

信源编码 原理与应用

田宝玉 贺志强 杨洁 许文俊◎编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

信源编码 原理与应用

田宝玉 贺志强 杨洁 许文俊◎编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书以香农信息理论为基础,较系统全面地介绍该理论的一个重要组成部分——信源编码原理与应用。本书共 14 章,内容主要包括:信源编码的基本知识、信源特征和常用信源、无损压缩编码理论、熵编码(分组码)、熵编码(算术编码)、通用无损信源编码、有损压缩编码理论、标量量化、矢量量化、预测编码、变换编码、子带编码、小波变换编码以及分布信源编码等。

本书在内容选择方面不仅考虑到基础性和完整性,同时也考虑到先进性和时代性,增加了本学科领域某些重要的新理论和新技术。本书强调教学内容中物理概念与结论的理解和掌握,简化或删除烦琐的数学推导。本书注重理论知识的实际应用,大部分章节都包含例题、基本算法、应用实例以及一定数量的思考题和习题。

本书主要用作信息与通信或相关专业研究生教材,也可作为相关专业工程技术人员或高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

信源编码原理与应用 / 田宝玉等编著. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2015.12

ISBN 978-7-5635-4535-3

I. ①信… II. ①田… III. ①信源编码—教材 IV. ①TN911.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 228211 号

书 名: 信源编码原理与应用

著作责任者: 田宝玉 贺志强 杨洁 许文俊 编著

责任编辑: 刘春棠

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 24.25

字 数: 632 千字

印 数: 1—2 000 册

版 次: 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4535-3

定 价: 48.00 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

当今社会是一个信息爆炸的社会,每时每刻都产生着海量的信息需要传输或处理。为充分利用有限的时间、空间和频谱资源,提高工作效率,降低处理成本,提高信息传输有效性显得尤其重要,而信源编码就是提高信息传输有效性的基本手段。

信源编码也称信源压缩编码,其基本思想就是压缩信息传输的码率。信源编码理论是对信源进行无损或有损压缩的理论基础,是香农信息论的重要组成部分。信源编码课程也是通信、信号与信息处理专业的重要学位课。学习本课程的目的主要是,掌握压缩编码的基本原理与技术,熟悉某些重要的信源编码方法,了解信源编码的主要应用和最新进展以及有关的新理论与新技术,为今后从事该领域更深入的研究奠定良好的理论和技术基础。

自从信息论产生以来,作为信息论的主干内容,信源编码和信道编码都得到飞速的发展。但与信道编码(纠错码)领域的专著或教材建设呈蓬勃发展的局面相比,关于信源编码的专著或教材数量很少。直到20世纪末(1990年)才有Robert M. Gray的《信源编码理论》(Source Coding Theory)一书问世,不过这本书讲述的仅是关于有损压缩的理论,也未涉及信源压缩的基本技术。而后还有一些可以归类于信源编码领域的专著,但大部分都是以信源编码研究的某个侧面作为重点。例如,有的侧重于有损压缩,有的侧重于具体的压缩技术。实际上,随着信息论的普及和信源压缩编码技术的发展,社会需要更多的全面系统介绍信源编码原理与实践的教材。

从20世纪80年代开始,中国工程院院士周炯槃教授率先在北京邮电大学开设信源编码研究生课程,并在1996年出版了《信源编码原理》一书。这是我国第一部全面系统地介绍信源编码理论与技术的专著,该书明确了信源编码领域的主要研究内容和基本框架,填补了我国在信源编码教材建设方面的空白,推动了国内信源编码理论与技术的研究与有关知识的普及。21世纪初,作者在周先生的指导下在信源编码领域的研究与教学实践中继续探索,经过多年教学和科研实践的积累,在研究和借鉴国内外大量专著和文献的基础上,以《信源编码原理》为主要参考书,进一步优化整合教学内容,并进行改进和补充,写成本书。

本书可视为《信源编码原理》内容的进一步充实和补充,共分为14章:第1章主要介绍信源编译码器模型、信源编码性能指标和信源编码研究进展;第2章介绍信源特征和建模以及四种常用信源:文本信源、音频信源、语音信源、图像信源;

第3章介绍无损压缩编码理论基础,主要包括:有根树、模型参数的估计、无失真信源编码定理以及通用无损压缩理论;第4章介绍几种重要的分组编码,包括哈夫曼(Huffman)编码、游程长度编码、格伦(Golomb)码、Tunstall码以及传真压缩技术;第5章介绍算术编码,主要包括:积累概率的概念、算术编码的性能以及编译码算法和实现;第6章介绍通用信源编码,主要包括:某些简单的通用编码、基于段匹配的编码、基于BT变换(BWT)的编码、部分匹配预测(PPM)编码、上下文树加权(CWT)编码;第7章介绍有损压缩编码理论基础,主要包括:连续随机变量的AEP、率失真函数、香农下界和限失真信源编码定理以及高码率量化基本理论;第8章介绍标量量化,主要包括:定码率最佳标量量化器、均匀量化和非均匀量化、自适应标量量化以及变码率最佳标量量化;第9章介绍矢量量化,主要包括:定码率最佳矢量量化、最佳矢量量化算法、无结构码书矢量量化、有结构码书矢量量化、格型量化、自适应矢量量化和高码率矢量量化;第10章介绍预测编码,主要包括:最佳预测基本理论、差值编码以及语音、图像和视频压缩系统中的预测编码;第11章介绍变换编码,主要包括:变换编码基本原理、离散正交变换、二维变换等;第12章介绍子带编码,主要包括:双通道分析/综合子带编码系统、多通道子带编码系统以及子带编码技术的应用;第13章介绍小波变换编码,主要包括:多分辨率分析、离散快速小波变换、小波滤波器的设计以及基于小波变换的图像压缩技术;第14章介绍分布信源编码,主要包括:无损DSC的理论基础、具有边信息的有损DSC理论、SW编码和WZ编码的实现以及DSC的应用。

本书遵循与时俱进的原则,坚持教学内容的改革。在内容的选择上既考虑基础性又考虑先进性和时代性,在保证基础理论讲授的前提下,加入信源编码领域的最新研究成果作为补充。本书强调定理中物理概念和结论的理解和掌握,简化而不陷入烦琐的数学推导,注重使用明确或直观的物理概念,增加实例,力求让讲述的内容更适合工科专业学生的学习。

学习本课程需要概率论、信息论基础以及信号处理方面的知识,本书主要用作信息与通信或相关专业研究生教材,也可作为相关专业工程技术人员或高年级本科生的参考书。

本书在写作过程中曾得到我国信息论奠基人之一周炯槃院士的关心与指导以及信息与通信理论专家吴伟陵教授指导;很多教师和同学也为本书的完成作出了贡献,作者在此一并表示感谢。今年是北京邮电大学建校60周年,在全校师生共庆北邮甲子生日的时刻,作者也想把此书献给将我们领进信息论神圣殿堂的周炯槃和蔡长年二位先生。

因作者水平所限,错误与疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2015年6月于北京邮电大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 通信系统模型	1
1.1.2 信源编译码器模型	3
1.1.3 信源编码的分类	4
1.1.4 信源编码的性能指标	4
1.2 信源编码的研究进展	5
1.2.1 历史回顾	6
1.2.2 熵编码进展	6
1.2.3 通用无损压缩进展	7
1.2.4 有损压缩编码进展	7
1.2.5 数据压缩中的新技术	11
本章小结	12
思考题	13
第 2 章 信源	14
2.1 信源特征的描述	14
2.1.1 离散信源的熵	14
2.1.2 连续信源的熵	16
2.1.3 信源的剩余度	17
2.1.4 谱的平坦度	18
2.2 信源与信宿的建模	19
2.2.1 信源的建模	19
2.2.2 信宿的建模	20
2.3 文本信源	21
2.3.1 概述	21
2.3.2 文本信源模型	21
2.3.3 上下文树模型	22
2.3.4 文本压缩与性能度量	24
2.4 音频信源	25
2.4.1 音频的基本概念	25

2.4.2 心理声学模型	25
2.4.3 音频压缩与质量评价	27
2.5 语音信源	28
2.5.1 语音产生模型	28
2.5.2 语音的剩余度	29
2.5.3 语音压缩与质量评价	29
2.6 图像信源	31
2.6.1 概述	31
2.6.2 图像的剩余度	33
2.6.3 图像压缩与质量评价	33
2.7 视频信源	35
2.7.1 模拟视频	35
2.7.2 视频信号的色彩模型	36
2.7.3 数字视频	37
2.7.4 视频压缩与质量评价	38
本章小结	39
思考题	39
习题	39
第3章 无损压缩编码理论基础	42
3.1 概述	42
3.2 有根树	43
3.2.1 有根树的基本概念	43
3.2.2 有根概率树	44
3.3 模型参数的估计	46
3.3.1 符号概率的估计	47
3.3.2 序列概率的贝叶斯估计	48
3.3.3 序列概率的 K-T 估计	49
3.4 分组编码	51
3.4.1 概述	51
3.4.2 定长码	51
3.4.3 变长码	53
3.4.4 变长消息的编码	54
3.5 无失真信源编码定理	55
3.6 通用无损压缩理论基础	57
3.6.1 通用编码的基本概念	57
3.6.2 最佳通用编码	60
3.6.3 通用编码剩余度下界	63
3.6.4 最小描述长度原理	64
本章小结	64

思考题	66
习题	66
第 4 章 熵编码——分组编码	69
4.1 概述	69
4.2 哈夫曼编码	70
4.2.1 二元 Huffman 码的构造	70
4.2.2 二元 Huffman 码的性质	72
4.2.3 规范 Huffman 码	74
4.2.4 多元 Huffman 码	75
4.2.5 马氏源的编码	76
4.2.6 Huffman 码决策树	77
4.3 自适应 Huffman 编码	78
4.3.1 两次通过 Huffman 编码	78
4.3.2 自适应 Huffman 编码的基本原理	78
4.3.3 自适应 Huffman 编码的实现	81
4.4 游程长度编码	83
4.4.1 概述	83
4.4.2 独立信源游程长度编码	84
4.4.3 马氏链游程长度编码	85
4.4.4 游程长度编码的性能	87
4.5 格伦码	87
4.5.1 单一码(Unary Code)	88
4.5.2 Golomb 码基本原理	89
4.5.3 Golomb 码的设计	91
4.5.4 Golomb 码的性能	93
4.5.5 指数 Golomb 码	94
4.5.6 自适应 Golomb 码	95
4.6 Tunstall 码	96
4.6.1 Tunstall 消息集	96
4.6.2 Tunstall 编码算法	97
4.6.3 DMS 变长到定长编码定理	99
4.7 传真压缩	100
4.7.1 一维编码	100
4.7.2 二维编码	102
本章小结	102
思考题	103
习题	103

第5章 熵编码——算术编码	105
5.1 基本概念	105
5.1.1 单信源符号积累概率	105
5.1.2 信源符号序列积累概率	105
5.1.3 二元独立序列积累概率	107
5.2 算术编码的性能	108
5.2.1 唯一可译性	109
5.2.2 编码剩余度	109
5.3 算术编码的编译码算法	110
5.3.1 编码算法	110
5.3.2 译码算法	111
5.3.3 算术编码的特点	113
5.4 算术编译码器的实现	114
5.4.1 二进制小数算术编码	114
5.4.2 二元信源的算术编码	119
5.5 马氏源的算术编码	121
5.6 自适应算术编码	121
5.7 算术编码的应用——MQ算术编码器	122
5.7.1 MQ算术编码器的基本原理	123
5.7.2 MQ算术编码器的实现	125
本章小结	128
思考题	129
习题	129
第6章 通用信源编码	131
6.1 概述	131
6.1.1 通用编码器模型	131
6.1.2 通用编码实现的方式	132
6.2 整数的编码	133
6.2.1 Elias 码	133
6.2.2 Fibonacci 码	135
6.3 某些简单的通用编码	136
6.3.1 代入码	136
6.3.2 枚举码	136
6.4 最近间隔和最近队列编码	138
6.4.1 最近间隔编码	138
6.4.2 最近队列编码	138
6.4.3 向前移编码	139
6.4.4 编码器的性能	140

6.5 基于段匹配的编码	140
6.5.1 概述	140
6.5.2 LZ77 算法	140
6.5.3 LZ78 算法	142
6.5.4 LZW 算法	143
6.5.5 编码器的性能	145
6.5.6 LZ 编码的主要应用	146
6.6 基于 BT 变换的编码	147
6.6.1 BWT 算法描述	148
6.6.2 向前移再编码	149
6.6.3 游程编码	149
6.6.4 BWT 的压缩性能	150
6.6.5 基于 BWT 的实用压缩算法	150
6.7 部分匹配预测编码	151
6.7.1 PPM 算法描述	151
6.7.2 概率与加权值的计算	152
6.7.3 实用的 PPM 编码	154
6.8 上下文树加权编码	155
6.8.1 CWT 算法描述	155
6.8.2 CWT 编码的实现	157
6.8.3 CWT 编码的性能	158
本章小结	160
思考题	160
习题	160
第 7 章 有损压缩理论基础	162
7.1 概述	162
7.1.1 有损压缩的基本概念	162
7.1.2 有损压缩关键技术	163
7.2 连续随机变量的 AEP	164
7.3 率失真($R(D)$)函数	165
7.3.1 失真测度	165
7.3.2 $R(D)$ 函数的定义	167
7.3.3 几种重要的 $R(D)$ 函数	168
7.4 香农下界	170
7.4.1 离散香农下界	170
7.4.2 连续香农下界	171
7.4.3 矢量香农下界	172
7.5 限失真信源编码定理	173
7.5.1 限失真信源编码定理	173

7.5.2 有损信源编码参数	173
7.6 高码率量化理论	174
7.6.1 高码率量化平均失真	174
7.6.2 固定高码率量化平均失真	175
7.6.3 熵约束高码率量化平均失真	178
7.6.4 高码率量化的性能	179
7.6.5 高码率量化理论与率失真理论	179
本章小结	180
思考题	181
习题	181
第8章 标量量化	182
8.1 量化的基本概念	182
8.1.1 量化器的模型	182
8.1.2 量化器的性能度量	183
8.1.3 量化器的分类	185
8.1.4 最佳量化器	185
8.2 定码率最佳标量量化器	186
8.2.1 最佳标量量化器的条件	186
8.2.2 最佳量化器的性质	188
8.2.3 最佳量化器设计算法	190
8.2.4 离散随机变量的最佳量化	191
8.3 均匀量化	192
8.3.1 均匀量化的性质	192
8.3.2 高分辨率均匀量化	193
8.3.3 语音信号的均匀量化	195
8.4 非均匀量化	196
8.4.1 非均匀量化的基本原理	196
8.4.2 对数压扩	197
8.4.3 分段均匀量化	198
8.4.4 高分辨率非均匀量化	199
8.5 自适应标量量化	201
8.5.1 前向自适应量化	201
8.5.2 后向自适应量化	202
8.5.3 自适应信号归一化	203
8.6 变码率最佳标量量化	203
8.6.1 量化器输出的熵编码	203
8.6.2 熵约束最佳标量量化的性能	204
本章小结	206
思考题	207
习题	207

第 9 章 矢量量化	209
9.1 概述	209
9.1.1 矢量量化的基本概念	209
9.1.2 量化器的性能度量	210
9.2 定码率最佳矢量量化	212
9.2.1 最佳矢量量化器的条件	212
9.2.2 最佳矢量量化器的性质	213
9.2.3 二维均匀量化	213
9.2.4 矢量量化的优点	214
9.3 定码率最佳矢量量化算法	216
9.3.1 最佳矢量量化基本算法	216
9.3.2 初始码书选择	218
9.3.3 矢量量化应用举例	219
9.4 无结构码书矢量量化	220
9.4.1 最近邻量化器	220
9.4.2 量化器复杂度	221
9.4.3 快速搜索算法	221
9.5 有结构码书矢量量化	222
9.5.1 树结构量化	222
9.5.2 乘积量化	223
9.5.3 多级量化	225
9.6 格型量化	226
9.6.1 格的基本概念	226
9.6.2 格矢量量化器	227
9.6.3 几何编码格型量化	229
9.7 有记忆矢量量化	230
9.7.1 反馈 VQ	230
9.7.2 有限状态 VQ	232
9.7.3 网格 VQ	232
9.8 自适应矢量量化	233
9.8.1 概述	233
9.8.2 均值自适应 VQ	233
9.8.3 增益自适应 VQ	234
9.8.4 矢量激励编码	234
9.9 高码率矢量量化	235
9.9.1 变码率格 VQ	235
9.9.2 高码率 VQ 的性能	236
本章小结	236
思考题	237
习题	237

第 10 章 预测编码	240
10.1 概述	240
10.2 最佳预测基本理论	241
10.2.1 最佳预测	241
10.2.2 矢量 MMSE 预测	244
10.2.3 线性预测	245
10.3 有限记忆线性预测	248
10.3.1 线性预测基本原理	248
10.3.2 高斯序列线性预测	249
10.4 差值编码	251
10.4.1 差值量化	251
10.4.2 差分脉冲编码调制	253
10.4.3 自适应脉冲编码调制	255
10.4.4 增量调制	256
10.5 语音线性预测编码	258
10.5.1 LPC 语音编码的基本原理	258
10.5.2 码激励线性预测编码器	259
10.6 图像压缩中的预测编码	261
10.6.1 概述	261
10.6.2 JPEG-LS 中的预测编码	262
10.7 视频压缩中的预测编码	263
10.7.1 概述	263
10.7.2 运动补偿技术	264
10.7.3 帧内预测编码	265
10.7.4 帧间预测编码	266
本章小结	267
思考题	267
习题	268
第 11 章 变换编码	270
11.1 概述	270
11.1.1 变换的一般概念	270
11.1.2 变换编码的基本原理	272
11.2 连续正交函数集	273
11.2.1 连续时间波形的正交展开	273
11.2.2 传统正交函数集	274
11.2.3 雷德马什(Rademacher)函数	275
11.2.4 哈尔(Haar)函数	275
11.2.5 沃尔什(Walsh)函数	276

11.3 离散正交变换	277
11.3.1 离散正交变换的性质	277
11.3.2 变换系数的最佳量化	279
11.3.3 变换编码增益	282
11.3.4 KL 变换(KLT)	283
11.3.5 正交变换编码的性能	285
11.4 常用离散正交变换	285
11.4.1 离散傅里叶变换(DFT)	285
11.4.2 离散余弦变换(DCT)	286
11.4.3 Harr 变换	287
11.4.4 Walsh 变换	288
11.4.5 斜变换	290
11.4.6 若干正交变换基函数的波形比较	291
11.5 二维变换	292
11.5.1 可分离的二维变换	292
11.5.2 常用的二维变换	293
11.6 变换编码实例	294
11.6.1 静止图像压缩编码	294
11.6.2 音频压缩编码中的修正 DCT	297
本章小结	298
思考题	299
习题	299
第 12 章 子带编码	302
12.1 概述	302
12.1.1 预备知识	302
12.1.2 子带编码的基本原理	304
12.1.3 子带编码的优缺点	305
12.2 双通道分析/综合子带编码系统	306
12.2.1 双正交滤波器组	307
12.2.2 正交滤波器组	309
12.3 多通道子带编码系统	310
12.3.1 树结构滤波器组	310
12.3.2 伪 QMF(PQMF)滤波器组	311
12.4 子带编码系统的性能	312
12.4.1 双通道子带编码率失真函数	312
12.4.2 子带编码的压缩性能	312
12.5 子带编码技术的应用	314
12.5.1 语音子带编码	314
12.5.2 高质量音频编码	314

12.5.3	图像子带编码	315
12.5.4	视频子带编码	317
	本章小结	318
	思考题	319
	习题	319
第 13 章 小波变换编码		321
13.1	小波变换的基本概念	321
13.2	多分辨率分析	323
13.2.1	概述	323
13.2.2	尺度方程分析	324
13.2.3	小波方程分析	325
13.3	离散快速小波变换	327
13.4	小波滤波器的设计	329
13.4.1	小波滤波器系数的性质	330
13.4.2	正交小波滤波器设计	330
13.4.3	双正交小波滤波器设计	331
13.5	基于小波变换的图像压缩	332
13.5.1	基本原理	332
13.5.2	嵌套零树小波(EZW)压缩	333
13.5.3	DWT 与 DCT 的比较	334
	本章小结	335
	思考题	335
	习题	336
第 14 章 分布信源编码		337
14.1	概述	337
14.2	无损 DSC 的理论基础	338
14.2.1	随机装箱	338
14.2.2	Slepian-Wolf(SW)定理	339
14.3	SW 编码的实现:不对称 SW 编码	341
14.3.1	伴随式法	342
14.3.2	奇偶校验法	346
14.4	SW 编码的实现:非不对称 SW 编码	347
14.4.1	时分系统	347
14.4.2	奇偶校验法	347
14.4.3	伴随式法	348
14.4.4	关于 SW 编码的注释	349
14.5	具有边信息的有损 DSC 理论	349
14.5.1	基本定理	349

14.5.2 二元对称信源的 $R_{X Y}^{WZ}(D)$	351
14.5.3 高斯信源的 $R_{X Y}^{WZ}(D)$	351
14.6 具有边信息的有损 DSC 的实现	353
14.6.1 嵌套码	353
14.6.2 嵌套码用于 WZ 编码	355
14.6.3 实际 WZ 编码系统与性能比较	356
14.6.4 关于 WZ 编码的注释	359
14.7 DSC 的应用	359
14.7.1 无线传感网络	359
14.7.2 分布视频编码	360
14.7.3 生物计量安全	362
14.7.4 超光谱图像压缩	364
本章小结	365
思考题	366
习题	367
参考文献	369

第1章 绪 论

传输有效性是通信系统的主要技术指标之一,高的传输有效性必须通过性能良好的信源编码才能实现。本章将简单介绍信源编码的基本概念以及信源编码理论与技术研究的进展。

1.1 概 述

信源编码是信息与通信系统的重要组成部分之一,本节在简单介绍通信系统模型的基础上,重点介绍与信源、信宿以及信源编码有关的基础知识。

1.1.1 通信系统模型

香农建立的通信系统模型如图 1.1.1 所示,是一个点对点的模型。它包括信源、编码器、信道、译码器、信宿和噪声等组成部分,而在编码器和译码器之中还分别包含信源编码器和信源译码器。所以通信系统模型也是研究传统的信源编码的参考模型。在信源编码领域重点研究的是信源和信宿的特点以及信源编译码方法和性能。

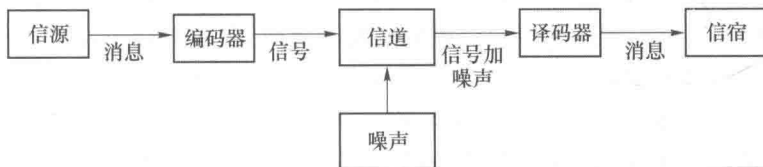


图 1.1.1 通信系统模型

信源是信息的来源,其功能是直接产生可能包含信息的信息。信源按输出符号的取值分类,可分为离散和连续信源两大类。在离散时间发出取值离散符号的信源为离散信源,例如,文件、信件、书报、杂志、电报、电传等都是离散信源。连续信源又分为两种,一种是在离散时间发出取值连续符号的信源,称为离散时间连续信源;另一种是输出为连续时间波形(连续时间,符号取值连续)的信源,称为波形信源或模拟信源。无线广播信号、电视信号、话音信号、图像信号以及多媒体信号等都是模拟信源,而模拟信源在时域或频域的采样以及通过其他变换方式得到的离散时间序列都是离散时间连续信源。

离散信源和离散时间连续信源也有共性,就是它们的输出都是序列,只不过符号的取值范围不同,前者取自可数符号集,而后者取自实数集。

信源按输出符号之间的依赖关系分类,可分为无记忆和有记忆信源。如果信源输出符号的概率与以前输出的符号无关,就称为无记忆信源,否则就称为有记忆信源。离散信源和离散