



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

# 编码调制技术

黄平 主编

有效整合编码与调制技术  
合理兼顾理论和应用系统  
丰富案例平顺引出正文  
多样知识开拓读者视野



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

# 编码调制技术

主 编 黄 平  
参 编 褚福涛



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

编码调制技术可以在不降低系统有效传输速率的前提下进行有效的编码和调制,是未来宽带移动通信系统中的关键技术之一。本书较系统、详细地介绍了这一重要通信技术,内容由浅入深,按基础篇和应用篇组织内容编写。

全书共9章,基础篇(第1~4章)为编码调制技术的基础理论问题,包括逼近香农限的信道编码技术、网格编码调制、分组编码调制、多层编码调制技术,以及比特交织编码调制技术(BICM);应用篇(第5~9章)将低密度奇偶校验码(LDPC)和当前主流编码调制技术相结合,对其设计方法及其应用进行介绍和分析,包括LDPC编码的多层编码系统、LDPC编码BICM系统的迭代解码、LDPC编码BICM-ID系统的调制映射研究、基于EXIT图的BICM-MIMO系统优化设计和多元域LDPC编码的OFDM系统。

本书力求兼顾编码调制技术的基础理论和应用系统,适合作为高等院校通信工程、电子信息工程等专业的本科高年级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

编码调制技术/黄平主编. —北京:北京大学出版社,2012.7  
(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)  
ISBN 978-7-301-20506-8

I. ①编… II. ①黄… III. ①编码—调制技术—高等学校—教材 IV. ①TN761

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第066990号

书 名: 编码调制技术

著作责任者: 黄平 主编

策划编辑: 程志强

责任编辑: 程志强

标准书号: ISBN 978-7-301-20506-8/TN·0087

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

印 刷 者: 河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 11.5印张 261千字

2012年7月第1版 2012年7月第1次印刷

定 价: 26.00元

---

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 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,期望能够实现高数据率、高可靠性的信息传输。但现实的通信环境具有复杂性和多样性等特点,导致传输信道中存在衰落、热噪声、符号间干扰、多用户干扰、多径传输和功率限制等问题。因此,能够同时节省功率和带宽的编码调制技术应运而生。编码调制技术将编码与调制作为一个整体考虑,能够在带宽和功率受限的信道中,在不降低有效传输速率的前提下进行有效编码。

节省带宽的编码调制技术是未来宽带移动通信系统中的关键技术之一。因此,通信专业的学生很有必要熟悉并掌握编码调制技术,但目前这一领域的教材相对较少。本书试图以浅显易懂的方式,较为全面地阐述这种重要的通信技术。

本书按基础篇和应用篇组织内容进行编写。基础篇着力解决当前主流的编码调制技术的共性基础理论问题,内容力求清晰深入,便于读者打好理论基础;主要介绍编码调制技术发展过程中几种主要的、成熟的技术,包括网格编码调制、分组编码调制、多层编码调制技术,以及现在流行的比特交织编码调制(BICM)技术,为后面的应用篇打好基础,还介绍迭代译码及逼近香农限的两种信道编码技术,在论述上着重阐明技术背后的原理和概念,尽量避免复杂的公式推导,通俗易懂,便于自学。

应用篇结合编者近年来在该领域的研究实践,将低密度奇偶校验码(LDPC)和当前主流编码调制技术相结合,对其设计方法及应用进行介绍和分析,主要内容包括 LDPC 编码的多层编码系统、LDPC 编码 BICM 系统的迭代解码、LDPC 编码 BICM-ID 系统的调制映射研究、基于 EXIT 图的 BICM-MIMO 系统优化设计和多元域 LDPC 编码的 OFDM 系统,内容上既包括一些成熟的技术,也包括最新的、正在研究中的问题,使读者能够对当前编码调制领域的关键技术和发展趋势有基本的了解。

本书适合作为高等院校通信工程、电子信息工程等专业的本科高年级和研究生的教材或教学参考书,对工程技术人员及研究人员也是一本有价值的参考书。

本书的第 1、2、4~9 章由黄平编写,第 3 章由褚福涛编写,全书由黄平负责统稿。本书思想的形成与完善,得到了诸多前辈和同行们的指教,在此表示衷心的感谢!

特别感谢在东南大学移动通信国家重点实验室攻读博士学位期间的老师和同学们,他们是赵春明教授,姜明、何善宝、张立、史志华、杨宜进、金毅,与他们的交流和讨论给了我莫大的启迪和帮助。

由于编者水平有限,加之编码调制技术的发展日新月异,书中难免出现疏漏之处,恳请读者谅解和指正。

黄 平

2012 年 2 月于南京

## 北京大学出版社本科计算机系列实用规划教材

序号	标准书号	书 名	主 编	定价	序号	标准书号	书 名	主 编	定价
1	7-301-10511-5	离散数学	段禅伦	28	42	7-301-14504-3	C++面向对象与 Visual C++ 程序设计案例教程	黄贤英	35
2	7-301-10457-X	线性代数	陈付贵	20	43	7-301-14506-7	Photoshop CS3 案例教程	李建芳	34
3	7-301-10510-X	概率论与数理统计	陈荣江	26	44	7-301-14510-4	C++程序设计基础案例教程	于永彦	33
4	7-301-10503-0	Visual Basic 程序设计	闵联营	22	45	7-301-14942-3	ASP .NET 网络应用案例教程 (C#.NET 版)	张登辉	33
5	7-301-10456-9	多媒体技术及其应用	张正兰	30	46	7-301-12377-5	计算机硬件技术基础	石 磊	26
6	7-301-10466-8	C++程序设计	刘天印	33	47	7-301-15208-9	计算机组成原理	娄国焕	24
7	7-301-10467-5	C++程序设计实验指导与习题解答	李 兰	20	48	7-301-15463-2	网页设计与制作案例教程	房爱莲	36
8	7-301-10505-4	Visual C++ 程序设计教程与上机指导	高志伟	25	49	7-301-04852-8	线性代数	姚喜妍	22
9	7-301-10462-0	XML 实用教程	丁跃潮	26	50	7-301-15461-8	计算机网络技术	陈代武	33
10	7-301-10463-7	计算机网络系统集成	斯桃枝	22	51	7-301-15697-1	计算机辅助设计二次开发案例教程	谢安俊	26
11	7-301-10465-1	单片机原理及应用教程	范立南	30	52	7-301-15740-4	Visual C# 程序开发案例教程	韩朝阳	30
12	7-5038-4421-3	ASP .NET 网络编程实用教程 (C#版)	崔良海	31	53	7-301-16597-3	Visual C++ 程序设计实用案例教程	于永彦	32
13	7-5038-4427-2	C 语言程序设计	赵建锋	25	54	7-301-16850-9	Java 程序设计案例教程	胡巧多	32
14	7-5038-4420-5	Delphi 程序设计基础教程	张世明	37	55	7-301-16842-4	数据库原理与应用 (SQL Server 版)	毛一梅	36
15	7-5038-4417-5	SQL Server 数据库设计与 管理	姜 力	31	56	7-301-16910-0	计算机网络技术基础与应用	马秀峰	33
16	7-5038-4424-9	大学计算机基础	贾丽娟	34	57	7-301-15063-4	计算机网络基础与应用	刘远生	32
17	7-5038-4430-0	计算机科学与技术导论	王昆仑	30	58	7-301-15250-8	汇编语言程序设计	张光长	28
18	7-5038-4418-3	计算机网络应用实例教程	魏 峥	25	59	7-301-15064-1	网络安全技术	骆耀祖	30
19	7-5038-4415-9	面向对象程序设计	冷英男	28	60	7-301-15584-4	数据结构与算法	佟伟光	32
20	7-5038-4429-4	软件工程	赵春刚	22	61	7-301-17087-8	操作系统实用教程	范立南	36
21	7-5038-4431-0	数据结构(C++版)	秦 锋	28	62	7-301-16631-4	Visual Basic 2008 程序设计教 程	隋晓红	34
22	7-5038-4423-2	微机应用基础	吕晓燕	33	63	7-301-17537-8	C 语言基础案例教程	汪新民	31
23	7-5038-4426-4	微型计算机原理与接口技术	刘彦文	26	64	7-301-17397-8	C++程序设计基础教程	郝亚辉	30
24	7-5038-4425-6	办公自动化教程	钱 俊	30	65	7-301-17578-1	图论算法理论、实现及应用	王桂平	54
25	7-5038-4419-1	Java 语言程序设计实用教程	董迎红	33	66	7-301-17964-2	PHP 动态网页设计与制作案 例教程	房爱莲	42
26	7-5038-4428-0	计算机图形技术	龚声蓉	28	67	7-301-18514-8	多媒体开发与编程	于永彦	35
27	7-301-11501-5	计算机软件技术基础	高 巍	25	68	7-301-18538-4	实用计算方法	徐亚平	24
28	7-301-11500-8	计算机组装与维护实用教程	崔明远	33	69	7-301-18539-1	Visual FoxPro 数据库设计案 例教程	谭红杨	35
29	7-301-12174-0	Visual FoxPro 实用教程	马秀峰	29	70	7-301-19313-6	Java 程序设计案例教程与实训	董迎红	45
30	7-301-11500-8	管理信息系统实用教程	杨月江	27	71	7-301-19389-1	Visual FoxPro 实用教程与上 机指导 (第 2 版)	马秀峰	40
31	7-301-11445-2	Photoshop CS 实用教程	张 瑾	28	72	7-301-19435-5	计算方法	尹景本	28
32	7-301-12378-2	ASP .NET 课程设计指导	潘志红	35	73	7-301-19388-4	Java 程序设计教程	张剑飞	35
33	7-301-12394-2	C# .NET 课程设计指导	龚自霞	32	74	7-301-19386-0	计算机图形技术 (第 2 版)	许承东	44
34	7-301-13259-3	Visual Basic .NET 课程设计 指导	潘志红	30	75	7-301-15689-6	Photoshop CS5 案例教程 (第 2 版)	李建芳	39
35	7-301-12371-3	网络工程实用教程	汪新民	34	76	7-301-18395-3	概率论与数理统计	姚喜妍	29
36	7-301-14132-8	J2EE 课程设计指导	王立丰	32	77	7-301-19980-0	3ds Max 2011 案例教程	李建芳	44
37	7-301-13585-3	计算机专业英语	张 勇	30	78	7-301-20052-0	数据结构与算法应用实践教程	李文书	36
38	7-301-13684-3	单片机原理及应用	王新颖	25	79	7-301-12375-1	汇编语言程序设计	张宝剑	36
39	7-301-14505-0	Visual C++ 程序设计案例教程	张荣梅	30	80	7-301-20523-5	Visual C++ 程序设计教程与上机 指导 (第 2 版)	牛江川	40
40	7-301-14259-2	多媒体技术应用案例教程	李 建	30	81	7-301-20630-0	C# 程序开发案例教程	李挥剑	39
41	7-301-14503-6	ASP .NET 动态网页设计案例 教程 (Visual Basic .NET 版)	江 红	35					

# 北京大学出版社电气信息类教材书目(已出版)

## 欢迎选订

序号	标准书号	书 名	主 编	定价	序号	标准书号	书 名	主 编	定价
1	7-301-10759-1	DSP 技术及应用	吴冬梅	26	38	7-5038-4400-3	工厂供配电	王玉华	34
2	7-301-10760-7	单片机原理与应用技术	魏立峰	25	39	7-5038-4410-2	控制系统仿真	郑恩让	26
3	7-301-10765-2	电工学	蒋 中	29	40	7-5038-4398-3	数字电子技术	李 元	27
4	7-301-19183-5	电工与电子技术(上册)(第2版)	吴舒辞	30	41	7-5038-4412-6	现代控制理论	刘永信	22
5	7-301-19229-0	电工与电子技术(下册)(第2版)	徐卓农	32	42	7-5038-4401-0	自动化仪表	齐志才	27
6	7-301-10699-0	电子工艺实习	周春阳	19	43	7-5038-4408-9	自动化专业英语	李国厚	32
7	7-301-10744-7	电子工艺学教程	张立毅	32	44	7-5038-4406-5	集散控制系统	刘翠玲	25
8	7-301-10915-6	电子线路 CAD	吕建平	34	45	7-301-19174-3	传感器基础(第2版)	赵玉刚	30
9	7-301-10764-1	数据通信技术教程	吴延海	29	46	7-5038-4396-9	自动控制原理	潘 丰	32
10	7-301-18784-5	数字信号处理(第2版)	阎 毅	32	47	7-301-10512-2	现代控制理论基础(国家级十一 五规划教材)	侯媛彬	20
11	7-301-18889-7	现代交换技术(第2版)	姚 军	36	48	7-301-11151-2	电路基础学习指导与典型题解	公茂法	32
12	7-301-10761-4	信号与系统	华 容	33	49	7-301-12326-3	过程控制与自动化仪表	张井岗	36
13	7-301-10762-5	信息与通信工程专业英语	韩定定	24	50	7-301-12327-0	计算机控制系统	徐文尚	28
14	7-301-10757-7	自动控制原理	袁德成	29	51	7-5038-4414-0	微机原理及接口技术	赵志诚	38
15	7-301-16520-1	高频电子线路(第2版)	宋树祥	35	52	7-301-10465-1	单片机原理及应用教程	范立南	30
16	7-301-11507-7	微机原理与接口技术	陈光军	34	53	7-5038-4426-4	微型计算机原理与接口技术	刘彦文	26
17	7-301-11442-1	MATLAB 基础及其应用教程	周开利	24	54	7-301-12562-5	嵌入式基础实践教程	杨 刚	30
18	7-301-11508-4	计算机网络	郭银景	31	55	7-301-12530-4	嵌入式 ARM 系统原理与实例 开发	杨宗德	25
19	7-301-12178-8	通信原理	隋晓红	32	56	7-301-13676-8	单片机原理与应用及 C51 程 序设计	唐 颖	30
20	7-301-12175-7	电子系统综合设计	郭 勇	25	57	7-301-13577-8	电力电子技术及应用	张润和	38
21	7-301-11503-9	EDA 技术基础	赵明富	22	58	7-301-12393-5	电磁场与电磁波	王善进	25
22	7-301-12176-4	数字图像处理	曹茂永	23	59	7-301-12179-5	电路分析	王艳红	38
23	7-301-12177-1	现代通信系统	李白萍	27	60	7-301-12380-5	电子测量与传感技术	杨 雷	35
24	7-301-12340-9	模拟电子技术	陆秀令	28	61	7-301-14461-9	高电压技术	马永翔	28
25	7-301-13121-3	模拟电子技术实验教程	谭海曙	24	62	7-301-14472-5	生物医学数据分析及其 MATLAB 实现	尚志刚	25
26	7-301-11502-2	移动通信	郭俊强	22	63	7-301-14460-2	电力系统分析	曹 娜	35
27	7-301-11504-6	数字电子技术	梅开乡	30	64	7-301-14459-6	DSP 技术与应用基础	俞一彪	34
28	7-301-18860-6	运筹学(第2版)	吴亚丽	28	65	7-301-14994-2	综合布线系统基础教程	吴达金	24
29	7-5038-4407-2	传感器与检测技术	祝诗平	30	66	7-301-15168-6	信号处理 MATLAB 实验教程	李 杰	20
30	7-5038-4413-3	单片机原理及应用	刘 刚	24	67	7-301-15440-3	电工电子实验教程	魏 伟	26
31	7-5038-4409-6	电机与拖动	杨天明	27	68	7-301-15445-8	检测与控制实验教程	魏 伟	24
32	7-5038-4411-9	电力电子技术	樊立萍	25	69	7-301-04595-4	电路与模拟电子技术	张绪光	35
33	7-5038-4399-0	电力市场原理与实践	邹 斌	24	70	7-301-15458-8	信号、系统与控制理论(上、 下册)	邱德润	70
34	7-5038-4405-8	电力系统继电保护	马永翔	27	71	7-301-15786-2	通信网的信令系统	张云麟	24
35	7-5038-4397-6	电力系统自动化	孟祥忠	25	72	7-301-16493-8	发电厂变电所电气部分	马永翔	35
36	7-5038-4404-1	电气控制技术	韩顺杰	22	73	7-301-16076-3	数字信号处理	王震宇	32
37	7-5038-4403-4	电器与 PLC 控制技术	陈志新	38	74	7-301-16931-5	微机原理及接口技术	肖洪兵	32

序号	标准书号	书 名	主 编	定价	序号	标准书号	书 名	主 编	定价
75	7-301-16932-2	数字电子技术	刘金华	30	92	7-301-18493-6	电工技术	张 莉	26
76	7-301-16933-9	自动控制原理	丁 红	32	93	7-301-18496-7	现代电子系统设计教程	宋晓梅	36
77	7-301-17540-8	单片机原理及应用教程	周广兴	40	94	7-301-18672-5	太阳能电池原理与应用	靳瑞敏	25
78	7-301-17614-6	微机原理及接口技术实验指导书	李干林	22	95	7-301-18314-4	通信电子线路及仿真设计	王鲜芳	29
79	7-301-12379-9	光纤通信	卢志茂	28	96	7-301-19175-0	单片机原理与接口技术	李 升	46
80	7-301-17382-4	离散信息论基础	范九伦	25	97	7-301-19320-4	移动通信	刘维超	39
81	7-301-17677-1	新能源与分布式发电技术	朱永强	32	98	7-301-19447-8	电气信息类专业英语	缪志农	40
82	7-301-17683-2	光纤通信	李丽君	26	99	7-301-19451-5	嵌入式系统设计及应用	邢吉生	44
83	7-301-17700-6	模拟电子技术	张绪光	36	100	7-301-19452-2	电子信息类专业 MATLAB 实验教程	李明明	42
84	7-301-17318-3	ARM 嵌入式系统基础与开发教程	丁文龙	36	101	7-301-16914-8	物理光学理论与应用	宋贵才	32
85	7-301-17797-6	PLC 原理及应用	缪志农	26	102	7-301-16598-0	综合布线系统管理教程	吴达金	39
86	7-301-17986-4	数字信号处理	王玉德	32	103	7-301-20394-1	物联网基础与应用	李蔚田	44
87	7-301-18131-7	集散控制系统	周荣富	36	104	7-301-20339-2	数字图像处理	李云红	36
88	7-301-18285-7	电子线路 CAD	周荣富	41	105	7-301-20340-8	信号与系统	李云红	29
89	7-301-16739-7	MATLAB 基础及应用	李国朝	39	106	7-301-20505-1	电路分析基础	吴舒辞	38
90	7-301-18352-6	信息论与编码	隋晓红	24	107	7-301-20506-8	编码调制技术	黄平	26
91	7-301-18260-4	控制电机与特种电机及其控制系统	孙冠群	42					

请登录 [www.pup6.cn](http://www.pup6.cn) 免费下载本系列教材的电子书(PDF 版)、电子课件和相关教学资源。

欢迎免费索取样书, 并欢迎到北京大学出版社来出版您的著作, 可在 [www.pup6.cn](http://www.pup6.cn) 在线申请样书和进行选题登记, 也可下载相关表格填写后发到我们的邮箱, 我们将及时与您取得联系并做好全方位的服务。

联系方式: 010-62750667, [pup6\\_czq@163.com](mailto:pup6_czq@163.com), [szheng\\_pup6@163.com](mailto:szheng_pup6@163.com), [linzhangbo@126.com](mailto:linzhangbo@126.com), 欢迎来电来信咨询。

# 目 录

## 基础篇

第 1 章 编码调制技术概述 .....	3	3.2 网格编码调制(TCM)的编码及译码 .....	50
1.1 数字通信系统 .....	4	3.2.1 自由欧氏距离 .....	50
1.2 纠错编码技术的发展 .....	6	3.2.2 TCM 的编码 .....	51
1.2.1 纠错编码的起源 .....	6	3.2.3 TCM 的译码 .....	54
1.2.2 纠错编码的早期发展 .....	7	3.3 分组码的基本原理 .....	55
1.2.3 近香农限的纠错编码 .....	8	3.3.1 线性分组码的网格 .....	56
1.3 编码调制技术的发展 .....	10	3.3.2 距离度量 .....	57
1.3.1 编码调制技术的提出 .....	10	3.3.3 BCM 的编码 .....	58
1.3.2 编码调制技术的发展历程 .....	11	3.3.4 BCM 的译码 .....	61
本章小结 .....	13	3.4 多层编码系统及其译码 .....	62
习题 .....	13	3.4.1 MLC 系统结构 .....	63
		3.4.2 MLC 码率设计准则 .....	63
第 2 章 先进的信道编解码技术 .....	15	3.4.3 MLC 的经典译码算法 .....	64
2.1 软判决迭代译码 .....	17	本章小结 .....	71
2.1.1 软判决译码 .....	17	习题 .....	72
2.1.2 迭代译码 .....	20	第 4 章 比特交织编码调制的基本原理 .....	74
2.2 Turbo 码的编码及迭代译码 .....	21	4.1 BICM 及 BICM-ID 系统 .....	75
2.2.1 Turbo 的编码 .....	22	4.1.1 BICM 系统结构 .....	75
2.2.2 Turbo 的迭代译码 .....	25	4.1.2 BICM-ID 系统 .....	76
2.3 LDPC 码及其软判决译码 .....	30	4.1.3 BICM-ID 系统的解调译码算法 .....	76
2.3.1 LDPC 码的表示方法 .....	30	4.2 BICM 系统的误码性能分析 .....	78
2.3.2 LDPC 码校验矩阵的构造方法 .....	32	4.3 BICM-ID 系统的 EXIT 图分析 .....	79
2.3.3 LDPC 码的编码 .....	34	4.3.1 BICM-ID 的 EXIT 图仿真 .....	80
2.3.4 LDPC 码的译码 .....	34	4.3.2 EXIT 图用于迭代译码的分析 .....	82
2.3.5 LDPC 码的 EXIT 图分析 .....	40	4.3.3 EXIT 图的其他应用 .....	82
本章小结 .....	44	4.4 BICM 的最佳映射方式 .....	83
习题 .....	44	4.5 BICM-ID 系统的映射方式设计 .....	85
第 3 章 TCM 和 BCM .....	47	4.5.1 欧式距离谱设计准则 .....	85
3.1 多电平调制信道的信道容量 .....	49	4.5.2 互信息设计准则 .....	91
		本章小结 .....	93
		习题 .....	94





## 应用篇

### 第 5 章 LDPC 码作为分量码的多层码

设计 ..... 99

5.1 分量码的构造及性能 ..... 100

5.1.1 SBS-LDPC 码的构造 ..... 101

5.1.2 SBS-LDPC 码的仿真性能 ..... 102

5.2 LDPC-MLC 系统的迭代译码 ..... 103

5.2.1 迭代解调译码算法 ..... 104

5.2.2 算法复杂度 ..... 105

5.3 仿真结果及性能分析 ..... 105

本章小结 ..... 109

习题 ..... 109

### 第 6 章 LDPC-BICM 中的迭代译码 ..... 110

6.1 LDPC-BICM-ID 系统的经典迭代译码 ..... 111

6.1.1 传统结构的迭代解调/译码 ..... 112

6.1.2 联合迭代解调/译码 ..... 115

6.2 LDPC-BICM-ID 系统的改进迭代译码 ..... 116

6.2.1 基于反馈 LLR 均值的迭代译码算法 ..... 117

6.2.2 基于高斯近似的迭代译码算法 ..... 120

6.3 几种迭代译码算法的 EXIT 图分析 ..... 124

6.4 仿真结果与分析 ..... 126

本章小结 ..... 130

习题 ..... 131

### 第 7 章 LDPC-BICM-ID 系统的映射

方案 ..... 132

7.1 CC-BICM-ID 系统的映射方案 ..... 133

7.2 LDPC-BICM-ID 系统的映射方案 ..... 134

7.2.1 各种映射方案下 LDPC-BICM-ID 的 EXIT 图 ..... 135

7.2.2 EXIT 图和性能曲线的对比 ..... 136

本章小结 ..... 139

习题 ..... 139

### 第 8 章 基于 EXIT 图的 LDPC-BICM-MIMO 系统优化 ..... 140

8.1 无线信道的特性及建模 ..... 141

8.1.1 移动通信信道的基本特性 ..... 141

8.1.2 多径衰落信道的物理特性 ..... 142

8.1.3 无线信道的建模 ..... 143

8.2 多天线无线信道的特性及建模 ..... 144

8.2.1 MIMO 系统模型 ..... 145

8.2.2 多天线无线信道的建模 ..... 145

8.3 空间复用及空时编码 ..... 146

8.3.1 空间复用技术 ..... 147

8.3.2 空时编码技术 ..... 148

8.4 LDPC-BICM-MIMO 系统 ..... 149

8.4.1 BICM-MIMO 系统模型 ..... 150

8.4.2 检测算法 ..... 151

8.5 LDPC-BICM-MIMO 系统的优化方案 ..... 152

8.5.1 解调器和译码器的 EXIT 图分析 ..... 152

8.5.2 两种优化方案 ..... 153

8.5.3 优化方案的 EXIT 分析和性能仿真 ..... 154

本章小结 ..... 156

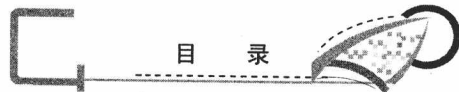
习题 ..... 156

### 第 9 章 多元域 LDPC 码在 BICM-OFDM 系统应用 ..... 158

9.1  $GF(2^p)$  LDPC 码及其译码 ..... 159

9.1.1 多元域码校验矩阵的非零元选取方法 ..... 160

9.1.2 多元域软判译码算法 ..... 160



## 目 录

9.2 多元域 LDPC 编码的 OFDM	
系统 .....	164
9.2.1 系统模型 .....	164
9.2.2 多元域 LDPC 码的编码 ...	165
9.2.3 MPSK 解调器软信息的 提取 .....	165
9.2.4 信道估计 .....	166
9.2.5 仿真结果与分析 .....	166
本章小结 .....	168
习题 .....	168
<b>参考文献</b> .....	169



# 基础篇





# 第1章

## 编码调制技术概述

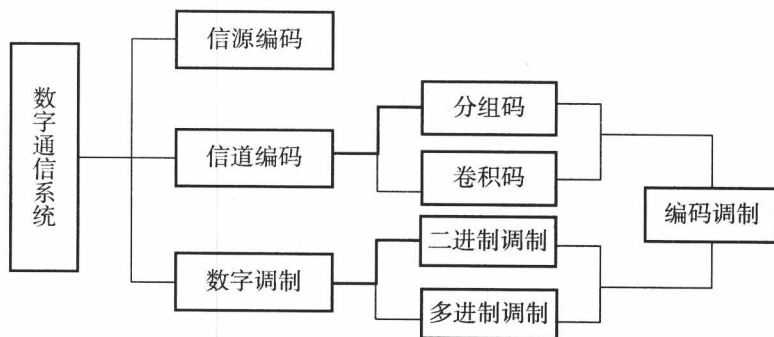


### 学习目标

- 掌握数字通信系统的结构
- 了解数字通信系统的性能指标
- 了解信道编码及调制的作用
- 掌握纠错码纠错的基本原理
- 了解纠错码技术的发展历程
- 掌握编码调制技术的提出和原理
- 了解编码调制技术的发展历程



### 本章知识结构





**案例 1:** 在日常的通信系统中, 信息能否实现完整无误的传输?

关于这个问题, 在香农的信息论出现之前, 人们一直认为在有噪声的信道上实现可靠传输是不可能的, 因为唯一的方法就是将传输速率降为零, 这意味着不传输数据。然而事实并非如此。1948 年, 32 岁的电子工程师及数学家香农(Claude Shannon)发表了题为《通信的数学理论》的著名论文, 首次否定了上述观点。在香农定理中, 他给出了有噪声信道下实现可靠通信的信息传输速率上限, 即信道容量。他指出, 信息传输时, 只要传输速率低于信道容量, 就可以实现完全无误的传输; 另外, 实现可靠通信的重要途径就是信道编码, 并给出了实现无误传输的信道编码方式的存在性证明, 从而奠定了信息理论的基础。从此以后, 通信界研究人员都试图寻找能够实际应用的逼近香农限的编码方案。

**案例 2:** 香农定理指出, 信道编码是在有扰信道中实现可靠通信的重要途径。但是, 信道编码在提高传输可靠性的同时, 冗余比特的引入又会引起频带的扩展, 造成信息传输速率的下降。如何解决这个问题, 即是否能找到这样一种编码技术, 在提高传输可靠性的同时, 又不会造成传输效率的降低?

20 世纪 70 年代前, 人们考虑采用非二进制调制的方法来抵消信道编码带来的频带扩展。但是直接将信道编码和高阶调制简单结合, 与相同频谱效率的未编码系统相比, 性能上并没有多少提高。直到以 TCM 技术产生为标志的编码调制技术的出现, 才真正解决了这一问题。

## 1.1 数字通信系统

人类社会的发展离不开通信技术, 同时, 社会的进步又有力地推动了通信技术的发展。近 50 年来, 由于信息需求的增加, 信息论、控制论等系统工程理论的发展以及微电、计算机、射频、光纤等技术的进步, 使通信技术发生了日新月异的变化。

通信的目的是在有干扰和噪声的环境中利用尽可能少的带宽、功率资源来可靠地传输信息。通信系统是指传递信息所需的一切设备和技术。按照传递信息的不同形式, 通信系统可以分为模拟通信系统和数字通信系统。由于数字通信有模拟通信无法比拟的优势, 如抗干扰能力强、差错可控、易于集成、方便和各种数字终端接口以及易于加密等, 因此数字通信更能适应现代社会对通信技术越来越高的要求。

通信系统有许多性能指标: 有效性、可靠性、经济性、保密性、标准性、可维护性等。其中, 有效性和可靠性是评价一个通信系统优劣的两个主要性能指标。有效性指的是信息的传输速率问题, 即单位时间能够传输多少信息, 通常用传信率(bps)表示, 系统中更准确的是用频带利用率即单位带宽下的传信率(bps/Hz)来衡量; 而可靠性是指接收信

息的准确程度,即信息是否能够无误地从接收端获得,通常用误信率和误码率来衡量。这两个指标相互矛盾又对立统一,通常还可以进行互换。

在实际应用中,由于噪声的存在,信息在信道中传输会不可避免地发生错误。那么在有扰信道中是否能实现通信的有效性和可靠性呢?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,因此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为零。然而事实并非如此,1948年,32岁的电子工程师及数学家 Claude Shannon 发表了题为《通信的数学理论》的著名论文,首次否定了上述观点。在 Shannon 定理中,他给出了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,为在有扰信道中实现可靠通信指明了方向——信道编码,从而奠定了信息理论的基础。

Shannon 在论文中将通信系统分为 5 个部分,分别为:信源、编码器、信道、译码器和信宿。在这 5 个部分中,编/译码器的实现是上述有效性与可靠性这对矛盾的集中体现。由于信源和信道的统计特性不同,为了便于分析和研究,编/译码器又被进一步分割为信源编/译码器、信道编/译码器和调制/解调器,图 1.1 给出了数字通信系统的框图模型。

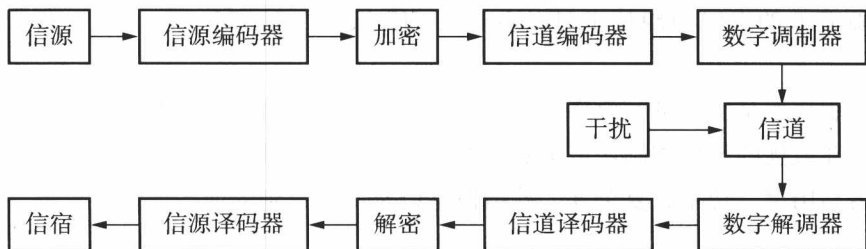
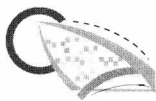


图 1.1 数字通信系统框图模型

如图 1.1 所示,发送端包含 4 个模块:信源、信源编码器、信道编码器和数字调制器。加密可看成是信源编码的一部分。信源编码是用二进制或多进制序列表示信源的原始符号,其目的在于减少码元数目和降低码元速率,提高系统有效性,因此也称为数据压缩。

信道编码(纠错编码)的目的是降低数字传输的误码率,进而提高通信系统的可靠性。实现方法是通过在信息序列中按一定规则添加一定的冗余码元形成具有检错和纠错功能的码字,在接收端按发端相应的规则对接收到的序列进行译码,检错或者纠错并恢复原始序列。

数字调制技术是将基带信号转变成传输信号的技术。它不仅可以将信号的频谱搬移到希望的位置上以适合信道的传输,而且还可以通过多进制调制增加信息的传输速率,从而提高通信系统的频带利用率。经典调制技术(幅度调制、相位调制)的功能主要是频谱搬移;现代调制技术可进一步延拓为空时编码、扩频调制和正交频分复用(OFDM)等。由于调制技术的原理在“通信原理”课程中有非常详细的阐述,因此本书不再赘述。



在信息传输过程中，噪声是影响通信系统可靠性的重要因素，为了降低噪声对信号的影响，人们很自然地想到了构建可靠的信道。但是，通过构建可靠的信道来降低噪声的影响在很多情况下无法实现，于是人们开始寻找别的出路。经过研究，人们发现信道编码及数字调制这两大技术是解决通信系统有效性和可靠性这对矛盾的关键，也是实现通信系统经济性的必由之路，所以在随后的几十年中，越来越多性能优异的信道编码和调制技术被人们发现，通信理论得到了空前的发展。

在数字通信系统中，调制解调和纠错编码是两项主要技术，但过去一般是独立进行研究。纠错编码能够在不增加功率的条件下降低误码率，但代价是增加占用的带宽，即频带利用率下降。同样，在误码率一定的情况下，多进制调制可以提高带宽的利用率，但其代价是增大信号的平均功率，即降低功率的利用率。

随着现代通信技术的快速发展，人们对通信系统要求越来越高，期望能够实现高数据率、高可靠性的信息传输。但现实的通信环境具有复杂性和多样性，导致传输信道中存在衰落、热噪声、符号间干扰、多用户干扰、多径传输和功率限制等问题。因此，如何同时节省功率和带宽成为通信领域的研究重点，即在带宽和功率受限的信道中，为了不降低有效传输速率的前提下进行有效的编码，应将编码与调制作为一个整体考虑，即所谓的带宽有效的编码调制技术(Bandwidth Efficient Coded Modulation)目前成为研究的热点。

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，以逼近香农限。联合编码调制的设计需要考虑诸多因素，如传输频谱利用率、功率、复杂度、差错概率以及需要达到的业务质量要求等。

## 1.2 纠错编码技术的发展

### 1.2.1 纠错编码的起源

当人们在阅读文章的时候，如果某些错别字影响了理解，人们通常可以通过上下文很容易地将这些错别字纠正过来。人们之所以能够在存在错误的情况下无误地理解文章，其原因在于人类的自然语言存在大量的冗余，而且这些冗余和文章的本质含义存在一定的关系。语言的这种冗余性使得语言的压缩效率很高，但语言的纠错能力也正是来自于这些冗余的信息。纠错编码的思想正是基于冗余的思想。在数字通信当中，对于一串0、1的序列，没办法判断哪些比特出现了传输错误。人们无法对原始的数字序列直接检测和纠正错误，所以需要人为地在序列中添加一些冗余的信息。如果在传输过程中出现错误，那些添加的冗余信息可以帮助人们检测和纠正错误。纠错编码在数字通信中的作用，就是检测和纠正这些传输错误。





由于通信系统的资源有限,人们在希望通过添加冗余纠正错误的同时,又希望所添加的冗余信息尽量少。如何解决这一对矛盾,即用尽可能少的添加冗余信息的同时,获取最大化纠正错误信息的能力,是纠错编码研究的终极目标。

在一定的信道条件下,究竟应该添加多少冗余信息才能够使得接收端无误地恢复信源信息?是不是有这样一个极限存在?1948年,香农在《通信的数学理论》一文中回答了这个问题。他指出:对于一个信道容量为 $C$ 的有扰信道,当在信源编码后的数据流中添加一定数量的冗余信息,使得信源信息所占的比例 $R$ 不大于信道容量 $C$ ,则只要码长足够长,总会存在一种编译码方式,使得传输错误概率任意小。给定信源产生信息的速率 $R$ ,纠错编码能够有效纠正错误所需要的最小比特信噪比,称为香农限。香农的这一理论称为香农第二定理,即有扰信道编码定理,该定理奠定了编码理论研究的基石,为信道编码指明了方向。但是该定理仅是一个存在性定理,并没有给出信道编码的具体构造方法。于是自从香农第二定理创立以来,如何构造能够实际应用的逼近香农限的编码方案和译码算法就成了纠错编码领域研究的最终目标。

### 1.2.2 纠错编码的早期发展

纠错编码主要分为分组码和卷积码两大类。线性分组码是发展最早的一类纠错码。线性分组码是一种以代数中的群论、域论等理论作为数学基础,利用各种代数几何方法设计的纠错码。例如,格雷码、汉明码、循环码和 BCH 码等码都属于线性分组码。分组译码算法多是采用大数逻辑译码和捕错译码。

20世纪40年代末,美国数学家汉明(Hamming)在进行数学计算的时候,为了避免计算机出现错误而停止工作,编制了一个能够使计算机自动检测和纠正数据错误的程序。他将输入数据每4个分为一组,通过二元域中的“模2加”运算来产生3个多余的校验比特,构成7个比特的码字。计算机根据这7个比特之间的相互关系,来检测码字中是否有错误发生,并能纠正一个独立的错误比特。这种编码方法就是著名的(7,4)汉明码,编译码方法都很简单。但是,汉明码码率较低,只能纠正码字中的单个错误。

为了进一步提高纠错能力,戈莱(Golay)在汉明码基础上提出了二元戈雷码和三元戈雷码。二元戈雷码是一种能够纠正3个随机错误的码,码长为23,信息比特数为12;而三元戈雷码则是将每6个三元符号作为一组系统符号,产生5个三元的校验符号,可以纠正两个随机错误。1954年,密勒(Muller)从线性空间角度出发,提出一种能纠正多个错误的码,同年里德(Reed)给出了它的大数逻辑译码算法,因此这种码被称为RM码。汉明码、戈雷码和RM码都是线性分组码。

在RM码提出之后,Prange于1957年提出了循环码的概念,这类码是一类特殊的线性分组码,它的码字经过循环移位以后仍然是一个有效码字。循环码具有许多特殊的代数性质,这些性质有助于按照要求系统地构造循环码,并可以采用带反馈的移位寄存器实现其编码,故可以大大简化编译码结构。1959年,法国的Hocquenghe与美国的Bose和