



★ ★ ★
“十三五”

国家重点图书出版规划项目



国之重器出版工程

网络强国建设

5G 丛书

Channel Coding for New Radio of 5th Generation Mobile Communications

5G-NR 信道编码

徐俊 袁弋非 著

国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT



国家重点图书出版规划项目

5G-NR 信道编码

Channel Coding for New Radio of
5th Generation Mobile Communications

徐俊 袁弋非 

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

5G-NR信道编码 / 徐俊, 袁弋非著. — 北京: 人民邮电出版社, 2018.4

(国之重器出版工程·5G丛书)

ISBN 978-7-115-47960-0

I. ①5… II. ①徐… ②袁… III. ①信道编码 IV. ①TN911.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第036663号

内 容 提 要

本书以 5G 主要应用场景和性能指标为基础, 对适合 5G 的几大编码技术逐一进行系统的描述。本书介绍的编码技术主要包含低密度校验码 (LDPC)、极化码 (Polar Code)、咬尾卷积码 (TBCC) 和 Turbo 码。除此之外, 对外层编码和其他的高级编码都有专门的章节介绍。每一种编码技术的描述包括码的结构、编解码算法、性能仿真和算法复杂度分析。

本书适合从事无线通信的科技人员、大学授课教师和研究生阅读, 同时也适合作为工程技术及科研教学的参考书。

-
- ◆ 著 徐 俊 袁弋非
责任编辑 李 强
责任印制 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
固安县铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 720×1000 1/16
印张: 19.25 2018 年 4 月第 1 版
字数: 342 千字 2018 年 4 月河北第 1 次印刷
-

定价: 98.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

《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	李东	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 言

数字信号的有效可靠传输离不开信道编码，前几代蜂窝通信系统中的信道编码基本上为欧洲和美国公司所垄断。例如，第二代中的卷积码是由麻省理工学院（MIT）所发明，卷积码与美国 MIT 教授发明的一种分组码：Reed-Solomon 码，形成经典组合，多次创下性能纪录。第三代的信道编码是 Turbo 码，由法国的研究人员发明，后经欧洲、日本和美国公司的完善，性能大大超越了卷积码。第四代中的主流标准 LTE 沿用 Turbo 码，相对 3G Turbo 的增强仍由欧美公司主导。这种局面在第五代蜂窝通信得到彻底改观。对于 5G 最重要的两种信道编码：LDPC 码和极化码（Polar Code），中国的系统设备商起了巨大的作用。在相应的关键技术点和会议提案方面，中国厂商的贡献非常可观，撑起了 5G 信道编码的半边天。5G 第一阶段的信道编码已在 2017 年 12 月基本完成，此书在这个时间出版是十分及时的，不仅服务于 5G 系统的广大开发人员，也体现了中国在前沿科技上的自信。

信道编码是一个“很专”的领域，需要艰深的数理基础和相对特别的研究分析手段，这与数字通信的其他领域有很大的不同。信道编码的书容易流于两种极端，一种是包含大量的数学公式和推导，尽管内容系统严谨，但晦涩难懂，只有专搞信道编码的人才能理解；另一种是“大话”式的演义，极少公式，缺乏严格抽象的表达，读者虽能了解粗枝大叶，但对信道编码的设计精髓并未准确把握。由于这两种极端，信道编码的技术人员只能去查看枯燥的标准协议，遇到问题也很难通过一些直觉方法来解决，降低了研发效率。本书在这两个极端之间做了较好的兼顾，从编码的基本概念入手，采用适当数量的公式和图表，深入浅出地阐述了 5G 信道编码，尤其是 LDPC 码和极化码的主要设计思想和



优化方向，更好地服务工程开发人员。其中的公式和一些理论分析对大专院校和研究单位的师生也比较适合。

中国通信标准化协会副理事长兼秘书长
杨泽民

2018年1月



前言

通信技术日新月异。2007年9月，3GPP推出了基于OFDM和MIMO的第四代移动通信技术4G-LTE。2010年12月，LTE通过载波聚合和更多的天线等技术增强为LTE-Advanced。2012年，LTE-Advanced进一步增强了高阶调制等技术。这时候，3GPP在考虑下一代移动通信技术了。经过多年的酝酿，3GPP在2016年3月通过了对第五代移动通信技术（5G）新空口（NR）的研究立项（SI），该项目于2017年3月进入协议标准化阶段。经过各公司和研究团体的辛勤工作，3GPP在2017年12月RAN#78次会议上完成了5G-NR的第一个版本（eMBB部分）。

相对4G-LTE，5G-NR引进了较多的新技术（LDPC码、Polar码、大规模MIMO、非正交多址NOMA等）。众所周知，为达到运营商的要求，3GPP对各种技术的选取相当严格，甚至近乎苛刻。1993年发明的Turbo码，在速率较低的3G-WCDMA和4G-LTE尚可使用，但在大带宽、高速率应用中（如20Gbit/s或更高，这是5G-NR的目标）明显逊于LDPC码。1955年发明的卷积码，已历经三代蜂窝通信（2G、3G、4G）。但其解码性能不具有竞争力，也只好让位于新近提出的Polar码。在将来（如6G），移动通信技术还会进一步发展，这可能会引进其他的编码技术。鉴于此，本书描述了这些编码方案的原理、应用、复杂度、性能等。

本书的特色是，首先，书的内容不仅有对5G-NR协议的解读，也有学术理论介绍；不仅面向无线通信的工程技术人员，同时可供科研院所的老师和学生作参考。其次，本书有丰富的理论性能分析和计算机仿真结果。再次，本书涵盖的面较广，包括工业界主流的信道编码方式以及学术界比较关注的新型编码



方式。考虑 LDPC 码和 Polar 码在 NR 中的广泛应用，本书对这两类信道编码做了较为详尽的描述。

本书由中兴通讯资深编码专家徐俊、袁弋非博士等人编著。其中，第 1 章（背景介绍）主要由袁弋非撰写；第 2 章（LDPC）主要由徐俊、袁弋非、黄梅莹、李立广、许进博士撰写；第 3 章（Polar 码）主要由彭佛才博士、徐俊、陈梦竹、袁弋非、谢赛锦撰写；第 4 章（卷积码）和第 5 章（Turbo 码）主要由袁弋非、许进、徐俊撰写；第 6 章（外码）主要由徐俊、李立广撰写；第 7 章（高级编码）主要由袁弋非、陈梦竹、彭佛才、徐俊撰写。全书由袁弋非和徐俊统筹规划。另外，其他一些同事以及清华大学的彭克武老师也提出了一些意见、建议或提供了技术支持，在此一并表示感谢！

另外，特别感谢国家“863”计划专题项目课题《Gbps 无线传输自适应、高效高速编码技术》（编号 2006AA01Z271）和国家重大专项课题《IMT-Advanced 开放性关键技术研究（编码调制与自适应）》（编号 2009ZX03003-011-04）的大力支持！同时感谢“IMT-2020(5G) 新型调制编码专题组”一些成员单位的技术贡献！

作者

2017 年 12 月于深圳



目 录

第 1 章 背景介绍	001
1.1 前几代移动通信的演进	003
1.2 第五代移动通信系统 (5G-NR) 的系统要求	005
1.2.1 主要场景	005
1.2.2 关键性能指标和评估方法	007
1.2.3 调制编码的性能仿真参数	009
1.3 信道编码的主要方案	009
1.3.1 低密度校验码 (LDPC)	009
1.3.2 极化码 (Polar Code)	010
1.3.3 卷积码 (Convolutional Code)	010
1.3.4 Turbo 码	011
1.3.5 外层编码 (Outer Code)	011
1.3.6 其他高级编码方案	012
1.4 本书的目的和篇章结构	013
参考文献	014
第 2 章 低密度校验码 (LDPC)	017
2.1 LDPC 的产生和发展	018
2.2 LDPC 码的基本原理	020



- 2.2.1 Gallager 码 020
- 2.2.2 规则 LDPC 和非规则 LDPC 022
- 2.2.3 置信度传播的基本原理及其应用 023
- 2.2.4 实用的解码方法 027
- 2.2.5 性能的理论分析 029
- 2.3 准循环 LDPC 码 (QC-LDPC) 032
 - 2.3.1 扩展矩阵 033
 - 2.3.2 基础矩阵的基本结构 038
 - 2.3.3 编码算法 039
 - 2.3.4 准循环 LDPC 码的多码长设计 042
 - 2.3.5 基于 QC-LDPC 码的多码率设计 045
 - 2.3.6 基于 QC-LDPC 码的精细码率调整 046
 - 2.3.7 一般 LDPC 码的短圈特性 046
 - 2.3.8 QC-LDPC 码的短圈特性 048
- 2.4 QC-LDPC 码的译码结构 050
 - 2.4.1 全并行译码 (Full-parallel) 052
 - 2.4.2 行并行译码 (Row-parallel) 054
 - 2.4.3 块并行译码 (Block-parallel) 057
- 2.5 LDPC 在 5G-NR 中的标准进展 059
 - 2.5.1 提升值设计 059
 - 2.5.2 紧凑型基本图设计 062
 - 2.5.3 基本图 063
 - 2.5.4 速率匹配 069
 - 2.5.5 交织 071
 - 2.5.6 分段 073
 - 2.5.7 信道质量指示 (CQI) 表格和编码调制方案 (MCS) 表格 075
 - 2.5.8 传输块大小 (TBS, Transport Block Size) 的确定 078
- 2.6 复杂度、吞吐量和解码时延 083
 - 2.6.1 复杂度 083
 - 2.6.2 吞吐量 084
 - 2.6.3 解码时延 084
- 2.7 链路性能 085
 - 2.7.1 短码 085



2.7.2	中长码	086
2.7.3	长码	086
2.8	LDPC 码在 3GPP 中的应用	087
2.9	未来发展	094
2.10	小结	094
	参考文献	095
第 3 章	极化码	099
3.1	Polar 码的起源	101
3.2	Polar 码在国内外的研究状况	102
3.3	Polar 码的基本原理	106
3.3.1	信道	106
3.3.2	信道合并	107
3.3.3	信道分离	109
3.3.4	信道极化	110
3.4	极化码基本的编码和解码方法	112
3.4.1	编码简介	112
3.4.2	解码简介	113
3.5	Polar 码构造	116
3.5.1	错误检测	117
3.5.2	编码矩阵生成	123
3.6	Polar 码序列	127
3.6.1	基本概念	127
3.6.2	若干序列介绍	129
3.6.3	序列的特性	136
3.6.4	序列的选择准则	137
3.6.5	序列的融合、3GPP 最终选择的序列及未来发展	138
3.6.6	速率匹配对序列的预冻结	139
3.7	Polar 码的速率匹配	140
3.8	交织	141
3.8.1	等腰直角三角形交织	141
3.8.2	双矩形交织	143
3.8.3	速率匹配过程中的交织	143



3.9	Polar 码的重传	145
3.10	分段	147
3.11	系统 Polar 码	148
3.12	2D Polar 码	151
3.13	Polar 码解码算法	153
3.13.1	SC 算法	153
3.13.2	SC-L 算法	154
3.13.3	基于统计排序的译码算法	156
3.13.4	置信度传播 (BP) 算法	158
3.13.5	Polar 码并行解码	159
3.14	复杂度、吞吐量与解码时延	161
3.14.1	计算复杂度	161
3.14.2	(存储) 空间复杂度	162
3.14.3	吞吐量	163
3.14.4	解码时延	163
3.15	Polar 码的性能	164
3.15.1	最小汉明距离	164
3.15.2	误块率	164
3.15.3	虚警率	166
3.15.4	与其他码的性能比较	167
3.16	3GPP 协议中的 Polar 码	171
3.17	Polar 码的优点、缺点及未来发展	174
	参考文献	175
第 4 章	卷积码	185
4.1	卷积码的原理	186
4.1.1	卷积码原理和解码算法	186
4.1.2	基本性能	190
4.1.3	解码复杂度和吞吐量分析	193
4.1.4	咬尾卷积码 (TBCC)	194
4.2	卷积码在蜂窝标准中的应用	198
4.2.1	3G UMTS (WCDMA) 中的卷积码	198
4.2.2	LTE 中的卷积码	199



4.3	卷积码的增强	200
4.3.1	支持多种版本冗余	200
4.3.2	支持更低码率	201
4.3.3	性能更优的生成多项式	202
4.3.4	CRC 辅助的列表解码	204
	参考文献	206
第 5 章 Turbo 码		209
5.1	Turbo 码原理	210
5.1.1	Turbo 码之前的级联码	211
5.1.2	并行级联卷积码	212
5.1.3	解码算法	213
5.1.4	基本性能	219
5.2	LTE 的 Turbo 码	221
5.2.1	LTE 的 Turbo 码的结构	221
5.2.2	LTE Turbo 码的 QPP 交织器	222
5.2.3	链路性能	226
5.2.4	解码复杂度分析	227
5.3	Turbo 码 2.0	229
5.3.1	更长的码长	229
5.3.2	更低的码率	229
5.3.3	咬尾 Turbo 码	231
5.3.4	新的打孔方式	233
5.3.5	新的交织器	233
	参考文献	234
第 6 章 外码		237
6.1	信道特性与外码	238
6.2	显式外码	239
6.2.1	常用外码	239
6.2.2	包编码 (Packet Coding)	241
6.3	隐式外码	256
6.4	小结	256



参考文献	256
第 7 章 其他高级编码方案	259
7.1 多元域 LDPC 码	260
7.1.1 概念	260
7.1.2 多元 LDPC 码比特交织编码调制 (BICM) 方案	261
7.1.3 多元码调制映射方案	262
7.2 多元域 RA 码	266
7.2.1 交织器	268
7.2.2 加权器	270
7.2.3 组合器与累加器	271
7.2.4 译码	271
7.3 格码	271
7.4 基于无速率码的自适应编码	279
7.5 阶梯码	281
7.5.1 编码	282
7.5.2 解码	283
7.5.3 性能	283
7.5.4 未来演进方向	284
参考文献	285
缩略语	287