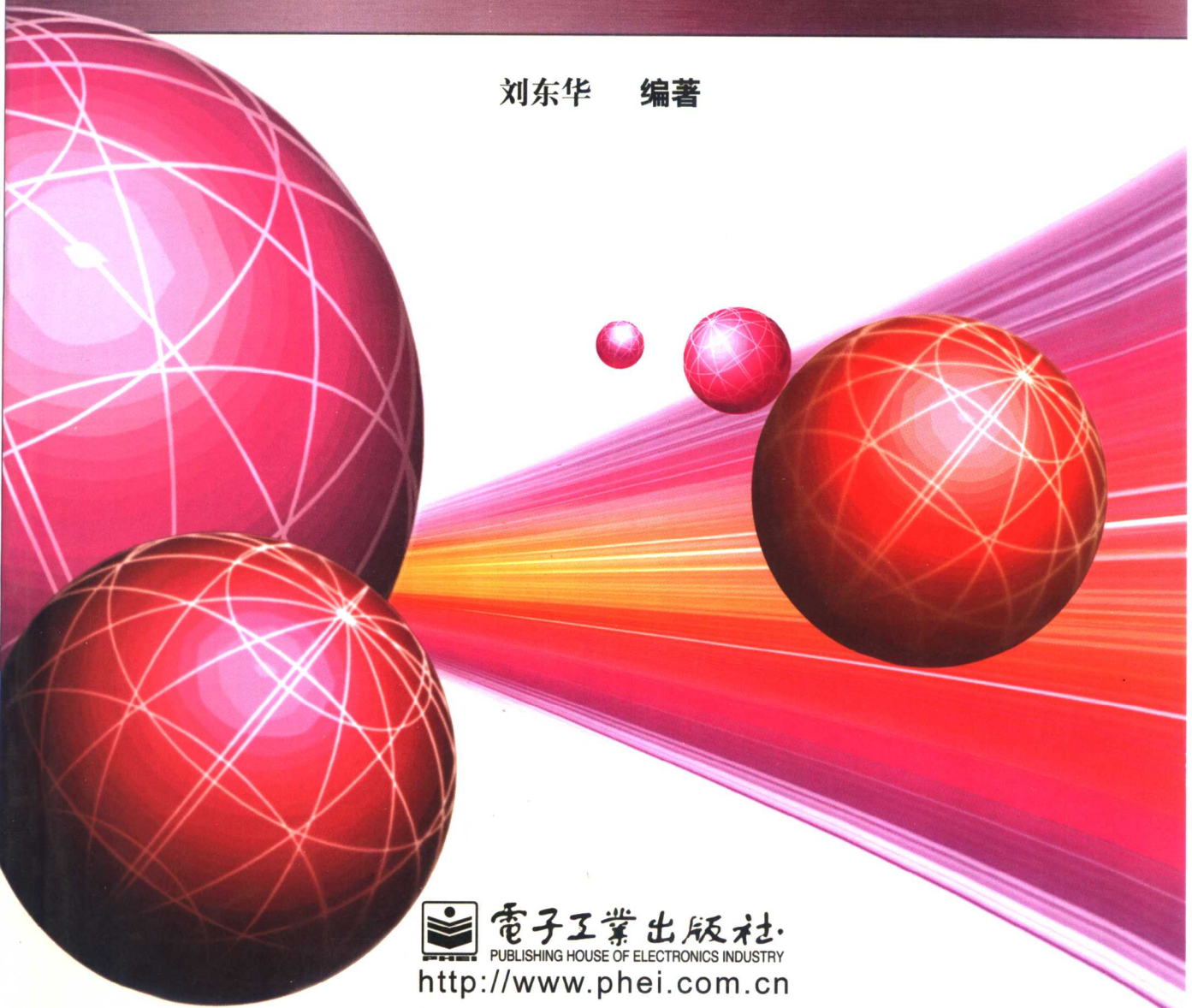


移动通信前沿技术丛书

Turbo码原理与 应用技术

刘东华 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

移动通信前沿技术丛书

Turbo 码原理与应用技术

刘东华 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

Turbo 码是继 1982 年 TCM 技术提出以来信息和编码领域最重大的研究成果。本书主要介绍 Turbo 码的原理及其应用技术。在介绍 Turbo 码的基本编码和译码原理及译码算法的基础上,详细介绍了 Turbo 码的特点、分析方法、分量码和交织器等关键部件的设计,对 Turbo 迭代译码的原理和收敛性以及迭代停止准则等内容进行了深入剖析,并对 Turbo 迭代原理用于信道估计、迭代均衡以及信号同步等方面的内容进行了重点介绍。

本书以介绍 Turbo 编码技术的基本思想和原理为基础,既有基本概念的分析 and 解释,又注重重要理论的推导和仿真实验的验证,在内容编排上力求使读者明确了解和学习这些技术的理论意义和应用价值。

本书可作为大专院校信息技术各专业的高年级本科生、研究生、教师以及科研院所从事纠错码研究和希望了解及掌握 Turbo 码最新技术的科研技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

Turbo 码原理与应用技术 / 刘东华编著. —北京: 电子工业出版社, 2004.1

(移动通信前沿技术丛书)

ISBN 7-5053-9500-9

I. T… II. 刘… III. 无线电通信—编码 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 119900 号

责任编辑: 沈艳波 特约编辑: 印晓芬

印 刷: 北京天竺颖华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 24.25 字数: 620 千字

印 次: 2004 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 39.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

纠错编码是数字通信系统和计算机系统的重要组成部分。1948 年,现代信息理论的奠基人 C. E. Shannon 在他的开创性论文“A mathematical theory of communication”中首次阐明了在有噪信道中实现可靠通信的方法,提出了著名的有噪信道编码定理,奠定了差错控制码的基石。

随着信息时代的到来以及微电子技术的飞速发展,今天的纠错码已不单是一个理论上探讨的问题,它已成为现代通信领域中不可或缺的一项标准技术。现代通信系统的复杂化以及通信业务的多样化,要求通信系统能够对话音、数据以及图像等大数据量信息实现高速实时传输,而且用户对通信质量的要求也在不断提高;移动通信的快速发展以及个人通信的全球化,使得对高数据率数字移动通信等领域所采用的纠错编码技术要求也越来越高。

自 20 世纪 40 年代以来,有关纠错编码技术的研究已经取得了许多骄人的成果。人们相继提出了乘积码、代数几何码、分组-卷积级联码、低密度校验码和 Turbo 码等编码方法,序列译码、Viterbi 译码、软判决译码和迭代译码等译码方法,以及编码与调制相结合的网格编码调制(TCM)技术。

上述所有编译码方法,它们所实现的系统性能始终与 Shannon 给出的理论极限有一定的差距。因此,编码理论和方法研究人员一直认为信道截止速率 R_0 是差错控制码性能的实际极限,Shannon 极限仅仅是理论上的极限,是不可能达到的。根据 Shannon 信道编码定理,若要信道传输速率 R 接近信道容量 C ,只有在码组长度无限的码集合中随机选择编码码字并且在接收端采用最大似然译码算法,才能使误码率任意小。但最大似然译码的复杂性会随码字长度的增加而呈指数形式加大,当编码长度趋于无穷大时,最大似然译码是不可能实现的。所以,人们认为随机性编译码仅仅是 Shannon 为证明定理存在性而引入的一种数学方法和手段,在实际的编码构造中是不可能实现的。

在 1993 年的国际通信会议(ICC'93)上,法国不列颠通信大学的 Claude Berrou 教授等人提出的 Turbo 码方案由于很好地应用了 Shannon 信道编码定理中的随机性编译码条件而获得了几乎接近 Shannon 理论极限的译码性能。仿真结果表明,在一定参数条件下,Turbo 码可以达到距 Shannon 极限仅差 0.7 dB 的优异性能。到目前为止,Turbo 码在现有信道编码方案中是最好的,尚未有任何一种编码方案能与其相比拟。Turbo 码的出现在编码理论界引起了轰动,成为自信息论提出以来最重大的研究进展。

Turbo 码的提出,对信道编码领域的研究产生了意义深远的影响。首先,Turbo 码提供了一种在低信噪比条件下性能优异的级联编码方案和次最优的迭代译码方法;其次,它改变了研究者设计好码的思路,即从最大化码字最小距离转化为最小化低重码字个数,同时也改变了判断好码的准则,即从与截止速率比较转向了与 Shannon 理论极限进行比较;第三,Turbo 迭代的思想为实现迭代信道估计、迭代均衡以及信号检测提供了新的思路。自 20 世纪 90 年代以来,人们对 Turbo 码的理论研究和应用研究取得了丰硕的成果,但目前在国内尚没有系统阐述 Turbo 码原理和应用的图书。对有志于投身到 Turbo 码理论及其应用研究的人员来说,一本全面概括 Turbo 码基本研究内容的图书有助于引导其快速进入这一生机勃勃的研究领域。这也是作者编写本书的初衷。

本书共分为 9 章,各章的主要内容如下:

第1章介绍信道码的发展以及 Turbo 码提出的背景、研究内容和发展方向,重点介绍对纠错码发展影响重大的级联码、软判决译码和网格编码调制等基本编译码思想,并在此基础上引出 Turbo 码的概念,然后从 Shannon 信息论的观点来分析 Turbo 码的基本特点。在详细介绍国内外有关 Turbo 码关键技术的研究成果的基础上,指明 Turbo 码研究的思路 and 方向。

第2章介绍差错控制编码基础。首先详细分析不同信道模型下的 Shannon 极限,然后介绍线性分组码和卷积码的编码方法和描述方法,并介绍最大似然译码、Viterbi 译码以及码字最小距离和重量分布等概念,最后简要介绍网格编码调制的基本方法和性能。

第3章为 Turbo 码基础,主要介绍 Turbo 码的编译码方法和性能,重点介绍基于软输入软输出算法的 Turbo 迭代译码方法,并介绍了基于最大后验概率算法和 Viterbi 算法的软输入软输出译码算法,最后给出不同设计参数和不同信道模型条件下 Turbo 码的性能仿真。

第4章介绍 Turbo 码的距离特性和设计方法。首先推导 Turbo 码的性能上限,然后介绍 Turbo 码最小距离和距离谱的计算;其次在详细分析 Turbo 码性能特点的基础上,分析不同信噪比条件下 Turbo 码的设计原则;最后介绍非对称 Turbo 码的设计和 Turbo 码的不等功率分配方案。

第5章对 Turbo 迭代译码进行分析。首先研究迭代译码输出外部信息的统计特性,并介绍以此为根据分析 Turbo 迭代译码的收敛性的方法;其次根据 Turbo 迭代译码的特点,介绍了利用输入信息与外部信息的互信息衡量迭代译码过程收敛性的方法,并对 Turbo 迭代译码的停止准则进行介绍;最后介绍了对软输入软输出算法的不同简化方法。

第6章介绍 Turbo 码研究中的一项关键技术——交织器的分析与设计。在分析交织器的不同设计属性的基础上,介绍了一些常用的交织器的设计方法及其性能,并针对 Turbo 码的特点,介绍了编码匹配交织器、基于黄金分割的交织器以及基于迭代译码适应性和距离谱的交织器设计方法。

第7章简要介绍 Turbo 码与网格编码调制的结合,分析了不同的 Turbo-TCM 方案的特点和性能。

第8章主要分析利用 Turbo 迭代译码实现迭代信道估计、迭代均衡和迭代信号检测的方法,重点讨论了高斯加性白噪声信道和慢衰落信道上联合信道估计及译码的方法。

第9章介绍利用 Turbo 码的输出软信息实现信号同步的方法。主要考虑结合 Turbo 码的特点进行符号定时估计和载波相位估计的方法。

本书充分反映了 Turbo 码领域最有实际应用意义的研究成果和最新的研究进展,不仅对读者的工程实践有直接的帮助,还有助于他们了解该领域的前沿课题,为进一步深入研究打下基础。

在本书的编写过程中,参考了国内外有关 Turbo 码研究的众多文献,特别是国内外的研究生学位论文,具体内容已列在每一章后的参考文献中。在此对所参阅文献和论文的作者表示衷心的感谢!胡耀华女士为本书的录入、校对做了大量工作,对她的大力支持和鼓励深表谢意!最后,我还要感谢电子工业出版社,没有他们的大力支持和辛勤工作,本书就没有机会与广大读者见面。

由于作者水平有限,错误、遗漏之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

刘东华
2003年9月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 数字通信系统的结构	(1)
1.2 信道编码理论的发展	(3)
1.3 Turbo 码编译码方案的提出	(9)
1.4 Turbo 码的研究状况	(11)
参考文献	(18)
第 2 章 差错控制编码基础	(20)
2.1 信道模型和信道容量	(20)
2.1.1 信道容量	(20)
2.1.2 信道模型及其信道容量	(23)
2.2 分组码	(32)
2.2.1 线性分组码	(32)
2.2.2 循环码	(38)
2.3 卷积码	(40)
2.3.1 卷积码的基本概念和编码方法	(40)
2.3.2 卷积码的距离特性和重量分布	(50)
2.3.3 结尾卷积码	(52)
2.3.4 删余卷积码	(52)
2.3.5 恶性卷积码	(53)
2.3.6 卷积码的 Viterbi 译码	(53)
2.3.7 递归系统卷积码	(59)
2.4 网格编码调制 (TCM) 技术	(61)
2.4.1 TCM 编码原理及基本结构	(62)
2.4.2 克服载波相位模糊的旋转不变码	(65)
2.4.3 多维网格编码调制	(66)
参考文献	(66)
第 3 章 Turbo 码基础	(68)
3.1 Turbo 码的编码	(68)
3.1.1 Turbo 码的编码结构	(68)
3.1.2 SCCC 的编码结构	(71)
3.1.3 HCCC 的编码结构	(71)
3.2 Turbo 码的译码结构	(72)
3.2.1 PCCC 的译码结构	(72)
3.2.2 SCCC 的译码结构	(78)
3.2.3 HCCC 的译码结构	(78)

3.3	基于后验概率的软输出译码算法	(79)
3.3.1	MAP 译码算法	(79)
3.3.2	Log-MAP 算法	(82)
3.4	软输出 Viterbi 译码算法	(86)
3.4.1	软输出 Viterbi 算法原理	(86)
3.4.2	SOVA	(89)
3.4.3	MAP 类算法与 SOVA 算法的复杂性比较	(93)
3.5	通用软输入软输出译码算法	(94)
3.5.1	乘法 SISO 算法	(97)
3.5.2	加法 SISO 算法	(98)
3.6	Turbo 码的性能分析	(100)
3.6.1	Turbo 码的性能特点	(100)
3.6.2	设计参数对 Turbo 码性能的影响	(103)
3.6.3	不同信道条件下 Turbo 码的性能	(116)
3.6.4	小结	(122)
	参考文献	(123)
第 4 章	Turbo 码的设计	(126)
4.1	Turbo 码的性能限	(126)
4.1.1	Turbo 码的重量分布特性	(126)
4.1.2	Turbo 码的误比特率性能限	(129)
4.2	Turbo 码自由距离的计算	(133)
4.2.1	Turbo 码的自由距离渐近特性	(133)
4.2.2	自由距离的计算	(136)
4.3	Turbo 码的距离谱	(145)
4.3.1	交织器对 Turbo 码距离谱的影响	(145)
4.3.2	均匀交织条件下 Turbo 码的距离谱	(148)
4.3.3	交织长度对 Turbo 码距离谱的影响	(152)
4.3.4	均匀交织条件下 Turbo 码的平均自由距离	(155)
4.3.5	距离谱细化	(157)
4.4	Turbo 码的设计	(161)
4.4.1	交织器增益	(162)
4.4.2	有效自由距离	(164)
4.4.3	Turbo 码的设计	(164)
4.5	非对称 Turbo 码的设计	(172)
4.6	Turbo 码的能量分配方案	(176)
4.6.1	功率分配方案	(176)
4.6.2	迭代译码算法的修正	(178)
	参考文献	(180)
第 5 章	迭代译码	(182)
5.1	外部信息的统计特性及应用	(182)

5.1.1	外部信息的概念	(182)
5.1.2	外部信息的统计特性	(182)
5.1.3	外部信息统计量随迭代次数的变化	(184)
5.1.4	基于外部信息统计值的迭代停止准则	(189)
5.1.5	迭代译码收敛性	(192)
5.2	迭代译码的收敛性	(194)
5.2.1	外部信息转移度量	(194)
5.2.2	迭代译码过程与外部信息转移曲线的关系	(199)
5.2.3	外部信息转移图的应用	(200)
5.3	迭代译码停止准则分析	(202)
5.3.1	停止准则的定义	(203)
5.3.2	采用停止准则时的译码性能	(206)
5.4	常用的迭代停止准则	(214)
5.4.1	交叉熵准则	(214)
5.4.2	SCR 准则	(217)
5.4.3	HDA 准则	(218)
5.4.4	SDR 准则	(218)
5.4.5	CRC 准则	(220)
5.4.6	仿真验证	(220)
5.4.7	$\Lambda(\mathbf{u})$ 准则	(222)
5.5	迭代译码算法的简化	(223)
5.5.1	根据迭代译码特点简化 Log-MAP 算法	(224)
5.5.2	指数和对数运算的简化	(226)
5.5.3	减小迭代译码算法延时	(229)
	参考文献	(233)
第 6 章	交织器的设计	(236)
6.1	交织器设计概述	(236)
6.1.1	交织器的基本概念	(236)
6.1.2	交织器结构对 Turbo 码性能的影响	(237)
6.1.3	交织器的设计	(237)
6.2	典型交织器设计	(239)
6.2.1	规则交织器	(239)
6.2.2	伪随机交织器	(242)
6.2.3	交织器的属性	(243)
6.3	编码匹配交织器	(257)
6.3.1	设计分析	(257)
6.3.2	设计步骤	(260)
6.3.3	交织器的性能	(261)
6.4	基于黄金分割的交织器设计	(262)
6.4.1	黄金分割的基本思想	(262)

6.4.2	基于黄金分割的交织器设计	(263)
6.4.3	性能分析	(264)
6.5	基于 IDS 和最小距离的交织器设计	(266)
6.5.1	迭代译码的相关性	(266)
6.5.2	与 IDS 相关的交织器设计算法	(268)
6.5.3	基于 IDS 和最小距离的新的交织器	(271)
	参考文献	(277)
第 7 章	Turbo 网格编码调制	(279)
7.1	T-TCM1	(279)
7.1.1	二维 Turbo 编码调制	(279)
7.1.2	多维 Turbo 编码调制	(281)
7.1.3	I-Q T-TCM 方案	(283)
7.2	T-TCM2	(284)
7.2.1	编码结构	(284)
7.2.2	译码结构及 Log-MAP 译码算法	(286)
7.2.3	T-TCM2 的性能	(288)
7.2.4	删余系统比特的 T-TCM 方案	(290)
	参考文献	(293)
第 8 章	迭代原理的应用	(294)
8.1	AWGN 信道上联合信道信噪比估计和译码	(294)
8.1.1	信噪比估计对 Turbo 码性能的影响	(294)
8.1.2	两种常用的信噪比估计器	(296)
8.1.3	联合信道信噪比估计和译码	(300)
8.2	衰落信道上联合信道估计和译码	(304)
8.2.1	系统模型	(304)
8.2.2	Turbo 码的信道估计	(306)
8.3	Turbo 均衡	(320)
8.3.1	经典均衡模型和算法	(320)
8.3.2	Turbo 均衡的概念和模型	(322)
8.3.3	软输出 Turbo 均衡算法	(323)
8.3.4	Turbo 均衡的性能	(328)
8.4	迭代多用户检测	(331)
8.4.1	系统模型	(331)
8.4.2	迭代多用户接收机	(333)
8.4.3	系统分析	(335)
8.4.4	性能仿真	(337)
	参考文献	(339)
第 9 章	Turbo 码系统的同步	(342)
9.1	基于最大似然准则的信号估计算法	(342)
9.1.1	经典估计方法和系统模型	(342)

9.1.2	最大似然符号定时同步	(346)
9.1.3	最大似然载波相位同步	(349)
9.1.4	Turbo 迭代译码与信号同步的关系	(352)
9.2	Turbo 码的符号定时同步	(353)
9.2.1	符号定时偏移对 Turbo 码性能的影响	(353)
9.2.2	利用迭代译码特性实现定时偏移估计	(357)
9.3	载波相位偏移估计	(367)
9.3.1	载波相位偏移对 Turbo 码性能的影响	(367)
9.3.2	利用迭代译码特性实现载波相位偏移估计	(370)
	参考文献	(375)

第1章 绪 论

随着现代通信技术和计算机技术的迅速发展，每天都在不断涌现新的通信业务和信息业务，同时用户对通信质量和数据传输速率的要求也在不断提高。由于通信信道固有的噪声和衰落特性，信号在经过信道传输到达通信接收端的过程中不可避免地会受到干扰而出现信号失真。通常需要采用差错控制码来检测和纠正由信道失真引起的信息传输错误。由于差错控制码主要用于实现信道纠错，因此又称为纠错码或信道码。最早的差错控制码主要是用于深空通信和卫星通信，随着数字蜂窝电话、数字电视以及高分辨率数字存储设备的出现，编码技术的应用已经不仅仅局限于科研和军事领域，而是逐渐在各种实现信息交流和存储的设备中得到成功应用。

现代信息和编码理论的奠基人 C. E. Shannon 在 1948 年提出了著名的有噪信道编码定理，在定理中 Shannon 给出了在数字通信系统中实现可靠通信的方法以及在特定信道上实现可靠通信的信息传输速率上限。同时，该定理还给出了有效差错控制编码的存在性证明，从而促进了信道编码领域研究的快速发展。

在这一章首先介绍数字通信系统的基本结构，在此基础上重点介绍差错控制编码在数字通信系统中的位置和作用；然后分析信道编码的基本数学理论和一些基本容量限；在分析信道编码技术发展历程之后对本书的主要内容，即 Turbo 码的研究现状进行综合归纳并在此基础上对 Turbo 码的主要研究内容进行概括。

1.1 数字通信系统的结构

随着对高效、高可靠性数字通信系统需求的迅猛增长，大规模高速宽带网络的发展使语音、图像和其他多媒体信息的传输成为可能。通信系统设计人员最关心的是如何在数据源功率和传输带宽有限，系统复杂性和设备造价尽可能小的条件下实现尽可能准确的信息传输，即使信息传输的误码率最小化。信道编码是消除或降低信息传输错误概率的有效手段之一。为更好地理解信道编码在数字通信系统中的地位和作用，下面首先介绍通用数字通信系统的基本组成结构，如图 1.1.1 所示。

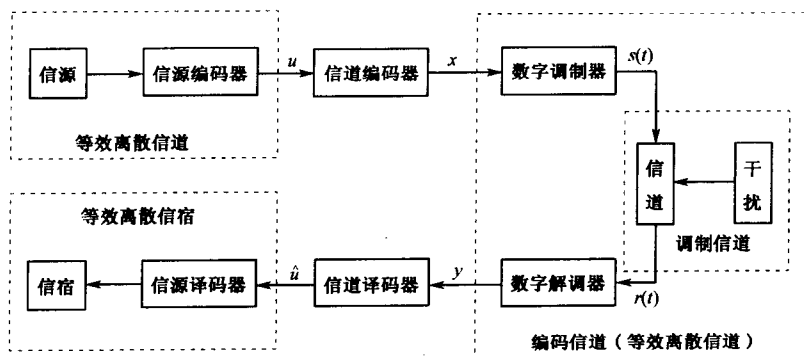


图 1.1.1 数字通信系统基本组成结构

图 1.1.1 中给出了通用数字通信系统的组成框图和信息流的传输过程。下面对其中的各个组成模块作简单介绍。

在数字通信系统中,发送器的任务是将信源生成的信息转换为能够抵抗信道噪声和失真以及有利于在传输媒质上进行传输的形式,它包括信源和信源编码器。其中信源用于生成需要传输的信息,可以是模拟信号,也可以是数字信号。如果信源是模拟信号,则在送入数字系统传输之前需要进行采样和量化等数字化处理;如果是数字信号,则可以是字、码字符号等,一般将这些元素称为码元。信源的输出根据给定的码表转换成符号序列,一般情况下最常用的是二元符号序列,码字符号中的码元取自集合 $\{0,1\}$,这时码元又称为比特。

信源中通常包含冗余信息,这主要是因为信源中相邻符号之间存在一定的相关性,而且每个符号出现的概率是不同的。为提高传输带宽的利用率和信息传输效率,在信息传输之前先利用信源编码器来消除这些冗余,可以利用最少的码元来代表要传输的信息。如果信源编码器的输出信号为 r_b bit/s,则称 r_b 为数据传输速率,简称为数据率。信源输出经过信源编码器编码后得到的数字序列称为信息序列。通常可以将信源和信源编码器看成等效的离散信源。

如前所述,传输信道存在一定的噪声和衰落,必然会对其上传输的信息引入失真和信号判决错误,因此需要采用差错控制码来检测和纠正这些比特错误。信道编码器的作用是在信息序列中嵌入冗余码元,提高其纠错能力。与原始信息序列中的冗余码元不同,经过信道编码添加的冗余码元的作用是减小传输中发生的信号和码元错误,提高系统的可靠性。信道编码是在发送器和接收机之间实现信号可靠传输的必要手段之一。后面主要考虑二元有限域上的信道编码,因此不再区分码元和比特的概念。信道编码的基本思想是将每 k 个连续的信息比特分为一组,经过适当的数学运算(编码)后得到 n 个比特的输出,这 n 个比特组成的序列称为一个码字。好的差错控制码所生成的码字应该是在码字集合中,所有码字之间的区别尽可能大,从而使通信系统中的无法纠正或检测的信道错误尽可能少。

定义

$$R = \frac{k}{n}$$

为编码速率,简称为码率。从而经过信道编码后的数据率为

$$r_c = \frac{r_b}{R_c} = \frac{r_b n}{k} \text{ (bit/s)}$$

差错控制码的基本目标是在有限的信号功率、系统带宽和硬件复杂性要求下使通信的可靠性最大,这个目标是通过在信息序列中引入冗余比特来实现的。与未编码系统相比,信道编码会导致数据传输率的降低或者对信道带宽的要求增加。

比特形式的信息是不适合在物理信道上传输的,因此需要利用数字调制器将这些编码信息比特转换成适合于在信道上传输的连续波形信号。同时调制器还可以在相同的物理信道上同时传输多个信息比特(数目与具体的调制方式有关:例如 8PSK 调制下可同时传输 3 比特信息,16QAM 调制下可同时传输 4 比特信息),从而提高信息传输速率。调制器的基本思想是将编码的数字序列映射成适合在信道上传输的模拟连续信号。具体地说, M 维调制器可以将 l 个二元数字符号映射成一个有 M 种不同波形的模拟连续信号,其中

$$M = 2^l$$

如果调制器输出的每个信号的持续时间为 T ,则称 T 为信号间隔,而称 $1/T$ 为符号速率。

如果定义信号带宽的最小值为 r_s Hz, 则可以表示为

$$r_s = \frac{r_b}{R_c l} = \frac{r_b n}{kl} \text{ (Hz)}$$

调制器可以是调幅、调频和调相等几种方式及其变形。由于本书主要讨论信道编码问题, 不考虑调制对系统性能的影响, 因此可以将数字调制器、物理信道和数字解调器一起看成等效的离散信道, 也称为编码信道。

信号经过调制器后送入物理信道进行传输。典型的传输信道包括有线信道、光纤信道、无线信道、卫星信道、磁记录信道以及水下声音信道等。无论是哪一种传输媒体, 都会引入一定的传输噪声, 使传输信号发生一定的失真。而且由于信道带宽资源有限, 通常需要为不同的通信业务分配不同的传输频率和带宽。因此, 在实际的信道中存在的两个主要问题就是信道固有的噪声和有限的带宽限制。此外, 移动信道会受到多径传播的影响, 卫星信道会受到信号功率衰减的影响等, 这些在系统设计过程中都应该考虑。

信号经过信道传输后到达接收端。在接收机中, 数字解调器的作用是通过对接收到的调制信号序列或传输码字进行最优估计, 然后输出数字编码序列到信道译码器。信道译码器对传输消息进行估计和判决, 估计准则是根据编码准则和信道特性而确定的, 目的是使信道噪声所造成的信号判决错误最小化。

最后, 信源译码器根据信源编码准则将得到的信道译码器输出的编码信息序列经过相应的信源译码后, 得到对原始信源序列的估计并传递给用户(信宿), 一般可以将信源译码器和信宿一起看成等效的离散信宿。

在如图 1.1.1 所示的数字通信系统的各个功能模块中, 信道码(包括编码和译码两部分)模块可以采用 Turbo 码实现。由于在很多通信系统中信道编译码和调制解调通常是结合在一起的, 因此将对 Turbo 码与调制的结合进行简要分析。同时, 信道条件的不同也会对信道编译码方案和调制解调方案有很大影响, 因此本书也将分析不同信道模型下 Turbo 码的性能。

下面简单介绍一下信道编码的发展史。

1.2 信道编码理论的发展

在图 1.1.1 给出的数字通信系统中, 信息的传输是有方向性的。即数据从发送端经过信道到达接收端, 而发送端无法知道在接收端数据是否已经实现正确接收和判决。通常这种单向的差错控制方式称为前向差错控制(FEC, Forward Error Control)方式。在 FEC 方式下, 接收端根据接收码字自动检测和纠正信道传输引入的错误。FEC 方式的优点是不需要反馈信道, 译码实时性比较好, 控制电路也比较简单。但缺点是译码设备比较复杂, 同时纠错码的选择还应该考虑信道的干扰情况。为达到一定的误码率要求, 通常编码效率都比较低。

与 FEC 方式相比, 在通信系统中还可以采用自动重发请求(ARQ, Automatic Repeat Request)方式进行错误检测的方法。在 ARQ 方式下, 接收端在检测到错误之后给发送端发送错误信息, 发送端根据错误信息重新发送传输数据到接收端。虽然在 ARQ 方式下相同冗余码字的检错能力要远高于其编码的纠错能力, 因此采用比较简单的检错码可以提高编码效率, 但 ARQ 差错控制方式要求有反馈信道, 控制电路比较复杂, 且译码的实时性较差。

本书后面对 Turbo 码的描述, 主要是针对 FEC 方式进行的, 即采用前向差错控制策略在接收端检测和纠正由于信道噪声所造成的信号传输错误。当然, 有关 Turbo 码在 ARQ 系统

中的应用也有讨论,有兴趣的读者可以参考相关文献。

前向差错控制码主要包括分组码、卷积码以及级联码等结构形式。下面首先介绍差错控制编码理论的起源和发展。

1948年,美国 Bell 实验室的 C.E.Shannon 在贝尔技术杂志上发表了题为《通信的数学理论》(A mathematical theory of communication)的论文,这是一篇关于现代信息理论的奠基性论文,它的发表标志着信息与编码理论这一学科的创立。Shannon 在该文中指出,任何一个通信信道都有确定的信道容量 C ,如果通信系统所要求的传输速率 R 小于 C ,则存在一种编码方法,当码长 n 充分大并应用最大似然译码(MLD, Maximum Likelihood Decoding)时,信息的错误概率可以达到任意小。这就是著名的有噪信道编码定理。虽然该定理仅仅是一个编码的存在性定理,但却开创了信道编码理论这一富有活力的研究领域,有噪信道编码定理从理论上给出了纠错码的理论极限,同时也指明了纠错码研究的方向和目标。

从 Shannon 信道编码定理可知,随着分组码的码长 n 或卷积码的约束长度 v 的增加,系统可以取得更好的性能(即更大的保护能力或编码增益),而译码的最优算法是最大似然译码算法。但是,最大似然译码算法的复杂性随码长 n 或编码约束长度 v 的增加呈指数形式增加,当 n 或 v 较大时,最大似然译码算法在物理上是不可实现的。因此,构造物理可实现编码方案及寻找有效译码算法一直是信道编码理论与技术研究的中心任务。

Shannon 提出的有噪信道编码定理作为现代通信理论的基础,给出了在有噪信道上实现可靠通信的理论极限。虽然该定理指出了可以通过差错控制码在信息传输速率不大于信道容量的前提下实现可靠通信,但却没有给出具体实现差错控制编码的方法。同在 20 世纪 40 年代, R.Hamming 和 M.Golay 提出了第一个实用的差错控制编码方案,使编码理论这个应用数学分支的发展得到了极大的推动。通常认为是 R.Hamming 提出了第一个差错控制码。当时他作为一个数学家受雇于贝尔实验室,主要从事弹性理论的研究。他发现计算机经常在计算过程中出现错误,而一旦有错误发生,程序就会停止运行。这个问题促使他编制了使计算机具有检测错误能力的程序,通过对输入数据编码,使计算机能够纠正这些错误并继续运行。Hamming 所采用的方法就是将输入数据每 4 个比特分为一组,然后通过计算这些信息比特的线性组合来得到 3 个校验比特。然后将得到的 7 个比特送入计算机。计算机按照一定的原则读取这些码字,通过采用一定的算法,不仅能够检测到是否有错误发生,同时还可以找到发生单个比特错误的比特的位置,该码可以纠正 7 个比特中所发生的单个比特错误。这个编码方法就是分组码的基本思想,Hamming 提出的编码方案后来被命名为汉明码。

虽然汉明码的思想是比较先进的,但是它也存在许多难以接受的缺点。首先,汉明码的编码效率比较低,它每 4 个比特编码就需要 3 个比特的冗余校验比特。另外,在一个码组中只能纠正单个的比特错误。M.Golay 研究了汉明码的这些缺点,并提出了两个以他自己的名字命名的高性能码字:一个是二元 Golay 码,在这个码字中 Golay 将信息比特每 12 个分为一组,编码生成 11 个冗余校验比特。相应的译码算法可以纠正 3 个错误。另外一个三元 Golay 码,它的操作对象是三元而非二元数字。三元 Golay 码将每 6 个三元符号分为一组,编码生成 5 个冗余校验三元符号。这样由 11 个三元符号组成的三元 Golay 码码字可以纠正 2 个错误。

汉明码和 Golay 码的基本原理相同。它们都是将 q 元符号按每 k 个分为一组,然后通过编码得到 $n-k$ 个 q 元符号作为冗余校验符号,最后由校验符号和信息符号组成有 n 个 q 元符号的码字符号。得到的码字可以纠正 t 个错误,编码码率为 $r = k/n$ 。这种类型的码字称为分组码,一般记为 (q, n, k, t) 码,二元分组码可以简记为 (n, k, t) 码或者 (n, k) 码。汉明码

和 Golay 码都是线性的, 任何两个码字经过模 q 的加操作之后, 得到的码字仍旧是码字集合中的一个码字。

从分组码的提出到如今已经有五十多年的时间了, 期间人们已经提出了许多不同类型的分组码, 并且在木星探测等方面(“航海家”号)得到了广泛的应用。

在 Golay 码提出之后最主要的一类分组码就是 Reed-Muller 码, 它是 Muller 在 1954 年提出的。此后 Reed 在 Muller 提出的分组码的基础上得到了一种新的分组码, 称为 Reed-Muller 码, 简记为 RM 码。RM 码在汉明码和 Golay 码的基础上前进了一大步, 在码字长度和纠错能力方面具有更强的适应性。而汉明码和 Golay 码则指定了组成码字的 (q, n, k, t) 等参数值。RM 码是一类参数选择范围很广的分组码。在 1969 年到 1977 年之间, RM 码在火星探测方面得到了极为广泛的应用。即使在今天, RM 码也具有很大的研究价值, 其快速的译码算法非常适合于光纤通信系统。

在 RM 码提出之后人们又提出了循环码的概念。循环码实际上也是一类分组码, 但它的码字具有循环移位特性, 即码字比特经过循环移位后仍然是码字集合中的码字。这种循环结构使码字的设计范围大大增加, 同时大大简化了编译码结构。循环码是线性码循环码的另外一个特点就是它可以用一个幂次为 $n-k$ 的多项式来表示, 这个多项式记为 $g(D)$, 称为生成多项式, 其中 D 为延迟算子。循环码也称为循环冗余校验 (CRC, Cyclic Redundancy Check) 码, 并且可以用 Meggitt 译码器来实现译码。由于 Meggitt 译码器的译码复杂性随着纠错能力 t 的增加而呈指数形式的增加, 因此通常 CRC 码用于纠正只有单个错误的应用情况, 常用做检错码而非纠错码。

循环码的一个非常重要的子集就是分别由 Hocquenghem 在 1959 年, Bose 和 Ray-Chaudhuri 研究组在 1960 年几乎同时提出的 BCH 码 (BCH, Bose Chaudhuri Hocquenghem), BCH 码的码字长度为 $n = q^m - 1$, 其中 m 为一个整数。二元 BCH 码 ($q=2$) 的纠错能力限为 $t < (2^m - 1)/2$ 。1960 年 Reed 和 Solomon 将 BCH 码扩展到了非二元 ($q>2$) 的情况, 得到了 RS (Reed-Solomon) 码。RS 码的最大优点是其非二元特性可以纠正突发错误。但直到 1967 年 Berlekamp 给出了一个非常有效的译码算法之后, RS 码才得到了广泛的应用。此后, RS 码在 CD 播放器、DVD 播放器以及 CDPD (Cellular Digital Packet Data) 标准中都得到了很好的应用。

虽然分组码在理论分析和数学描述方面已经非常成熟, 并且在实际的通信系统中也已经得到了广泛的应用, 但分组码固有的缺陷大大限制了它的进一步发展。首先, 由于分组码是面向数据块的, 因此, 在译码过程中必须等待整个码字全部接收到之后才能开始进行译码。在数据块长度较大时, 引入的系统延时是非常大的。分组码的第二个缺陷是它要求精确的帧同步, 即需要对接收码字或帧的起始符号时间和相位精确同步。另外, 大多数基于代数的分组码的译码算法都是硬判决算法, 而不是对解调器输出未量化信息的软译码, 从而造成了一定程度的增益损失。对于硬判决译码而言, 信道输出可以是二元的或者离散的, 而对于软判决译码, 信道输出必须是连续的。为进一步提高译码性能, 要求连续值的信道输出。因此分组码的译码错误概率相对来说是比较大的, 尤其是在信噪比值比较小的情况下, 分组码的纠错能力很差。可以说, 在低信噪比条件下, 分组码的性能由码字本身的特性和硬判决译码的性能共同决定。虽然也可以实现分组码的软判决译码, 但译码的复杂性通常都是比较大的, 基本上是随着码字长度的增加而呈指数形式的增长。

分组码所存在的固有缺点可以通过采用其他的编码方法来改善。这种编码方法就是卷积码。卷积码是 Elias 等人在 1955 年提出的。卷积码与分组码的不同在于分组码在编码之前先

将信息序列按照一定的数据块长度分组, 然后对每一组信息进行独立编码, 即对于 (n, k) 分组码来说, 码字中的 $n-k$ 个检验元仅与本码字的 k 个信息元有关, 而与其他码字的信息元无关。同样, 在分组码的译码时也是针对每一个接收码字进行独立译码的, 在一个接收码字内部提取译码相关信息, 与其他码字无关。而在卷积编码中则充分利用了各个信息块之间的相关性。通常卷积码记为 (n_0, k_0, m) 码。其中 n_0 为码长, k_0 为信息元个数, m 为编码寄存器长度。卷积码的编码过程是连续进行的, 依次连续将每 k_0 个信息元输入编码器, 得到 n_0 个码元, 得到的码元中的检验元不仅与本码的信息元有关, 还与以前 $m+1$ 个时刻输入到编码器的信息元 (反映在编码寄存器的内容上) 有关。同样, 在卷积码的译码过程中, 不仅要本码中提取译码信息, 还要充分利用以前和以后 $m+1$ 个时刻收到的码组, 从这些码组中提取译码相关信息, 而且译码也是可以连续进行的, 这样可以保证卷积码的译码延时相对比较小。通常, 在系统条件相同的条件下, 在达到相同译码性能时, 卷积码的信息块长度和码字长度都要比分组码的信息块长度和码字长度小, 相应译码复杂性也小一些。

卷积码是一类非常有前途的编码方法, 本书中讲述的 Turbo 码就是以卷积码为基础发展起来的。虽然对卷积码没有像分组码那样完善严密的数学分析工具, 但可以通过计算机搜索来得到性能较好的卷积码。

由于在满足一定性能要求的前提下, 卷积码的码组长度要比分组码的码组长度小一些, 因此卷积码的译码相对要容易一些。而且卷积码的译码可以充分利用解调器输出的软判决信息。卷积码的译码通常有如下几个比较流行的译码算法:

- 由 Wozencraft 和 Reiffen 在 1961 年提出, Fano 和 Jelinek 分别在 1963 年和 1969 年进行改进了的序列译码算法。该算法是基于码字树图结构的一种次最优概率译码算法。
- 由 Massey 在 1963 年提出的门限译码算法。这个算法利用码字的代数结构进行代数译码, 类似于循环码的大数逻辑译码算法。
- 由 Viterbi 在 1967 年提出的 Viterbi 算法。该算法是基于码字格图结构的一种最大似然译码算法, 是一种最优译码算法。

在 Viterbi 译码算法提出之后, 卷积码在通信系统中得到了极为广泛的应用。其中约束长度 $v=7$, 码率为 $1/2$ 和 $1/3$ 的 Odenwalder 卷积码已经成为商业卫星通信系统中的标准编码方法。在“航海家”以及“先驱者”等太空探测器上也都采用了卷积码作为其差错控制编码方法。在移动通信领域, GSM 采用约束长度 $v=5$, 码率为 $1/2$ 的卷积码; 在 USDC 中, 采用的是约束长度 $v=6$, 码率为 $1/2$ 的卷积码; 在 IS-95 中, 上行链路中采用的是约束长度 $v=9$, 码率为 $1/3$ 的卷积码, 在下行链路中采用的是约束长度 $v=9$, 码率为 $1/2$ 的卷积码。特别在第三代移动通信标准中也是以卷积码以及与卷积码相关的编码方法作为差错控制编码方案的。

在过去的 50 多年里, 有关纠错编码技术的研究已经取得了许多骄人的成果。随着信息时代的到来以及微电子技术的飞速发展, 今天的纠错码已不再单纯是一个理论上探讨的问题, 它已成为现代通信领域中不可或缺的一项标准技术。现代通信系统的复杂化以及通信业务的多样化, 要求通信系统能够对话音、数据、图像等大数据量信息实现高速实时传输, 而且用户对通信质量的要求也在不断提高。另外, 移动通信的快速发展以及个人通信的全球化, 使得对高数据率数字移动通信等领域所采用纠错编码技术的要求也越来越高。

近年来, 在信道编码定理的指引下, 人们一直致力于寻找能满足现代通信业务要求, 结构简单、性能优越的好码, 并在分组码、卷积码等基本编码方法和最大似然译码算法的基础

上提出了许多构造好码及简化译码复杂性的方法, 提出了乘积码、代数几何码、低密度校验码 (LDPC, Low Density Parity Code)、分组-卷积级联码等编码方法和序列译码、逐组最佳译码、软判决译码等译码方法以及编码与调制相结合的网格编码调制 (TCM, Trellis Coded Modulation) 技术。其中对纠错码发展贡献比较大的有级联码、软判决译码和 TCM 技术等。下面分别对这些技术作简单介绍。

Forney 在 1966 年提出了串行级联码编码方案。其基本思想是将编制长码的过程分级完成, 从而通过用短码级联构造长码的方法来提高纠错码的纠错能力。级联码的目标是构造具有较大等效分组长度的纠错码, 并且允许将最大似然译码分为几个较简单的译码步骤, 这样便得到一个次最优但实际可行的译码策略。在级联码方案中, 内码译码器可以看做一个噪声滤波器, 它不仅能改变错误分布, 而且能有效增加接收信号的信噪比 (SNR, Signal to Noise Ratio)。以两级级联为例, 级联码由内码和外码组成, 一般内码选用善于纠正随机错误的二进制线性分组码, 如 BCH 码; 而外码一般选择纠突发错误能力较强的多进制线性码, 如 RS 码。此外, 级联码方案中还可以选用结构较简单但纠错能力强的卷积码作为内码和外码。采用级联编译码方案的系统框图如图 1.2.1 所示。

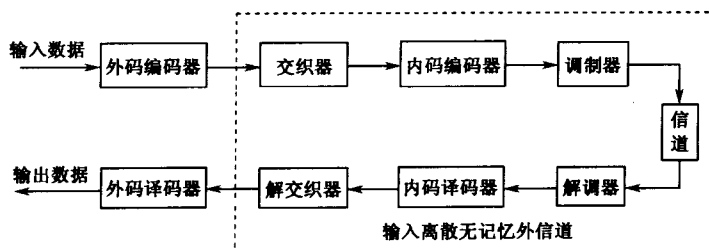


图 1.2.1 级联编码系统框图

当然, 为提高级联码的纠错能力, 也可以采用分组码和卷积码级联的编码方案。例如, 以 RS 码为外码, 卷积码为内码。该方案充分利用了 RS 码和卷积码纠错性能互补的特点。RS 码的典型特点是纠突发错误能力强, 而软判决卷积码在低信噪比条件下有较强的纠随机错误能力。该级联码方案于 1987 年被美国空间数据系统顾问委员会 (CCSDS) 和欧洲空间委员会 (ESA) 制定为深空通信的标准。其中, 美国在“行星标准”中采用的是 (255,223) RS 码和 (2,1,6) 卷积码的串行级联方案。当在内外编码器之间采用大小为 2~8 个 RS 码字长度的信道分组交织器 (BI, Block Interleaver) 时, 此级联码方案的编码增益与 Shannon 理论极限的距离在 2.3~2.6 dB 之间。

传统通信系统的最佳接收机中解调器和译码器是独立的两个部分。在处理接收信号的过程中, 解调器首先对调制器输入符号做最佳判决, 然后将硬判决结果送给译码器; 译码器再对编码器输入消息做最佳判决, 纠正解调器可能发生的错误判决, 这是硬判决译码的思想。事实上, 经过解调器对符号的硬判决, 丢失了很多有利于译码的信息。为了提高编码通信系统的性能, 人们从信息论的角度对接收机中解调器与信道译码器的功能划分和接口重新审视, 提出了软判决译码方法。即解调器对输出不进行判决, 送到译码器的是判决符号可能的概率值或未量化输出, 而非硬判决值, 则译码器就可以利用这些信息与编码信息综合做出判决, 从而提高系统性能, 这就是软判决译码的基本思想。研究表明, 在接收机中解调器采用软输出可以得到比硬输出高 2 dB 左右的附加编码增益。

软判决译码算法主要分为两大类: 一类是使符号错误概率最小的逐位软判决译码算法,