

多用户信息论

仇佩亮 张朝阳 杨胜天 余官定 编著



科学出版社

多用户信息论

仇佩亮 张朝阳 杨胜天 余官定 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者在近十年科学研究和研究生教学实践的基础上,经过深入分析论证、充分归纳综合编著而成,全面、系统地介绍了多用户信息论。本书内容包括绪论、单用户信息论中的几个专题、多端信源编码、多接入信道、广播信道、干扰信道和认知信道、中继信道与合作信道及反馈信道与双向信道。

本书的主要阅读对象是信息与通信工程专业的研究生和从事通信前沿理论研究的科研工作者,特别是对于从事研发新一代无线网络的研究人员具有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

多用户信息论/仇佩亮等编著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-033846-4

I. 多… II. 仇… III. 信息论-理论-研究 IV. TN911.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 043658 号

责任编辑:余 丁 薄继敏 / 责任校对:包志虹

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕 者

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 3 月第一次印刷 印张:32 1/4

字数:638 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

以 Shannon 在 1948 年发表的伟大著作《通信的数学理论》为标志的 Shannon 信息论被认为是 20 世纪信息科学最重要的理论之一,而多用户信息论是单用户信息论的发展和推广,也是当前信息论的研究热点和主流研究方向。

多用户信息论研究多个信源利用多个发信机与接收机在通信网络上进行有效、可靠传输的问题,它关注多用户信源编码和信道编码所能达到的性能极限和编码方法。多用户信息传输会产生许多单用户通信没有的新现象和新问题,如信息的相互叠加、干扰、合作、竞争、反馈等。研究这些问题的信息论本质并充分利用其特点来分析和设计各种新型多用户信息传输机制,对于提高网络信息传输的效能具有极大意义。尤其是近年来随着网络通信,特别是无线网络的飞速发展,网络通信面临的容量、效能等问题日趋突出。多用户信息论发展起来的许多新思想、新概念、新方法为解决这些问题提供了重要的理论和方法上的指导。因此,多用户信息论引起了越来越多的国内外学者的关注和重视,它对于现代通信网络的发展起着越来越重要的影响和作用。

本书是作者近十年来科学研究和研究生教学实践的结晶,历时五年才得以完成。作者承担过多项与多用户信息论有密切关系的研究项目,在研究工作中参阅了大量文献、资料,经过深入分析论证,归纳成现在的体系。

本书中许多内容曾在浙江大学通信学科博士生讨论班上演讲和研讨过。本书以网络中的竞争、合作、认知、反馈等多用户行为为研究主线,以各种多用户基本信道为具体分析对象,把多用户信息论的基本概念、思想、方法、结论等有机地贯串在一起,形成层次合理的理论体系,既内容丰富,又条理清楚。本书适当简化了一些烦琐的论证,重在阐述多用户信息论揭示的多用户信道中信息传输所服从的理论界限和本质规律,以及不同信道之间的关联性,很多只给出证明思路,使得读者易于理解。同时,本书面向通信理论和工程研究人员,因此更注重介绍达到理论界限的编码方法、相关定理的本质内涵及其应用中必须遵循的基本原则。

尽管国际上关于多用户信息论的研究活动十分活跃,但有关多用户信息论的专著不多,主要有 Cover 和 Thomas 的名著 *Elements of Information Theory* (其中的第 10 章),Kramer 的 *Topics in Multi-user Information* 以及 El Gamal 和 Kim 的 *Lecture Notes on Network Information Theory*。但是有关多用户信息论的文献、资料却浩如烟海,不可胜数。作者在写作过程中对许多有代表性的重要文献进行学习和研究,并引用了相关成果,在此对于这些文献的作者深表感谢。

本书由 8 章组成。第 1 章是绪论。第 2 章简要回顾单用户信息论中的几个专题,包括具有边信息的信道容量、脏纸和脏带信道、单用户 MIMO 信道、具有边信息的单端率失真理论、信源/信道对偶性。第 3 章介绍多端信源编码中的几个著名问题,即 Slepian-Wolf 问题、Wyner-Ziv 问题、Berger-Chang 问题、Berger-Tung 问题、CEO 问题和 MDC 问题。第 4 章讨论多接入信道,强调多接入信道容量区的拟阵多面体结构和码率分裂多址技术,介绍多接入衰落高斯信道的通量容量区与中断容量区的概念、资源优化分配问题,最后介绍 MIMO 多接入信道。第 5 章首先讨论一般广播信道容量区的内、外界,同时介绍一些特殊广播信道的容量区;接着论述抽头信道,介绍平行广播信道和衰落广播信道问题、高斯广播信道与高斯多接入信道之间的对偶;最后介绍高斯 MIMO 广播信道。第 6 章论述干扰信道和认知信道。首先论述离散干扰信道的各种可达码率区及容量区外界,讨论高斯干扰信道,介绍 Z 信道;最后论述认知信道的容量区问题。第 7 章论述中继信道与合作信道。首先介绍关于中继信道容量的各种上、下界和目前已知其容量的几个特殊中继信道;其次论述高斯中继信道,包括时分、频分和线性中继信道;再次介绍 MIMO 中继信道、多跳中继信道、多用户中继信道;最后综述合作多接入信道与合作广播信道。第 8 章专门介绍反馈信道与双向信道问题,首先论述单用户反馈信道的基本思想与一般结论,接着论述带反馈的多接入信道、广播信道与干扰信道,以及带反馈的 MIMO 多用户信道,最后介绍双向信道。

本书内容比较丰富,由 4 位作者合作编著而成。本书的 2.4 节和第 6 章由余官定副教授撰写,第 3 章由杨胜天副教授撰写,第 8 章由张朝阳教授撰写,其余部分由仇佩亮教授撰写。全书由仇佩亮教授统稿。

本书得以完成是与作者所承担的国家重点基础研究计划(973)项目(2009CB320405, 2012CB316104)和国家自然科学基金相关项目(60472079, 60772093, 60972057, 60802012)的支持分不开的,在此表示感谢。作者还要感谢浙江大学信息与电子工程学系和信息与通信工程研究所对于本书写作的支持;感谢历年来参加过浙江大学无线通信博士生讨论班的同学,他们对于本书的形成和完善提出了许多宝贵建议;感谢作者的家人,正是他们的无私奉献为作者创造了一个良好的写作环境。

限于作者的水平,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多用户信息论引言	1
1.2 本书中常用的一些记号与本书结构	8
1.2.1 一些常用记号	8
1.2.2 本书的结构和内容介绍	9
参考文献	11
第 2 章 单用户信息论中的几个专题	12
2.1 单用户离散信道的容量	12
2.1.1 离散无记忆信道的容量与编码定理	12
2.1.2 具有独立、同分布状态信息的信道容量	14
2.1.3 有记忆信道的信道容量	22
2.2 加性高斯噪声信道	28
2.2.1 加性白高斯噪声信道	28
2.2.2 加性有色高斯噪声信道	33
2.2.3 衰落信道的容量	35
2.3 脏纸信道与脏带信道	39
2.3.1 脏纸信道容量	40
2.3.2 广义脏纸信道容量	42
2.3.3 脏带信道容量	45
2.4 MIMO 信道	51
2.4.1 MIMO 信道模型	51
2.4.2 确定性 MIMO 信道的容量	51
2.4.3 衰落 MIMO 信道的容量	54
2.4.4 MIMO 信道分集增益和复用增益的折中关系	57
2.5 单端信源的率失真理论	59
2.5.1 离散、无记忆信源	60
2.5.2 平方误差失真度量下平稳高斯信源	63
2.5.3 具有边信息的率失真问题	64
2.5.4 间接率失真问题	68

2.6 单用户信道编码与信源编码之间的对偶性	69
2.6.1 信道编码与信源编码之间的公式对偶	70
2.6.2 信道编码与信源编码之间的功能对偶	73
2.6.3 信道编码与信源编码之间的工作对偶	81
参考文献	87
第3章 多端信源编码	91
3.1 Slepian-Wolf 编码定理	91
3.2 Wyner-Ziv 编码问题	99
3.3 Berger-Chang 编码问题	108
3.4 Berger-Tung 编码问题	116
3.5 CEO 问题	122
3.5.1 一般离散、无记忆相关信源的 CEO 问题	123
3.5.2 二次高斯 CEO 问题	126
3.6 多描述编码	129
3.6.1 具有 2 个信道和 3 个接收机的多描述编码	130
3.6.2 可达性定理 3.6.1 的证明	137
3.6.3 信息描述的逐次细化	139
参考文献	144
第4章 多接入信道	148
4.1 离散无记忆多接入信道的容量区	148
4.1.1 具有公共消息的二发射机多接入信道	148
4.1.2 具有独立消息的离散无记忆多接入信道容量区	150
4.1.3 任意相关信源在多接入信道上传输	151
4.2 离散无记忆多接入信道可达码率区的拟阵多面体结构与码率分裂 多接入技术	155
4.2.1 拟阵多面体与反拟阵多面体	155
4.2.2 离散无记忆 MAC 可达码率区的拟阵多面体结构	158
4.2.3 离散无记忆 MAC 的码率分裂多接入技术	159
4.3 高斯无记忆多接入信道	164
4.3.1 具有公共消息的二发射机高斯多接入信道	164
4.3.2 具有独立消息的高斯无记忆多接入信道	165
4.3.3 高斯多接入信道上码率分裂算法	167
4.4 多接入衰落高斯信道的通量容量区与最佳资源分配	175
4.4.1 多接入衰落高斯信道模型与通量容量区	176
4.4.2 通量容量区边界的 Lagrangian 特征	178

4.4.3	最佳功率控制与码率分配	179
4.4.4	容量区 $C(\bar{P})$ 的边界面	181
4.5	多接入衰落高斯信道的中断容量区与最佳传输策略	183
4.5.1	多接入衰落高斯信道的时延-受限(0-中断)容量区与最佳传输策略 ...	184
4.5.2	多接入衰落高斯信道的共同中断容量区与最佳传输策略	187
4.5.3	多接入衰落高斯信道的各自中断容量区问题	192
4.6	MIMO 多接入高斯信道	196
4.6.1	常数 MIMO 多接入信道	196
4.6.2	衰落 MIMO 多接入信道容量区	200
	参考文献	201
第 5 章	广播信道	204
5.1	一般离散无记忆广播信道容量区的内界和外界	205
5.1.1	广播信道的定义与分类	205
5.1.2	广播信道容量区的内界	207
5.1.3	广播信道容量区的外界	210
5.1.4	工作于 BC(II)方式的一般广播信道的容量区	213
5.2	几个已知容量区的特殊广播信道	214
5.2.1	退化的离散无记忆广播信道	214
5.2.2	Less Noisy 广播信道和 More Capable 广播信道	216
5.2.3	确定性和半确定性广播信道	218
5.2.4	发送功率受限的 AWGN 广播信道的容量区	220
5.3	抽头信道与具有机密消息的广播信道	224
5.3.1	离散无记忆抽头信道	225
5.3.2	高斯抽头信道	230
5.3.3	具有机密消息的广播信道	233
5.4	高斯广播信道容量区特征与功率优化分配	237
5.4.1	高斯广播信道容量区的特征	237
5.4.2	高斯广播信道功率最优分配	242
5.5	平行高斯广播信道与衰落广播信道	243
5.5.1	平行高斯广播信道	243
5.5.2	衰落高斯广播信道	245
5.6	高斯广播信道与高斯多接入信道之间的对偶	252
5.6.1	高斯多接入信道与高斯广播信道回顾	252
5.6.2	常数信道增益 AWGN 多接入信道与广播信道之间的对偶	254
5.6.3	衰落多接入信道与广播信道之间的对偶	257

5.6.4	MAC 与 BC 对偶的凸优化解释与最优译码次序	259
5.7	高斯 MIMO 广播信道	260
5.7.1	高斯 MIMO 广播信道与脏纸编码可达码率区	261
5.7.2	高斯 MIMO 广播信道与高斯 MIMO 多接入信道之间的对偶	264
5.7.3	高斯 MIMO 广播信道的“和码率”容量	266
5.7.4	高斯 MIMO 广播信道的容量区	269
	参考文献	274
第 6 章	干扰信道与认知信道	278
6.1	干扰信道容量区的内界和外界	279
6.1.1	干扰信道的模型	279
6.1.2	一般干扰信道容量区的外界	280
6.1.3	一般干扰信道容量区的内界(可达码率区)	283
6.1.4	几种退化干扰信道的容量区	287
6.2	高斯干扰信道	290
6.2.1	一般高斯干扰信道的可达码率区	292
6.2.2	高斯强干扰信道的容量区	293
6.2.3	高斯退化干扰信道	294
6.2.4	高斯单边干扰信道	295
6.2.5	一般高斯干扰信道的容量区外界	297
6.3	Z 信道	300
6.3.1	Z 信道的可达码率区	302
6.3.2	几种退化的 Z 信道	305
6.3.3	高斯 Z 信道	307
6.4	认知信道的可达码率区	310
6.4.1	非因果认知信道的可达码率区	311
6.4.2	非因果高斯认知信道的可达码率区	317
6.4.3	因果高斯认知信道的可达码率区	320
	参考文献	323
第 7 章	中继信道与合作信道	325
7.1	离散无记忆中继信道容量的上、下界	326
7.1.1	中继信道容量的割集上界	327
7.1.2	中继信道容量的下界	327
7.2	几个已知容量的中继信道模型	333
7.2.1	反向退化中继信道的容量	333
7.2.2	退化中继信道的容量	334

7.2.3	半确定中继信道的容量	334
7.2.4	具有正交分量的中继信道的容量	335
7.2.5	带无噪反馈的中继信道的容量	337
7.3	AWGN 中继信道	337
7.3.1	AWGN 中继信道容量的割集上界	338
7.3.2	AWGN 中继信道容量的译码转发下界与估计转发下界	340
7.3.3	AWGN 中继信道上传每比特所需的最小能量	342
7.4	频分和时分加性高斯噪声中继信道	346
7.4.1	FD-AWGN 中继信道的容量和容量界	346
7.4.2	FD-AGN 中继信道的容量和容量界	350
7.4.3	TD-AGN 中继信道的容量界	354
7.5	AWGN 线性中继信道	358
7.5.1	一般 AWGN 线性中继信道	358
7.5.2	B 类 FD-AWGN 线性中继信道	360
7.6	MIMO 中继信道	364
7.6.1	高斯 MIMO 中继信道模型	364
7.6.2	全双工高斯 MIMO 中继信道容量的上界	365
7.6.3	全双工高斯 MIMO 中继信道容量的下界	367
7.7	多中继节点信道	369
7.7.1	多中继节点信道模型	369
7.7.2	多中继节点信道 DF 方式的可达码率	370
7.7.3	多中继节点信道 CF 方式的可达码率	374
7.7.4	高斯多中继信道	378
7.8	多用户中继信道	379
7.8.1	多接入中继信道	379
7.8.2	广播中继信道	384
7.9	合作多用户信道	391
7.9.1	合作多接入信道	391
7.9.2	合作广播信道	397
	参考文献	404
第 8 章	反馈信道与双向信道	407
8.1	单用户信道反馈容量的一般结论	408
8.1.1	离散无记忆信道反馈容量与 Schalkwijk-Kailath 编码	408
8.1.2	一般高斯信道反馈容量界	412
8.1.3	反馈增加高斯信道容量的充分必要条件	419

8.1.4 有向信息速率与反馈容量的关系	419
8.2 带反馈的多接入信道	422
8.2.1 带理想反馈的离散无记忆多接入信道	422
8.2.2 带理想反馈的高斯多接入信道	429
8.2.3 多接入信道的反馈容量界	436
8.3 带反馈的广播信道	441
8.4 带反馈的干扰信道	449
8.4.1 离散无记忆干扰信道的反馈容量界	449
8.4.2 无记忆高斯干扰信道的反馈容量	454
8.5 带反馈的矢量多接入信道和矢量广播信道	460
8.5.1 带反馈的矢量高斯多接入信道	461
8.5.2 带反馈的矢量高斯广播信道	467
8.6 双向信道	469
8.6.1 双向信道容量区的 Shannon 内界和外界	469
8.6.2 一种可以超出 Shannon 内界的编码方式	473
8.6.3 比 Shannon 界限更紧的内界和外界	477
8.6.4 高斯双向信道	480
参考文献	480
附录 A 典型列理论	484
附录 B 网络中信息传输码率的割集上界	493
附录 C 凸集、凸函数和凸优化	495
附录 D 辅助随机变量的基数界	500

第 1 章 绪 论

1.1 多用户信息论引言^[1~9]

以 Shannon 在 1948 年发表的伟大著作《通信的数学理论》^[1] 为标志的 Shannon 信息论被认为是 20 世纪信息科学最重要的科学理论。Shannon 信息论主要研究数据压缩(信源编码)和数据可靠传输的极限性能和实现方法。Shannon 在他 1948 年的经典著作中关注的是只具有一个发信机(编码器)和一个接收机(译码器)的单用户数据压缩和可靠传输问题,也就是所谓单用户信息论。单用户通信系统模型示于图 1.1.1。

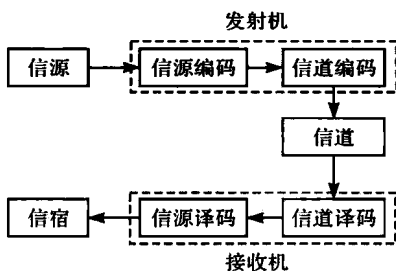


图 1.1.1 单用户通信系统模型

Shannon 在他的经典著作^[1]中提出并证明了单用户信息论中两条最基本定理,即信源无损压缩编码定理与信道编码定理。

信源无损压缩编码定理 离散无记忆信源 $\{X, p(x)\}$ 的熵 $H(X)$ 是无损压缩该信源所能达到的最小码率。

信道编码定理 离散无记忆信道 $\{X, p(y|x), Y\}$ 的容量 $C = \max_{p(x)} I(X; Y)$ 是数据在该信道上可靠传输的最大码率。

这两条定理给出信源压缩编码和信道编码的极限性能。同时 Shannon 还证明了所谓的信源、信道分离编码定理。

分离编码定理 信道容量为 C , 信源的熵速率为 H , 若 $C \geq H$, 则总存在一个编码系统使得信源可在该信道上以任意小差错概率传输; 若 $C < H$, 则不能以任意小差错概率传输。

按照分离编码定理, 信源、信道联合最佳编码并不能提高通信系统的极限性

能。因此,通信工程师在设计通信系统时可以把信源编码和信道编码分开考虑,而不致影响整体性能。当然这里的分离编码定理是针对单用户离散无记忆信道和离散无记忆信源而言的。

Shannon 的开创性工作为信息论的建立提供了基本概念、基本框架、基本方法和基本结果。此后 Shannon 以及其他学者对于这两条基本定理给出了更严格的证明,有些学者用其他不同的方法同样证明了这些基本定理;更有许多学者进一步把定理结果推广到一些更复杂、更实际的信源和信道;同时发展了有损压缩编码理论,也即率失真理论。第一篇关于率失真理论的论文是 Shannon 在 1959 年发表的《保真度准则下的离散信源编码定理》^[10]。

信源有损压缩编码定理 对于离散无记忆信源 $\{X, p(x)\}$ 和失真度量 $d(x, \hat{x})$, 率失真函数 $R(D) = \min_{p(\hat{x}|x), E(d(x, \hat{x})) \leq D} I(X; \hat{X})$ 表示在失真不大于 D 的条件下压缩该信源所能达到的最小码率。

早期的单用户信息论并没有找到很多的应用场合,许多通信工程师认为信息论过于抽象,他们还不理解信息论的意义。但是随着电子科学技术和计算机技术的发展,尤其是集成电路 CMOS 技术的进展,低价、高性能计算和信号处理成为可能,从而引发了各种纠错编码、调制技术和各种媒体(文本、语音、图像和视频)压缩技术的研究,使得信源压缩编码码率和信道传输码率逐渐接近 Shannon 指出的极限最佳码率。从 20 世纪 60 年代开始,Shannon 理论对于通信工程的指导意义开始凸显。同时无线技术的发展使研究者关注衰落信道通信。由于在发送端或接收端能获得有关信道状态的知识,可以极大改善通信效果,于是引发了对边信息(side information)的兴趣。事实上 Shannon 在 1958 年就发表了《发送机具有边信息的信道》论文^[11]。具有边信息的信道、信源编码虽然从形式上看是属于单用户信息论模型,但是它是向多用户信息论的过渡,许多学者也把它归于多用户信息论研究范畴。

20 世纪六七十年代出现的因特网、蜂窝移动网络以及 ALOHA 系统激发了人们对于通信网络的兴趣。因此研究在多用户工作条件下的通信极限问题引起了信息论专家的关注。这方面的研究是以前单用户信息论的自然推广,称为多用户信息论。多用户信息论与单用户情况一样,主要研究两类问题,即多端相关信源的压缩编码和多用户信息在网络信道上可靠、有效传输的信道编码;特别是研究它们的极限性能,即多端信源编码的率失真区和多用户信道的容量区。第一篇关于多用户信息论的文章是 1961 年 Shannon 在一次关于统计和概率的国际会议上发表的,名为《双向通信信道》^[12]。此后在 70 年代和 80 年代初、中期,随着网络通信的兴起,多用户信息论研究出现了一个高潮,取得了许多研究成果。但是,当时多用户信息论研究成果对于通信网技术发展的指导作用并没有达到预期的效

果。这一方面是由于多用户信息论所基于的模型过于简化,并不实用;另一方面也是由于多用户信息论的理论难度远远超出单用户情况,对于许多看上去非常简单的,仅包含几个用户的网络都不能够获得它的可计算的容量区或率失真区,因而也不知道它们的最佳性能极限和最佳通信方式。80年代中到90年代初多用户信息论研究出现了一个短时期的低潮。

90年代以后,无线移动通信和无线网络有了长足的进步,各种无线通信网络层出不穷。人们不但对于宽带、码率提出越来越高的要求,同时对于通信资源(频带、功率、空间)的消耗也提出越来越苛刻的限制。这一时期无线通信技术获得突飞猛进。在编码领域出现许多新的纠错编码,如 Turbo 码、LDPC 码和喷泉码(fountain code)等,这些码的性能已经非常接近 Shannon 极限;对于衰落信道有了更深入的研究,各种分集、合并技术,各种自适应均衡技术,扩谱、多用户检测技术,多载波技术,软件无线电技术等物理层和链路层优化技术获得了极大发展和应用。特别要指出的是,基于多天线的多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)技术显著提高了信道的容量和抗衰落性能。可以说在端到端之间的无线通信技术已经发展到了极致,所达到的性能已与 Shannon 单用户信息论所指出的极限相差无几,要进一步提高无线网络的性能,不能指望单用户信息论的理论指导。因此,无线网络的需求与无线技术的发展重新激发了研究者对于多用户信息论的研究热情。

现实的无线网络,特别是在近20年所发展起来的 Ad-Hoc 自组织网络、大规模无线传感器网络、无线 Mesh 网络等都是极为复杂的多跳网络。它们包含多个源、多个目的节点,传输多种消息,包含多种传输方式,可能是单向传输、双向传输、多播、广播、机密传输等;这些信源不仅具有冗余,而且是时变的,并可能在空间、时间上相关;无线网络传输信道不仅要承受各种衰落,而且受到相互干扰、传输时延和节点损坏的影响。在多跳网络中,节点也不是仅仅执行转发功能,许多情况下节点要进行复杂的信号处理,有些还要作出判断或计算。在无线网络中除了可靠传输外,信息安全是非常重要的,在开放环境中只有在一定的机密性要求下的可靠传输才有意义。制约所有这些困难问题解决的瓶颈是无线网络资源的限制,这些资源包括频谱资源、能量资源、计算资源,甚至包括空间和时间的资源。

近几年来广为无线网络专家和工程师研究的通信中的合作(cooperation)、竞争(competition)和认知(cognition)技术,即所谓的无线新 3C 技术,就是致力于网络资源的更有效使用。探索这些技术的目的在于使每个节点共享相邻节点的频谱、能量和计算资源,从而优化整个网络总资源的利用。

多个信源利用多个发信机与接收机在通信网络上进行信息传输会发生许多单用户通信中没有的新问题,如相互干扰、相互合作、相互竞争、相互叠加、边信息、信息反馈等。研究清楚这些问题的信息论本质,并充分利用其特点来分析和

设计各种合作、竞争和认知的新技术,构建新型的多用户信息传输机制,对于提高网络信息传输的效能具有极大意义。因此多用户信息论是通信工程中新 3C 技术的理论基础。就像端对端通信技术是在单用户 Shannon 理论指导下发展起来的一样,多用户信息论对于网络通信,特别是无线网络通信同样具有极大的指导意义。

总结起来,多用户信息论对于无线网络的贡献有两个方面,一方面多用户信息论为各种无线网络建立模型,给出传输性能的理论极限,即容量区;另一方面多用户信息编码中发展起来的许多新思想、新概念、新方法,如合作编码、叠加编码、嵌入编码、逐次抵消、合作灌水、信息细化、反向译码、脏纸写字、随机装箱、边信息应用等思想精华可望在无线网络通信中获得应用,直接推动无线通信网络技术的发展。虽然目前许多多用户信道的容量区还是一个未解决的难题,但是为了获得任何一个新的、更好的可达码率区必须创造性地提出一种新的、更有效的编码实现方式,这种不断发展过程本身就对无线网络技术发展具有指导作用。因此这些未解决的难题就像一只只会下金蛋的鸡,它会源源不断地产生出新思想和新成果。我们有理由相信多用户信息论的理论研究是无线网络技术发展的重要的创新源泉,下一代的无线网络通信必须从多用户信息论中吸取思想精华,才可望获得新的发展。

多用户信息论中研究的基本信道编码和信源编码模型有如下几种:

具有边信息(状态信息)的信道 信道在不同状态下具有不同的传输特性,因此接收端或发送端若能获得关于信道的状态信息(也称为边信息)将改善传输性能。具有边信息的信道示于图 1.1.2。仅编码器具有边信息而译码器没有边信息情况是很有意义的一种情况,其中 Shannon 研究编码器具有因果边信息情况,而 Gelfand-Pinsker 研究编码器具有非因果边信息情况,都获得了相应的信道容量公式。具有边信息的信道是研究各种衰落信道、信息隐藏及具有缺损的存储器的合适模型。

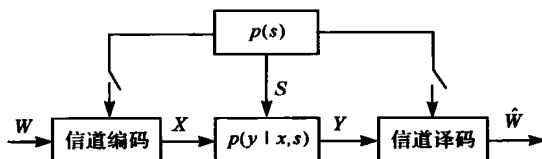


图 1.1.2 具有边信息(状态信息)的信道

多接入信道 多个用户的消息经过各自编码后送入同一信道传输,输出由一个译码器译码,恢复相应消息。图 1.1.3 表示一个 2-用户多接入信道框图。卫星通信系统和蜂窝网络的上行链路可用多接入信道作为模型。多接入信道的容量区问题已经被解决,这是多用户信息论中少有的几种情况之一。

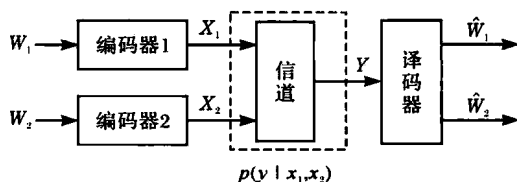


图 1.1.3 多接入信道模型

广播信道 在图 1.1.4 所示的广播信道中,消息经过一个编码器编码,从一个信道入口输入,多个出口输出到各自译码器去译码,恢复相应消息。卫星通信和蜂窝网络的下行链路和广播电视均可用广播信道作为模型。一般广播信道的容量区问题尚未被解决,仅得到一些外界和内界(可达码率区);但对一些退化的广播信道,容量区问题已解决。

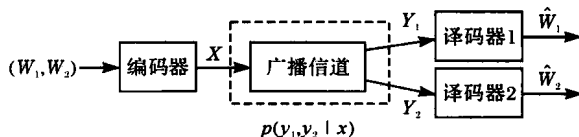


图 1.1.4 广播信道模型

干扰信道 干扰信道具有多个入口和多个出口,各个编码器和各个译码器独立工作。共享频谱的多址通信系统可用干扰信道作为模型。一般干扰信道的容量区问题尚未被解决,仅获得一些外界和内界(可达码率区);但对一些退化的干扰信道,如强干扰信道,容量区问题已解决。图 1.1.5 表示一个 2-用户干扰信道模型。如果编码器 2(发射机 2)可以通过因果或者非因果手段获得有关编码器 1(发射机 1)要发送的消息,那么干扰信道构成了认知信道模型。

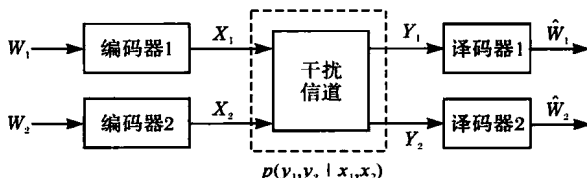


图 1.1.5 干扰信道模型

双向信道 双向信道上的一对用户在同一信道上可同时收、发双向工作,如图 1.1.6 所示。双向信道看上去非常简单,但一般双向信道的容量区问题至今没有解决。反馈通信可以看成是双向信道的一个特例。对于如图 1.1.7 所示的离散无记忆单用户信道,Shannon 已证明因果反馈不增加它的容量。但对于一般多用户信道,因果反馈可以扩大它的容量区。这是由于通过反馈可以提供某种用户

间的合作,合作可以扩大多用户信道的容量区。对于一般的具有反馈的多用户信道,它的容量区问题还没有解决。图 1.1.8 表示一个具有广义反馈信号的多接入信道(MAC)。

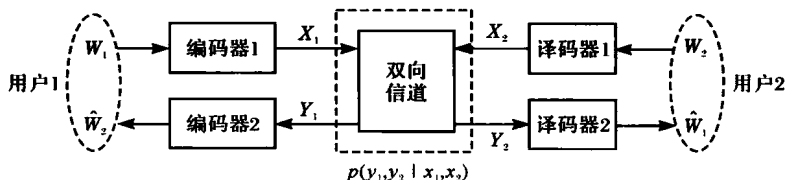


图 1.1.6 双向信道模型

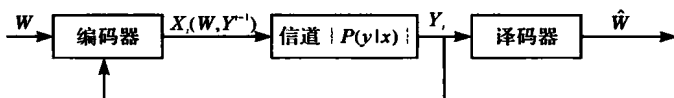


图 1.1.7 带因果反馈的离散无记忆信道

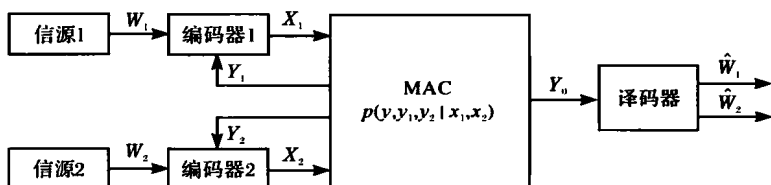


图 1.1.8 具有广义反馈信号的多接入信道

中继信道 如图 1.1.9 所示,一对用户在通信时得到第三方中继站的帮助,而中继站自身不发送属于自己的信息。微波接力转发系统是中继信道的一个简单例子。中继信道是一个 2-跳网络,中继节点可以获得源节点信息,因此可以协助源节点传输信息。中继信道理论是合作通信技术的重要理论基础。一般中继信道的容量问题尚未被解决,但对于退化的中继信道,它的容量问题已解决。如果中继站也有属于自己的信息需要发送或接收,这就是一个合作信道。

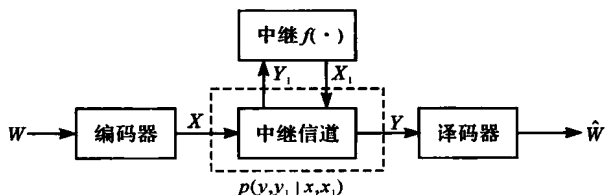


图 1.1.9 中继信道模型