

5G移动通信中的信道编码

Channel Coding for 5G

白宝明 孙韶辉 王加庆 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



国之重器出版工程

网络强国建设

5G 技术与应用丛书

5G 移动通信中的信道编码

Channel Coding for 5G

白宝明 孙韶辉 王加庆 著

CU000407 10

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书系统论述了 5G 移动通信系统中的 LDPC 码与 Polar 码等信道编码技术,包括码设计、构造、编译码算法等。本书首先介绍了信道编码的基本原理与移动通信中典型的编码方法,讨论了编码系统性能限的计算;然后重点论述了 LDPC 码与 Polar 码的编码原理、译码算法与构造方法,介绍了 3GPP 确定的 5G 数据信道 NR LDPC 码的设计、性能与编码链路组成,以及 5G 控制信道编码标准、Polar 码的设计与速率适配方法等。为便于读者开发与使用 5G 系统,本书附录给出了 NR LDPC 码、Polar 码的技术规范与性能曲线。

本书适合信息与通信工程领域的工程技术人员与有关专业的本科生和研究生阅读,对从事无线通信与信道编码研究的人员也有重要的参考价值。

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

5G 移动通信中的信道编码 / 白宝明, 孙韶辉, 王加庆著. —北京: 电子工业出版社, 2020.3
ISBN 978-7-121-38261-1

I. ①5… II. ①白… ②孙… ③王… III. ①信道编码 IV. ①TN911.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 020002 号

责任编辑: 米俊萍 特约编辑: 武瑞敏

印 刷: 固安县铭成印刷有限公司

装 订: 固安县铭成印刷有限公司

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

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 24.25 字数: 489 千字

版 次: 2020 年 3 月第 1 版

印 次: 2020 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: mijp@phei.com.cn。

《国之重器出版工程》

编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

于 全 中国工程院院士

王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授

王建民 清华大学软件学院院长

王哲荣 中国工程院院士

王 越 中国科学院院士、中国工程院院士

尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授

邓宗全 中国工程院院士

甘晓华 中国工程院院士

叶培建 中国科学院院士

朱英富 中国工程院院士

朵英贤 中国工程院院士

邬贺铨 中国工程院院士

刘大响 中国工程院院士

刘怡昕 中国工程院院士

刘韵洁 中国工程院院士

孙逢春 中国工程院院士

苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
原机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士



- 屈贤明** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐** “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成** 中国工程院院士
- 闻雪友** 中国工程院院士
- 徐德民** 中国工程院院士
- 唐长红** 中国工程院院士
- 黄卫东** “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥** 中国工程院院士
- 黄 维** 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰** 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏** “长江学者奖励计划”特聘教授



序一

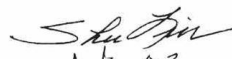
自 20 世纪 80 年代初第一代模拟移动通信商用系统开始，人们经历了第二代（2G）到第四代（4G/LTE）数字移动通信系统的演进，即将进入第五代（5G）移动通信。信道编码作为支撑数据有效且可靠传输的物理层关键技术，经历了从卷积码到 Turbo 码的阶跃性发展，即将转向 LDPC 码和 Polar 码，因为 5G 需要更高的传输可靠性与更灵活的传输速率。当然，这也得益于 LDPC 码和 Polar 码具有逼近容量限的性能与较低的编译码复杂度。

本书是关于 5G 移动通信中所使用的现代信道编码的著作，系统总结了 5G NR LDPC 码的设计方法与性能，以及 Polar 码的编码方案等。本书的内容介绍由浅入深，循序渐进，并且兼顾了编码理论、算法与实际应用。本书首先面向无线通信应用，介绍了信道编码基础知识与典型编码方法，然后深入讨论了 5G NR LDPC 码的设计与性能、数据信道编码链路的组成，以及 Polar 码的原理与 5G 控制信道 NR Polar 码的设计等。

本书第一作者西安电子科技大学的白宝明教授长期致力于信道编码的教学与科研工作，曾于 2005 年作为访问学者在加州大学戴维斯分校（UC Davis）从事信道编码研究，回国后的科研工作也主要是面向无线通信的编码理论与编码调制系统设计。而另外两名作者，电信科学技术研究院有限公司的孙韶辉研究员和王加庆高级工程师，长期从事移动通信系统的实际研发及编码标准化研究工作。我 2016 年到中国访问时，注意到本书作者正在开展 5G 编码方面的合作研究；2017 年欣闻他们合作设计的 LDPC 码入选 3GPP 国际标准，所提出的 Hash-Polar 码也曾作为 Polar 编码的候选方案之一。本书既是他们在 5G 信道编码领域深入合作的结晶，也是高校科研与行业应用需求结合的典范。



目前国际上专门介绍 5G 新型编码设计的著作很少。我相信本书对于 5G 系统的研发及其他无线系统的信道编码设计等均具有重要的参考价值。


林舒

于美国加州大学戴维斯分校

2019 年 2 月



序二

自 21 世纪初以来，以互联网和移动通信为基础的移动互联网和物联网得到迅猛发展。相应地，其对移动通信系统的各项性能指标也提出了越来越高甚至苛刻的要求。人们希望设计与制造出能适应各种复杂移动通信环境和极其多样化移动终端情况下的移动通信系统设备，使其比现有第四代（4G）移动通信系统具有更高的数据传送速率、更高效的频谱利用率，以及极高的信息传输可靠性和更为严格的安全性。不仅如此，所设计和制造的系统设备应该更为节能环保，并能适应各种多样化终端设备，这就是目前广为研究并已开始设计、制造和试点应用的第五代（5G）移动通信系统。

综合利用已有的各种最新科技成果和技术，设计出能满足 5G 移动通信的各种苛刻性能指标的 5G 系统设备，是对有关科技界和工程界技术人员的极大挑战。为了保证 5G 系统的性能，必然要从移动通信的各个方面、各个子系统进行综合的分析与考虑。其中，应用已有的各种新的科研成果是保证系统极高性能指标的必然结果。由 Shannon 信道编码定理可知，要保证通信系统极高的信息传输可靠性（极低的误码率）和高频谱利用率，只有利用信道编码才能做到。因此在移动通信系统中，信道编码便成为必须采用的关键技术之一。

本书的作者西安电子科技大学的白宝明教授长期致力于信道编码的教学与科研工作，对信道编码有着深入的研究，具有深厚的理论知识。而另外两名作者，电信科学技术研究院有限公司（大唐电信）的孙韶辉研究员和王加庆高级工程师，他们长期从事移动通信系统的实际研发及标准化研究工作，他们与白宝明教授在信道编码方面有着长期的合作。他们曾为国际标准化组织提出了有关在 5G 中应用的部分信道编码技术方案与标准，本书可以说是他们合作的结晶。



本书是专门针对 5G 移动通信中所使用的现代信道编码的专著，着重介绍了现代编码中的 LDPC 码与 Polar 码的编译码原理与构造方法，以及面向 5G 系统数据信道的 LDPC 码设计方法与性能曲线，给出了 5G 信道编码标准等。并且为了让读者更好地学习现代编码技术，本书也介绍了信道编码的基本原理与方法、必要的数学基础及某些经典码的编译码原理等。

在国内外，虽然目前已出版了许多有关信道编码方面的著作，但是系统论述 5G 编码设计的，本书是首次。本书在叙述中由浅入深，条理清晰，取材新颖，有比较深的工程背景，因此特别适合有关的工程技术人员学习参考，对大学有关专业的本科生和研究生也有重要的参考价值，甚至对初学者来说也是一本很好的书籍。

大专院校教师与有关研发单位工程技术人员合作，取长补短共同完成有关任务，是今后教学科研的方向之一。在这方面，本书的作者们无疑迈出了坚实的一步，衷心祝贺他们的合作成果！并预祝他们今后在祖国的通信事业中取得更多的成果，做出更杰出的贡献！

于西安电子科技大学

2018 年 12 月



前言

随着智能移动设备的广泛应用，面向移动互联网和物联网的第五代（5G）移动通信系统成为学术与工业界最大的研究领域之一。为了支持“万物互联”，5G将通过采用各种先进的空口技术来全面实现5G的关键性能参数指标。信道编码是5G新空口（NR）的关键技术之一。随着3GPP关于5G NR标准化的R15版本的冻结，3GPP完成了eMBB场景信道编码研究与标准化工作。二元LDPC码被推荐为5G NR数据信道的编码方案，而Polar码被作为控制信道的主要编码方案。从此，5G移动通信系统进入了商业化的新阶段。

在3GPP关于信道编码的标准化过程中，西安电子科技大学和电信科学技术研究院有限公司联合参与了相关研究工作。为了使广大工程技术人员与学生及时了解5G NR信道编码技术，以便更好地研究、开发与使用5G移动通信系统，我们在多年编码研究基础上，综合相关资料，结合我们自己的5G编码研究成果，撰写了本书。本书反映了当前5G NR编码的研究状况。

本书的撰写由浅入深。作为信道编码技术基础，本书第1章和第2章首先介绍分组码、卷积码和编码系统性能参数等基本知识，然后叙述移动通信网络中当前应用的几种编码方法，重点介绍4G系统中的Turbo码、咬尾卷积码，讨论编码系统性能限的计算方法、编码与扩频的关系等。在此基础上，第3章和第4章分别介绍LDPC码的编译码原理与构造方法，以及3GPP确定的5G eMBB数据信道LDPC码的设计与性能、速率适配与编码链路组成；第5章和第6章分别讨论Polar码的编译码原理与构造方法，以及5G控制信道编码标准、上下行控制链路的Polar码设计与速率适配方法等；附录介绍作为编码数学基础的有限域基本知识，以及3GPP标准中关于5G LDPC码、Polar码的技术规范与性能曲线，以便于工程技术人员查阅与使用5G编码。



本书主要是针对信息与通信工程领域的研究生及工业界的研发人员撰写的。第 2 章关于编码技术基本知识的介绍使得信道编码的入门者也可以较容易地学习 5G NR 编码技术。

本书的完成,首先要感谢我们的老师林舒(Shu Lin)教授和王新梅教授。在他们对 5G 编码研究的过程中,他们给予了许多鼓励与支持,以及对我们的研究工作的指导。他们在学术上孜孜不倦、不断创新的精神时刻激励着我们前行。

在此也要感谢我们研究团队的同事和研究生们,在本书的撰写过程中,他们给予了很大的帮助。他们帮忙排版、仿真、校对和整理图片,同时本书中也包含了很多他们的研究结果。特别感谢博士生李华安,他参与撰写了第 3 章、第 4 章和附录 B、附录 C 的部分内容,制作了书中的部分图表,并对书稿的输入与 LaTeX 排版提供了帮助。我们也同时感谢博士生穆锡金、张冀和陈佩瑶,硕士生徐旻子和任兆丰,其中穆锡金参与了第 3 章速率兼容 LDPC 码部分的撰写,张冀参与了第 4 章 5G LDPC 编码链部分的撰写,陈佩瑶参与了第 5 章 Polar 编码调制部分的撰写,徐旻子参与撰写了第 5 章和第 6 章的部分内容,任兆丰参与搭建了第 6 章 Polar 码的仿真平台。对本书撰写有贡献的学生还包括博士生冯丹和张睿,硕士生平磊和何庆黎,以及徐恒舟博士和朱敏博士等,在此对他们表示衷心的感谢。最后,本书第一作者也同时感谢中山大学的马啸教授长期以来的合作与支持,书中的部分内容包含了我们的合作研究成果。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(61771364)的支持,特此致谢。我们同时也要感谢综合业务网理论及关键技术国家重点实验室(西安电子科技大学)、无线移动通信国家重点实验室(电信科学技术研究院有限公司)和新一代移动通信无线网络与芯片技术国家工程实验室多年来对我们信道编码研究的支持。

最后,感谢电子工业出版社的米俊萍编辑,她为本书的出版做了大量的工作。

对本书的撰写,我们虽然竭力而为,但限于时间和写作水平,书中可能存在不妥甚至错误之处,敬请读者批评指正。

作者
2018 年 10 月



目录

第1章 绪论	1
1.1 第五代移动通信系统	1
1.1.1 5G 愿景与性能指标	4
1.1.2 5G 技术路线及无线传输关键技术	9
1.1.3 5G 研究和标准化进展	11
1.2 信道编码技术的发展及其在移动通信中的应用	14
1.2.1 信道编码技术的发展	14
1.2.2 信道编码技术在移动通信中的应用	18
1.3 5G 中的信道编码方法与标准化	21
第2章 信道编码基础及典型编码方法	23
2.1 数字通信系统模型	23
2.1.1 信号星座与信号映射器	26
2.1.2 5G 通信系统中的调制信号映射	26
2.2 线性分组码	27
2.2.1 线性分组码的定义与最小汉明距离	27
2.2.2 生成矩阵和校验矩阵	28
2.2.3 对一个线性码简单修改而构造新码	31
2.3 译码方法与性能度量	32
2.3.1 最佳译码	32
2.3.2 线性分组码的检错	34
2.3.3 对数似然比	35
2.3.4 编码系统性能度量	36



2.4	几类常用的分组码	37
2.4.1	重复码和单奇偶校验码	37
2.4.2	循环冗余校验 (CRC) 码	39
2.4.3	Simplex 码	42
2.4.4	Hadamard 矩阵与 Hadamard 码	42
2.5	Reed-Muller 码	43
2.5.1	构造方法	44
2.5.2	一阶 RM 码的编码与译码	46
2.6	卷积码	49
2.6.1	卷积码的概念与网格图表示	49
2.6.2	卷积码的最大似然译码: Viterbi 算法	51
2.6.3	卷积码的逐符号 MAP 译码: BCJR 算法	55
2.6.4	Max-Log-MAP 译码算法	64
2.7	咬尾卷积码	67
2.7.1	编码方法与 LTE 系统中的咬尾卷积码	67
2.7.2	咬尾卷积码的译码算法	70
2.8	Turbo 码	76
2.8.1	Turbo 编码原理	76
2.8.2	Turbo 码的迭代译码	82
2.8.3	面向 5G 应用的增强型 Turbo 码	84
2.9	编码系统性能限	88
2.9.1	频谱效率	88
2.9.2	信噪比	89
2.9.3	信道容量	90
2.9.4	有限码长性能限	97
2.10	编码与扩频	101
2.10.1	扩展频谱系统	101
2.10.2	编码与扩频的信道容量	104
2.10.3	软扩频	105
第 3 章	LDPC 码的编译码原理与构造方法	107
3.1	LDPC 码的概念与因子图表示	107
3.1.1	LDPC 码的定义与矩阵表示	107
3.1.2	因子图表示	110



3.1.3	度分布	113
3.2	LDPC 码的编码	114
3.2.1	QC-LDPC 码的编码	115
3.2.2	单对角结构 LDPC 码的编码	117
3.2.3	双对角结构 LDPC 码的编码	118
3.2.4	双对角结构 QC-LDPC 码的编码	119
3.3	LDPC 码的译码	121
3.3.1	和积算法基本原理	122
3.3.2	概率域上的和积算法	123
3.3.3	对数域上的和积算法	126
3.3.4	低复杂度的简化和积算法	130
3.3.5	分层译码算法	133
3.4	LDPC 码的分析与设计	135
3.4.1	密度进化	135
3.4.2	高斯近似	137
3.4.3	外信息转移 (EXIT) 图	140
3.4.4	基模图码的 EXIT 技术	146
3.4.5	LDPC 码的设计	148
3.5	LDPC 码的构造	150
3.5.1	基于计算机的构造: PEG 算法	150
3.5.2	基模图 LDPC 码的构造	152
3.5.3	LDPC 码的叠加构造	156
3.5.4	基于代数的 QC-LDPC 码叠加构造	160
3.6	速率兼容 LDPC 码	167
3.6.1	RC-LDPC 码的基本概念	167
3.6.2	基于代数和图理论结合的方法构造 RC-LDPC 码	168
3.6.3	基于代数辅助方法构造信息位长度和码率同时兼容的 LDPC 码	174
3.7	LDPC 编码调制	175
3.7.1	LDPC-BICM 系统	175
3.7.2	星座成形	178



第4章	5G 数据信道 LDPC 编码方案	187
4.1	5G 数据信道编码的需求与标准化建议	187
4.2	5G LDPC 编码参数与码设计	191
4.2.1	校验矩阵的基本结构	192
4.2.2	矩阵散列	195
4.2.3	基矩阵设计	196
4.2.4	循环移位矩阵的设计	198
4.3	5G LDPC 码的构造	200
4.3.1	可支持多个移位尺寸的准循环 LDPC 码	200
4.3.2	5G LDPC 码循环移位矩阵的代数辅助构造	204
4.4	5G LDPC 码编译码方法与性能	211
4.4.1	5G LDPC 码的编码	211
4.4.2	5G LDPC 码的译码	216
4.4.3	基图选择	218
4.5	5G LDPC 编码链	221
4.5.1	CRC 添加	223
4.5.2	码块分段	225
4.5.3	速率适配	227
4.5.4	码块内交织	230
第5章	Polar 码的编译码原理与构造方法	233
5.1	Polar 码的概念与基本原理	233
5.1.1	信道极化	234
5.1.2	Polar 码	243
5.2	Polar 码的编码	244
5.3	Polar 码的译码	246
5.3.1	SC 译码算法	246
5.3.2	SCL 译码	253
5.3.3	因子图表示与 BP 译码	258
5.4	Polar 码的构造	262
5.4.1	Bhattacharyya 参数构造	263
5.4.2	蒙特卡罗构造	263
5.4.3	密度进化构造	264
5.4.4	高斯近似构造	265