及传输的安全性问题,也受到社会的广泛欢迎,并多次再版。

随着信息技术的发展,很多大学的相关专业相继开设信息论课程,说明信息论基本理论的普及和掌握在当前信息时代显得越来越重要。因此,编写既适于本科层次又兼顾研究生层次,而且还包含当前信息领域最新进展内容的教材就显得尤为需要。这也是本书《工程信息论》写作的初衷。

本书是在上述两本教材的基础上,用作者经过多年的教学和科研实践经验的积累,以及向众多的信息论与通信界著名专家学习的心得体会写成的。

本书力求遵循与时俱进的原则,简化某些不太重要的内容,适当增加该领域的最新成果。与国内已出版的大部分教材相比,所增加的内容主要有:第 2 章的信息散度;第 3 章的无限离散信源和周期马氏源;第 4 章对离散无记忆信道容量的计算方法的系统归纳;第 5 章对算术编码的较详细的论述,LZ 编码以及文本树加权编码;第 6 章用联合典型序列方法对仙农第 2 定理所作的证明;第 7 章的最大熵谱估计和复高斯信源熵的计算;第 8 章的数字调制系统的容量,该内容对数字调制与编码系统的研究有重要参考价值;第 9 章的倒注水原理;第 10 章的有约束信道容量与编码的大部分内容;第 11 章的空时信道容量的研究。

本书所考虑的另一个因素就是力求让讲述的内容更适合工科专业学生的学习,因此对定理的讲解尽量不陷入繁琐的数学推导,而注重明确的物理或直观的概念和理解,并尽量用实例来说明,从而使本书更体现信息论宽广的工程背景。

此外,为了便于自学,本书将内容分成层次,有*号者在初学时可以略过。同时,每章后面都有习题作为课后的练习。为便于读者对某些问题进行深入研究,有些章后面列出了本章的重要参考文献,而各章共同的参考文献则列于书的末尾。

学习本课程需要具备较扎实的概率论与随机过程的知识,如果有通信原理的基础则更好一些,但通常本课程可以与通信原理课同步学习。本书除主要用做信息与通信或相关专业本科教材外,还可作为相关专业研究生和工程技术人员的参考书。

本书在写作过程中,作者得到北京邮电大学的资助,得到校领导、教务处和信息工程学院领导郭军院长、杨洁副院长的关心与支持,并始终得到了周炯荣、吴伟陵、钟义信等信息论著名专家的关心与指导,得到了信息理论与技术教研中心的全体教师特别是吴文礼教授、王晓湘副教授的支持与帮助,得到天津大学电子信息工程学院戴居丰院长、侯春萍副院长、王秉钧教授的支持。很多同学也为本书的完成作出了贡献,他们是贺志强、龙恩、李涛、谭云、田涛、黄曜明、聂霄、张帆、胡子明等。作者在此一并表示感谢。

尽管作者花费很大精力撰写本书,但终因水平所限,错误与疏漏之处所在难免,敬请诸位读者批评指正。

作者

2004年3月于北京邮电大学

目 录

第 1 章 绪论

1.1 信息的概念和主要特征	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 信息的基本概念和特征	2
1.1.3 信息论的基本内容	3
1.2 通信系统的模型	3
1.2.1 通信系统模型	4
1.2.2 提高通信系统技术指标的措施	5
1.3 仙农信息论所研究的问题	6
1.3.1 仙农信息论所研究的问题	6
1.3.2 仙农信息论的特点	7
1.4 仙农信息论形成与发展	7
1.4.1 技术背景	7
1.4.2 理论背景	7
1.4.3 仙农的主要工作	7
1.4.4 仙农信息论发展	8
1.4.5 信息论的应用	9
1.5 仙农生平简介与研究风格	9
1.5.1 仙农生平简介	9
1.5.2 仙农的学术风格	10

第 2 章 离散信息的度量

2.1 自信息和条件自信息	11
2.1.1 自信息	11
2.1.2 联合自信息	12
2.1.3 条件自信息	12

2.2 互信息和条件互信息	13
2.2.1 互信息	13
2.2.2 互信息的性质	13
2.2.3 条件互信息	14
2.3 离散集合的平均自信息(熵)	15
2.3.1 信息熵	15
2.3.2 条件熵	15
2.3.3 联合熵	15
2.3.4 信息熵与热熵的关系	16
2.4 熵的基本性质	16
2.4.1 凸函数	16
2.4.2 信息散度	18
2.4.3 熵的基本性质	19
2.4.4 各类熵的关系	20
2.4.5 熵函数的惟一性	21
2.5 离散集的平均互信息	21
2.5.1 集合与事件之间的互信息	21
2.5.2 平均互信息	21
2.5.3 平均互信息与熵的关系	22
2.5.4 平均互信息的性质	22
2.5.5 平均条件互信息	24
本章小结	25
习题	26

第3章 离散信源

3.1 信源的分类与数学模型	30
3.1.1 信源的分类	30
3.1.2 信源的数学模型	30
3.2 离散无记忆信源	31
3.2.1 单符号离散无记忆信源	31
3.2.2 多维离散无记忆信源	32
3.3 离散无记忆信源的扩展源	32
3.3.1 N 次扩展源	32
3.3.2 N 次扩展信源的熵	33
3.4 无限离散信源	33

3.4.1 无限离散信源的均值和熵	33
* 3.5 概率分布的信息生成函数	35
3.6 离散平稳信源	36
3.6.1 概述	36
3.6.2 平稳有记忆 N 次扩展源的熵	37
3.7 马尔可夫信源	39
3.7.1 有限状态马氏链	39
3.7.2 状态转移概率	39
3.7.3 齐次马氏链	40
3.7.4 Kolmogorov-Chapman 方程	41
3.7.5 马氏链状态分类	42
3.7.6 马氏链的平稳分布	43
3.7.7 马尔可夫信源	45
3.7.8 马尔可夫信源熵的计算	47
3.8 信源的剩余度	52
3.8.1 信源的相关性	52
3.8.2 信源剩余度(冗长度)	53
本章小结	53
附录 定理 3.4.2 的证明	54
习题	55

第4章 离散信道及其容量

4.1 信道模型及其分类	59
4.1.1 信道模型	59
4.1.2 信道的分类	59
4.2 离散无记忆信道	61
4.2.1 一般信道的数学模型	61
4.2.2 离散无记忆信道	61
4.2.3 平稳(或恒参)信道	61
4.2.4 单符号离散信道	61
4.2.5 离散无记忆扩展信道	63
4.3 扩展信道输入与输出平均互信息	64
4.4 级联信道	67
4.5 离散无记忆信道容量	69
4.5.1 信道容量的定义	69

4.5.2 离散无噪信道的容量	69
4.5.3 信道容量的计算	70
4.5.4 离散对称信道的容量	73
4.5.5 离散无记忆 N 次扩展信道的容量	76
4.5.6 离散并联信道的容量	76
4.5.7 和信道的容量	76
4.5.8 关于信道容量的注释	78
4.6 信道容量的迭代计算	78
本章小结	80
附录 定理 4.5.1 的证明	82
习题	83

第5章 无失真信源编码

5.1 概述	87
5.1.1 无失真信源编码的分类	87
5.1.2 信源编码器模型	87
5.1.3 简单信源编码器举例	88
5.2 分组码	89
5.2.1 分组码的性质	89
5.2.2 码树	90
5.3 定长码	91
5.3.1 无失真编码条件	91
5.3.2 信源序列分组定理	92
5.3.3 渐进均分特性	94
5.3.4 定长码信源编码定理	94
5.4 变长码	97
5.4.1 异前置码的性质	97
5.4.2 变长码信源编码定理	99
5.5 最优码	102
5.5.1 二元哈夫曼(Huffman)编码	102
5.5.2 多元哈夫曼编码	105
5.5.3 马氏源的编码	106
* 5.6 算术编码	108
5.6.1 积累概率	108
5.6.2 算术编码的性能	112

5.6.3 算术编码和译码算法	113
5.6.4 一般马氏源的算术编码	115
5.6.5 算术编码算法实现中的技术问题	116
5.7 L-Z 编码	116
5.7.1 L-Z 算法简介	117
5.7.2 一种简化的 LZW 算法	117
5.8 文本树加权编码	121
5.8.1 二元序列概率的估计	121
5.8.2 树信源和文本树	121
5.8.3 文本树加权编码的实现	125
5.8.4 文本树加权编码的性能评估	126
本章小结	126
本章参考文献	128
习题	128

第 6 章 有噪信道编码

6.1 概述	131
6.1.1 信息传输速率	132
6.1.2 单符号判决规则	133
6.1.3 译码错误概率	133
6.2 常用判决准则	134
6.2.1 最大后验概率准则	134
6.2.2 最大似然准则	134
6.3 费诺(Fano)不等式	136
6.3.1 信道疑义度	136
6.3.2 费诺不等式	136
6.3.3 序列费诺不等式	138
6.4 序列的最佳译码准则	138
6.4.1 汉明距离	138
6.4.2 序列最大似然译码	139
6.5 有噪信道编码定理	140
6.5.1 联合典型序列	140
6.5.2 有噪信道编码定理	141
6.5.3 无失真信源信道编码定理	144
本章小结	145

习题.....	146
---------	-----

第7章 连续信息与连续信源

7.1 连续随机变量的互信息	150
7.1.1 连续随机变量的离散化	150
7.1.2 连续随机变量的互信息	151
7.1.3 连续集合平均互信息的性质	152
7.2 连续随机变量集合的熵	152
7.2.1 连续随机变量集合的熵	152
7.2.2 差熵的性质	154
7.2.3 信息散度	156
7.2.4 差熵与平均互信息的关系	156
7.2.5 线性变换下平均互信息的不变性	156
7.3 离散时间高斯信源的熵	157
7.3.1 一维高斯随机变量集合的熵	157
7.3.2 多维独立高斯随机变量集合的熵	157
7.3.3 多维相关高斯随机变量集合的熵	157
7.3.4 复高斯信源的熵	159
7.4 连续最大熵定理	161
7.4.1 限功率最大熵定理	161
7.4.2 限峰值最大熵定理	162
7.5 连续时间波形的正交展开	163
7.6 连续时间信源的熵	166
7.6.1 限带高斯白噪声信源的熵	166
7.6.2 限带高斯信源的熵	167
7.6.3 熵功率	168
7.7 最大熵原理与最大熵谱估计	168
7.7.1 最大熵原理	169
7.7.2 最大熵谱估计	169
7.8 离散集合与连续集合之间的互信息	171
7.8.1 离散事件 x 与连续事件 y 之间的互信息	171
7.8.2 离散集合 X 与连续集合 Y 的平均互信息	171
本章小结.....	172
本章参考文献.....	172
附录 复矢量到实矢量的变换及其性质.....	173

习题.....	173
---------	-----

第8章 波形信道

8.1 离散时间连续信道	176
8.1.1 加性噪声信道	177
8.1.2 加性高斯噪声信道	177
8.1.3 容量代价函数	178
8.1.4 离散时间信道的容量	179
8.1.5 一般加性噪声信道容量界	180
8.1.6 并联加性高斯噪声信道	181
8.2 数字基带波形的正交展开	183
8.3 AWGN 信道的容量.....	185
8.3.1 加性高斯噪声信道	185
8.3.2 波形信道的互信息与容量	186
8.3.3 AWGN 信道的容量.....	187
8.3.4 高斯噪声信道编码定理	190
8.3.5 功率利用率和频谱利用率的关系	191
8.4 有色高斯噪声信道	193
8.5 数字调制系统的信道容量	196
8.5.1 PAM 调制系统的信道容量	196
8.5.2 二维数字调制的信道容量	199
8.5.3 BPSK 调制的信道容量	202
* 8.6 复高斯信道容量	203
* 8.7 接近信道容量界的编码	205
8.7.1 Turbo 码	205
8.7.2 LDPC 码	206
本章小结.....	207
本章参考文献.....	208
习题.....	209

第9章 信息率失真函数

9.1 概述	213
9.1.1 系统模型	213
9.1.2 失真测度	214
9.2 信息率失真函数	215

9.2.1 信息率失真函数	215
9.2.2 $R(D)$ 的性质	216
9.3 限失真编码定理	219
9.3.1 编码速率的压缩	219
9.3.2 限失真信源编码定理	220
9.3.3 限失真信源信道编码定理	222
9.4 离散信源信息率失真函数的计算	223
9.4.1 $R(D)$ 参量表示法求解	224
9.4.2 方程的解法	225
9.4.3 参量 s 的意义	226
9.5 连续信源信息率失真函数	229
9.5.1 信息率失真函数与性质	229
9.5.2 $R(D)$ 函数的计算	229
9.5.3 差值失真测度	231
9.6 高斯信源的 $R(D)$ 函数	231
9.6.1 离散时间无记忆高斯信源	232
9.6.2 独立并联高斯信源	233
9.6.3 有记忆高斯信源	235
9.6.4 时间连续高斯信源	236
9.6.5 限带高斯信源	237
9.7 一般连续信源 $R(D)$ 函数	238
9.8 有损数据压缩	238
9.8.1 量化	239
9.8.2 最佳速率分配	239
9.8.3 预测编码	240
9.8.4 子带编码	241
9.8.5 变换编码	242
本章小结	242
附录1 关于 P_e 的计算	243
附录2 定理 9.7.1 的证明	245
本章参考文献	246
习题	247

第10章 有约束信道及其编码

10.1 标号图及性质	250
-------------------	-----

10.1.1	标号图的基本概念	251
10.1.2	标号图的变换	253
10.2	有约束信道的容量	257
10.2.1	有约束信道容量的定义	257
10.2.2	等时长符号有约束信道的容量	257
10.2.3	不等时长无约束信道的容量	259
10.2.4	不等时长有约束信道的容量	259
10.2.5	马氏源的最大熵	261
10.3	有约束序列的性质	262
10.3.1	信道的约束	262
10.3.2	游程长度受限序列(RLL)	263
10.3.3	部分响应最大似然(PRML)序列	265
10.3.4	直流平衡序列	266
10.3.5	其他频域受限序列	268
10.4	有约束信道编码定理	268
10.4.1	有约束信道编码定理	268
10.4.2	编码器的描述	270
10.4.3	近似特征矢量	271
10.4.4	一致状态分裂	272
10.4.5	有限状态编码定理	273
*10.5	有约束系统的编码	274
10.5.1	编码器性能指标	274
10.5.2	块编码器	275
10.5.3	确定性编码器	277
10.5.4	有限类型编码器	278
10.5.5	直流平衡序列编码系统	279
10.5.6	滑动块译码器	281
10.6	有约束序列编码实例	282
10.6.1	(d, k) 块码编码系统	282
10.6.2	实用的直流平衡序列	284
10.6.3	无直流游程受限序列	284
10.6.4	有约束序列在家用电子产品中的应用	284
本章小结		285
附录 定理 10.2.2 的证明		285
本章参考文献		287

习题.....	287
---------	-----

第 11 章 空时信道的容量与空时码

11.1 空时无线系统.....	290
11.2 衰落多径信道的统计模型.....	291
11.2.1 多径信道描述参数.....	291
11.2.2 频率非选择性信道.....	292
11.2.3 频率选择性信道.....	293
11.2.4 衰落信号分量的统计模型.....	294
11.3 确定性 MIMO 信道的容量	295
11.3.1 MIMO 信道模型	295
11.3.2 发射机未知 CSI 的容量	296
11.3.3 发射机已知 CSI 的容量	297
11.3.4 SIMO 系统的容量	298
11.3.5 MISO 系统的容量	299
11.4 衰落 MIMO 信道的容量	300
11.4.1 容量的定义.....	300
11.4.2 容量的计算.....	301
11.4.3 影响信道容量的因素.....	304
11.5 空时接收机.....	305
11.5.1 CSI 对发射机和接收机均已知情况	305
11.5.2 信道状态仅对接收机已知情况.....	305
11.6 空时信道的编码.....	308
11.6.1 空时编码器.....	308
11.6.2 空时块码.....	309
11.6.3 空时格码.....	311
11.6.4 空间复用编码.....	312
11.6.5 可达容量的比较.....	313
本章小结.....	313
本章参考文献.....	314
习题.....	314
参考文献.....	317

第 1 章 绪 论

1.1 信息的概念和主要特征

1.1.1 概述

我们知道,组成客观世界三大基本要素是:物质、能量和信息。特别是在今天的信息时代,社会的发展更离不开物质(材料)、能量(能源)和信息资源。美国学者欧廷格说:“没有物质什么都不存在,没有能量什么都不发生,没有信息什么都无意义。”(“Without materials nothing exists. Without energy nothing happens. Without information nothing makes sense.”)因此,关于信息的课程本应该像物理、化学、生物等课程一样,是基础课。但是,由于信息的抽象性以及人们对信息的认识还不完全清楚,所以在当前只能是专业课。

人们普遍认为,1948 年美国工程师和数学家仙农(Claude Edwood Shannon, 1916~2001)发表的《通信的数学理论》(《A Mathematical Theory of Communication》, BSTJ, 1948)这篇里程碑性的文章标志着信息论的产生,而仙农本人也成为信息论的奠基人。

几十年来,随着人们对信息的认识不断深化,对信息论的研究日益广泛和深入,信息论的基本思想已渗透到许多学科。在人类社会已经走过农业时代和工业时代,进入信息时代的今天,信息理论的应用将不可避免地超出通信领域,而向其他自然科学和社会科学领域延伸和发展。

仙农指出,通信的基本问题是在一点精确地或近似地恢复另一点所选择的消息。人们从这个基本问题出发,对通信系统制定了 3 项性能指标:传输的有效性,传输的可靠性,传输的安全性。有效性是指:1)信源代码应尽量短(如摩尔斯电码“点”代表出现频率最高的字母 e);2)信息传输应尽量快,即高的传信率;3)信息传送应该尽量节省资源,即高的频谱利用率。可靠性是指传输差错要尽量少,对数字传输就是要求低的误码率。安全性是指传输的信息不能泄露给未授权人。3 项性能指标所对应的 3 项基本技术是:数据压缩,数据纠错,数据加密。

仙农信息论解决了前两项技术的理论问题:提高有效性可通过信源编码来实现,即信源压缩编码,并给出了压缩编码的极限;提高可靠性可通过信道编码来实现,并给出实现可靠传输的信息传输速率的极限。所以说,仙农揭示了数据压缩和传输的基本定律。

实际上,传输安全性的理论问题也是仙农首先解决的。不过,关于传输安全性的问题往往被认为属于信息安全或密码学领域。早在二战期间,仙农就对密码学感兴趣。他认识到,密码学中的基本问题与通信中的问题密切相关。1945年,他完成了《密码学的数学理论》(“A Mathematical Theory of Cryptography”)一文,1949年更名为《保密系统的通信理论》(“Communication Theory of Secrecy System”)公开发表。这篇文章建立了保密系统的数学理论,对密码学产生了很大的影响。人们认为,是仙农的工作才把密码学从艺术变成科学。

所以说,仙农建立了通信系统中的3项基本技术的理论基础,信息论是前两项技术的理论基础。

1.1.2 信息的基本概念和特征

由于信息已成为许多专家学者争相研究的对象,而且他们从不同的角度和侧面研究和定义信息。据说,到目前为止已有上百种信息的定义或说法。例如,“信息是事物之间的差异”,“信息是物质与能量在时间与空间分布的不均匀性”,“信息是收信者事先不知道的东西”等等。

正因为信息定义形式繁多,所以当前还没有一个公认的关于信息的定义,但这并不影响我们对信息的基本特征的认识。信息有许多与物质、能量相同的特征,例如,信息可以产生、消失、携带、处理和量度。信息也有与物质、能量不同的特征,例如,信息可以共享,可以无限制地复制等。

下面我们采用一种比较普遍的说法来描述广义信息。

信息是认识主体(人、生物、机器)所感受的和所表达的事物运动的状态和运动状态变化的方式。以这种定义为基础,我们可以把广义信息分成3个基本层次,即语法(Syntactic)信息,语义(Semantic)信息,语用(Pragmatic)信息。它们分别反映事物运动状态及其变化方式的外在形式、内在含义和效用价值。

语法信息是事物运动的状态和变化方式的外在形式,不涉及状态的含义和效用。像语言学领域的“词与词的结合方式”,而不考虑词的含义与效用,在语言学中称为语法学。语法信息还可细分为概率信息、偶发信息、确定信息、模糊信息等。

语义信息是事物运动的状态和变化方式的含义。在语言学里,研究“词与词的结合方式含义”的学科称为语义学。

语用信息是事物运动状态及其状态改变方式的效用。

下面举例说明信息3个层次的含义。有一个情报部门,其主要任务是对经济情报进行收集、整理与分析以提供给决策机构。该部门设3个组:信息收集组、信息处理组和信