

SHUZI TONGXIN HE BIANMA YUANLI

数字通信和编码原理

[美] A.J. 维特比 J.K. 小村 著 蒋慧清 译

人民邮电出版社

数字通信和编码原理

【美】 A.J.维特比
J.K.小村 著
蒋慧清 译

人民邮电出版社

ПРИНЦИПЫ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ И КОДИРОВАНИЯ

А.Д.ВИТЕРБИ

ДЖ.К.ОМУРА

МОСКВА «РАДИО И СВЯЗЬ» 1982

内 容 简 介

本书叙述信息论重要分支的基础：分组编码、卷积码和信源编码。从教学角度恰当地研究仙农(Shannon)理论和它们的应用，在不同的信道中运用分组码和卷积码时有可能达到的错误概率的评价，编码方法。特别注意对于实践有重要意义的问题，其中包括卷积码结构的构成和研究、维特比(Viterbi)算法和堆栈算法以及它们解码的有效性的研究、干扰的影响。

本书供科学工作者和工程技术工作者使用，也可供大学高年级学生参考。

数字通信和编码原理

〔美〕 A.J. 维特比

著

J.K. 小村

蒋慧清 译

责任编辑：俞天林

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1163 1/32

1990年5月 第一版

印张：21¹⁶/₃₂

页数：344

1990年5月河北第1次印刷

字数：572千字

印数：1—2 500

册

ISBN7-115-04064-8/TN·266

定价：9.75元

目 录

译本编辑的前言
为俄文出版作的前言
前言

第一部分 数字通信和分组编码的基础

第一章 数字通信系统：基本概念和参数	(9)
1.1 信源、熵和无噪声编码定理	(13)
1.2 互信息和信道容量	(27)
1.3 编码定理的反演	(36)
1.4 文献述评及引证	(43)
附录 1 A 凸函数	(44)
附录 1 B 凸函数的 Jensen 不等式	(50)
习题	(52)
第二章 信道模型和分组编码	(59)
2.1 在分组编码时沿加性高斯噪声信道的数字通信	(59)
2.2 最小错误概率和最大似然解法器	(67)
2.3 错误概率和简单限	(72)
2.4 错误概率的精确上限	(78)
2.5 在加性白高斯噪声信道中有等能量的正交信号	(79)
2.6 对频带宽度的限制、符号间的干扰和扩散时的不确定性	(84)
2.7 对信道输入端的限制	(91)
2.8 信道输出的量化、无记忆离散信道	(94)
2.9 线性码	(99)
2.10 系统线性码和二进制对称信道的最佳解码	(107)
2.11 评述加性白高斯噪声信道中和因量化而演化成的信道 中 的线性分组码特性的例子	(116)

2.12 其它无记忆信道	(123)
2.13 文献述评及引证	(139)
附录 2 A Gram-Schmidt正交法和信号的表象	(140)
习题	(143)
第三章 分组码码集特性的分析	(154)
3.1 码集平均的错误概率: 上限	(154)
3.2 信道编码定理和无记忆信道中错误概率的指数率性质	(161)
3.3 有删节的码集平均错误概率: 较小速率时的上限	(173)
3.4 例子。二进制输入对称输出信道以及高噪声信道	(183)
3.5 Chernoff界限和Neyman-Pearson引理	(193)
3.6 球形包封的下限	(201)
3.7 在零速率时的下限	(211)
3.8 在较小速率时的下限	(218)
3.9 假设和反演	(224)
3.10 线性码的码集界限	(230)
3.11 文献述评及引证	(237)
附录 3 A 有用的不等式以及引理3.2.1和定理3.3.2的证明	(237)
附录 3 B Kuhn-Tacker条件及定理3.2.2和3.2.3的证明	(247)
附录 3 C 计算信道容量的算法	(252)
习题	(258)

第二部分 卷积编码和数字通信

第四章 卷积码	(281)
4.1 导言。码的结构	(281)
4.2 卷码的最大似然解码器—维特比算法	(290)
4.3 二进制输入信道的卷码的距离性质	(296)
4.4 二进制输入对称输出的无记忆信道中具体的卷码特性的 评价	(300)
4.5 若干情况和例子	(305)
4.6 速率 $1/n$ 的码的结构。正交卷码	(311)
4.7 在维特比解码器中路径索引的截短、测度的量化和码同步	

.....	(318)
4.8 反馈解码	(322)
4.9 有符号间干涉的信道	(335)
4.10 有符号间干涉的信道的编码	(346)
4.11 文献述评及引证	(352)
习题	(353)
第五章 卷码码集的特性	(371)
5.1 时变卷码的信道编码定理	(371)
5.2 例子: 高噪声信道的卷积编码的指数率	(386)
5.3 二进制输入对称输出信道的有删节的上限	(388)
5.4 错误概率的下限	(393)
5.5 错误事件分布的临界深度	(397)
5.6 路径索引的截短和始同步的错误	(402)
5.7 系统卷码的错误概率的界限	(404)
5.8 在有符号间干涉的信道中的时变卷码	(407)
5.9 文献述评及引证	(419)
习题	(420)
第六章 卷码的序列解码	(429)
6.1 基本概念和堆栈算法	(429)
6.2 计算量的分布: 上限	(435)
6.3 错误概率的上限	(444)
6.4 计算量的分布: 下限	(449)
6.5 解码的Fano算法和其它序列算法	(455)
6.6 复杂度、缓冲器的溢出和其它的系统的装置	(459)
6.7 文献述评及引证	(465)
习题	(465)

第三部分 数字通信的信源编码

第七章 有误差传输理论: 用于无记忆信源的基本概念 ...	(473)
7.1 信源编码问题	(473)
7.2 无记忆离散信源. 分组码	(477)

7.3	与信道编码的联系	(495)
7.4	无记忆离散信源。篱笆码	(503)
7.5	振幅连续的无记忆信源	(517)
7.6	$R(D)$ 的计算。无记忆离散信源	(527)
7.7	$R(D)$ 的计算。振幅连续的无记忆信源	(547)
7.8	文献述评及引证	(558)
附录 7 A	$R(D)$ 的计算方法	(558)
习题		(565)
第八章	有误差传输理论: 有记忆信源, 高斯信源和 通用	
	编码	(578)
8.1	无记忆向量信源	(578)
8.2	有记忆信源	(592)
8.3	$R(D)$ 的界限	(610)
8.4	平方差误差高斯信源	(615)
8.5	具有误差的均衡度量的对称信源和具有规定结构的序列	(634)
8.6	通用编码	(650)
8.7	文献述评及引证	(661)
附录 8 A	误差分布的 <i>Chernoff</i> 界限	(661)
习题		(668)
参考文献		(675)

译本编辑的前言

请苏联读者注意，著名美国专家在编码和信息传输领域中的这本书是在通信理论领域内已有名著的最好补充，其中首先指出J. Wozenraft和I. Jacobs的专著“通信技术理论基础”和R. Gallager的专著“信息论和可靠性通信”。本书由三部分组成，其中只有第一部分——“数字通信和分组编码的基础”——的内容部分地超出了R. Gallager书中的相应篇章的内容。而其它两部分则以作者的独创性工作为基础，用于阐述信源卷积编码和解码的资料还没有在专著和教学中得到反映。

作者的名字早就为信息论领域中的专家们所熟悉。在1967年A. 维特比提出的并以他的名字命名的巧妙的卷积码解码的算法广泛地用于通信系统中。此外，他也是俄译本“相干通信原理”的作者和制造通信设备的商号“灵格比特”的创始人之一，并担任副董事长职务。洛杉矶加利福尼亚大学教授Jim K. 小村的特点是有广泛的科学兴趣，他在信息论的不同领域中作了大量的工作，其中突出地研究了具有符号间干扰的信道和信源编码。

本书第一部分中，对分组编码方法运用了与习惯不同的论述，同时还包括对分组编码实用数字方法的研究，它考虑了用于实际信道时所产生的限制。第二部分阐述了卷积码及其解码方法，其中除了对卷积编码器按码集平均的特性作出经典分析外，对具体解码器的特性还作了评价。更多地注意到解码器的实现问题。书的第三部分用于论述数字通信系统中信息压缩的问题。

本书的数学水平与苏联工科院校数学水平相适应。叙述基本上是足够严密的，但是训练有素的读者一定会发现许多不足。在某些情况下译者对它们作了必要的注释。在译本中纠正了英文原本中包

含的错字，其文献目录承蒙作者寄来。

虽然在书的文献述评中没有充分反映苏联的成就，我们认为可以不增补它，因为实际上在信息论的领域中苏联工作的全面的文献述评(到1974年前)已包括在*R. Gallager*的书的译本中。

书的翻译是由*А. Ю. Швердяев* (1—3章)、*А. В. Кузнецов* (4—6章)和*В. Н. Кошелев* (7—8章)完成的。

К. И. 齐汉吉罗夫

为俄文出版作的前言

本书(Principles of Digital Communication and Coding)反映信息论的“美国学派”的观点,信息论的原理是1948年由C.E.仙农的奠基著作提出的,并得到了发展。对信道中解码的错误概率的界限和误差函数对速度的依从关系的叙述,基本上采用传统方法,这是较常用的方法,能紧密地与数字通信技术的实际研究相联系。我们无法判断能否成功地使通信工程师克服数学证明的障碍。(我们试图在书的第一部分开始用对实际信道模型的概述和物理直观讨论,还有在英文版的前言中指出的阅读次序来做到这点,这就使得可能避免大量理论上造成的困难)。今后主要应注意研究成果的实际运用和它们对数字通信系统发展的影响,特别是对美国宇宙通信系统和卫星通信系统发展的影响。

本书主要反映美国研究人员的观点和风格,对其它国家学者的著作在文献中的引证不够完备。主要的例外是对苏联研究者К. И. 齐汉吉罗夫,日本研究者S. Arimoto和以色列研究者J. Zúfa的工作的引证,这些研究者拓宽了和加深了由作者在书中叙述的问题的观点。

我们特别感谢К. И. 齐汉吉罗夫, В. Н. Кошелев, А. В. Кузнецов和А. Ю. Швердяев翻译这本书,我们确信,译本的价值由翻译者渊博的学识和他们在这个领域的发展中的贡献所保证。

A. J. 维特比

J. K. 小村

前 言

数字通信—广泛采用的带有许多涵义上微细差别的术语。本书供通信理论的研究用，供在数字消息传输和接收时使用的信道、终端装置、调制解调器和网的设计者用。本书对数字通信理论的任务是概括与下面两方面问题相关的全部结果和方法：1)、为了满足对符号的、声音的或可视的信息正确性（质量）的给定要求下使比特数最少（理论的相应部分称为信源编码）；2)保证存在各种不同干扰时沿信道传输的符号的正确接收（这部分理论称为信道编码）。解决这两个问题的理论基础是C. 仙农在1948年卓越的论文集中奠定的。在随后的数十年中，被称为信息论的这个理论的发展和运用在深入研究数字通信系统时的技术决策表现出不断增大的影响，而直到电子装置和系统的工艺发展程度达到当年还未必预测得到的水平时才充分地展现其潜力。信息论的进步使大规模集成电路模块的制造提前了，并增强了运用卫星通信而得到的经济利益增强了。

本书不打算把与数字通信理论相近的题目都包括进来，如果这些题目要求严重地偏离上述的解决基本问题的基本概念和方法。根据这个理由，本书特别回避结构代数方法，虽然它们在选择码的结构时是有益的并能导出重要的基本理论结果。同样，本书还回避技术上重要的载波相位和频率的扩散及时间同步的问题。这两个题目在其它著作中得到了足够充分地阐述。

但是，本身性质与卷积编码问题相类似的数字通信中的符号间干扰，在本书中得到了反映。对于这种技术问题的新的处理方法在书中是作为与所叙述材料的基本题目相关的结果出现的。

本书是在洛杉矶，其后在圣地亚哥大约化了12年时间，在加利福尼亚大学高年级学生阅读的一系列教学课程的基础上写成的。我

们追求的目标是给有不同需要的读者提供理解数字通信和编码的基础的最直接的方法。要求所有的读者有一些概率论和随机过程理论方面的初步知识，且希望把它们用于通信。作为起码的知识，有某种工程的或数学方面的一年的知识就完全足够。

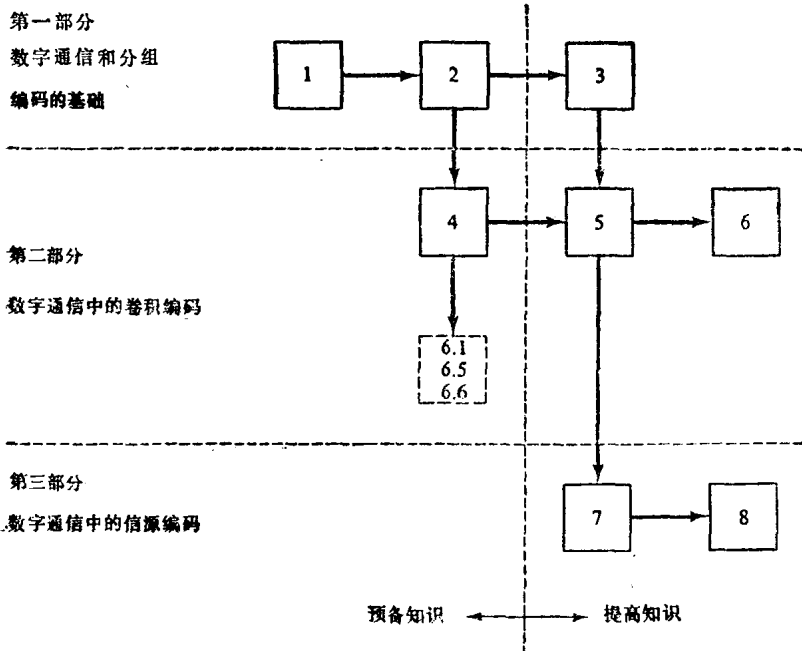


图 P.1 对知识的组织和要求

假如读者有这方面的知识，可以给读者指出多种途径，通过图 P.1 所示的这些途径来钻研本书，就可以达到自己的具体目标。对于初学者，一个学期或半个学期的教程可以只学习第一部分的基础。这几章分别包括信源和信道的基本概念和参数，考虑到信道物理性质的信道模型的处理，最后，介绍以按码集求平均为基础的码特性的评价。高年级大学生或专家可以转入第二部分，这里对卷积编码和解码作了同样详细的叙述。指出的方法是实现沿信道达到实际上无错误通信的可能的最有效方法之一。在一年的教程中还可以扩大

到第三部分：这部分指出了信源的最佳编码的方法实质上是与在第一部分和第二部分中研究过的信道中的编码方法互为表里的。

专业工程师和大学生们只要仔细学好第二、四章和第六章的大约一半，就可以掌握实际信道中编码的原理。如果避开以按码集求平均为基础的复杂讨论，那么不要化费过多的力气去掌握整个理论，就能学会在有噪声信道中编码。

作为另一个极端的情形，可以用一个学期或半个学期的教程向具有一定程度的数字通信知识的大学生介绍第三至六章中叙述的信道编码方面的材料，然后在同样长的时间内已经有了一定基础知识的大学生就可以掌握阐述信源编码的第三部分。

书中列举了大量的习题和例子。

除了仙农的著作之外，对书的写法有明显影响的两本重要教科书是：*Wozencraft*和*Jacobs*的书(1965)，这本书首先着重指出作为编码理论的基本概念发展基础的数字通信信道物理特性的意义；和*Gallager*的书(1968)，此书是迄今对这个领域知识的最为完备的和成熟的叙述。

书的结构是在有许多大学同行和大学生参与工作的情况下形成的。第一个作者与由*I.M. Jacobs, J.A. Heller, A.R. Cohen*和*K.S. Gilhousen*领导的“灵格比特”公司中，首先实现可靠的高速方案的、写在书中的所有卷积解码的方法的研究人员小组的紧密合作有着特别大的影响。书稿的最后说法还反映*J.L. Massey*对全书的精心评论和校勘，他建议的改进措施的大部分已经写入了原文。相信读者会由此有所得益。

最后，有这样的情况，严谨掌握通信理论的想像的漫长而困难的道路会使有的人望而生畏，然而请记住一句著名的已经有25个世纪的并编入老挝语的古代至理名言：“最漫长的旅途始于第一步”。

Andrew J. 维特比

Jim K. 小村

第 一 部 分

数字通信和分组编码的基础

第 一 章

数字通信系统: 基本概念和参数

如果20世纪头50年可以认为是建立可靠地传输消息的方法,其中包括语言以及电视图像消息的方法(主要是模拟方法)的无线电通信时代,那么,20世纪后50年就可以看作是数字通信发展的时代。

下述三种情形可以认为是数字通信日臻完善的推动因素:

1) 许多领域运用来自电子计算机数据库的和远距离终端装置的信息,各种形式的数据传输的需要不断增长以及对传输的准确性的要求不断提高。

2) 同步人造通信卫星系统的迅速发展,这种系统尽管便于在数据传输的极高速率条件下作全球通信,但由于极高的发射费用和由此引起的对功率和频带的限制,要求寻找利用信道资源的有效方法;

3) 建立同时为许多不同速率和各种不同要求用户服务的通信网。由于经济的原因,这里采用最简单而有效的数据压缩方法和多通路信道作为第一方案。

在20世纪的第三个25年内,所列举的方面与为建立有效的、灵活的和可靠的数字通信系统所必需的半导体技术同时发展。数字通信系统的理论基础是在40年代由C.E.仙农在他的著名论文《通信的数学原理》(1948)中奠定的。仙农似乎直觉地感到,沿信道的可靠的数字通信和把模拟信号最有效地变换成数字形式,这是一个问题的两个相关方面,因而允许作相同的描述和几乎同样的解决方法,实际上这种解决方法在仙农的奠基性论文中已经提出了。随后

的20年，许多研究者使理论更加明确和丰富起来，并把它改造成便于实际深入研究的表述；他们同时致力于实现符合理论的方法和算法所必需的工艺学。

由仙农阐述的和解决的两个相关的问题，利用图1.1的方框图能很好地完整地表示清楚。信源被制成数据随机发生器或能产生为传输所需要的随机信号的装置。信源编码器把信源输出变换成离散序列（通常是二进制的）。如果信源本身是离散输出，由编码器实现的变换将可能是彼此单值对应的。在某些时候用称为无噪声信道的直接联接体（在图1.1上用虚线圈出）代替包括编码器和解码器的信道。如果信源编码器的变换是单值对应的，那么在只是实现反变换时，信源解码器送给收信者以同信源产生的信息完全一致的信息。因而，一对信源编码器-解码器的用途在于使信源输出端的表象最少。用为足够的表象和信源解码器随后复原信源输出序列所必需的单位时间内的符号（通常是二进制的）数表示的速率作为可达到的数据压缩程度的度量。随机离散信源的序列沿无噪声信道传输、并可能依次准确复原的最小速率与随机离散信源的基本参量熵有关。

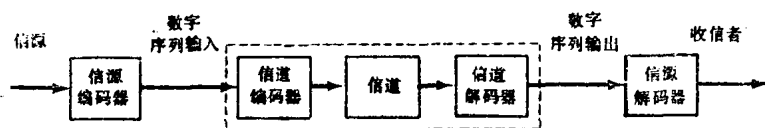


图 1.1 数字通信系统的基本模型

模拟信息源的输出信号不能准确地用离散序列表示，因为信源输出端上的序列从无穷集中取值，显然，这个无穷集不能彼此单值地变换为离散集，也就是变换为离散字母表¹。较好的做法，即把这种信息源的输出信号变换成离散序列——这就要容忍在信源解码器处理之后仍有某些畸变，这仅仅是近似地实现相反的变换。此时

注1. 模拟数字变换器，也称为量化器，可作为模拟信源编码器的最简单例子；相对于这种装置，数字模拟变换器就是信源解码器。