

无线通信新技术系列丛书

宽带移动通信中的 先进信道编码技术

KUANDAI YIDONG TONGXINZHONG DE XIANJIN XINDAO BIANMA JISHU



袁东风 张海霞 等编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

宽带移动通信中的 先进信道编码技术

袁东风 张海霞 等编著

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

本书系统地介绍了接近香农限的好码 Turbo 码的编译码技术,另一种接近香农限的好码 LDPC 码的编译码技术,多级编码调制技术,基于先进的信道编码技术的自适应调制与编码的实现方法,最后介绍了编码的正交频分复用,并给出了构架在正交频分复用传输技术上的新型的高速、宽带移动信道编码技术的应用结果。

本书文字通顺、取材新颖,可作为本科生高年级、研究生“信道编码理论与技术”课程的教材或参考书,也可供在移动通信领域中从事研究与开发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

宽带移动通信中的先进信道编码技术/袁东风,张海霞等编著. —北京:北京邮电大学出版社,2004
ISBN 7-5635-0860-0

I. 宽... II. ①袁...②张... III. 宽带通信系统—移动通信—编码—技术 IV. TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 003036 号

书 名: 宽带移动通信中的先进信道编码技术

编 著: 袁东风 张海霞等

责任编辑: 李欣一

出 版 者: 北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号)

邮编: 100876 电话: 62282185 62283578

电子信箱: publish @ bupt. edu. cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京通州皇家印刷厂

印 数: 1—5 000 册

开 本: 787 mm×1 092 mm 印张: 12 字数: 280 千字

版 次: 2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-0860-0/TN·323

定 价: 21.00 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

自无线电发明一个多世纪以来,无线通信快速发展,短波、超短波、微波、卫星通信和移动通信等无线通信手段,在社会发展中发挥了重要作用。目前信息化浪潮如日中天,无线通信技术更是推波助澜,成为令人神往的高新技术风景线,无线通信产业也因此成为最见发展前景的产业之一。

由于无线接入互联网和无线多媒体数据业务巨大需求的推动,无线通信今后仍将持续快速发展。无线通信的目标是实现无所不在的通信,即任何人/物在任何时间和任何地点均能实现任何形式的相互通信。这时,无线通信系统能最大限度地利用频域、时域、码域、空域等各种资源,提供大容量通信能力,并支持高质量多种速率的多媒体业务,能动态地运行在多层小区、多种通信环境和多种通信网络之中,自适应地为用户提供优质服务,实现一个多业务、多频段、多模式、多媒体的“全球一网”的“融合的无线环境”。

为了实现这一宏大目标,无线通信领域正在发展很多新的先进技术。这些先进技术将大大提高无线通信系统的数据传输速率和通信的可靠性,增强系统功能,扩大应用领域和服务范围,为用户提供更优质服务和更大方便,使无线通信在社会信息化进程中发挥更大作用。可以预计,无线通信在未来将更加令人瞩目和神往。

北京邮电大学出版社作为信息通信领域的专业出版社,为满足迫切了解无线通信新技术以及在无线通信领域从事研究与开发的科研和工程技术人员、教师、学生和其他无线通信爱好者的需要,特邀一批工作在山东大学、北京邮电大学、东南大学的专家教授,组织编写了这套《无线通信新技术丛书》。

在这套丛书中,我们向大家呈献以下五本书。它们是:由山东大学信息科学与工程学院院长、博士生导师袁东风教授主持写作,同时又适用于本科生教学使用的《宽带移动通信中的先进信道编码技术》;由北京邮电大学著名信息通信专家、博士生导师乐光新教授担纲主审,尹长川副教授主笔的《多载波宽带无线通信技术》;由我国通信领域的著名学者、北京邮电大学博士生导师吴伟陵教授指导并由年轻学人贺志强编写的《无线通信中空时处理》(暂定名);东南大学无线电工程系副主任陈晓曙教授撰写的《Ad Hoc 无线移动网络》和由本套丛书主编、东南大学无线电工程系移动通信国家重点实验室博士生导师毕光国教授主持撰写的《超宽带无线通信》。

这5本书详尽介绍了当前无线通信领域中引人关注且蓬勃发展的先进技术。丛书的作者们长期活跃在该技术领域,今天,他们在百忙中抽出时间奉献了这套丛书,对他们的支持和参与,我们表示衷心的感谢。北京邮电大学出版社为这套丛书的出版倾注了大量的精力,在此我们一并谨致诚挚谢意。

热诚欢迎有关专家和广大读者对丛书提出宝贵意见和建议!我们将根据技术的发展和演变,增加一些受人关注、有更大需求的新书,不断丰富和充实本套丛书。

丛书主编 毕光国教授
2004年3月于南京

作者曾于1998年10月至1999年1月受德国DAAD基金资助赴德国爱尔兰根大学、世界著名的Huber教授领导的信息论与信道编码小组进行合作项目研究。当时我们讨论最多的一个问题是:自1948年香农通信的数学理论提出并奠定了信道编码技术的基础以来,经过了50年的发展,直到1993年Turbo码的提出,香农限基本达到,这是否意味着以追求最佳的通信的可靠性为目标的信道编码技术的理论及应用研究已经走到了尽头?面对通信技术日新月异的飞速发展,作为通信系统整体结构一部分的纠错抗干扰技术,它的新的研究内容及发展方向是什么?当时讨论的结果是没有答案的,双方都陷入了茫然之中,并成为作者在随后的几年中一直苦苦思索的问题。

2001年6月作者有幸受国家留学基金资助,赴美国最著名的学府之一——密西根大学,在W. Stark教授领导的无线通信组从事合作研究工作。在那里,我聆听了来自美国Notre Dame大学的D. J. Costello教授的报告——《编码理论的诞生》(The Genesis of Coding Theory)。他的报告系统地总结了自香农信息理论提出以来,信道编码理论及应用50多年来的发展,提出了在无线通信新的发展时期,作为信道编码技术的新的研究领域和研究内容,为信道编码的理论及应用研究指明了继续前进的方向,使人耳目一新。在Costello教授报告的启发下,当时作者就萌生了写作本书的想法,试图尽自己所能,从一个侧面,向工作在此领域的研究生们和工程师们展示当前信道编码技术的革命性变革与最新进展,认识 and 了解它的新的发展空间及研究内容,沿着香农所指引的方向继续前进,这就是作者组织编写本书的初衷。

技术的进步及用户的迫切需求是移动通信飞速发展的动力。随着大规模集成电路技术、各种先进通信技术的进步,人们对高速、宽带移动传输信息提出了更高的要求。从第2代到第2.5代,再到第3代,乃至第4代,这种迫切的市场需求均突出地反映出人们对信息在移动环境下传输的速度和带宽上的更高要求。而在高速、宽带的移动环境下如何保证可靠地传输信息是我们今天面对的一个新的课题。在低速、窄带环境下使用多年的成熟的信道编码技术如何在高速、宽带下使用?其性能如何?构架在正交频分复用(OFDM)传输技术之上的先进信道编码技术有什么新的特点?这些都是本书试图表达的。

全书共6章。第1、4章由袁东风编写;第2章由罗骥编写;第3章由张海刚编写;第5

章由单晓红编写;第6章由张海霞编写。全书由袁东风统稿、主编。

第1章以 Costello 教授的报告为出发点提出全书的主线,在全面总结信道编码技术50多年发展的基础上提出问题,即:在高速、宽带环境下可靠地传输信息必须追求方案的频带有效性;第2章系统地介绍了接近香农限的好码 Turbo 码的编译码技术,主要包括:它的各种交织器设计及各种不同的译码方法,另外还针对高速、宽带传输环境介绍了如何将低的频带有效性 Turbo 码方案向高的频带有效性 Turbo 码方案推进的问题;第3章系统地介绍了另一种接近香农限的好码 LDPC 码的编译码技术,主要介绍了 Tanna 图编码、和乘积算法及迭代译码方法;第4章介绍多级编码调制技术,它是不展宽频带编码技术的一个很好的例子;第5章介绍了基于以上各种先进信道编码技术的自适应调制与编码的实现方法;在本书的最后一章,也就是第6章,介绍了编码的正交频分复用;我们试图给出构架在正交频分复用(OFDM)传输技术上的新型的高速、宽带移动信道编码技术的应用结果。

本书可以作为本科生高年级、研究生“信道编码理论与技术”课程的教材或参考书,也可供在移动通信领域工作的工程师们参考。

在本书思想的形成阶段及写作阶段,曾向多位国内外前辈及同行们请教过,并同他们进行过有益的讨论,同时也得到了他们的热情帮助与支持,特此表示衷心的感谢!他们是:J. Huber 教授、Schill 博士、W. Stark 教授、曹志刚教授、毕光国教授、吴伟陵教授、李道本教授、张平教授、杨义先教授、范平志教授、樊平毅教授。

本书中部分结果来源于作者已完成的和正在进行的国家自然科学基金项目,在此国家对国家自然科学基金对本人多年来研究工作的支持表示衷心的感谢!

有关书中的缺点错误,恳请广大读者批评指正。

袁东风
2003年12月于济南

第 1 章 香农限及其信道编码技术的最新进展

1.1 信道编码技术的发展史	1
1.2 信道编码技术的最新进展	9
1.3 基于 OFDM 的高速信道编码技术	10
本章参考文献	12

第 2 章 Turbo 码

2.1 Turbo 码的编码结构	14
2.1.1 Turbo 码编码器的基本结构	14
2.1.2 非系统卷积码(NSC)和循环系统卷积码(RSC)	14
2.1.3 交织器	17
2.1.4 截断器	17
2.2 Turbo 码的译码	17
2.2.1 译码器结构	18
2.2.2 BCJR 算法 ^[6]	19
2.2.3 MAP 算法 ^[1]	20
2.2.4 Max-Log-MAP 算法 ^[3]	24
2.2.5 Log-MAP 算法 ^[3]	25
2.2.6 SOVA 算法 ^{[4][5]}	25
2.3 各种信道中的码率与香农限及算法的简化	26
2.3.1 二进制对称信道	27
2.3.2 加性高斯白噪声信道(AWGN)	28
2.3.3 带信道信息的瑞利信道(SI)	29
2.3.4 不带信道信息的瑞利信道(NSI)	31
2.4 Turbo 码各种算法的比较	33
2.4.1 硬判决	33
2.4.2 软判决 ^[20]	34

2.5 Turbo 码的交织器	36
2.5.1 分组型交织器	36
2.5.2 随机型交织器	38
2.5.3 Code matched 交织器	39
2.6 Turbo 码的性能分析	39
2.6.1 利用卷积码分析性能界	40
2.6.2 利用重量枚举函数分析性能界	41
2.7 非二进制 Turbo 码	43
2.7.1 编码器结构	43
2.7.2 译码算法	45
2.7.3 译码结构	46
2.8 Turbo 码的应用	47
2.8.1 Turbo 码在第三代移动通信系统中的应用	49
本章参考文献	51
第 3 章 低密度校验码	
3.1 线性分组码基础	53
3.2 低密度校验码的定义及编码	55
3.2.1 低密度校验码定义	55
3.2.2 校验矩阵的构造方法和矩阵中的周期	57
3.3 低密度校验码的译码	57
3.4 译码错误概率	67
3.5 校验矩阵的构造及密度进化	68
3.6 低密度校验码构成的高效编码调制方案	70
3.7 低密度校验码最新进展	76
本章参考文献	80
第 4 章 多级编码调制	
4.1 信道容量规则及不同集分割方案下的信道容量	85
4.1.1 信道容量规则及其在 MLC 最优方案设计中的应用	86
4.1.2 在 AWGN 信道中不同集分割方案下的信道容量	90
4.1.3 在 Rayleigh 衰落信道下采用三种不同集分割方案时的信道容量	93
4.1.4 分析、比较与结论	97
4.2 MLC 不同译码方法在衰落信道中的性能	100
4.2.1 编码方案中分量码的选择	100
4.2.2 多级编码的译码	102
4.2.3 MSD 及 MLC/PDL 在 Rayleigh 衰落信道中的性能	108
4.3 高效调制下 MSD 的简化译码	116

4.3.1 多级编码译码方法的研究与比较	116
4.3.2 映射方法与译码方法之间的关系	117
4.3.3 几种新的集分割方案及对应的 MSD 译码结构	119
4.3.4 仿真结果	121
4.4 小结	122
本章参考文献	123
第 5 章 自适应传输与自适应信道编码	
5.1 自适应传输概述	126
5.1.1 自适应传输的概念	126
5.1.2 自适应传输的研究历史和现状	128
5.1.3 自适应传输技术的应用	129
5.2 链路自适应中的关键环节	129
5.2.1 衡量信道质量的参数及其使用	129
5.2.2 信道估计	130
5.2.3 自适应调制和编码	132
5.2.4 自适应频率	137
5.3 LA 中的两个问题	138
5.3.1 具有鲁棒性的自适应算法	138
5.3.2 自适应传输与非自适应传输	140
5.4 更加广泛的研究兴趣	140
本章参考文献	141
第 6 章 编码的正交频分复用	
6.1 无线移动信道	145
6.1.1 平衰落信道	145
6.1.2 宽带多径衰落信道	146
6.1.3 无线移动信道的选择性衰落	147
6.1.4 频率选择性信道	149
6.2 正交频分复用系统的基本原理	154
6.2.1 OFDM 技术的基带 IFFT/FFT 实现原理	156
6.2.2 保护间隔(Guard Interval)	157
6.2.3 OFDM 的优缺点	159
6.2.4 基于小波包正交多载波调制系统(WOFDM)	161
6.3 编码的正交频分复用系统	164
6.3.1 采用卷积码作为信道编码方案时 OFDM 系统的 BER 性能	164
6.3.2 不同正交基的 OFDM 的性能比较	167
6.3.3 不同小波包作为正交基时的性能比较	169

6.3.4 不同码参数的 Turbo 码在基于小波包基的 OFDM 中的性能	170
6.3.5 Turbo 码和 LDPC 码在基于小波包基的 OFDM 中的性能比较	171
6.3.6 基于 MLC 的 UEP 方案在 WOFDM 中的应用	173
本章参考文献	177

第1章

香农限及其信道编码技术的最新进展

1.1 信道编码技术的发展史

1948年香农发表的著名的《通信的数学理论》一文,为信道编码技术的发展指明了方向。半个多世纪以来,伴随着通信技术的飞速发展以及各种传输方式对可靠性要求的不断提高,信道编码技术作为抗干扰技术的一种重要的手段,在数字通信技术领域和数字传输系统中显示出愈来愈重要的作用。特别是近年来移动通信技术和产品的快速发展,以及它所涉及到的快衰落信道,使这种特别恶劣信道的抗干扰问题面临新的挑战,也为信道编码技术提出了新的课题。经过了50多年的不懈努力,各种新的信道编码方案不断涌现出来,性能离香农提出的最佳限越来越近。信道编码技术的进步主要体现在两个方面:一方面是在功率有效性的性能上,人们高兴地看到,1993年出现的Turbo码在BPSK调制下的性能离香农限仅有0.1 dB,而近两年才刚刚又重新热起来的LDPC码在BPSK调制下的性能离香农限仅有0.07 dB;另一方面是在新方案的频率有效性的性能上,通过同高效调制的结合,使新方案在功率有效的同时更加频率有效(带宽有效),以满足下一代移动通信高速宽带传输的迫切要求。

下面将信道编码技术的发展从1948年提出到1998年以每十年为一个阶段来回顾一下它50多年来的技术进步和发展^[1]。

图 1.1 给出了香农信道编码理论提出之前、没有信道编码时各种调制方案在加性高斯白噪声(AWGN)信道下的信道容量距香农限的距离。从图中可见,在香农提出可用信道编码的方法来提高信息传输的可靠性之前,要保证可靠地传输信息,我们有两个自由度可供选择:一是可提高系统的信噪比功率,即 E_b/N_0 的值;二是可以选用不同的调制方式。例如,在信息传输的可靠性要求为误比特率 10^{-5} 时,BPSK 调制需要 10 dB 的信噪比功率才可达到 1 比特/符号的传输效率,或称之为带宽有效性。此时,同香农限相比可见,有 10 dB 的空间是留给信道编码的,这意味着:当采用好的信道编码时,在 BPSK 调制下,仅用 0 dB 就可以实现无误码的信息传输。又如,图中采用 32QAM 调制时,需要 16 dB 的信噪比功率才可达到 5 比特/符号的传输效率,而此时香农限给出的要求是 7.5 dB,这意味着:当采用好的信道编码时,在 32QAM 调制下,仅用 7.5 dB 就可以实现无误码的信息传输,所以,留给我们的工作空间是: $16 - 7.5 = 8.5$ dB。因此,按香农定理计算出的信道容量为信道编码技术和纠错抗干扰技术的发展指明了研究和发展的方向。半个多世纪以来,信道编码界的研究者和学者们正是沿着香农所指引的方向,在向可靠性极限——香农限——逼近,并不断取得可喜的成果。

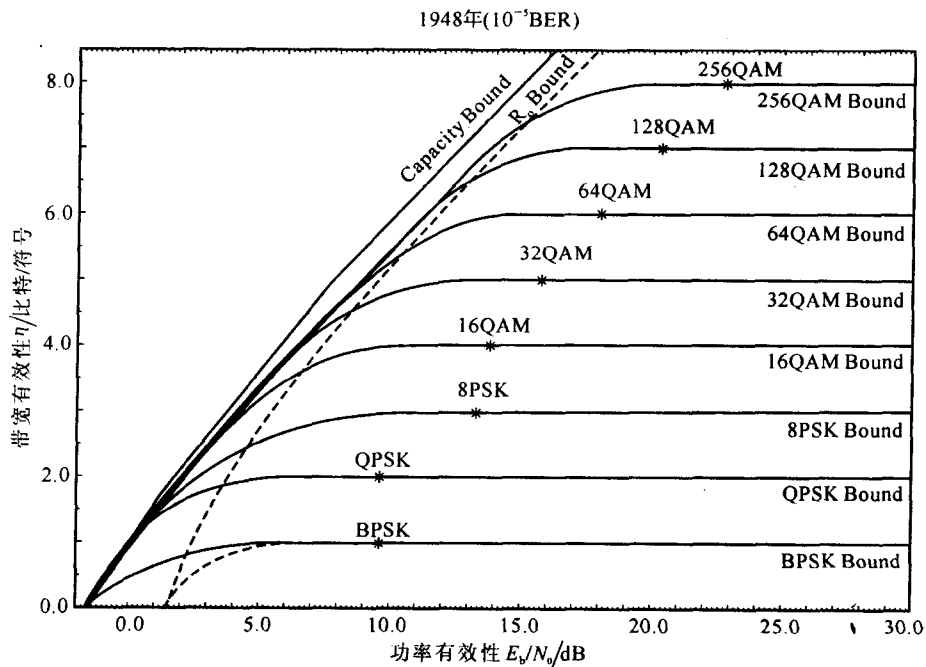


图 1.1 香农信道编码理论提出之前各种调制方案的信道容量

作为例子,图 1.2 给出了香农的信道编码理论从提出到发展的第一个十年内所取得的主要进展。图中还给出了这个时期提出和构造出的最好信道编码方案:汉明码、格雷码及 Reed-Muller 码等。这时的各种信道编码方案,有以下几个特点:

(1) 提出的信道编码方案仅适用于 AWGN 信道,而不是衰落信道,所以,所有的码都是针对随机错误,而不是突发错误的。

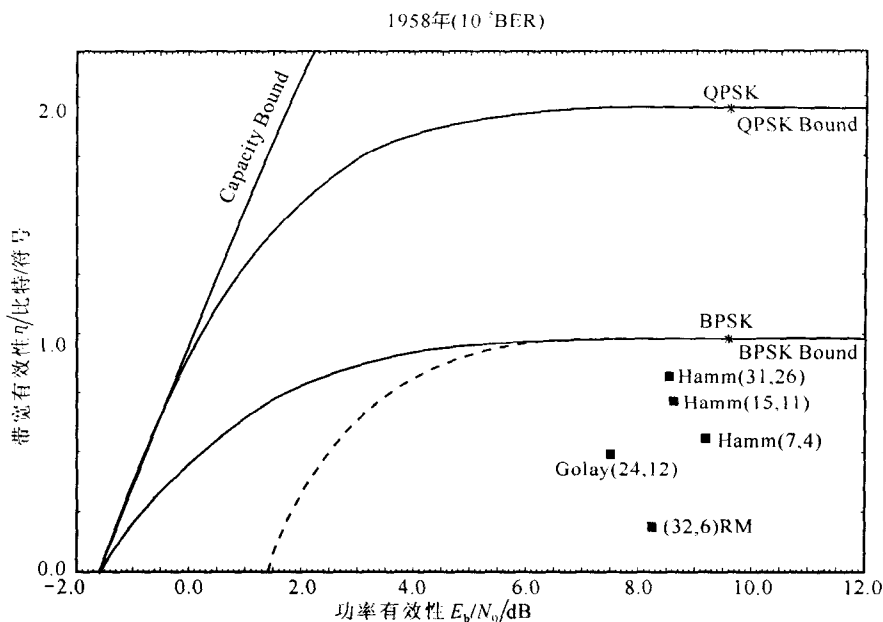


图 1.2 第一个十年内信道编码的进展

(2) 构造出的码的码长都很短,且是线性循环码类,因此,按照香农信道编码定理的条件——码长应为无限长——来看,此时构造出的码性能不可能太好。

(3) 由于需增加冗余位来实现抗信道干扰,故使系统在性能提高的同时,降低了传输效率,即频带有效性下降。这说明,早期的、传统的信道编码方案难以克服传输有效性同传输可靠性之间的这对矛盾。

(4) 所有码的译码都是采用的硬判决译码,因此,将损失掉一定的软判决译码增益。

由图 1.2 可见,在带宽有效性为 1 比特/符号的 BPSK 系统中,当采用 Hamming(15,11) 码时,可获得 1.4 dB 的编码增益($10 - 8.6 = 1.4$),但是作为代价,系统的频带有效性由原来的 1 比特/符号下降到 0.73 比特/符号;而当采用 Golay(24,12) 码时,可获得 2.4 dB 的编码增益($10 - 7.6 = 2.4$)。此时,系统的频带有效性下降的幅度更大,由原来的 1 比特/符号下降到 0.5 比特/符号。

进入 20 世纪 60 年代,信道编码开始进入了它的第一个大的发展期。各种好的分组码结构都在这个时期被提出来。图 1.3 给出了第二个十年内信道编码的进展情况。由图可见,新提出的各种各样的好码,其性能向香农限逼近的速度很快。如美国 NASA 宇航局在深空卫星信道中采用的 Pioneer 码,在软判决译码下其性能已比原来性能最好的二分之一率的 Golay(24,12) 码好了很多,其编码增益在 Golay 码的基础上又有了约 4.9 dB 新的编码增益($7.6 - 2.7 = 4.9$)。也就是说,在信息传输的可靠性要求为误比特率 10^{-5} 时,未编码的系统在 BPSK 调制下传输,需要 10 dB 的信噪比功率才可达到 1 比特/符号的传输效率,而当采用了 Pioneer 码进行差错控制以后,虽然系统的传输效率下降了一倍,但是它的抗干扰能力却大大提高了,要达到同样的误比特性能其所需的信噪比仅要 2.7 dB,这对卫星信道这种功率受限、频带不限型信道的可靠性的提高起到了重要的作用。但

是,同香农限相比,留给信道编码的空间仍然有 2.7 dB。在这个时期,作为一类循环码中的好码的 BCH 码也得到了很快的发展,各种 BCH 长码也显示出了很好的编码增益性能,如图中所示的 BCH(255,123)码,同前十年提出的性能最好的 Golay 码相比,在系统的频带有效性下降不大的情况下,又有了约 2 dB 新的编码增益。

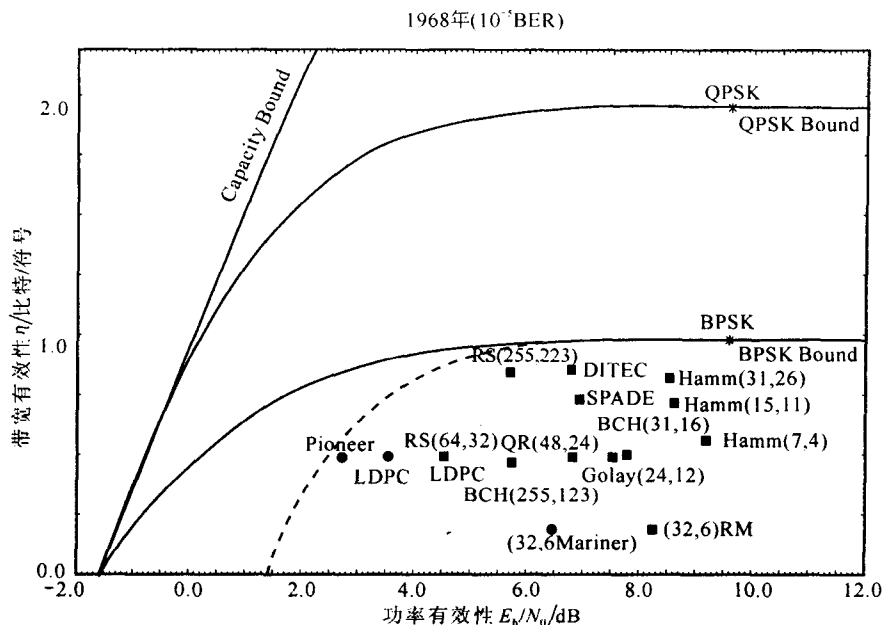


图 1.3 第二个十年内信道编码的进展

特别值得一提的是:在这个时期,也就是 1961 年,MIT 的 Gallager 博士在他的博士论文中首次提出了著名的 LDPC 码的思想。虽然在当时的条件下,人们还没有意识到它的重要性和它极其接近香农限的性能特征,但今天的事实已证明,20 世纪 60 年代由 Gallager 博士提出的 LDPC 码是最接近香农限的好码之一,它的提出和近年来的应用向学术界宣告:1948 年由香农提出的、大批的学者专家们研究了半个多世纪的可靠性传输的命题已被解决。

作为纠突发错误的、非二元的 RS 码也在此期间被提出,并开始在卫星信道中采用。图 1.3 中所示的中、高速率的 RS(64,32)码和 RS(255,223)码与早期的 Golay 码相比,不论是在功率有效性、还是在频带有效性上都有了显著的提高。

另外一个特点是:软判决译码技术的出现,如 Pioneer 码、(32,6)Mariner 码及 LDPC 码都是在软判决译码下完成的。由图 1.3 中可见,采用软判决译码的 LDPC 码的性能比采用硬判决译码的 LDPC 码的性能好 1 dB 多。

同时,由于在 20 世纪 60 年代移动通信还未有大的发展,频带资源还不是特别紧张,因此信道编码的大部分应用场合还都是一些功率受限、频带不受限的环境,如有线信道环境、无线的固定通信环境、微波通信等。当时技术上主要还是追求方案的最大功率有效性,即大的编码增益。有关这一点,见图 1.3,即没有方案(频带有效性大于 1 比特/符号)

在图的上半平面出现。

进入20世纪70年代,信道编码开始进入了它的第二个大的发展时期。在这个时期有三大重要的进展:一是一类不展宽频带的编码调制技术的提出;二是级连编码概念的提出;三是作为分组码的另一类——卷积码的软判决译码算法。图1.4给出了第三个十年内信道编码的进展情况。

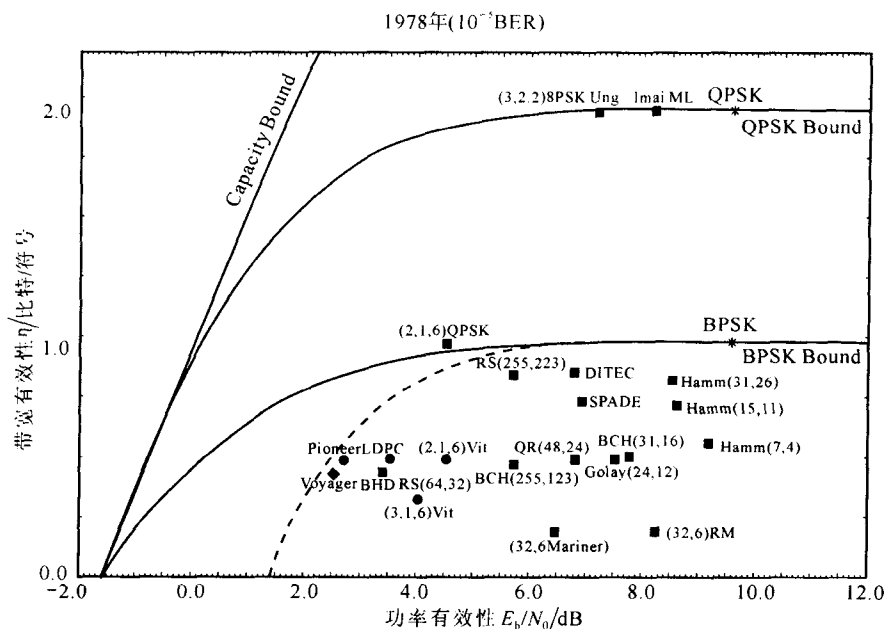


图 1.4 第三个十年内信道编码的进展

多年来,传统的信道编码思想是采用给传输的信息位增加冗余的办法来抗干扰,因此在提高了系统可靠性的同时,也降低了系统传输的有效性,即系统的频带有效性下降,这从前面的图中均可看出。为了解决这一矛盾,1978年欧洲的 Ungerboeck 和日本的 Imai 分别独立地提出了具有不展宽频带特性的编码调制结合的思想。他们的想法都是:将信道编码同调制技术联合考虑,通过对信号空间的不同分配,来最大化信号相点间的最小欧式距离,以此达到抗干扰的目的。由 Ungerboeck 提出的网格编码调制技术(Trellis Coded Modulation, TCM)同 Imai 提出的多级编码调制技术(Multilevel Coding, MLC)间的最大区别是:TCM 是将卷积码同调制结合,而 MLC 是将分组码同调制结合。虽然两者的构成不同,但是出发点和结果是相同的,即均可实现不展宽频带编码。由图1.4可见,(3,2,2) 8PSK Ung 码和 Imai ML 码相比,未编码的 QPSK 均有较好的编码增益,但又没有任何的频带展宽,还是2比特/符号。在 AWGN 信道下,TCM 又比 MLC 的功率增益多1dB。后来的发展证明:TCM 是 AWGN 信道下的最佳抗干扰方案,而 MLC 在移动衰落信道下具有更广泛的应用前景,这一点在随后的第4章中有详述。同时,随着近年来移动通信的迅速发展以及带宽资源的不断受限,研究出的信道编码方案不仅要求具有功率有效性,而且同时要求具有频带有效性,这一迫切要求使得编码调制技术成为近年来研究工

作的热点。

按照香农的理论,无疑是设计的码长越长,其性能就越好,但是码长越长,译码的复杂度呈现指数增加。因此人们开始设想用几个短码级连构成长码,使性能提高而复杂度仅为线性叠加关系,这就是级连编码的思想。与图中所示的 Voyager 级连码相比最好的 Pioneer 码,在频带有效性下降不多的情况下,提高了 BPSK 系统的编码增益达 0.3 dB,使得功率有效性又向香农限推进了一步,仅差约 2.4 dB 即可达到香农限了。

针对 1967 年 Viterbi 提出的卷积码的网格译码算法,进入 20 世纪 70 年代后,在 Viterbi 译码算法的软判决译码方面又有了新的进展。图中给出的 (2, 1, 6) Vit 和 (3, 1, 6) Vit 采用软判决译码后,在功率有效性上均比 BCH(255, 123) 要好 1 dB 以上,且译码的复杂度要低。

伴随着移动通信的飞速发展,自 20 世纪 80 年代开始,信道编码开始进入了它的第三个大的发展时期。在 20 世纪 80 年代的这十年中,它的进展情况如图 1.5 所示。这十年发展的最大特点是:具有高的频带有效性的抗干扰方案大量涌现,并且功率有效性性能还在不断地向香农限逼近,这一点从图 1.5 中,频带有效性大于 2 比特/符号方案的大量出现可以看出。此时,Ungerboeck 网格编码的思想继续向同高效调制结合的方向发展,例如:TCM 同 32QAM 结合方案、TCM 同 16QAM 结合方案等。图中所示的 (4, 3, 6) 32QAM Ung 码的性能在 4 比特/符号下与单纯的 16QAM 调制相比已有近 4 dB 的编码增益;而 (4, 3, 6) 16QAM Ung 码的性能在 3 比特/符号下与单纯的 8PSK 调制相比已有近 5.3 dB (13.3 - 8 = 5.3) 的编码增益,而且此时的几乎所有方案都是在软判决译码下完成的。

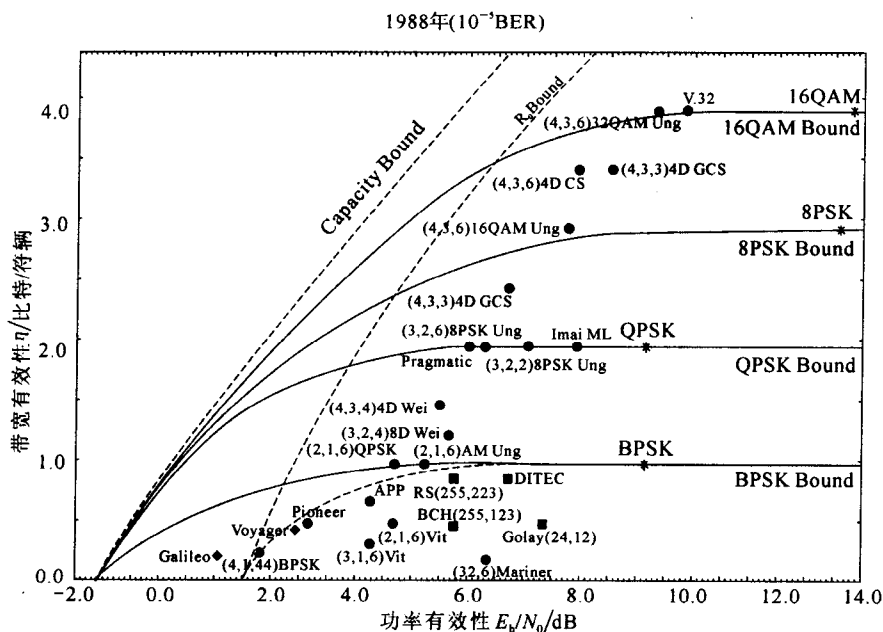


图 1.5 第四个十年内信道编码的进展