



联合编码调制 技术及应用

Joint Coded Modulation
Technology and Its Application

薛睿 赵旦峰 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

联合编码调制技术及应用

薛睿 赵旦峰 等著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书旨在研究带宽有效的编码技术,探索编码与调制的联合方案,将先进的信道编码(Turbo 或 LDPC 码)、高效的调制(CPM)以及 Turbo 检测技术进行有机融合,最大限度地逼近功率有效性和带宽利用率之间的最佳平衡点,为下一代无线移动通信链路中编码与调制策略的选择提供新思路和可行性论证。

本书内容主要分为以下四个部分:第一部分内容为卷积码、Turbo 码、二元及多元 LDPC 码的基本理论;第二部分内容为 MSK 和 CPM 调制的基本原理;第三部分内容为编码和调制的联合方案的设计、优化与系统性能分析;第四部分内容为编码调制技术在卫星导航系统中的应用研究。

本书力求兼顾编码调制技术的基础理论和实际应用,适合作为高等院校通信工程、电子信息等专业的高年级本科生及研究生的教材或教学参考书,也可供研究人员、工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

联合编码调制技术及应用 / 薛睿等著. —北京: 国防工业出版社, 2015. 3
ISBN 978-7-118-09876-3
I. ①薛… II. ①薛… III. ①编码技术-调制技术 IV. ①TN911.212.TN761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 017990 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11½ 字数 260 千字

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

随着现代通信技术的快速发展,人们对通信系统的要求越来越高,期望实现高数据率、高可靠性的信息传输。提高信息传输的可靠性和有效性,始终是通信工作者所追求的目标,然而在数字通信系统中,可靠性与有效性通常是一对矛盾。经过研究,人们发现信道编码与数字调制技术是解决通信系统可靠性和有效性这对矛盾的关键,也是实现通信系统经济性的必由之路,越来越多性能优异的信道编码和调制方案被人们发现,通信理论得到了空前的发展。

信道编码和调制技术在无线通信中取得一系列突破性进展的同时,人们发现传统的信道编码和调制相互独立的设计方法存在致命缺陷,即以增加冗余度为主要设计思想信道编码随纠错性能的提高,冗余度大幅度增加,降低了有效信息传输速率。与此同时,现代通信技术的大容量、高可靠性、快速移动、实时通信的特点对信道编码和调制技术提出了更高要求。因此,迫切需要在带宽和功率受限的信道中研究以不降低有效传输速率为前提的编码/调制的技术,即所谓的带宽效率编码。

联合编码调制技术是实现带宽效率编码的重要途径,其研究的目的是最大限度利用现有传输资源,选择最优的传输体制,以逼近香农(Shannon)限。比特交织编码调制(Bit Interleaved Coded Modulation, BICM)作为一种新兴的联合编码调制方案,是一种编码、调制、星座映射和迭代译码相结合的技术,其具有灵活性强、频谱利用率高、性能优异等特点,BICM 作为下一代无线移动通信链路中的一项关键技术得到了广泛关注。

目前,BICM 系统的信道编码方案中研究比较成熟的是卷积码,该编码方案在高码率和低信噪比情况下不具备较好的误码率性能,难以通过增加码率来提高信息传输速率。为此,本书将采用 Turbo 码、二元 LDPC 码以及多元 LDPC 码。Turbo 码和 LDPC 码是迄今为止所发现的最接近香农限的信道编码,可提供接近理论极限的通信与纠错能力,将它们与高性能的调制方式相结合应用于低信噪比背景中,可以在不增加带宽的情况下提高信息传输速率和改善误码率性能。

M-PSK 和 QAM 是当前 BICM 系统的主要调制方式,这两种调制方式存在相位不连续的情况,相位不连续会造成频谱的扩展和发射机的高压瞬变现象。为了提高频谱的利用率和信息传输速率,本书采用连续相位调制(CPM),该调制方式具有相位连续、包络恒定、频带利用率高、调制具有一定的编码效应、可以输出软判决信息以及在低信噪比条件下具有高检测概率等优点。

本书针对功率和频带均受限的无线通信系统,以提高功率有效性和频带利用率为目标,研究带宽有效的编码技术,探索编码和调制的联合方案,将先进的信道编码(Turbo 或 LDPC 码)、高效的 CPM 以及 Turbo 检测技术进行有机融合,最大限度地逼近功率有效性和带宽利用率之间的最佳平衡点,为下一代无线移动通信链路中编码与调制策略的选择

提供新思路和可行性论证。

全书共分8章,其中第1章、第2章由赵旦峰编写,第3章由高敬鹏编写,第7章由佟宁宁编写,其余章节由薛睿编写,全书由薛睿统稿。主要内容如下:第1章绪论,分析总结近香农限的信道编码和高带宽效率数字调制技术的发展现状,介绍联合编码调制的概念、起源和发展;第2章阐述 Turbo 码和 MSK 调制的基本原理,分析 Turbo - MSK 系统性能;第3章阐述二元 LDPC 码校验矩阵的构造以及编/译码算法,分析 LDPC - MSK 系统性能;第4章阐述串行级联卷积码和 CPM 调制的基本原理,对 SCCPM 系统进行建模并分析其系统性能;第5章建立 Turbo - CPM 系统模型,分析迭代过程中的收敛性,研究主要参数对该系统性能的影响;第6章建立二元 LDPC - CPM 系统模型,分析迭代过程中的收敛性,研究主要参数对该系统性能的影响;第7章阐述多元 LDPC 码校验矩阵的构造、编/译码算法以及 EXIT 图,建立多元 LDPC - CPM 系统模型并分析其系统性能;第8章探索联合编码调制技术在卫星导航信号体制中的应用,分析信道编码和调制技术在卫星导航系统中的研究进展,研究卫星导航信号质量的评估方法,评估 MSK - BOC 和 SS - CPM 调制波形的性能。

本书适合高等院校通信类、电子信息类专业高年级本科生或研究生用作教材,也可作为无线通信与编码调制技术领域研究人员的重要参考资料。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(No. 61403093, No. 61371099)、黑龙江省留学归国科学基金(No. LC2013C22)、黑龙江省博士后科研启动金(No. LBH - Q14048)以及中央高校基本科研业务费专项基金(No. HEUCF140807)的资助,在此表示感谢。该书是集体智慧的结晶,薛睿、赵旦峰、佟宁宁、高敬鹏是本书的主要编著者,许多教师和同学都对该书的完成做出了有益贡献,特别感谢韩志学、雷李云、罗清华、张英、张杰、张亚倩、徐锡超等。感谢魏强、孙岩博、曹庆铭等对本书的校对所付出的宝贵时间和精力。

本书在编写过程中参阅的国内外文献和书籍均列于各章的参考文献中,在此向作者表示衷心的感谢!感谢国防工业出版社给予我们的大力支持,为本书的出版提供了有力支持和保证。

限于作者的知识水平和时间,书中难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

薛睿

2014年8月

目 录

第 1 章 编码调制技术概述	1
1.1 编码和调制的作用	1
1.2 信道编码技术的发展与现状	3
1.2.1 信道编码的前期发展	3
1.2.2 近香农限的信道编码	4
1.3 高带宽效率数字调制技术发展现状	6
1.3.1 带宽有效调制的发展历程	6
1.3.2 连续相位调制技术的研究进展	7
1.4 联合编码调制技术的发展与现状	9
1.4.1 联合编码调制技术的提出	9
1.4.2 联合编码调制技术的研究进展	10
1.5 本书的组织结构	11
参考文献	12
第 2 章 基于 Turbo 码的 MSK 编码调制系统	18
2.1 MSK 调制技术	18
2.1.1 基本原理	18
2.1.2 调制与解调	20
2.2 Turbo 码编码原理	23
2.2.1 PCCC 编码器结构	23
2.2.2 3GPP 标准中的 Turbo 码	25
2.3 Turbo 码译码原理	27
2.3.1 Turbo 译码器结构	27
2.3.2 Turbo 译码算法	28
2.3.3 译码算法性能分析	35
2.4 Turbo-MSK 系统性能分析	38
2.4.1 系统模型	38
2.4.2 仿真结果与分析	38
2.5 本章小结	42
参考文献	43

第 3 章 基于 LDPC 码的 MSK 编码调制系统	44
3.1 LDPC 码的基本原理	44
3.2 LDPC 码的编码方法	45
3.2.1 基于高斯消去的编码方法	45
3.2.2 基于近似下三角矩阵的有效编码方法	45
3.2.3 基于删除信道的 LDPC 码的迭代编码方法	46
3.2.4 具有准循环结构的 LDPC 码的编码方法	47
3.3 LDPC 码的译码算法	48
3.3.1 概率域 BP 译码算法	49
3.3.2 对数域 BP 译码算法	50
3.3.3 改进的 BP 译码算法	51
3.3.4 译码算法性能对比	52
3.4 LDPC 码校验矩阵的构造	53
3.4.1 随机构造方法	54
3.4.2 结构构造方法	55
3.4.3 改进的构造方法	58
3.5 LDPC - MSK 系统性能分析	59
3.5.1 系统模型	59
3.5.2 仿真结果与分析	60
3.6 本章小结	62
参考文献	63
第 4 章 基于卷积码的 BICM 系统	64
4.1 SCCC 编译码原理	64
4.1.1 编译码器结构	64
4.1.2 基于 Log - MAP 算法的 SISO 滑窗模型	65
4.1.3 迭代检测收敛性分析	66
4.2 CPM 调制技术	69
4.2.1 CPM 信号的定义	69
4.2.2 CPM 信号的状态描述	71
4.2.3 CPM 信号的频谱特性	72
4.2.4 CPM 信号的性能	73
4.3 CPM 信号的分解模型	74
4.3.1 无记忆调制器 (MM)	75
4.3.2 连续相位编码器 (CPE)	77
4.4 CPM 性能仿真	77
4.4.1 CPM 的误比特率性能	78
4.4.2 CPM 的功率谱密度特性	79

4.5	SCCPM 系统性能分析	81
4.5.1	系统模型	81
4.5.2	仿真结果与分析	82
4.6	本章小结	85
	参考文献	85
第 5 章	基于 Turbo 码的 BICM 系统	87
5.1	Turbo - CPM 系统模型	87
5.1.1	基于 SISO 算法的接收机设计	87
5.1.2	Turbo 编/译码器的设计	88
5.2	迭代检测收敛性分析	89
5.3	Turbo - CPM 系统性能分析	92
5.4	本章小结	95
	参考文献	95
第 6 章	基于二元 LDPC 码的 BICM 系统	97
6.1	LDPC - CPM 系统模型	97
6.1.1	基于 SISO 算法的接收机设计	97
6.1.2	LDPC 码的迭代编码算法	98
6.2	迭代检测收敛性分析	99
6.3	LDPC - CPM 系统性能分析	101
6.4	本章小结	105
	参考文献	105
第 7 章	基于多元 LDPC 码的 CPM 编码调制系统	106
7.1	多元 LDPC 码的表示形式	106
7.2	多元 LDPC 码的编码	108
7.2.1	基于高斯消去的编码方法	109
7.2.2	基于近似下三角矩阵的有效编码方法	109
7.2.3	迭代编码方法	110
7.2.4	具有准循环结构的 LDPC 码的编码方法	111
7.3	多元 LDPC 码译码算法	114
7.3.1	BP 译码算法	115
7.3.2	FFT - BP 译码算法	117
7.3.3	Log - FFT - BP 译码算法	118
7.4	多元 LDPC 码校验矩阵的构造	119
7.4.1	基于 PEG 的随机构造方法	119
7.4.2	PS 结构构造方法	120
7.4.3	QC 结构化构造方法	122

7.5	多元 LDPC 码的 EXIT 图	123
7.5.1	规则多元 LDPC 码的 EXIT 图	123
7.5.2	非规则多元 LDPC 码的 EXIT 图	126
7.5.3	仿真结果及分析	127
7.6	多元 LDPC 码性能仿真	129
7.7	多元 LDPC - CPM 系统性能分析	134
7.8	本章小结	138
	参考文献	138
第 8 章	编码调制技术在卫星导航中应用研究	140
8.1	卫星导航信号体制的研究现状	140
8.1.1	信道编码的研究进展	141
8.1.2	调制技术的研究进展	142
8.2	GNSS 信号中新型的调制方式	144
8.2.1	BOC 调制	144
8.2.2	MSK - BOC 调制	146
8.2.3	SS - CPM 调制	149
8.3	卫星导航信号质量评估	152
8.3.1	码跟踪误差评估	153
8.3.2	Gabor 带宽评估	157
8.3.3	多径误差评估	159
8.3.4	抗干扰及兼容性评估	165
8.4	基于扩频的 LDPC - MSK - BOC 信号体制	168
8.5	本章小结	170
	参考文献	170
缩略语		173

第 1 章 编码调制技术概述

随着蜂窝移动通信、因特网和多媒体业务的发展,世界范围内无线通信的容量需求在迅速增长。任何通信系统的信道容量均与所采用的编码/调制方案直接相关,对编码和调制策略的研究以及正确选择对于整个系统的高效工作是至关重要的。本章主要分析编码和调制功能模块在数字通信系统中的重要作用,回顾近香农极限的纠错编码和高带宽效率数字调制技术的发展与应用,阐述联合编码调制技术的提出、研究现状以及应用前景。

1.1 编码和调制的作用

在任何一个通信系统中,尤其是在无线数字系统中,编码和调制始终扮演着一个重要角色。根据香农(Shannon)的信息论,一个典型的点对点单向的数字通信系统模型如图 1-1 所示。

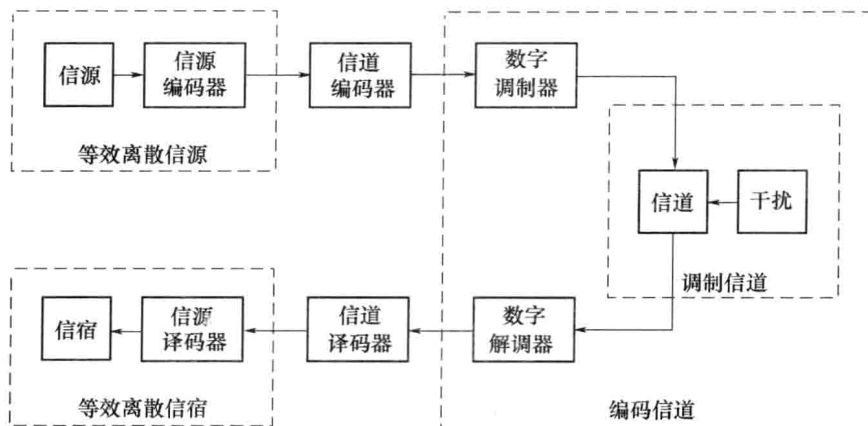


图 1-1 典型数字通信系统组成框图

下面对图 1-1 中的各个组成模块作简要介绍。

信源产生需要发送的信息,其可以是模拟信号,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,则可以是比特、字、码符号等,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(bit)。

信源产生的信息可能是不适合传输的,比如包含大量的冗余信息,或信息表征方式不适宜于信道传输。此外,在数字通信中往往需要统一的信息格式。信源编码是用二进制或多进制序列表示信源的原始符号,除去信源中的冗余,使其以最小冗余进行传输。如果

信源编码器输出信号的速率为 r_b bit/s, 则称 r_b 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。

传输信道存在一定的噪声和干扰, 必然会对其上传输的信息引入失真和信号判决错误, 信道编码的目的就是在信息序列中嵌入冗余码元, 从而使信道引入的差错最小化。信道编码的基本思想是将每 k 个信息单元分为一组, 经过一定的数学运算(编码)后得到 n 个信息单元, 通常称 n 个信息单元为一个码字, 比值 $R = k/n$ ($R < 1$) 定义为码率。信道编码的实质是在有限的信号功率、系统带宽和硬件复杂度的要求下使通信的可靠性最大, 与未编码系统相比, 信道编码会导致数据传输率降低或者对信道带宽的需求增加^[1]。

信道编码器输出的数据一般不适于信道传输, 所以在数据送入信道前还要进行调制。调制的目标就是要将信道编码器输出的信号变换为适合于信道传输的信号, 另一方面通过调制提高信道的频带利用率, 即将多个数字比特映射到一个调制波形上面, 如多进制正交幅度调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 等^[2]。一个 M 进制的调制器将信道编码器输出的 l 个数字比特映射到 M 个可能的符号上去, 也即 $M = 2^l$ 。假定调制后的符号持续时间为 T , 则 $r_s = 1/T$ 定义为符号率, 那么最小所需信道带宽为 r_s Hz, 其可表示为

$$r_s = \frac{r_b}{Rl} = \frac{r_b n}{lk} \quad (1-1)$$

对通信系统进行综合评价或设计时, 往往涉及许多性能指标, 如可靠性、有效性、适应性、经济性、保密性、标准性及可维护性等, 这些指标从各个方面评价了通信系统的质量。但从信息传输的观点来看, 通信的有效性和可靠性是系统最主要的性能指标。所谓通信的有效性是指系统传输的效率或信息传输的速率, 即系统在单位时间、单位频带上传送信息量的多少, 用单位带宽下的传信率 (bit/s/Hz) 来衡量, 是描述系统传输信息的“速度”指标。而可靠性是指接收信息的准确程度, 即信息是否能够准确无误地从接收端获得, 通常用误比特率和误码率来衡量。

在设计通信系统时, 总希望有效性和可靠性都很高, 但实际系统中这两个性能指标是相互制约、相互矛盾的, 并可相互转化。人们期望有效性和可靠性能够达到双赢, 一般需以应用背景为出发点, 结合系统的技术指标在二者之间进行某种折衷, 通常的方法是对系统的编码和调制方案进行权衡。因此, 对编码和调制策略的研究以及正确选择对整个系统的高效工作是至关重要的, 尤其对于功率和带宽均受限的系统, 寻找功率效率和带宽效率之间的最佳平衡点具有重要的现实意义, 将先进的编码与高效的调制技术相结合正是解决这一问题的有效途径。可获取如下系统优势^[3]:

- (1) 增加容量(具有更高的数据传输速率和容纳更多用户);
- (2) 增加带宽效率(在无线移动系统中具有更低的频谱价格成本);
- (3) 降低功率需求;
- (4) 增加对同频干扰的容忍度;
- (5) 削弱多径效应。

1.2 信道编码技术的发展与现状

1.2.1 信道编码的前期发展

通信发展的初期,人们普遍认为有效性与可靠性是一对不可调和的矛盾,因而在有扰信道上实现可靠传输的唯一方法就是将传输速率降至为零。1948年,信息论的开创者 Shannon 在贝尔技术杂志上发表了题为《通信的数学理论》的论文^[4],首次否定了上述观点,这篇论文的发表标志着现代信息论与编码理论这一学科的诞生。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 ,只要信息传输速率 R 小于 C ,则存在一种编码方法,当码长 n 充分大并采用最大似然译码(Maximum Likelihood Decoding, MLD)时,译码的错误率可以达到任意小。这就是著名的信道编码定理,该定理解决了好码的存在性问题,并为后人用构造性方法去寻找好的纠错码指明了方向。

20世纪40~60年代,科学家们主要研究各种有效的编/译码方法,该时期奠定了线性分组码的基础。1946年,工作于贝尔实验室的数学家 Hamming 提出了第一个差错控制码——汉明码,这个编码的方法成为了分组码的基本思想^[5]。20世纪50~60年代,相继出现了许多分组码,如格雷(Golay)码^[6]、里德-穆勒(Reed-Muller)码^[7]、BCH(Bose Chaudhury Hocquenhem)码^[8]等。虽然分组码在理论分析和数学描述上已经非常成熟,并且在实际的通信系统中也得到了广泛的应用,但是分组码固有的缺点制约了它的进一步发展,尤其是大多数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,造成了一定程度的增益损失,特别是在低信噪比条件下,分组码的纠错能力表现得很差。

分组码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(Convolutional Code, CC)^[9]。该码是 Elias 等人在1955年提出的,它与分组码的不同之处在于:某时刻所产生的校验比特不仅与该时刻的输入信息比特有关,而且与先前时刻的信息比特也有关,增强了前后码元之间的相关性,使得在相同复杂度的条件下可以获得比分组码更高的编码增益。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。

20世纪60~70年代是信道编码发展过程中最为活跃的时期。该时期有以下几个重要成果:一是卷积码的软判决算法;二是级联码概念的提出;三是低密度奇偶校验(Low-Density Parity-Check, LDPC)码^[10]的提出。1967年,Viterbi 提出了基于似然译码的 Viterbi 算法^[11]后,卷积码得到了极为广泛的应用,其中约束长度为7,码率1/2和1/3的 Odenwalder 卷积码已成为商业卫星通信系统中的标准编码方法。

为了解决译码性能和译码复杂度的矛盾,1966年 Forney 提出了一种串行级联码的编码方案^[12]。在该方案中,信息序列先进行一种编码(称为外码),然后再对外码编码所得序列进行另一种编码(称为内码),这里内、外码的得名是源于编码方案距离信道的远近而来的。在接收端采用分级译码,首先经过内码译码器译码,最后由外码译码器译码。Forney 的串行级联码近似实现了香农定理中第二个条件。可惜的是,Forney 提出的级联系统中外码和内码之间没有引入交织器,没能实现定理中的随机编码条件,距香农的三条

定律只差一步之遥。

1962年, Gallager 提出了一种特殊的线性分组码——LDPC 码, 该码采用迭代算法进行译码, 但由于当时计算机仿真水平的限制, 这种码的性能没有得到充分体现, 今天的事实已经证明, 它是接近香农限的好码之一。

20 世纪 70 ~ 90 年代是信道编码的第二个大发展时期, 该时期形成了以下几个主要研究成果: 一是软判决译码算法的完善; 二是不展宽频带的编码调制技术的提出; 三是 Tanner 图在信道编码理论中的应用。1974 年, Bahl、Cocke、Jelinek 和 Raviv 共同提出了最大后验概率 (Maximum A Posteriori probability, MAP) 译码算法 (也称为 BCJR 算法)^[13]。该算法基于码的格图 (trellis) 进行译码, 适用于任何线性分组码和卷积码, 但由于计算量较大, 当时并未引起广泛关注, 直到 Turbo 码的出现才赋予它新的活力。

为了解决传输可靠性和频带有效性之间的矛盾, 1982 年欧洲的 Ungerboeck 提出格形编码调制 (Trellis Coded Modulation, TCM)。在不增加系统带宽的条件下, TCM 技术通过扩展符号映射空间来提高编码增益, 奠定了带限信道上编码调制技术的研究基础, 被认为是信道编码发展中的一个里程碑。与此同时, 日本学者 Imai 提出将分组码与调制结合的多级编码调制 (Multi-level Coding, MLC), 该技术在衰落信道下性能比较突出。

Tanner 是自 1962 年 Gallager 提出 LDPC 码和迭代译码技术后长期关注 LDPC 码和迭代译码的学者之一。1981 年 Tanner 建立了编码的图模型概念^[14], 证明了和积 (Sum-Product) 译码算法在无圈图中的最优性, 并提出了如何采用代数方法构造适合的和积译码算法的图模型。

1.2.2 近香农限的信道编码

信息编码理论发展到现阶段, 特别是 20 世纪 90 年代以后, 以迭代译码为基础的高效信道编码成为了业界的主要研究对象。这一阶段涌现了一系列接近香农极限的信道编码方案, 其中最具代表性的是 Turbo 码的提出和 LDPC 码的再发现。

1993 年, Berrou C 等人提出了令人震惊的并行级联卷积码 (Parallel Concatenated Convolutional Code, PCCC)——Turbo 码^[15], 并在信道编码的理论和应用中取得了突破性的进展。Turbo 码是在综合过去几十年来级联码、乘积码、最大后验概率译码与迭代译码等理论基础上的创新。它克服了传统码随机性差、码字重量分布不均的缺点, 大幅度地提高了纠错能力, 并在译码复杂性和码率之间达到了较好的平衡^[16]。

多年来, 通过学者们在降低 Turbo 译码复杂度方面的努力, Turbo 码已经走上了实用化的道路。在第三代移动通信系统中, Turbo 码被各种标准采用作为高速数据业务的信道编码方式^[17]; 在深空通信中, Turbo 码作为标准码被写入 CCSDS 建议中^[18]; 在第四代移动通信的研究方案中, Turbo 码也作为信道编码的备选方案之一^[19]; Turbo 码还被广泛应用于数字音频、视频广播^[20]以及新兴的无线网络场景。

Turbo 码真正的突破性不在于它的编码形式, 而是发现了基于软输入软输出 (Soft Input Soft Output, SISO) 算法的迭代译码方法。Turbo 码独创性的迭代原理, 又称 Turbo 原理, 为信道均衡、信道估计、信号检测、信噪比估计以及多用户检测等子系统的设计提供了新思路。迭代的观念现已应用到了各种子系统中, 成为了一种设计先进接收机的方法^[21, 22]。文献[23]中, 作者用“Turbo 处理”来描述迭代反馈译码和检测的一般方法。

目前, Turbo 码的理论研究仍在进行,主要集中在以下方面:①如何更好地链接分量编码器和交织器;②如何找出更好的交织器使得 Turbo 码更接近香农限的性能;③迭代译码算法的简化;④Turbo 码的硬件实现;⑤在多用户检测方面的运用^[24]。

Turbo 码的出现加深了对随机编码和迭代译码的本质理解,使基于图模型的编译码原理及其优化设计成为研究热点。1996 年, Mackay 和 Neal 对 Gallager 在 1962 年提出的 LDPC 码重新研究发现,该码也是一种可实现的编码方案,其性能接近香农限,甚至可超过 Turbo 码^[25]。文献[26]的研究结果表明:最好的非规则 LDPC 码(长度为 10^6) 在 $BER = 10^{-6}$ 时可获得仅偏离香农限 0.13dB 的性能,优于迄今所知道的最佳 Turbo 码;当码长为 10^7 、码率 $R = 1/2$ 时,其性能距香农限仅 0.0045dB,这是目前距离香农限最近的码。因此,越来越多的研究者将注意力集中在 LDPC 码上,并将其作为未来高速宽带移动通信系统中的信道编码的主要备选方案之一^[27]。

从 Gallager 提出 LDPC 码到 Mackay 等人的重新发现这 30 多年期间,只有极少数人关注 LDPC 码的研究。其中, Tanner 提出的 LDPC 码的双向图表示是这期间的研究成果^[14],从 Tanner 图上可以直观地理解 LDPC 码的译码过程。Mackay 等人在总结前期工作的基础上,证明了 LDPC 码是一种实用性好码,推广了 Gallager 概率迭代译码算法,论述了置信传播(Belief Propagation, BP)译码算法^[28]的详细实现方案,极大地推动了 LDPC 码的发展,成为 LDPC 码发展中的一个重要里程碑。

1997 年, Luby 等人首先提出了非规则的 LDPC 码(Irregular LDPC Code)^[29-30],并证明了非规则码比规则码具有更好的性能。Richardson 和 Urbanke 等人总结发展了 Luby 的分析方法,提出了密度进化(Density Evolution)方法,分析了消息传递译码下的 LDPC 码的容量^[31],设计了接近香农限的非规则 LDPC 码^[32],论述了快速 LDPC 码的编码方法^[33],对 LDPC 码的研究和应用做出了极大贡献。在上述工作的基础上,LDPC 码在译码算法的简化、密度进化的改进、非规则码的度数设计、校验矩阵的构造、距离特性和性能界的分析以及应用等各个方面展开,取得了很多有价值的研究成果,并在实际系统中得到了应用^[34]。

虽然 Turbo 码在 3G 通信标准中获得了主导地位,但与 Turbo 码相比,LDPC 码具有 3 个明显优势:①LDPC 码具有一套较为系统的优化设计方法、更强大的纠错能力和更低的地板效应;②LDPC 码的迭代译码算法为并行算法,可实现完全并行的操作,便于硬件实现;③LDPC 码本身具有抗突发错误的能力,不需引入交织器,避免了可能带来的延时。这些优点使得 LDPC 码在无线通信中展现出了巨大的应用前景^[27]。

目前,许多通信标准都开始关注 LDPC 码,欧洲的新一代数字卫星广播标准(DVB-S2)、无线城域网传输标准(IEEE 802.16e)、中国数字电视地面广播标准(DTMB)、欧洲地面数字广播标准(DVB-T2)以及第四代移动通信系统都将其选为前向纠错编码方案。

迄今为止,大部分研究都集中在二进制,只有极少数文献涉及到多元 LDPC 码^[35]的设计与构造。多元 LDPC 码是由 Davey 和 Mackay 在 1998 年首次提出的,相对于二元 LDPC 码,该码具有如下优点:①多元 LDPC 码的中短码长具有更优的差错控制性能;②多元 LDPC 码可将突发比特错误序列合成为长度较短的突发符号错误序列,具有更强的抗突发错误能力;③多元 LDPC 码是基于高阶有限域设计的,非常适宜与高阶调制方案结合,从而提高数据传输速率和频谱效率。由上述优点可见,多元 LDPC 码具有很高的实际应用价值^[36]。

除了 Turbo 码和 LDPC 码之外,重复累计(Repeat Accumulated, RA)码^[37]、级联树码^[38]、Turbo 乘积码(TPC)^[39]都是接近香农极限的实用好码,它们的共同特点是都采用图模型和迭代译码算法,纠错性能好,占用额外带宽不多,并且译码复杂度通常是可以接受的,因此能被广泛应用于各类传输系统。

最终能够逼近香农容量限的 Turbo 码和 LDPC 码都引入了随机编码的思想, Turbo 码的交织器和 LDPC 码的稀疏校验矩阵都体现了随机特性,并且它们的码长都较长,译码均采用接近最大后验概率(MAP)译码^[40,41](当输入信息等概时,最大后验概率译码等价于最大似然译码)的迭代译码算法。换句话说,香农证明的信道编码定理的 3 种技术在逼近容量限的 Turbo 码和 LDPC 码中都有体现^[42]。采用信道编码技术可以提高系统的功率有效性,但功率有效性的提高是以引入冗余信息为代价的,冗余信息的引入实际上降低了用户的频谱利用率。

1.3 高带宽效率数字调制技术与现状

1.3.1 带宽有效调制的发展历程

在一个通信系统中,待传送数据经过编码之后,总要通过信号调制将离散符号变换为适合信道传送的信号波形。不同的调制方式,其实现的复杂度、频带利用率、对功率放大器的要求、抗信道噪声能力等均不同。理想的调制方式应具备较高的频带利用率、较强的抗噪声和抗干扰能力、较低的误码率以及易解调等特点。

本节主要介绍带宽有效的调制技术,该技术主要适用于卫星通信、卫星导航、深空通信等具有通信距离远、信号能量衰减大等特点的通信系统。在早期的深空通信系统中,使用较多的是二相相移键控调制(Binary Phase Shift Keying, BPSK)。为了提高频带利用率,在它的基础上提出了四相相移键控调制(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)。它们产生的已调波,在码元转换时刻都有可能产生 180° 的相位突跳,使频谱展宽,带外辐射增大。为了消除 180° 的相位突跳,改善频谱特性,20 世纪 60 年代末在 QPSK 的基础上提出了偏移四相相移键控调制(Offset - QPSK, OQPSK)。该调制方式能克服 180° 相位突跳的问题,但在码元转换时刻仍可能有 90° 的相位突跳,使得频谱在高频部分不能很快的滚降。

为了彻底解决相位突跳的问题,人们自然会想到相邻码元之间的相位变化不应该瞬时的突变,而是在一个码元时间内逐渐累积完成,从而保持码元在转换时刻相位连续。20 世纪 70 年代初提出的最小频移键控(Minimum Shift Keying, MSK),其相位累积规律是直线形变化的。由于其相位累积仅局限在一个码元内,很大程度上限制了选择不同相位路径的可能性。为了把相位路径的研究扩展到几个码元内进行,1977 年提出了受控调频(Tamed Frequency Modulation, TFM)。通过用高斯滤波器来代替 TFM 中的相关编码器,于 1979 年提出了调制前高斯滤波的最小频移键控(Gaussian - filtered MSK, GMSK)。为了进行简单的比较,表 1 - 1 列出了几种在无线通信系统中使用的经典调制技术的相位路径特点。

表 1-1 经典调制方式的相位路径

名称	提出时间	相位路径特点
BPSK	20 世纪 50 年代末	$0, \pi$ (突跳)
QPSK	20 世纪 60 年代末	$0, \pm \pi/2, \pi$ (突跳)
OQPSK	20 世纪 70 年代初	$0, \pm \pi/2$ (突跳)
MSK	20 世纪 70 年代初	直线(连续)
GMSK	1979 年	非线性(连续)
$\pi/4 - \text{DQPSK}$	20 世纪 80 年代初	$\pm \pi/4, \pm 3\pi/4$

目前,在实际移动通信系统中,线性调制技术和恒定包络(连续相位)调制技术是最常用的数字调制方式。线性调制技术中所谓的“线性”,是指这类调制技术要求通信设备从频率变换、放大直到发射的整个过程中都保持充分的线性。显然,这种要求会增加制造移动设备的难度和成本,但这类调制技术可获得较高的频带利用率。此类调制技术主要包括 PSK、QPSK、四相相对相移键控(Differential - QPSK、DQPSK)、OQPSK、 $\pi/4 - \text{DQPSK}$ 和多电平 PSK 等。在许多系统(如移动无线手机)中使用的高功率放大器通常工作在高度的非线性状态。这些非线性器件具有“幅相转换(AM/PM)”效应,即当输入信号幅度发生变化时,能转换为输出信号的相位变化,造成频谱扩散现象。因此,已调信号应包络恒定或包络起伏很小,以减小 AM/PM 效应。恒定包络(连续相位)调制技术泛指那些载波相位以连续形式变化(已调信号包络恒定)的一大类频率调制技术。此类调制技术的优点是已调信号具有相对窄的功率谱,且对放大设备没有线性要求;不足之处在于其频谱利用率通常低于线性调制技术。恒定包络调制技术主要包括 MSK、GMSK、高斯频移键控(Gauss Frequency Shift Keying, GFSK)和 TFM 等^[3]。

在深空通信中,为了有效利用空间飞行器的功率,发送信号功率放大器通常采用高功率非线性放大器,这就要求发送信号波形的瞬时幅度波动较小。同样,卫星通信信道既是功率和带宽受限的信道又是非线性信道,加上通信容量的日益增加,要求调制信号的频带尽可能的集中,且具有快速高频滚降的频谱特性,从而使调制信号通过带限和非线性处理后具有尽可能小的频谱扩散。因此,幅度受到调制的信号波形在这两种通信系统中的应用受到了限制,一般采用具有恒定包络或准恒定包络的调制方式,如 PSK、MSK、连续相位调制(Continuous Phase Modulation, CPM)等^[43]。

1.3.2 连续相位调制技术的研究进展

随着无线通信技术的高速发展,人们对无线通信提出了更高要求,即在移动、多径、衰落、动态变化等恶劣信道环境下仍能保持稳定、高速的数据通信,这就需要具有高功率效率和高频谱效率的编码/调制体制与之相适应。最优化的系统应具有频谱效率高、带外功率小、抗干扰能力强等优点。此外,调制信号也往往要求包络恒定、采用非线性功率放大器、在移动环境中性能优异、具有类似 Turbo 码的编码增益。要满足上述所有要求,需要从众多的调制方式中寻找一种高效的调制方式与之相适应。

连续相位调制(CPM)是一类满足上述要求的高效调制技术,它在相位变化中携带信息,是一种具有记忆性的调制方式,可以用卷积码的网格图来表示,因此可看作是网格编

码调制。CPM 中的记忆性表现为引入了一个相位状态寄存器,避免了相位的跳跃变化,使 CPM 信号具有很窄的频谱。这些优越的特性使 CPM 尤其适合于需要使用非线性功率放大器的无线通信系统,如卫星通信、深空通信、卫星导航、移动通信、战术电台等^[44]。

CPM 调制技术是在数字相位调制技术的基础上提出来的,它克服了一般 PSK 信号相位突变所带来的频谱泄漏等缺陷。最初研究较多的是基于普通 FSK 提出的连续相位频移键控(Continuous Phase Frequency Shift Keying, CPFSK)。在对 CPFSK 的研究日渐成熟的时候,Aulin 等人于 1981 年发表两篇论文^[45,46],对 CPM 作了详细的描述,其中对信号的一般表达式、相位特性、频谱特性以及误码率性能等都给出了非常完善的总结和归纳。在上述两篇论文的基础上,Anderson 和 Aulin 联合编写了《Digital Phase Modulation》一书,对 CPM 的各个方面都展开了讨论,不仅有完善的公式推导,而且加入了与其他调制方式的性能比较,并就 CPM 的检测和接收问题分章节进行了重点分析,最后总结得出了 CPM 信号的最优化接收机模型。

1988 年 Rimoldi 发表论文^[47],引入了倾斜相位的概念,改进了 CPM 信号的原始表达式。新的表达式假定信号在任何调制指数 h 下对应的状态网格图都是时不变的,而原始表达式会令状态网格图在 h 一半的取值机会中为一个时变网格,进而增加了检测时的计算量和复杂度。因此,新的表示法使 CPM 信号的检测算法得到简化和相对固定,网格图由时变到时不变之后检测的计算量成倍减少。1991 年,Svensson 在 Rimoldi 表示法的基础上,通过对状态合理的合并,进一步简化了 CPM 信号的状态网格图,并在检测时引入判决反馈,此举在性能损失很小或几乎没有损失的前提下大大减少了 CPM 信号检测的计算量,尤其在原始状态数成倍增加时,检测算法的计算量可以维持不变或增加很少,这种检测方法被称为基于判决反馈的减少状态序列检测。该方法大大简化了检测器的复杂度,使多进制 CPM 信号的实际应用成为可能,而之前由于多进制 CPM 信号的接收机过于复杂,实际应用只有简单的二进制 CPM 信号。在这之后,Colavolpe 等人又针对 CPM 信号的非相干检测作了研究并发表论文^[48],对检测性能给出了相应的仿真结果。

在进行 CPM 理论研究的同时,CPM 的应用研究也随之起步,CPM 调制在一些实际系统中已经获得了广泛应用。除了在 GSM 系统中使用的 GMSK 信号、蓝牙系统中使用的 GFSK 信号以外,美国卫星通信军标 MIL - STD - 188 - 181B 将多调制指数 CPM (Multi - h - CPM) 作为物理层波形的定义,旨在窄带 25kHz 的 UHF 卫星信道上传输 64Kbit/s 数据。美国的先进靶场遥测计划组织和 Edwards 空军基地也将多调制指数的 CPM 作为遥测调制体制^[49], Multi - h - CPM 已被 ARIM 联合办公室作为遥测新体制的第二步目标^[50]。法军的战术数据链 PR4G 系统使用了八进制的 CPM 调制,美军战术指挥电台也采用了自适应迭代检测的串行级联 CPM 方案^[51]。

在 Turbo 码提出后不久,人们证明了串行级联码(Serial Concatenated Code, SCC)比 Turbo 码具有更优异的性能,并且当网格编码调制或连续相位调制与 SCC 结合时,其带宽效率远远高于采用 SCC 加简单的载波调制(如 BPSK)的系统。因此,具有高频谱利用率、功率利用率和类似 Turbo 码性能的串行级联连续相位调制(Serially Concatenated Continuous Phase Modulation, SCCPM)系统引起了人们的关注,它在动态和衰落环境下较为稳健,而且适用于跳频系统和当前对军用领域感兴趣的自组织网络,在移动通信、卫星通信、深空通信及遥测等领域获得了广泛的重视^[52]。