



未来移动通信论坛
FUTURE MOBILE COMMUNICATION FORUM

5G 关键技术系列丛书

5G 先进信道 编码技术

Advanced Channel Coding for 5G Communication Systems

◆ 史治平 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

5G 关键技术系列丛书

5G 先进信道 编码技术

Advanced Channel Coding for 5G Communication Systems

◆ 史治平 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

5G先进信道编码技术 / 史治平编著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2017.6
(5G关键技术系列)
ISBN 978-7-115-45719-6

I. ①5… II. ①史… III. ①无线电通信—信道编码
IV. ①TN92②TN911.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第164068号

内 容 提 要

本书共分4章,涉及5G通信标准中讨论的LDPC码、极化码和Turbo码3种候选码字。第1章是绪论,介绍移动通信的发展过程、5G通信及其关键技术、信道编码及其发展过程;第2章是LDPC码,包括LDPC码的基本原理与方法、LDPC码的优化设计、LDPC码的高级译码方法、LDPC码在标准化中的应用以及LDPC码在5G通信中的应用;第3章是Polar码,介绍了极化码概述、信道极化原理、极化信道的可靠性度量、极化码编码、极化码的译码方案,以及极化码在5G通信中的应用研究;第4章是Turbo码,包括Turbo码概述、Turbo码编译码方法、Turbo码并行译码与结尾处理、Turbo码在3G/4G中的应用,以及Turbo码与5G通信等。

本书的目标读者是从事纠错编码调制和5G通信的科研人员、技术人员及高等院校相关专业的研究生与教师,也可以作为相关专业研究生的教学参考书。

◆ 编 著 史治平

责任编辑 代晓丽

执行编辑 刘 琳

责任印制 彭志环

◆ 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>

三河市潮河印业有限公司印刷

◆ 开本: 880×1230 1/32

印张: 6

2017年6月第1版

字数: 161千字

2017年6月河北第1次印刷

定价: 59.00元

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

反盗版热线: (010)81055315

前言

信道编码是无线通信系统的关键技术，与多址接入技术、多输入多输出（MIMO）技术一起组成了 5G 空中接口的三驾马车。在 2016 年 5G 的标准化进程中，信道编码方案成了异常耀眼的亮点。3GPP 围绕 5G 的三大应用场景——增强移动宽带（eMBB）、大规模机器通信（mMTC）和高可靠低时延通信（URLLC），候选编码方案在美国主推的低密度奇偶校验码（LDPC 码）、中国主推的极化码（Polar 码）以及法国主推的 Turbo 码之间展开。在 2016 年 10 月的里斯本会议以及 11 月的里诺会议上，LDPC 码作为 eMBB 数据信道的编码方案，极化码作为 eMBB 控制信道的编码方案进入了 5G 后续的标准化讨论。虽然 Turbo 码在这次激烈的竞争中未能获得一席之地，但是 Turbo 码在第三代和第四代移动通信中的辉煌以及在信道编码中里程碑式的意义是值得我们去探索的。

本书在回顾移动通信和信道编码的发展历程的基础上，重点介绍了 LDPC 码、极化码、Turbo 码 3 种信道编码方案的基本原理、编译码方案，以及它们在 3GPP RAN#1 中的有关进展。3 种编码方案各具特色，是目前现代编码领域的重点研究内容，它们不仅是移动通信系统中信道编码的候选技术，也是卫星通信、军事通信、物联网、光通信等众多通信系统中信道编码的候选方案。2017 年是 5G 技术发展的关键阶段，信道编码的讨论也将进入具体方案设计。因此本书不仅是 5G 技术人员的参考书，也是一本编码领域以及通信领域相关技术人员的参考书，同时也可以作为通信领域相关专业高年级本科生或研究生的参考教材。

本书在编写过程中得到了电子科技大学通信抗干扰技术国家

级重点实验室周亮教授和张忠培教授的大力支持，他们对本书结构和内容的完善都做出了重要贡献，对本书的编写都给予了大力的支持和帮助，在此表示衷心的感谢！另外，也感谢实验室的田佳佳、任亚军、赵永佳、吕凤橙、唐锐、闫秦怀、甘柳月、于清苹、邓莉、李艳霞、李一鸣、张淑君等同学，他们完成了本书部分资料的整理、校对与编辑工作，在此表示感谢！

另外，特别感谢 FuTURE 论坛和出版社的所有老师给本书出版提供的大力支持。最后也衷心地感谢本书所有参考文献的作者以及相关人士，是你们的付出为本书的出版奠定了基础。

由于时间和水平有限，书中难免有不足之处，敬请广大读者批评指正！

史治平
2017年1月

第 1 章 绪论	1
1.1 移动通信的发展过程	2
1.1.1 第一代移动通信系统	2
1.1.2 第二代移动通信系统	4
1.1.3 第三代移动通信系统	4
1.1.4 第四代移动通信系统	5
1.1.5 第五代移动通信系统	6
1.2 5G 及其关键技术	7
1.2.1 5G 的愿景	7
1.2.2 5G 的关键技术	11
1.3 信道编码及其发展过程	12
1.3.1 信道编码的性能度量	13
1.3.2 信道编码的发展过程	21
参考文献	25
第 2 章 LDPC 码	27
2.1 LDPC 码的基本原理与方法	28
2.1.1 LDPC 码的基本概念	29
2.1.2 LDPC 码的构造方法	32
2.1.3 LDPC 码的编码方法	45
2.1.4 LDPC 码的译码算法	48
2.2 LDPC 码的优化设计	53

2.2.1	译码门限	54
2.2.2	错误平层	57
2.3	LDPC 码的高级译码方法	64
2.3.1	译码调度策略	64
2.3.2	线性规划译码	67
2.3.3	基于概率计算的译码实现	72
2.4	LDPC 码在标准化中的应用	77
2.4.1	DVB-S 标准中的 LDPC 码	78
2.4.2	CCSDS 标准中的 LDPC 码	81
2.4.3	IEEE 802.16e 标准 LDPC 码	86
2.5	LDPC 码在 5G 中的应用	89
	参考文献	92
第 3 章	极化码	97
3.1	极化码概述	98
3.2	信道极化原理	102
3.2.1	信道合并	103
3.2.2	信道分裂	107
3.2.3	信道极化	109
3.3	极化信道的可靠性度量	111
3.3.1	计算巴氏参数	112
3.3.2	密度进化	113
3.3.3	高斯近似	116
3.4	极化码的编码	117
3.5	极化码的译码方案	120
3.5.1	SC 译码方法	120
3.5.2	SCL 译码方法	124
3.6	极化码在 5G 通信中的应用研究	130
	参考文献	135

第 4 章 Turbo 码	139
4.1 Turbo 码概述	140
4.2 Turbo 码的编译码方法	142
4.2.1 Turbo 码编码方法	142
4.2.2 Turbo 码译码算法	146
4.3 Turbo 码的并行译码与结尾处理	155
4.3.1 Turbo 码并行译码	155
4.3.2 结尾处理	161
4.4 Turbo 码在 3G/4G 中的应用方案	170
4.4.1 Turbo 码在 3G 中的应用	170
4.4.2 Turbo 码在 4G 中的应用	173
4.5 Turbo 码与 5G	176
4.6 结束语	179
参考文献	180
名词索引	183



第1章

绪论

- 1.1 移动通信的发展过程
- 1.2 5G 及其关键技术
- 1.3 信道编码及其发展过程

本章回顾移动通信发展过程，介绍第五代（5G）移动通信系统及其关键技术；回顾信道编码的发展过程，介绍信道容量、信噪比、差错率、香农限、编码增益等基本概念。

1.1 移动通信的发展过程

现代人的工作、学习与生活都离不开移动通信，手机给人们带来的好处不言而喻。随着第四代（4G）移动通信系统网络的大规模商用以及 5G 系统的日趋成熟，新一代移动通信系统离我们越来越近。本节回顾移动通信的发展过程^[1]，介绍第一代（1G）移动通信系统到第五代移动通信系统的基本情况。

1.1.1 第一代移动通信系统

移动通信的蓬勃发展始于 20 世纪 70 年代中期。1978 年年底，美国贝尔实验室成功研制了先进移动电话系统（AMPS），建成了蜂窝移动通信网，主要采用的是模拟技术和频分多址（Frequency Division Multiple Access, FDMA）技术。该阶段称为第一代移动通信技术。当时的移动通信系统除了美国的高级移动电话系统之外，还包括英国的总访问通信系统（TACS）以及日本的 JTACS、德国的 C-Netz、法国的 Radiocom 2000 和意大利的 RTMI 等。

这一阶段的特点是蜂窝移动通信网成为实用系统，并在世界各地迅速发展。除了用户要求迅猛增加这一主要推动力之外，一些技术的进步也为移动通信技术的发展提供了条件。首先，微电子技术在这一时期得到长足发展，这使得通信设备的小型化、微型化有了可能，各种轻便电台被不断地推出。其次，提出并形成了移动通信新体制。随着用户数量增加，大区制所能提供的容量很快饱和，这就必须探索新体制。在这方面最重要的突破是贝尔实验室在 20 世纪 70 年代提出的蜂窝网概念，解决了公用移动通信系统要求容量

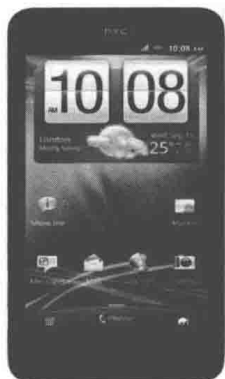
大与频率资源有限的矛盾。第三方面进展是随着大规模集成电路的发展而出现的微处理器技术日趋成熟以及计算机技术的迅猛发展，从而为大型通信网的管理与控制提供了技术手段。以 AMPS 和 TACS 为代表的第一代移动通信模拟蜂窝网虽然取得了很大成功，但也暴露了一些问题，比如容量有限，制式太多，互不兼容，话音质量不高，不能提供数据业务，不能提供自动漫游，频谱利用率低，移动设备复杂，费用较贵，以及通话易被窃听等，使得它无法真正大规模普及和应用。昂贵的价格使它成为当时的一种奢侈品和财富的象征。图 1-1 (a) 是第一代移动通信系统时代使用的手机。



(a) 1G 手机



(b) 2G 手机



(c) 3G 手机



(d) 4G 手机

图 1-1 第一代至第四代移动通信的手机

1.1.2 第二代移动通信系统

数字移动通信的发展始于 20 世纪 80 年代中期，通信技术进入了第二代（2G）移动通信系统时代，和 1G 不同，2G 采用的是数字传输技术，这极大地提高了通信传输的保密性。2G 主要采用的是时分多址（Time Division Multiple Access, TDMA）技术和码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）技术，与之对应的是 GSM 和 CDMA 两种体制。2G 主要是以数字语音传输技术为核心，无法直接传送如电子邮件、软件等信息；只具有通话和一些如时间日期等传送的手机通信技术规格。不过手机 SMS（Short Message Service，短消息服务）在 2G 的某些规格中能够被执行。随着 2G 技术的发展，手机逐渐在人们的生活中变得流行，虽然价格仍然较贵，但不再是奢侈品。诺基亚 3110、摩托罗拉 StarTAC 等 2G 时代的经典机型，图 1-1（b）是第二代移动通信系统时代使用的手机。

2G 到 3G（第三代）移动通信系统的发展并不像 1G 到 2G 那样平滑顺畅，由于 3G 是个相当浩大的工程，从 2G 不可能直接迈向 3G，因此出现了介于 2G 和 3G 之间的衔接技术——2.5G。HSCSD、WAP、EDGE、蓝牙（Bluetooth）、EPOC 等技术都是 2.5G 技术。2.5G 功能通常与 GPRS 技术有关，GPRS 技术是在 GSM 基础上的一种过渡技术。GPRS 的推出标志着人们在 GSM 的发展史上迈出了意义重大的一步，GPRS 在移动用户和数据网络之间提供一种连接，给移动用户提供高速无线 IP 和 X.25 分组数据接入服务。相较于 2G 服务，2.5G 无线技术可以提供更高的速率和更多的功能。

1.1.3 第三代移动通信系统

随着移动网络的发展，人们对于数据传输速度的要求日趋高

涨，而 2G 网络十几 kbit/s 的传输速度显然不能满足人们的要求。于是高速数据传输的蜂窝移动通信技术——3G 应运而生。目前 3G 存在 3 种标准：CDMA2000、WCDMA 和 TD-SCDMA。中国国内支持国际电联确定的 3 个无线接口标准，分别是中国电信的 CDMA2000、中国联通的 WCDMA 和中国移动的 TD-SCDMA。可以说 3G 的发展进一步促进了智能手机的发展，因为 3G 的传输速度可以达到几百 KB/s。

相对第一代模拟制式手机和第二代 GSM、TDMA 等数字手机，第三代手机是基于移动互联网技术的终端设备。3G 手机完全是通信业和计算机工业相融合的产物，和此前的手机相比差别较大，因此越来越多的人开始称呼这类新的移动通信产品为“个人通信终端”。即使是对通信业最外行的人也可从外形上轻易地判断出一部手机是否是“第三代”：第三代手机都有一个超大的彩色显示屏，往往还是触摸式的。3G 手机除了能完成高质量的日常通信外，还能进行多媒体通信。用户可以在 3G 手机的触摸显示屏上直接写字、绘图，并将其传送给另一部手机，而所需时间可能不到一秒。当然，也可以将这些信息传送给一台计算机，或从计算机中下载某些信息；用户可以用 3G 手机直接上网，查看电子邮件或浏览网页；有不少型号的 3G 手机自带摄像头，这将使用户可以利用手机进行计算机会议，甚至替代数码相机。图 1-1 (c) 是第三代移动通信使用的手机。

1.1.4 第四代移动通信系统

作为 3G 的延伸，4G 移动通信系统近几年为人们所熟知，2008 年 3 月，在国际电信联盟无线电通信部门 (ITU-R) 指定一组用于 4G 标准的要求，命名为 IMT-Advanced 规范，设置 4G 服务的峰值速率要求在高速移动的通信（如在火车和汽车上使用）达到 100 Mbit/s，固定或低速移动的通信（如行人和定点上网的用户）达到 1 Gbit/s。在通往 4G 技术的路上主要有第三代合作伙伴计划 (3rd

Generation Partnership Project, 3GPP) 主导的 LTE (Long Term Evolution, 长期演进) 和 IEEE 提出的 WiMAX 技术, 尽管 WiMAX 可以给其客户提供市场上传输速率最快的网络, 但仍然不是 LTE 技术的竞争对手。LTE 项目是 3G 的演进, 它改进并增强了 3G 的空中接入技术, 采用 OFDM 和 MIMO 作为其无线网络演进的唯一标准。主要特点是在 20 MHz 频谱带宽下能够提供下行 100 Mbit/s 与上行 50 Mbit/s 的峰值速率, 相对于 3G 网络大大地提高了小区的容量, 同时将网络延迟大大降低: 内部单向传输时延低于 5 ms, 控制平面从睡眠状态到启动状态迁移时间低于 50 ms, 从驻留状态到启动状态的迁移时间小于 100 ms。该技术包括 TD-LTE 和 FDD-LTE 两种制式, 严格意义上来讲, LTE 只是 3.9G, 尽管被宣传为 4G 无线标准, 但它其实并未被 3GPP 认可为国际电信联盟所描述的下一代无线通信标准 IMT-Advanced, 因此在严格意义上其还未达到 4G 的标准。

4G 是集 3G 与 WLAN 于一体的, 并能够传输高质量视频图像, 它的图像传输质量与高清晰度电视不相上下。图 1-1 (d) 是第四代移动通信系统使用的手机。4G 系统能够以 100 Mbit/s 的速率下载, 比目前的拨号上网快 2 000 倍, 上传的速率也能达到 20 Mbit/s, 并能够满足几乎所有用户对于无线服务的要求。而在用户最为关注的价格方面, 4G 与固定宽带网络在价格方面不相上下, 而且计费方式更加灵活机动, 用户完全可以根据自身的需求确定所需的服务。此外, 4G 可以在 DSL 和有有线电视调制解调器没有覆盖的地方部署, 然后再扩展到整个地区。很明显, 4G 有着不可比拟的优越性。

1.1.5 第五代移动通信系统

2013 年 2 月, 欧盟宣布将拨款 5 000 万欧元, 加快 5G 移动技术的发展, 计划到 2020 年推出成熟的标准。2014 年 5 月 8 日, 日本电信营运商 NTT DoCoMo 正式宣布将与爱立信、诺基亚、三星等 6 家厂商共同合作, 开始测试 5G 网络。预计在 2015 年展开户外

测试，并期望于2020年开始运作。2015年3月1日，英国《每日邮报》报道，英国已成功研制5G网络，并进行100 m内的传送数据测试，并称于2018年投入公众测试，2020年投入商用。因此2020年也被业界认为是5G正式推出的时间。2015年9月9日，美国移动运营商Verizon无线公司宣布，将从2016年开始试用5G网络，2017年在美国部分城市全面商用。美国联邦通信委员会（FCC）针对24 GHz以上频谱用于无线宽带业务宣布了新的规则和法令，从而使美国成为全球首个宣布将这些频谱用于5G无线技术的国家。而且，为了保证美国在无线技术领域的领先地位，美国政府宣布将斥资4亿美元支持5G无线技术研究，这一计划是由美国科学基金会领导的，名为先进无线通信研究计划（Advanced Wireless Research Initiative）。同时，我国在工业和信息化部、国家发展和改革委员会和科学技术部的支持下，依托IMT-2020（5G）推进组全面开展了5G研发，并在5G需求、概念、关键技术、国际标准、技术试验等方面取得了重要突破，制定了我国5G在2020年商用的发展规划。这些政策与规划预示着人们对于5G的憧憬。

1.2 5G 及其关键技术

目前，5G已经成为各国政府与组织在通信领域的研究热点。那么，5G到底是什么呢？它能为我们带来什么样的好处？又有哪些新的技术呢？

1.2.1 5G 的愿景

纵观移动通信系统的发展，我们可以看出，从第一代系统开始，几乎是每10年，移动通信系统就更新换代一次。2000年3G开始成熟并商用，2010年4G开始成熟并商用，现在研究5G，2020年成熟应该是符合规律的预期。2020年，我们使用的网络、终端应该是什么样

子？人们在使用 4G 手机时，就开始研究未来的移动通信系统了。

2015 年 6 月，ITU 在 ITU-R WP5D 第 22 次会议上确定了 IMT-2020 的名称、愿景和时间表等关键内容，这成为 5G 发展史上的重要里程碑。国际电信联盟在会议上将 5G 正式命名为 IMT-2020。这个名称也沿袭了 ITU-R 对移动通信的命名传统。之前的第三代和第四代移动通信系统分别称为 IMT-2000 和 IMT-Advanced。其实我国在 2013 年 5 月就成立了 IMT-2020 推进组，旗帜鲜明地举起了“IMT-2020”的大旗，这也彰显出我国在移动通信的影响力在不断扩大。

这次会议的另一个显著成果是明确了 5G 的愿景，对 5G 进行了定量描述，主要体现在以下 3 个方面^[2,3]。

(1) 应用场景

3 个应用场景分别是增强移动宽带、大规模机器通信和高可靠低时延通信，如图 1-2 所示。

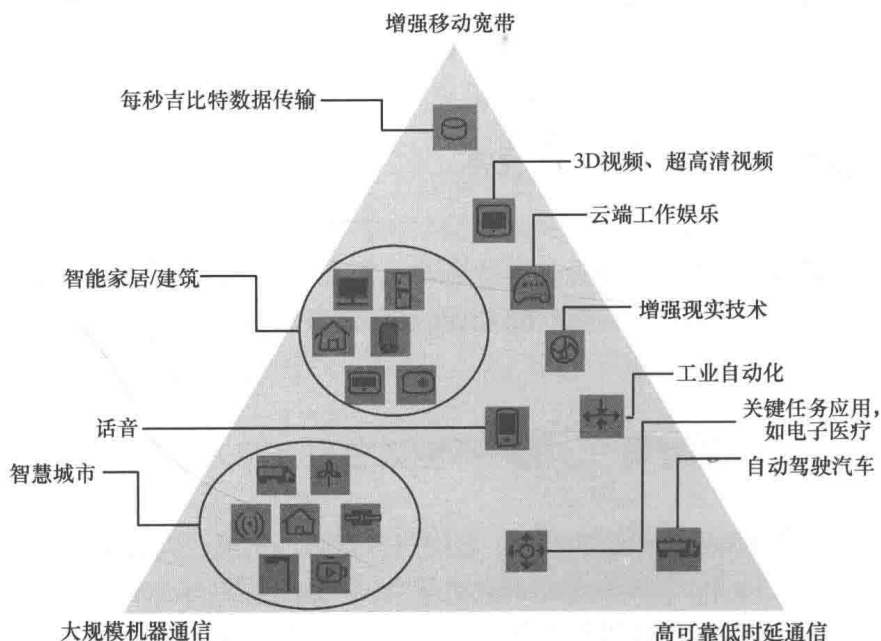


图 1-2 应用场景

这3个场景与我国 IMT-2020 推进组发布四大场景基本相同，只是我国将移动宽带进一步划分为广域大覆盖和热点高速两个场景。

(2) 能力指标

在 4G 时代，能力指标图体现出的是一个著名的“车”图，在 5G 时代，这张图是雷达图的形式（如图 1-3 所示）。可以看到，5G 不再单纯地强调峰值传输速率，而是综合考虑 8 个技术指标：峰值速率、用户体验速率、频谱效率、移动性、时延、连接数密度、网络能量效率和流量密度。

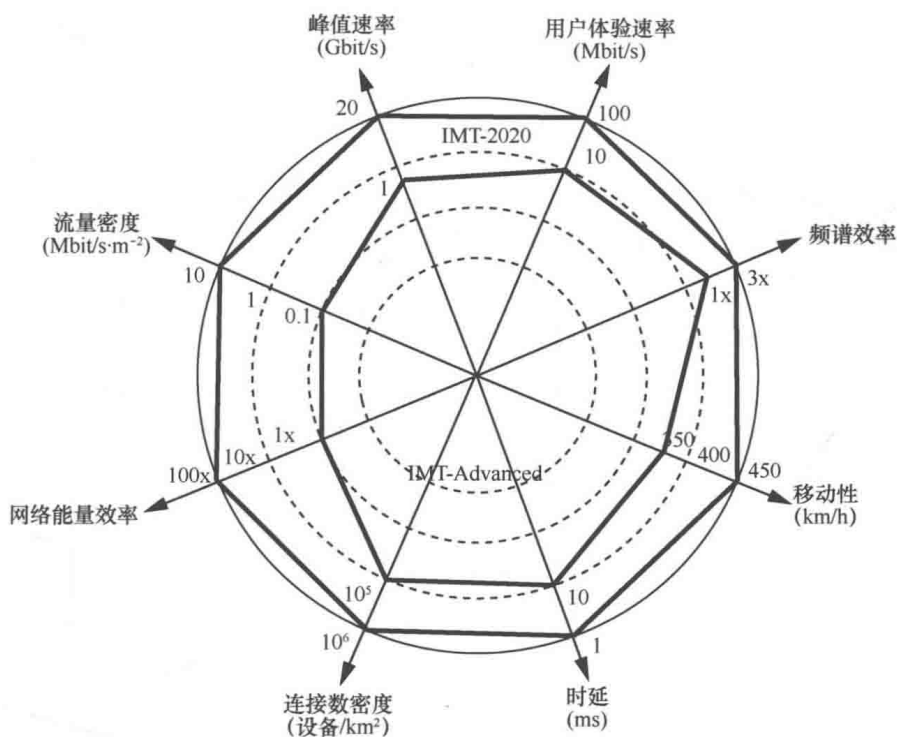


图 1-3 能力指标

(3) 不同场景下的技术需求

图 1-4 是前面两张图的结合，展示了不同应用场景下不同的技术要求。