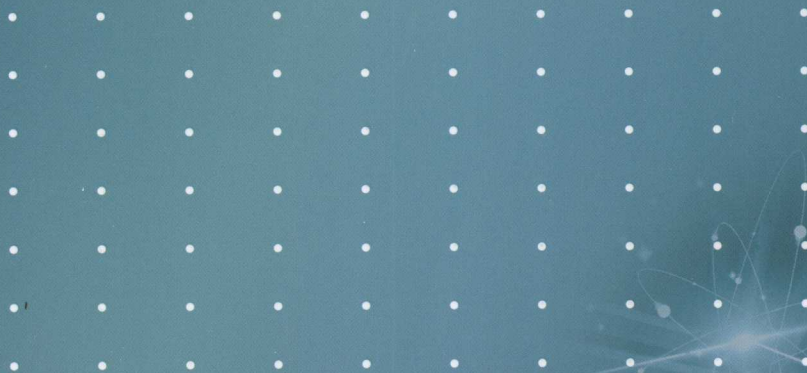


教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

信息论与编码理论

第二版

■ 王育民 李 晖 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

013028324

TN911.2-43
08-2

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分

信息论与编码理论

XINXILUN YU BIANMA LILUN

第二版

■王育民 李 晖 编著



TN911.2-43

08-2



北航

C1635095



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

13058354

内容简介

信息论和编码理论是研究信息传输和信息处理的基础理论。信息论对实际通信系统和通信网络的设计已经产生了深刻的影响,通信领域工程师在信息论方面的理论基础对其事业的发展有重要的作用。本书总结了西安电子科技大学自1960年创办信息论专业以来,特别是近十年来为通信工程、电子信息工程、信息工程、信息安全等专业的本科生和信息与通信工程、密码学等方向的研究生开设信息论和编码理论课程的经验。书中围绕通信系统和通信网络的构建需求阐述信息论的理论思想,较详细地讨论了信息论中信息量的定义、各类编码定理及其证明的基本思想,对于信息论中发展的若干重要课题(如率失真理论、多用户信息论、逼近Shannon极限的信道编码)都做了专题讨论,同时给出了这一领域近期发展的近况和重要的参考文献。这对于需要获得信息论基本知识的有关专业学生和在这些领域从事研究、开发工作的工程技术人员都将是有益的。

本书可作为通信工程、电子信息工程、信息工程、信息安全等专业高年级本科生和研究生的教材。在给高年级本科生讲授时,可以只讲一些基本内容。书中标有*号的章节主要供研究生阅读,各章后面都附有一些难易程度不等的习题,可根据需要选用。书末附有较详尽的参考文献,可供阅读时参考。

图书在版编目(CIP)数据

信息论与编码理论/王育民,李晖编著. --2版.

--北京:高等教育出版社,2013.4

ISBN 978-7-04-036988-5

I. ①信… II. ①王…②李… 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(2013)第031242号

策划编辑 吴陈滨
插图绘制 尹莉

责任编辑 吴陈滨
责任校对 杨凤玲

封面设计 赵阳
责任印制 尤静

版式设计 童丹

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 北京市密东印刷有限公司
开本 787mm×1092mm 1/16
印张 22.25
字数 540千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2005年12月第1版
2013年4月第2版
印 次 2013年4月第1次印刷
定 价 34.70元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 36988-00

序

由教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐,西安电子科技大学与高等教育出版社联合策划的这套电子信息类专业基础课程系列教材即将陆续出版发行,我很高兴,这是我国高校电子信息类教材建设工作的一个新举措!

本系列教材的编写基于西安电子科技大学的电子信办学特色和长期的教学经验积累。学校从1931年诞生于江西瑞金的中央军委无线电学校,到1949年张家口的军委工校和20世纪60年代的“西军电”,80年代的西北电讯工程学院,到现在的西安电子科技大学,一直致力于为国家和军队培养电子信息方面的高级专业人才,是国内最早建立信息论、信息系统工程、雷达、微波天线、电子机械、电子对抗等专业的高校之一,形成了鲜明的电子与信息学科特色与优势。本系列教材由学校众多知名教授担任主编,他们长期从事电子信息专业基础课教学和研究,努力继承和发扬学校在电子信息类专业基础课教学方面的经验和特色,并结合最新的科技进展组织和编写了系列教材。

大家知道,培养高素质的电子信息专门人才的前提,是要加强基础课程建设,尤其是数理基础和专业技术基础,要打造一个高水平的专业基础课程平台;本系列教材正是瞄准这一目标,从电路分析、信号与系统、模电(低频,高频)、数电、电磁场等专业基础课,到通信原理、雷达原理、软件技术基础、微波技术与天线等技术基础课,构成了一个知识面宽阔的电子信息类专业基础课教材体系。

本系列教材在编写时强调了如下几点,也可看做是本系列教材的特色:

(1) 本系列教材自成体系,以西安电子科技大学的优势学科和特色专业为依托,覆盖了学校电子信息类专业的主干专业基础课程,知识结构系统完整,内容精练,具有先进性、系统性、完整性等特点。

(2) 本系列教材由学校知名教授、专家(包括国家级教学名师、教育部相关教指委委员、学科带头人等)担任主编,他们具有较丰富的教学和科研经验,保证了该系列教材的编写质量。

(3) 本系列教材具有很好的基础,大部分教材都是在原有教材的基础上进行修订,在此基础上增加先进的内容和新的方法,而部分原有教材是国家“九五”、“十五”、“十一五”国家级规划教材和普通高等教育精品教材,获得过省部级优秀教材奖。

(4) 本系列教材对应的本科生课程大部分是国家级精品课程或省级精品课程,课程建设和教材建设十分注重基础理论知识与实际工程应用之间的紧密结合,注重对学生的分析问题和解决问题能力的培养。

电子信息领域是一个发展异常迅速的领域,新的需求不断产生,新技术不断涌现,电子信息产品迅速更新并广泛应用于社会的各个方面,从而对IT人才培养提出了更高的要求,反映在课程建设和教材建设上,就是要有前瞻性,并不断强化基础、不断适应新技术和新要求,就是要通过

教学改革与创新,不断提高教学质量,进而促进人才培养质量的全面提升。

希望本系列教材能在这方面产生一些积极的促进作用,并在实践中不断改进和提高,为国家培养出更多优秀的电子信息高级专业人才做出贡献!

保铮

2012年5月于西安

序 二

自 1999 年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型和种类较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类与电气信息类专业平台课程教材规划”。

这套规划教材的制订和编写遵循了以下几点原则:

1. 尊重历史,将高等教育出版社经过半个多世纪的积淀所形成的名家名作、精品教材纳入规划。这些教材经过数十年的教学实践检验,具有很好的教学适用性。此次规划将依据新的《电子电气基础课程教学基本要求》以及电气信息学科领域的最新发展,对教材内容进行修订。

2. 突出分类指导,突出不同类型院校工程教育的特点。大众化教育阶段,不同类型院校的人才培养目标定位不同,应当根据不同类型院校学生的特点组织编写与之相适应的教材。鼓励有编写基础的一般院校和应用型本科院校经过 2~3 年的试用,形成适用于本层次教学的教材。

3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程教育人才的要求。

4. 数字化的多媒体资源与纸质教材内容相结合。在教育部“加快教育信息化进程”的倡导下,提倡利用多样化、立体化的信息技术手段(如动画、视频等),将课程教学内容展现给学习者,以加深他们对知识的理解,达到更好的教学效果。

教材建设是一项长期、艰巨的工程。我们将本着成熟一批出版一批的指导思想,把这项工作扎实持续地推进下去,为电子信息科学类与电气信息类专业基础课程建设一批基础扎实、教学适用性强、体现时代气息的规划教材,为提高高等教育教学质量,深化高等教育教学改革做出应有的贡献。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员



2010 年 12 月

第二版前言

本书是教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材。在2005年出版的本书第一版的基础上,根据近年来学校本科生和研究生教学的实际情况,我们对教材进行了一些修订,加强了典型序列等概念在编码定理证明中的介绍,去掉了一些比较烦琐的定理推导,更加突出信息论的主要理论思想。具体而言,在第2章增加了相对熵和信息不等式的相关内容,对一些定理的证明也更加简洁;在第3章的3.5节明确了熵率的定义和性质;对第4、5章进行了修订,在第9章增加了率失真编码正定理的证明;在第10章利用典型序列对几个多用户信息论定理证明进行了修改,并且增加了中继信道的相关内容。由于本书主要定位是介绍 Shannon 信息论的基本定理,对于近年来快速发展的多用户信息论、MIMO 等无线通信新技术在相关章节小结中给出了一些重要的参考文献,使读者可以在本书基本理论的基础上对相关文献进行研读。

本书可作为通信工程、电子信息工程、信息工程、信息安全等专业高年级本科生和研究生的教材。在给高年级本科生讲授信息论基础课程时,可以只讲一些基本内容,包括1、2、3、4、5、9章的基础章节,不超过48学时。书中标有*号的章节主要供研究生阅读。如进一步讲授纠错编码,可以增加讲授第6、7、8章,总学时80学时。第10章作为研究生课程的教学内容。读者可以访问网站 <http://ste.xidian.edu.cn/xx12> 了解我们对于不同授课内容的章节选择,并作为参考。

李晖博士主要承担了本书的修订工作,感谢博士生刘樵帮助进行了图表的编辑和修改工作。

王新梅教授对本书进行了仔细的审阅,并提出了许多宝贵意见和建议,在此表示诚挚的感谢。

本书在编写中参考了一些有关著作,特别应当提到的有 Cover(2006), Gallager(1968), Fano(1961), Golomb(1964), Lin 和 Costello(1982), McEliece(1977), Viterbi 和 Omura(1979), Kolesnik 和 Poltalev(1982), 有本卓(1977), 周炯槃(1983) 以及 Yeung(2011) 等教授的著作。

本书的编写得到教育部“信息论与编码理论”国家精品课程建设项目、“信息安全”国家级教学团队建设项目以及西安电子科技大学研究生教材建设项目的资助,在编写过程中得到高等教育出版社的大力支持和鼓励,作者在此表示衷心感谢。由于作者水平有限,编写过程中存在诸多不足之处,恳请读者批评指正。联系方式为: lihui@mail.xidian.edu.cn。

作者

于西安电子科技大学

2012年8月

第一版前言

I

众所周知,信息是构成任何系统的三大要素之一,另外两个要素是物质和能量。信息虽然是无形的和抽象的,但它是系统的灵魂。

1948年,C. E. Shannon 发表了划时代文章《通信的数学理论》,宣告了一门崭新的学科——信息论的诞生。文章给出了可以概括一切通信系统的数学模型;用概率统计这一数学工具描述了模型中各组成部分(信源、信道、信宿、干扰源、编码器和译码器);给出了信息量的定义,使人们可以定量地研究信息的传输、处理和存储。

Shannon 信息论不仅建立了信源和信道编码定理,给出了有效性的极限,而且为人们明确地指出了实现有效而可靠通信的必由之路是数字化和编码。这是通信技术领域革命的数学或理论基础,而半导体和计算机技术则是这一革命的物理或物质基础。值得指出的是,信息论和晶体管同时诞生在 Bell 实验室。

Shannon 所给出的编码定理的证明是非构造性的,所给出的证明也不够严格,但他的“数学直观出奇地正确”[A. N. Kolmogorov(1963)]。经过无数科技工作者 50 年来的努力奋斗,人们不仅在数学上已严格地证明了 Shannon 编码定理,而且发现了各种具体可构造的有效编码理论和方法,可以实现 Shannon 指出的极限。现在已可实现几乎无差错地经由高斯(Gaussian)信道传信,其传信率可达信道容量的 80% [A. J. Viterbi(1998)],对于非白高斯信道,Shannon 的注水定理和多载波调制(MCM)技术也可接近于理论限实现有效和可靠的通信。这在当代 CDMA、MCM/COFDM、TCM (Trellis Coded Modulation)、BCM (Block Coded Modulation)、Turbo 码、LDPC (Low Density Parity Codes)、空时编码、各种均衡技术、对消技术以及信息存储编码调制技术中都充分体现了 Shannon 定理的作用。

通过近五十年的努力,人们不仅在理论上发展了 Shannon 信息论,而且在实际中逐步实现了某些信道下的 Shannon 理论所指出的理想传信。信息论这一抽象而完美的理论,在几十年后有如此巨大、丰硕的技术成果,实在令人惊叹!

信息论对实际通信系统的设计已产生了深刻的影响,通信工程师在信息论方面的基础对他们事业的发展有重要的作用。

自 1948 年以来,已过了半个多世纪。IEEE 的信息论学会曾在 1973 年发表了一系列文章,纪念信息论诞生 25 周年,出版了 Shannon 著作集。在 1998 年又举行了一系列纪念活动,纪念信息论诞生 50 周年,并出版了专集。伟大的 Shannon 于 2001 年 2 月 24 日在纽约谢世。

50 年后的今天,通信、计算机和半导体技术的发展已将人类社会推进到一个崭新的信息时代。信息在现代社会中的作用愈来愈大,社会对信息的需求愈来愈大。通信、广播、影视、出版等正在从模拟到数字,从单一媒体到多媒体,从人工、机械化到智能化,从局部联网到全球通信网。

20 世纪七八十年代完成了通信与计算机技术的结合(C & C)。Internet 的出现,为人类交换信息,促进科学、技术、文化、教育、生产的发展,提高现代人的生活质量提供了极大的便利,大大加速了人类信息化社会的进程,加之 90 年代开始了通信、计算机和消费电子(Communications Computer Consumer electronics, 3C)的三结合,信息高速公路或全球信息基础设施(GII)的提出和建设,构成了人类生存的信息环境——信息空间(Cyberspace)。这个虚拟空间的形成和发展将人类社会推进到了一个新的发展阶段——信息化社会阶段,为人们提供了更方便、更舒适的工作和生活环境,它对人类社会的发展将产生巨大的影响。

信息化社会导致经济全球化和知识化。互联网已成为社会资源重新分配的基本工具。

信息化社会导致第三次军事革命,联合作战和信息化作战成为重要作战形式,数字化部队和数字化战场也跟着诞生。

信息化社会中,人们的一切活动都将在信息空间中进行竞争和接受检验。

信息化社会中,许多有形的东西开始向数字的、无形的方向转变。

信息化社会也使人们越来越忙碌、越来越浮躁,在信息的大洋中有弄潮儿,也有溺水者。

在信息化社会中,一个国家、一个地区、一个单位乃至一个家庭和个人,除了要有能力在物理空间中生存外,还必须建设好信息基础设施,学会在无形的数字化信息空间中生存,否则,它在现代信息社会的激烈竞争中,就会落后和失败。预计到 2025 年,所有的传输都将数字化,灵巧的个人终端将为人们提供各种各样的服务,个人终端将通过几十米至几千米的无线信道与光纤等骨干网连通,通向世界。

人类已进入 21 世纪。数字化、信息化、网络化正在冲击、影响、改变我们社会生活的各个方面。从科学研究、生产制造、产品流通、商业运作、超市购物、医疗服务、教育培训、出版印刷、媒体传播到文化生活、娱乐休闲、人际交往、法律规范、伦理道德、军事作战……无一不将受到信息网络的挑战,无一不在信息技术这一最新高科技生产力的作用下迅速变化。

为了表彰信息论的创始人 Shannon 的伟大功绩,2000 年 10 月 6 日 IEEE Information Society 的 25 名成员,在 Claude Shannon 儿童时代的老家 Michigan 的 Gaylord 举行了 Shannon 塑像的落成典礼。塑像底座正面刻文如下:

Claude Elwood Shannon

Father of Information Theory

Electrical engineer, Mathematician, and native son of Gaylord. His creation of information theory, the mathematical theory of communication, in the 1940s and 1950s inspired the revolutionary advances in digital communications and information storage that have shaped the modern world.

This statue was donated by the Information Theory Society of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, whose members follow gratefully in his footsteps.

Dedicated October 6, 2000

Edgene Daub, Sculptor

著名信息论和编码学者 Dr. Richard Blahut 在 Shannon 塑像落成典礼上的题词中说:“在我看来,两百年之后,当人们回过头来看我们这个时代的时候,他们可能不会记得谁曾是美国的总统,他们也不会记得谁曾是影星或摇滚歌星,但是仍然会知晓 Shannon 的名字,学校里仍然会讲授信息论。”

II

距离我们在西安电子科技大学出版社出版《信息与编码理论》一书已有 17 年之久,该书第九章的作者,我们的良兄益友梁传甲教授也已过早地于 1992 年 10 月 11 日逝世,我们的老师、西安电子科技大学信息论专业的创始人——陈太一工程院院士也已于 2004 年 5 月 6 日辞世。本书的改版也是对他们两位的纪念。

III

随着我国教育事业的迅速发展,大学有关专业比较普遍地开设了信息论课程,特别是自各校广泛招收研究生以来,信息论几乎成了信息科学与技术、通信与信息系统、信号与信息处理、计算机和应用数学等有关专业普遍选修的课程。在这种形势下,我们在多次编写信息论、编码理论教材的基础上,重新编写了这本教材,以期能适应科学技术和我国教育形势的新发展。

这本教材总结了我校自 1960 年创办信息论专业以来,为信息工程系各专业和其他工程专业开设信息论和编码理论课程的经验,特别是总结了改革开放以来为本科生和研究生开设此课的经验。书中较详细地讨论了信息论的基本理论,对信息论中新发展的若干重要课题(如率失真理论、多用户信息论等)都做了专题讨论,并反映信息论和编码理论这一学科的近况。这对于需要获得信息论基本知识的有关专业的同学和在这些领域从事研究、开发工作的工程技术人员都将是有意义的。

本书可作为有关专业高年级本科生和研究生的教材。在给高年级本科生讲授时,可以只讲一些基本内容。书中标有 * 号的章节主要供研究生阅读。若只想了解一般信息论的基本内容,第 6、7、8 章有关纠错码的部分可以从略。各章后面都附有一些难易程度不等的习题,可根据需要选用。书末附有较详尽的参考文献,可供阅读时参考。

李晖博士参加了本书的改写工作,他的贡献是在第 3.4 节增加了算术码和 LZ 压缩算法,增写了全新的第 8 章——接近 Shannon 极限的编码,对原书有关内容进行重新整理和改写,构成第 5、6、7、9 和 10 章。

本书在编写中参考了一些有关著作,特别应当提到的有 Gallager (1968)、Fano (1961)、Golomb (1964)、Lin 和 Costello (1982)、McEliece (2002)、Viterbi 和 Omura (1979)、Kolesnik 和 Poltalev (1982)、有本卓 (1977) 以及周炯槃 (1983) 等教授的著作。

本书得到国家自然科学基金项目和西安电子科技大学研究生教材基金的资助,胡子濮、王莹、吴蔚以及西安电子科技大学信息论课程组的各位老师编写过程中提供了帮助,提出了宝贵意见。在出版过程中还得到高等教育出版社的大力支持和鼓励,作者在此表示衷心感谢。

作者

于西安电子科技大学

2005 年 2 月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第 1 章 引论	1	小结	43
1.1 通信系统模型	1	习题	43
1.2 Shannon 信息论的中心问题	3	第 3 章 信源编码——离散信源无失真 编码	47
1.3 Shannon 信息论的局限性	4	3.1 信源及其分类	47
1.4 信息的广义性	6	3.2 离散无记忆信源的等长编码	49
第 2 章 信息量和熵	8	3.3 离散无记忆信源的不等长编码	54
2.1 离散变量的非平均信息量	8	3.4 最佳不等长编码	60
2.1.1 非平均互信息量	9	3.4.1 Huffman 编码	60
2.1.2 条件互信息与联合事件的互 信息量	12	3.4.2 算术编码	64
2.1.3 离散变量的非平均自信 息量	14	3.4.3 LZ 编码	66
2.2 离散集的平均自信息量——熵	16	* 3.5 平稳源编码	69
2.2.1 熵和条件熵	16	* 3.6 马尔可夫源	73
2.2.2 熵的性质	18	小结	81
2.2.3 相对熵和条件相对熵	20	习题	82
* 2.3 熵的唯一性定理	20	第 4 章 信道及其容量	87
2.4 离散集的平均互信息量	23	4.1 信道分类	87
2.5 信息不等式	25	4.2 离散无记忆信道	88
2.5.1 凸函数及其性质	25	4.2.1 有关 DMC 的容量定理	89
2.5.2 K-T 条件	26	4.2.2 对称 DMC 容量的计算	91
2.5.3 信息不等式	28	4.2.3 一般 DMC 容量的计算	95
2.6 相对熵、熵和互信息量的凸性	33	* 4.3 离散无记忆信道容量的迭代 算法	96
2.6.1 相对熵和熵的凸性	33	4.3.1 交替优化	96
2.6.2 互信息量的凸性	33	4.3.2 信道容量算法	96
2.7 连续随机变量的互信息量和微 分熵	34	* 4.4 离散有记忆信道	101
2.7.1 连续随机变量的互信息量	34	4.5 信道的组合	104
2.7.2 连续随机变量的熵	37	4.6 时间离散的无记忆连续信道	107
2.7.3 微分熵的极大化	39	4.6.1 可加噪声信道	108
* 2.8 随机过程的信息量和熵	41	4.6.2 平均功率受限可加噪声 信道	109

4.6.3 平行可加高斯噪声信道	111	6.3.3 码的扩展和缩短	151
4.7 波形信道	112	6.4 一些特殊的线性分组码	151
小结	115	6.4.1 Hamming(汉明)码	151
习题	115	6.4.2 Hadamard 码	151
第5章 信道编码定理	119	6.4.3 Golay 码	152
5.1 信道编码和译码	119	6.5 伴随式和最小汉明距离译码	153
5.1.1 信道编码	119	6.5.1 分组码的标准阵译码	153
5.1.2 译码准则	120	6.5.2 最小距离与纠错能力	156
5.1.3 离散序列的译码	120	6.6 循环码	157
5.1.4 连续序列的译码	122	6.6.1 循环码的数学描述	157
5.2 联合典型序列	125	6.6.2 循环码的译码	163
5.3 信道编码定理	126	6.7 BCH 码	165
* 5.4 错误概率上限	128	6.7.1 BCH 码的定义和性质	165
5.4.1 并集限	128	6.7.2 BCH 码的译码	166
5.4.2 Bhattacharyya(巴塔恰亚)限	129	6.8 Reed-Solomon 码	169
5.4.3 Gallager(加拉格)限	130	* 6.9 分组码的性能限	169
5.4.4 随机码集合平均错误概率上限	131	* 6.10 线性分组码的性能限	173
5.4.5 DMC 的译码错误概率上限	132	小结	174
5.4.6 时间离散连续信道错误概率上限	134	习题	175
5.5 等能量正交编码信号	136	第7章 卷积码	177
小结	138	7.1 卷积码的基本概念	177
习题	140	7.2 Viterbi 译码	191
第6章 线性分组码	143	7.3 序列译码	201
6.1 Galois 域	143	* 7.4 卷积码集合平均错误概率限	206
6.1.1 域运算	143	7.5 级联码	210
6.1.2 $GF(p^m)$ 的构造	144	小结	213
6.1.3 有限域的特征和元素的级	146	习题	213
6.1.4 最小多项式	147	第8章 接近 Shannon 极限的编码	215
6.2 线性分组码	147	8.1 Turbo 码的构造	215
6.3 线性分组码的生成矩阵和校验矩阵	148	8.1.1 递归系统卷积码(RSC)	216
6.3.1 生成矩阵	148	8.1.2 Turbo 码的距离谱	217
6.3.2 校验矩阵	150	8.1.3 Turbo 码交织器的设计	219
		8.2 Turbo 码的译码	221
		8.2.1 APP 译码器	222
		8.2.2 MAP 译码算法	222
		8.2.3 SOVA 译码算法	228
		8.2.4 Turbo 码的迭代译码特性	230
		8.3 Turbo 码的性能限	232

8.4 低密度校验码的定义	233	*9.7 有失真时的离散无记忆信源编 码定理	271
8.4.1 LDPC 码的定义	233	*9.8 连续幅度无记忆信源	276
8.4.2 LDPC 码的 Tanner 图 表示	234	小结	278
8.4.3 LDPC 码的构造	235	习题	279
8.5 低密度校验码的译码	236	第 10 章 多用户信息论	281
8.5.1 硬判决译码	236	10.1 多用户通信及多用户信道的 分类	281
8.5.2 最佳 APP 译码	237	10.2 相关信源独立编码	284
8.5.3 LDPC 译码的和积算法	240	*10.3 相关源协同编码	289
8.5.4 对数域和积算法	242	10.4 多元接入信道(MAC)	295
8.5.5 最小和算法	244	10.4.1 多元接入信道的容量区域 及可达性	295
8.6 低密度校验码的性能	245	10.4.2 多元信道容量域的凸性	300
小结	247	10.4.3 多发送端的多元接入信道 容量区域	300
习题	247	10.4.4 高斯多元接入信道	300
第 9 章 信源编码——无记忆信源的有 失真编码	249	*10.5 广播信道	302
9.1 一般概念与定义	249	*10.6 中继信道	309
9.2 率失真函数的基本性质与有失真 时的逆信源编码定理	252	10.6.1 一般中继信道	309
9.2.1 基本性质	252	10.6.2 退化中继信道	310
9.2.2 有失真时的逆信源编码 定理	254	10.6.3 反向退化中继信道	312
9.3 无记忆信源 $R(D)$ 的计算	255	10.6.4 带反馈的一般中继信道	312
*9.4 率失真函数的迭代计算	262	10.6.5 高斯退化信道	313
*9.5 率失真函数的可达性	263	小结	314
*9.6 $R(D)$ 上、下限的估计	266	习题	315
9.6.1 $R(D)$ 的下限	266	参考文献	318
9.6.2 $R(D)$ 的上限	269		

第 1 章

引 论

本章介绍通信系统模型、信息论研究的对象和基本方法。

1.1 通信系统模型

“信息论”或者称为“通信的数学理论”，是研究信息的传输、存储和处理的科学。通信的基本问题是在彼时（存储情况）或彼地（通信情况）精确地或近似地再现此时、此地发出的消息。信息论研究的主要问题是通信系统设计中如何实现有效性和可靠性。

各种通信系统（包括存储系统），如电报、电话、图像、计算机、导航、雷达乃至生物系统，虽然它们的形式和用途各不相同，但从信息传输、存储和处理的角度来看，本质上有许多共同之处。对有收发两端的单向传信系统，一般可概括为图 1.1.1 所示的模型。

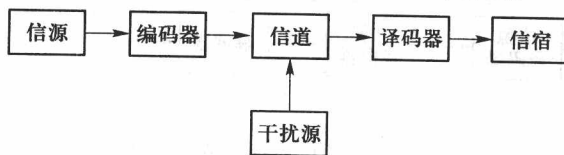


图 1.1.1 通信系统模型

信源是产生消息的源。消息可以是文字、语言、图像等，它可以是离散的，也可以是连续的，但都是随机发生的，即在收到这些消息之前不可能确切地知道它们的内容，否则通信将失去意义。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消息的统计特性和信源产生信息的速率。

编码器是将信源发出的消息变换成适于信道传送的信号的装置。一般包含 3 个部分，即信源编码器、纠错编码器和调制器。信源编码器是在一定的准则下，对信源的输出进行变换，目的在于求得有效性；纠错编码器是对信源编码器的输出进行变换，用以提高对于信道干扰的抗击能力；调制器将信源编码器的输出变成适合于信道传输要求（带宽/波段、功率/通信时间等）的信号形式。不一定每个系统的编码器都含有这 3 个部分，有的只有其中的两个或一个组成部分，也有的将其中的两个合并起来由一个组成部分实现。纠错编码器和调制器的组合又称做信道编码器，因为它们主要是针对信道的情况进行设计的，目的在于充分利用信道的传信能力可靠地传送信息，参看图 1.1.2。

信道是将信号从发端传送到收端的媒质或通道，它是包括收、发设备在内的物理设施。信道的种类很多，如架空明线、电缆、表面波、声呐、光束、电离层反射、对流层散射、卡片、磁盘、磁鼓、

书籍等都可看做是信道。

干扰源是我们为了分析方便,将整个通信系统中各部分引入的各种干扰,如衰落、多径、码间干扰、非线性失真、可加噪声等都集中表示为一个方框作用于信道。这种干扰源的统计特性是划分信道的重要因素,并且是决定信道传输能力的决定因素。信道的中心课题是研究信道的统计特性和它的传信能力,即信道容量。实际干扰可分成两大类。一类是由外界引入的随机干扰,如天电干扰、设备内部的噪声,它们与信道输入信号统计无关,信道的输出就是输入和干扰的和,所以这种干扰又称为加性干扰;另一类干扰是信号在传输过程中由于物理条件的变化(如温度、电离层位置随机变化等)引起信号参量(如频率色散、幅度衰减、相位偏移等)随机变化,此时信道的输出信号是输入与某些随机变量相乘的结果,所以这种干扰又称为乘性干扰。实现有效和可靠通信的主要困难是什么?是系统中的干扰。如何克服这类困难,也就是如何抗干扰是通信理论研究的中心课题。信息论要对干扰进行数学上的定量描述,以确定它们对传信能力影响的大小,从而给出有干扰下信道的传信能力。

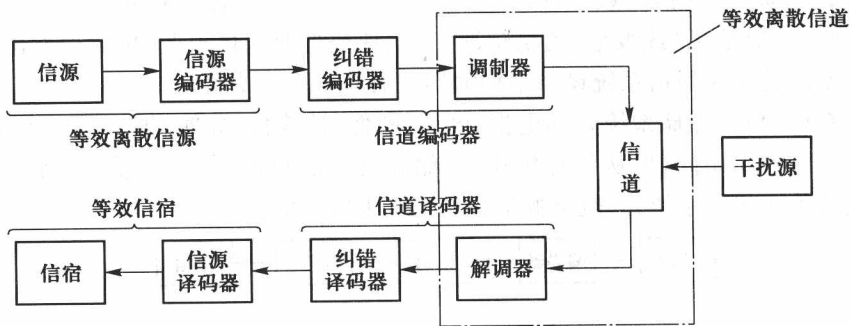


图 1.1.2 通信系统模型的细分

译码器是编码的逆变换,它要从受干扰的信号中最大限度地提取出有关信源输出消息的信息,应尽可能精确地恢复信源的输出,并将它们递送给信宿。中心问题是研究各种可实现的解调和译码方法。

信宿是信息的接收者,可以是人或物,且与信源处于不同地点或存在于不同时刻。它要对传过来的消息提出可接受的条件,即提出一定的准则,发端将以此来确定对信源处理时所保留的最小信息量。至于信宿本身的主观因素,在 Shannon 信息论中不加过问。

系统的模型不是不变的,它根据实际情况而定。图 1.1.2 就是将图 1.1.1 中的编码器和译码器做了更细致的划分,目的是使信源编码的研究主要与信源及信宿发生关系,此时信道编码器、译码器和信道的组合可等效为一个离散无扰信道。而信道编码的研究可与信源、信宿无关,而只与信道有关,此时对于信道编码器来说信源和信源编码器组合成一个等效离散源,它的输出可近似地看成是无记忆、等概的数字序列。这种划分可使信源编码集中于解决传输的有效性问题的,而信道编码则集中于解决抗信道干扰和失真问题,即解决传输可靠性问题,从而简化了研究。这样划分是否会对发挥通信系统的传信潜力有根本性的限制呢?研究表明,在很一般的条件下,对大多数理论结果没有太大限制。这样划分也不一定总是合理的,有时将信源编码和信道编码统一进行设计可能更有效些,有人已进行了这方面的探讨 [Davisson (1973)],如信源和信道联合

编码、加密与纠错联合设计的研究。

图 1.1.1 和 1.1.2 给出的模型适用于两个用户(或终端)之间的单向通信情况。在网络通信情况下,可能有很多分开的信源、信道和信宿相互进行信息交换。为了研究网络通信系统中的信息传输和处理问题,要对上面给出的单路系统进行拓广,而引入多用户通信系统,并将单路通信的信息论发展成为多用户信息理论,这是由 Shannon 所开创的[Shannon(1961)]在 20 世纪的七八十年代得到广泛研究的信息论的一个新分支。本书第 10 章中将介绍其中的一些基本结果。

上面多次提到了信息、消息和信号,在结束本节时,我们想澄清这 3 个不同但又密切相关的概念。

信息是一种抽象的、存于具体消息(信息的载体)之中的东西。它是无形的,但是可以定量描述的(至少有些类信息是可以定量描述的),它又与具体信宿的接收消息空间有关。信息的产生、传送、接收、处理、存储等都离不开物质的运动,但它不是物质运动本身,而是借助于物质运动递送系统所关心的系统状态和变化的不确定性的。

信息、物质和能量被认为是构成一切系统的三大要素,信息是系统中传送(或存储、处理)的对象,它包含在消息之中。消息是比较具体的概念,但不是物理的,如语言、文字、数字、图像等。消息中载荷有信息,但同一信息可以由不同的消息载荷。例如,同一信息可以用不同类型的消息(语言、图像、文字等)表达。信号是表示消息的物理量,如电信号可通过幅度、频率、相位的变化表示不同的消息。可以用不同类型的信号,如声、光、电等信号传递同一消息。

1.2 Shannon 信息论的中心问题

Shannon 信息论的基本任务是为设计有效而可靠的通信系统提供理论依据。通信的基本目的是在接收端精确地或以给定的失真度重现信源的输出。信源编码器的作用是根据失真度准则对信源的输出进行划分,给每一类以不同的表示,即码字。信源译码器的任务是根据收到的信源表示恢复出信源所属的类。显然,精确度要求越高,失真度要求越低,对信源的划分就要越细,因而为表示信源所需的信息量或码长就越大。在给定信源和失真度条件下,要多大信息速率才行?或对给定信源保留一定的信息速率下,可以达到的最小失真是多少?这是信息论所关心的信源编码问题,也是通信“可行性”研究的一个问题。另一个问题是如何实现这一理论结果,即找出实际可行的信源编码和译码方法。

信息论研究的另一个主要问题是信道编码问题。它和信源编码问题类似,但它不是研究最有效地表示信源输出的,而是研究在保证信息传输可靠性(如错误概率小于给定值)的条件下最有效地利用信道的传信能力的。设送入信道的信息速率为 R ,信道容量为 C ,信道编码基本定理告诉我们,若 $R < C$,则可以将速率为 R 的信息以任意高的可靠性送至接收端;若 $R > C$,则不可能。这是信道编码和“可行性”问题。信道编码的另一个问题是寻找实际可行的编、译码方法。

信息论在研究信源和信道编码定理时所用的方法都是随机编码的方法,它是证明定理的重要工具,但为非构造性的,因此不能提供具体的可实现的编、译码方法。由 Hamming(1950)开始的可构造的编码理论在 20 世纪 50 年代末和 60 年代得到了很大的发展,成为信息论中的一个重要分支——纠错编码理论[Peterson(1961)]。信源编码理论在 20 世纪 70 年代有了很大发展,形成速率失真理论[Shannon(1959)和 Berger(1971)]和数据压缩技术[Davidson 和 Gray(1976)]以