

5G NR

The Next Generation
Wireless Access Technology

5G NR标准

下一代无线通信技术

[瑞典] 埃里克·达尔曼 斯特凡·巴克浮 约翰·舍尔德 著
(Erik Dahlman) (Stefan Parkvall) (Johan Sköld)

朱怀松 王剑 刘阳 译

以3GPP 2018年9月制定的R15版5G标准为基础，详解5G NR标准技术规范
爱立信5G标准专家撰写，爱立信中国研发团队翻译，行业专家作序



机械工业出版社
China Machine Press

| 现代通信网络技术丛书 |

5G NR
The Next Generation
Wireless Access Technology

5G NR标准

下一代无线通信技术

[瑞典] 埃里克·达尔曼 斯特凡·巴克浮 约翰·舍尔德 著
(Erik Dahlman) (Stefan Parkvall) (Johan Sköld)

朱怀松 王剑 刘阳 译



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

5G NR 标准: 下一代无线通信技术 / (瑞典) 埃里克·达尔曼 (Erik Dahlman) 等著; 朱怀松, 王剑, 刘阳译.
—北京: 机械工业出版社, 2019.5

(现代通信网络技术丛书)

书名原文: 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology

ISBN 978-7-111-62474-5

I. 5… II. ① 埃… ② 朱… ③ 王… ④ 刘… III. 无线电通信 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 067099 号

本书版权登记号: 图字 01-2019-0741

5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology
Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld
ISBN: 978-0-12-814323-0
Copyright © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.
Authorized Chinese translation published by China Machine Press.
《5G NR 标准: 下一代无线通信技术》(朱怀松 王剑 刘阳 译)
ISBN: 9787111624745
Copyright © Elsevier Ltd. and China Machine Press. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from Elsevier (Singapore) Pte Ltd. Details on how to seek permission, further information about the Elsevier's permissions policies and arrangements with organizations such as the Copyright Clearance Center and the Copyright Licensing Agency, can be found at our website: www.elsevier.com/permissions.

This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright by Elsevier Ltd. and China Machine Press (other than as may be noted herein).

This edition of 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology is published by China Machine Press under arrangement with ELSEVIER LTD.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本版由 ELSEVIER LTD. 授权机械工业出版社在中国大陆地区 (不包括香港、澳门以及台湾地区) 出版发行。

本版仅限在中国大陆地区 (不包括香港、澳门以及台湾地区) 出版及标价销售。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受民事及刑事法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

注意

本书涉及领域的知识和实践标准在不断变化。新的研究和经验拓展我们的理解, 因此须对研究方法、专业实践或医疗方法作出调整。从业者和研究人员必须始终依靠自身经验和知识来评估和使用本书中提到的所有信息、方法、化合物或本书中描述的实验。在使用这些信息或方法时, 他们应注意自身和他人的安全, 包括注意他们负有专业责任的当事人的安全。在法律允许的最大范围内, 爱思唯尔、译文的原文作者、原文编辑及原文内容提供者均不对因产品责任、疏忽或其他人身或财产伤害及 / 或损失承担责任, 亦不对由于使用或操作文中提到的方法、产品、说明或思想而导致的人身或财产伤害及 / 或损失承担责任。

5G NR 标准: 下一代无线通信技术

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 卢璐

责任校对: 殷虹

印刷: 北京市兆成印刷有限责任公司

版次: 2019 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 186mm × 240mm 1/16

印张: 20.5

书号: ISBN 978-7-111-62474-5

定价: 119.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88379426 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294

读者信箱: hzit@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

序 言

从2012年ITU-R启动“IMT for 2020 and beyond”项目到现在,5G走过了需求规划、标准制定、研发测试及商业部署准备等困难重重但又硕果累累的历程。移动产业界对5G的愿景已达成共识:5G不仅将为用户提供增强的移动互联网服务——包括更佳的用户体验、更多样的连接方式,而且将提供面向物与物、人与物通信的物联网服务——包括大规模连接和低时延、超可靠的连接。虽然移动互联网仍是5G的主要应用之一,但对众多产业和领域进行渗透和赋能的移动物联网将是5G区别于前几代移动通信技术的显著特点。

移动通信的全球漫游属性和巨大的产业规模,使得全球统一的国际标准成为关键。3GPP是全球移动通信标准组织,在2G到5G国际标准的制定中扮演着越来越重要的作用。3GPP在2016年开始5G技术标准的研究工作。2018年6月14日,3GPP正式批准5G独立组网标准冻结。这意味着5G完成了第一阶段的全功能标准化工作,标志着5G具备了构建端到端全新业务的能力。3GPP 5G标准的发布是全球5G发展的重要里程碑,凝聚了来自全球的技术和标准人员的智慧和汗水。

中国与其他国家一道,在推进5G发展进程中积极做出了自己的努力和贡献。2013年,中国成立了IMT-2020(5G)推进组,组织国内外主流企业共同推进5G发展,相继开展了5G需求规划、技术标准制定、研发和国际合作等工作。2016~2018年,为加快推动5G研发及产业发展,IMT-2020(5G)推进组组织开展了5G研发技术试验。2018年年底,5G研发试验第三阶段基本完成。测试结果表明,5G基站与核心网设备均可支持非独立组网和独立组网模式,达到了预商用水平。当前,国内三家运营企业也在开展5G测试和试验活动,为即将到来的商业部署做着积极的准备。

本书以3GPP 2018年9月的版本为基础,重点对5G新空口(NR)进行了详细而又深入的解读。由于工作关系,我和本书的几位作者有过多接触,对他们的技术领域和造诣有比较深入的了解。他们作为移动通信技术领域的专家,从2G开始就工作在移动通信技术发展的最前沿,他们之前出版的关于3G和4G的专著也已成为相关领域的畅销书和权威著作。本书的译者也是移动行业的资深人士,在各自的领域都做出了成绩。我相信本书的翻译出版会进一步推动5G在中国的普及,为中国读者提供对5G国际标准的既忠实可靠又全面系统的解读。

全球5G之旅才刚刚开始。5G真正的潜力也许要再过几年才能完全显现出来。随着5G商用的脚步越来越近,当前迫切需要挖掘能够体现5G能力、在商用初期可投入应用的创新

业务，助力 5G 成功商用。IMT-2020（5G）推进组现已开展了“绽放杯”5G 应用大赛，充分发挥引领行业需求的作用，力争孵化一批 5G 特色应用。希望在各行业、各领域的积极参与下，在全球移动通信产业界的通力合作、积极进取下，5G 在中国的发展能够取得更大的成功！

最后，借此机会，对爱立信公司在全球和中国 5G 发展中做出的重要贡献表示深深的敬意和感谢！

王志勤

中国信息通信研究院副院长

IMT-2020（5G）推进组组长

序 言 二

2015年9月,3GPP举办了一次特别的研讨会。来自全球移动产业界、监管部门、研究机构的500多名专家汇聚一堂,商谈5G标准化的规划。会议达成的共识包括:5G标准化分成两个阶段,第一阶段满足早期商业部署的需要,第二阶段计划覆盖所有的应用场景,包括eMBB(enhanced Mobile Broadband)、mMTC(massive Machine Type Communications)和URLLC(Ultra Reliable and Low Latency Communications)等5G典型应用场景。这次研讨会实际上标志着3GPP 5G标准化工作的正式开始。

从那时到现在已经过去三年,经过艰苦的努力(仅2017年一年3GPP就处理了超过10万份提案,有些工作组的参会代表人数达到了600人,这在3GPP历史上前所未有),3GPP 5G标准化的工作取得了丰硕的成果。2017年12月3GPP发布了第一个NR标准,即3GPP Release 15(针对非独立NR操作的场景)。2018年年中Release 15冻结(增加了对独立NR操作的支持)。目前,3GPP Release 16的工作也已开始,计划于2020年上半年完成。

毫无疑问,3GPP在5G标准化过程中起着重要的作用。作为一个由CCSA(中国)、ETSI(欧洲)、ARIB(日本)、TTC(日本)、ATIS(美国)、TTA(韩国)和TSDSI(印度)七个区域性和国家级标准化组织构成的全球性组织,3GPP标准化的成果综合考虑了各个国家和地区的诉求并达成一致。考虑到移动通信的特点,一个能被全球尽可能多的国家和地区所接受的5G标准对5G未来的成功起着举足轻重的作用,而3GPP为这一成功提供了有力的支撑。

中国在5G技术发展和标准化进程中的重要性也是有目共睹的。由工信部、IMT-2020(5G)推进组及信通院领导和实施的5G技术测试,对于推动中国5G研发及产业的发展起到了至关重要的作用。同时,中国移动、中国电信和中国联通等多家运营商开展的5G测试和试验,也走在了行业的前列。包括爱立信在内的网络设备商也积极参与到中国的5G测试活动中,为即将到来的5G商用做积极的准备。爱立信公司也加大了在中国的5G研发,这不仅是因为中国将是5G的最大市场,更重要的是中国已成为5G技术发展与应用探索的前沿阵地,对今后5G技术的发展影响深远。

本书作者Erik Dahlman、Stefan Parkvall和Johan Sköld先生,均就职于爱立信研究院(Ericsson Research),是无线通信领域的顶级技术专家,从2G时代起就参与标准的制定工作以及无线技术预研,拥有许多发明和创新。他们之前出版的关于3G和4G无线接入的专著均得到了业内外读者的广泛认可,成为了解无线通信的技术宝典,或许读者对他们不会感到陌生。同时,相信通过译者的辛勤劳动,本书将为读者提供对5G的详细而又深入的解读。

希望本书的翻译出版能为推动 5G 在中国的发展贡献一点力量。

5G 并不仅仅是另一个新的“Generation”，5G 与前面几代移动通信技术的最大区别在于它与其他行业和领域的深入和广泛的结合。在某种程度上，5G 的成功与否将取决于它是否能真正赋能各个行业，是否能够真正服务于各垂直领域。可喜的是，目前我们已经看到各个行业和领域在积极探索和尝试基于 5G 的新应用和新服务。相信在不远的将来，5G 能够真正成为当今社会数字化转型的强大引擎！

彭俊江

爱立信（中国）通信有限公司 CTO

译者序

本书作者 Erik Dahlman、Stefan Parkvall 和 Johan Sköld 对于移动通信行业的许多同行来说并不陌生。从 3G 时代开始他们就撰写了相关著作，4G 时代又出版了基于 3GPP 标准的专著，这些著作受到读者好评，并成为 3G 和 4G 无线技术的畅销书。凡是参与过 3GPP 工作或者阅读过 3GPP 标准的同行，相信都对其流程的繁复、标准的丰富深有感触，迫切希望有一本深入浅出而又忠实可靠的著作能够对相关标准做一番梳理，以帮助读者尽快建立起对 5G NR 标准的系统性把握。

本书是一本开创性著作，对 5G NR 的 3GPP 标准做了全面解读和梳理，它提供了对 5G NR 标准的准确、易读的描述，以及对 NR 物理层结构、高层协议、射频和频谱的详细解读。不仅如此，它还提供了对 5G NR 标准的洞察：不仅描述技术本身，而且还揭示技术决策背后的原因，即常常萦绕在读者心头的问题——标准为什么做出这样的规定？

本书的英文版一经出版，相关的翻译工作也随即着手开始。虽然在移动通信行业工作多年，但作为译者，在翻译过程中心情还是很忐忑的。既要忠实于原著，又要尊重中文的表达方式，个中酸甜苦辣恐怕只有当事人才能体会一二。

在翻译过程中，译者得到了原作者的大力支持。同时，编辑朱捷先生和卢璐先生的耐心指导和悉心审阅，是整个翻译能够顺利完成的强有力的保障，在此我们对朱捷先生和卢璐先生表示诚挚的感谢！

尽管我们已经尽最大努力来保证译本的准确、易读，但由于时间紧、任务急，译作之中肯定存在疏漏，对此，作为译者，我们愿意承担全部责任。希望在后续版本里能够改正这些不足之处。

不同的人对于移动通信如何影响当今社会也许有不同的看法，但毋庸置疑的是，移动通信已经彻底改变了我们的生活方式，包括沟通方式。5G 的引入将使得这一改变更加深入、更加彻底。我们希望本书中文版的出版能为 5G 事业在中国的发展尽一点力量，“他山之石，可以攻玉”，技术是为了创造更加美好的生活，Technology for good!

朱怀松 王剑 刘阳

前 言

LTE 已成为迄今为止全球最成功的、服务于数十亿用户的移动宽带技术。毫无疑问，移动宽带现在是，将来也是移动通信的重要组成部分，但未来的无线网络在很大程度上将涵盖更广泛的应用和更广阔的需求。虽然 LTE 是一项非常强大的技术并且仍在不断发展，在未来许多年内仍将被继续使用，但是新的 5G 无线接入技术——（New Radio，新空口）——已经被标准化，以满足未来的需求。

本书对 NR 标准进行了描述。NR 标准是在 2018 年春末由 3GPP 制定的新一代无线接入技术标准。

第 1 章对 5G 做了简单介绍。第 2 章描述了标准化的过程和相关的组织，比如 3GPP 和 ITU。第 3 章介绍了可用于移动通信的频段以及发掘可用新频段的流程。

有关 LTE 及其演进的概述请参阅第 4 章。虽然本书的重点是 NR，但作为后续章节的背景，对 LTE 做简要概述是有益的。一个原因是，LTE 和 NR 都是由 3GPP 制定的，因此具有共同的背景，并且使用了某些相同的技术构件。NR 中的许多设计选择也是基于 LTE 的经验做出的。此外，LTE 还会继续与 NR 并行发展，仍是 5G 无线接入中的重要组成部分。

第 5 章是对 NR 的概述，可以单独阅读以获得对 NR 的宏观理解，也可以作为对后续章节的介绍。

第 6 章概述了 NR 总的协议结构，第 7 章描述了 NR 整个的时频域结构。

多天线处理和波束赋形是 NR 的重要组成部分。第 8 章概述了支持这些功能的信道探测方法，第 9 章总体介绍了传输信道的处理，第 10 章介绍了相关的控制信令。这些功能如何支持不同的多天线方案和波束赋形在第 11 章和第 12 章中描述。

重传功能和调度是第 13 章和第 14 章的主题，第 15 章讲功率控制，第 16 章讲初始接入。

与 LTE 的共存和互通是 NR 的重要组成部分，特别是在依赖 LTE 进行移动性和初始接入的非独立组网模式下。第 17 章对此进行了介绍。

考虑到大频率范围上以及多标准无线终端的频谱灵活性，第 18 章描述了 NR 对射频的要求。第 19 章讨论了毫米波范围内较高频段的射频实现所要考虑的问题。

最后，第 20 章对本书做了总结，对未来的 NR 版本进行了展望。

致 谢

感谢爱立信公司所有同事为本书的写作提供的帮助，包括对本书有关内容直接提供的建议和意见，以及参与开发 NR 和 5G 这一宏大的下一代无线接入项目。

标准化过程涉及来自世界各地的工作者，在此感谢无线通信业的所有同仁，特别是 3GPP RAN 工作组的努力。没有他们的工作和对标准化的贡献，这本书就不可能存在。

最后，非常感谢家人在撰写本书的漫长过程中给予我们的宽容和支持。

目 录

序言一	
序言二	
译者序	
前言	
致谢	
第1章 5G概述	1
1.1 3GPP 和移动通信的标准化	2
1.2 下一代无线接入技术——5G/NR	3
1.2.1 5G 应用场景	3
1.2.2 LTE 向 5G 演进	3
1.2.3 NR——新的 5G 无线接入技术	4
1.2.4 5GCN——新的 5G 核心网	4
第2章 5G标准化	5
2.1 标准化和监管概述	5
2.2 ITU-R 从 3G 到 5G 的活动	7
2.2.1 ITU-R 的角色	7
2.2.2 IMT-2000 和 IMT-Advanced	7
2.2.3 ITU-R WP5D 的 IMT-2020 流程	8
2.3 5G 和 IMT-2020	10
2.3.1 IMT-2020 使用场景	10
2.3.2 IMT-2020 能力集	11
2.3.3 IMT-2020 性能要求和评估	14
2.4 3GPP 标准化	16
2.4.1 3GPP 流程	16
2.4.2 作为 IMT-2020 候选技术的 3GPP 5G 规范	18
第3章 5G频谱	20
3.1 移动系统的频谱	20
3.1.1 ITU-R 为 IMT 系统定义的频谱	20
3.1.2 5G 的全球频谱状况	23
3.2 NR 的频段	24
3.3 6GHz 以上的射频暴露	28
第4章 LTE概述	30
4.1 LTE Release 8——基本的无线接入	30
4.2 LTE 演进	32
4.3 频谱灵活性	34
4.3.1 载波聚合	34
4.3.2 授权辅助接入	35
4.4 多天线增强	36
4.4.1 扩展的多天线传输	36
4.4.2 多点协作和传输	36
4.4.3 增强的控制信道结构	37
4.5 密集度、微蜂窝和异构部署	37
4.5.1 中继	37
4.5.2 异构部署	38
4.5.3 微蜂窝开关	38
4.5.4 双连接	39
4.5.5 动态 TDD	39
4.5.6 WLAN 互通	39
4.6 终端增强	40
4.7 新场景	40

4.7.1 设备到设备通信	40	第7章 总体传输结构	79
4.7.2 机器类型通信	41	7.1 传输机制	79
4.7.3 降低时延——sTTI	42	7.2 时域结构	81
4.7.4 V2V 和 V2X	42	7.3 频域结构	83
4.7.5 飞行器	42	7.4 部分带宽	86
第5章 NR概览	43	7.5 NR 载波频域位置	88
5.1 高频操作和频谱灵活性	44	7.6 载波聚合	89
5.2 极简设计	45	7.7 补充上行	90
5.3 向前兼容	45	7.7.1 与载波聚合的关系	92
5.4 传输方案、部分带宽和帧结构	46	7.7.2 控制信令	92
5.5 双工方式	48	7.8 双工方式	93
5.6 低时延支持	49	7.8.1 时分双工	94
5.7 调度和数据传输	49	7.8.2 频分双工	95
5.8 控制信道	50	7.8.3 时隙格式和时隙格式指示	95
5.9 以波束为中心的设计和多天传输	51	7.9 天线端口	99
5.10 初始接入	52	7.10 准共址	100
5.11 互通和与 LTE 共存	53	第8章 信道探测	102
第6章 无线接口架构	55	8.1 下行信道探测: CSI-RS	102
6.1 系统总体架构	55	8.1.1 CSI-RS 基本结构	103
6.1.1 5G 核心网	55	8.1.2 CSI-RS 配置的频域结构	106
6.1.2 无线接入网	57	8.1.3 CSI-RS 配置的时域特性	106
6.2 服务质量	59	8.1.4 CSI-IM 干扰测量	107
6.3 无线协议架构	60	8.1.5 零功率 CSI-RS	108
6.4 用户面协议	61	8.1.6 CSI-RS 资源集	108
6.4.1 服务数据调整协议	63	8.1.7 跟踪参考信号	109
6.4.2 分组数据汇聚协议	63	8.1.8 物理天线映射	109
6.4.3 无线链路控制	64	8.2 下行测量和上报	110
6.4.4 媒体接入控制	65	8.2.1 上报数量	111
6.4.5 物理层	73	8.2.2 测量资源	111
6.5 控制面协议	74	8.2.3 上报类型	112
6.5.1 RRC 状态机	74	8.3 上行信道探测: SRS	112
6.5.2 空闲态和非激活态的移动性	76	8.3.1 SRS 序列和 Zadoff-Chu 序列	114
6.5.3 连接态的移动性	77	8.3.2 多端口 SRS	115
		8.3.3 SRS 时域结构	115

8.3.4	SRS 资源集	115
8.3.5	物理天线映射	116
第9章	传输信道处理	117
9.1	概述	117
9.2	信道编码	118
9.2.1	每个传输块添加 CRC	118
9.2.2	码块分段	118
9.2.3	信道编码	119
9.3	速率匹配和物理层 HARQ 功能	120
9.4	加扰	122
9.5	调制	122
9.6	层映射	123
9.7	上行 DFT 预编码	123
9.8	多天线预编码	123
9.8.1	下行预编码	124
9.8.2	上行预编码	125
9.9	资源映射	126
9.10	下行预留资源	128
9.11	参考信号	130
9.11.1	基于 OFDM 的上下行传输所使用的 DM-RS	131
9.11.2	基于 DFT 预编码的 OFDM 上行传输所使用的 DM-RS	137
9.11.3	相位跟踪参考信号	138
第10章	物理层控制信令	140
10.1	下行	140
10.1.1	物理下行控制信道	141
10.1.2	控制资源集	143
10.1.3	盲解码和搜索空间	148
10.1.4	下行调度分配: DCI 格式 1-0 和 1-1	151
10.1.5	上行调度授权: DCI 格式 0-0 和 0-1	154
10.1.6	时隙格式指示: DCI 格式 2-0	156
10.1.7	抢占指示: DCI 格式 2-1	156
10.1.8	上行功率控制命令: DCI 格式 2-2	156
10.1.9	SRS 控制命令: DCI 格式 2-3	157
10.1.10	指示频域资源的信令	157
10.1.11	指示时域资源的信令	158
10.1.12	指示传输块大小的信令	160
10.2	上行	161
10.2.1	PUCCH 基本结构	162
10.2.2	PUCCH 格式 0	163
10.2.3	PUCCH 格式 1	165
10.2.4	PUCCH 格式 2	166
10.2.5	PUCCH 格式 3	167
10.2.6	PUCCH 格式 4	168
10.2.7	PUCCH 传输使用的资源和参数	169
10.2.8	通过 PUSCH 传输的上行控制信令	170
第11章	多天线传输	173
11.1	简介	173
11.2	下行多天线预编码	177
11.2.1	类型 I CSI	178
11.2.2	类型 II CSI	180
11.3	上行多天线预编码	180
11.3.1	基于码本的传输	181
11.3.2	基于非码本的预编码	183
第12章	波束管理	185
12.1	初始波束建立	186
12.2	波束调整	186
12.2.1	下行发送端波束调整	187
12.2.2	下行接收端波束调整	188
12.2.3	上行波束调整	188

12.2.4 波束指示和 TCI	188	15.1.3 PUCCH 功率控制	226
12.3 波束恢复	189	15.1.4 多个上行载波情况下的 功率控制	226
12.3.1 波束失败检测	190	15.2 上行定时控制	227
12.3.2 新备选波束的认定	190	第16章 初始接入	229
12.3.3 终端恢复请求和网络响应	190	16.1 小区搜索	229
第13章 重传协议	192	16.1.1 SSB	229
13.1 带软合并的 HARQ	193	16.1.2 SSB 的频域位置	231
13.1.1 软合并	195	16.1.3 SSB 的周期	231
13.1.2 下行 HARQ	196	16.1.4 SS 突发集: 时域上多个 SSB	232
13.1.3 上行 HARQ	197	16.1.5 PSS、SSS 和 PBCH 的详细说明	234
13.1.4 上行确认的定时	197	16.1.6 剩余系统信息	237
13.1.5 HARQ 确认的复用	199	16.2 随机接入	237
13.2 RLC	201	16.2.1 前导码的发送	238
13.2.1 序列编号和分段	202	16.2.2 随机接入响应	243
13.2.2 确认模式和 RLC 重传	203	16.2.3 消息 3: 竞争解决	244
13.3 PDCP	205	16.2.4 消息 4: 竞争解决和连接建立	244
第14章 调度	207	16.2.5 补充上行的随机接入	245
14.1 动态下行调度	207	第17章 LTE/NR互通和共存	246
14.1.1 带宽自适应	209	17.1 LTE/NR 双连接	246
14.1.2 下行抢占处理	210	17.1.1 部署场景	247
14.2 动态上行调度	211	17.1.2 架构选项	248
14.2.1 上行优先级处理	213	17.1.3 单发工作	248
14.2.2 调度请求	215	17.2 LTE/NR 共存	249
14.2.3 缓存状态报告	216	第18章 射频特性	252
14.2.4 功率余量报告	217	18.1 频谱灵活性的影响	252
14.3 调度和动态 TDD	218	18.2 不同频率范围的射频要求	254
14.4 无动态授权的传输	218	18.3 信道带宽和频谱利用率	255
14.5 不连续接收	220	18.4 终端射频要求的总体结构	257
第15章 上行功率和定时控制	222	18.5 基站射频要求的总体结构	257
15.1 上行功率控制	222	18.5.1 NR 基站射频传导要求和辐射 要求	257
15.1.1 功率控制基线	222		
15.1.2 基于波束的功率控制	224		

18.5.2 NR 不同频率范围的基站类型	259
18.6 NR 射频传导要求概述	260
18.6.1 发射机传导特性	260
18.6.2 接收机传导特性	261
18.6.3 区域性要求	262
18.6.4 通过网络信令通知特定频段的 终端要求	262
18.6.5 基站等级	262
18.7 传导输出功率电平要求	263
18.7.1 基站输出功率和动态范围	263
18.7.2 终端输出功率和动态范围	263
18.8 发射信号质量	264
18.8.1 EVM 和频率误差	264
18.8.2 终端带内发射	264
18.8.3 基站时间对齐	264
18.9 无用发射传导要求	265
18.9.1 实现因素	265
18.9.2 带外域的发射模板	265
18.9.3 邻道泄漏比	267
18.9.4 杂散发射	268
18.9.5 占用带宽	269
18.9.6 发射机互调	269
18.10 传导灵敏度和动态范围	269
18.11 接收机对于干扰信号的敏感性	270
18.12 NR 的射频辐射要求	271
18.12.1 FR2 的终端辐射要求	272
18.12.2 FR1 的基站辐射要求	272
18.12.3 FR2 的基站辐射要求	273
18.13 研究中的 NR 射频要求	274
18.13.1 多标准无线基站	274
18.13.2 多频段能力基站	275
18.13.3 工作在非连续频谱	277

第19章 毫米波射频技术	279
19.1 ADC 和 DAC	279
19.2 本振和相位噪声	281
19.2.1 自由振荡器和锁相环的 相位噪声特性	281
19.2.2 毫米波信号生成的挑战	283
19.3 功放效率和无用发射的关系	284
19.4 滤波器	286
19.4.1 模拟前端滤波器	287
19.4.2 插损和带宽	288
19.4.3 滤波器实现示例	289
19.5 接收机噪声系数、动态范围和 带宽的关系	291
19.5.1 接收机和噪声系数模型	291
19.5.2 噪声因子和噪底	292
19.5.3 压缩点和增益	293
19.5.4 功率谱密度和动态范围	294
19.5.5 载波频率和毫米波技术	294
19.6 总结	296
第20章 5G的演进	297
20.1 接入和回传一体化	297
20.2 工作在非授权频谱	298
20.3 非正交多址接入	299
20.4 机器类型通信	299
20.5 设备到设备的通信	300
20.6 频谱和双工灵活性	300
20.7 结束语	302
术语表	303
参考文献	310

第 1 章

5G 概述

过去 40 年，世界见证了四代移动通信系统的发展。

第一代移动通信始于 1980 年左右，使用的是模拟传输，主要技术有北美制定的 AMPS (Advanced Mobile Phone System, 高级移动电话系统)、北欧国家的公共电话网络运营商 (当时由政府控制) 联合制定的 NMT (Nordic Mobile Telephony, 北欧移动电话), 以及在英国等地使用的 TACS (Total Access Communication System, 全接入通信系统)。基于第一代技术的移动通信系统只限于提供语音服务, 不过, 这是历史上移动电话首次可供普通民众使用。

第二代移动通信出现于 20 世纪 90 年代早期, 其特点是在无线链路上引入了数字传输。虽然其目标服务仍然是语音, 但是数字传输使得第二代移动通信系统也能提供有限的数据服务。最初存在几种不同的第二代技术, 包括由许多欧盟国家联合制定的 GSM (Global System for Mobile communication, 全球移动通信系统)、D-AMPS (Digital AMPS, 数字高级移动电话系统)、由日本提出并且仅在日本使用的 PDC (Personal Digital Cellular, 个人数字蜂窝), 以及稍后发展出来的基于 CDMA 的 IS-95 技术。随着时间的推移, GSM 从欧洲扩展到世界, 并逐渐成为第二代技术中的绝对主导。正是由于 GSM 的成功, 第二代系统把移动电话从一个小众用品变成了一个世界上大多数人使用的、成为生活必需品一部分的通信工具。即使在今天, 尽管第三代和第四代技术已经问世, 在世界的许多地方 GSM 仍然起着主要作用, 在某些情况下甚至是唯一可用的移动通信技术。

第三代移动通信, 通常称为 3G, 出现于 2000 年初期。3G 是朝着高质量移动宽带迈出的真正一步, 尤其是借助于称为 3G 演进的 HSPA (High Speed Packet Access, 高速数据接入)^[21] 技术, 无线互联网的快速接入成为可能。此外, 相对于早期的基于频分双工 (Frequency-Division Duplex, FDD) 对称频谱的移动通信技术 (即网络到终端和终端到网络的链路各自使用不同的频谱, 见第 7 章), 3G 首次引入了非对称频谱的移动通信技术, 它基于由中国主推的基于时分双工 (Time Division Duplex, TDD) 的 TD-SCDMA 技术。

从过去的几年到现在, 作为主导的是以 LTE 技术^[28] 为代表的第四代移动通信。在

HSPA 的基础之上, LTE 提供更高的效率和增强的移动宽带体验, 即终端用户的数据速率更高。这有赖于能提供更大传输带宽的基于 OFDM 的传输技术以及更先进的多天线技术。此外, 相对于 3G 支持一种特殊的非对称频谱工作的无线接入技术 (TD-SCDMA), LTE 支持在一个通用的无线接入技术之中实现 FDD 和 TDD 工作, 即对称和非对称频谱的工作。这样, LTE 就实现了一个全球统一的移动通信技术, 适用于对称和非对称频谱以及所有移动网络运营商。在第 4 章里, 我们还会详细讨论 LTE 的演进是如何把移动通信网络的范围扩展到非授权频谱的。

图 1-1 展示了移动通信系统的发展史。

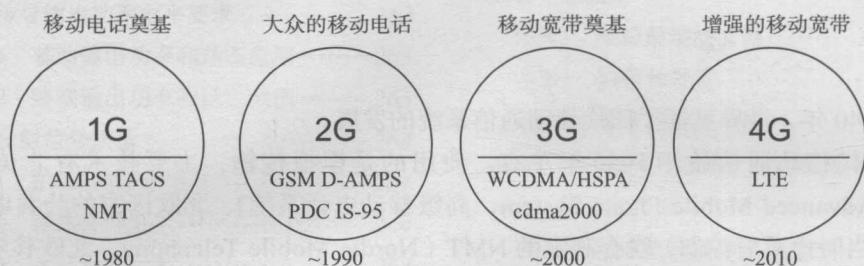


图 1-1 移动通信发展史

1.1 3GPP 和移动通信的标准化

移动通信成功的关键是存在被许多国家认可的技术规范和标准。这些规范和标准保证了不同厂家生产的终端和设备的可部署性和互操作性, 以及终端在全球范围内的可用性。

正如之前提到的, 第一代 NMT 技术就是由多个国家共同制定的, 使得终端及其签约使用在这几个北欧国家范围内都能有效工作。接下来的 GSM 移动通信技术规范和标准的制定也由欧洲的许多国家共同完成。相关工作在 CEPT 进行, CEPT 后来改名为 ETSI (European Telecommunications Standards Institute, 欧洲电信标准组织)。所以从一开始, GSM 终端及签约服务就能在很多国家正常工作, 涵盖了大量的潜在用户。这个巨大的共同市场对终端有极大的需求, 催生了五花八门的手机品牌, 大大降低了终端的价格。

不过, 随着 3G 技术规范, 特别是 WCDMA 的制定, 迈出了制定真正的全球性移动通信标准的脚步。一开始, 3G 技术标准的制定工作也基于区域分别在欧洲 (ETSI)、北美 (TIA, T1P1)、日本 (ARIB) 等地进行。然而, GSM 的成功已经表明技术覆盖广度的重要性, 特别是终端的通用性和成本方面。而且越来越清楚的是, 虽然不同的地区性标准化组织都在分别进行自己的工作, 但是研究的技术具有很多相似性。特别是欧洲和日本, 都在研究不同的, 但非常类似的 WCDMA (Wideband CDMA, 宽带 CDMA) 技术。

最终, 在 1998 年, 各个区域性标准化组织走到一起, 成立了 3GPP (Third-Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴项目), 其目标是基于 WCDMA 来完成 3G 技术规范的制定。稍后, 一个平行的组织 (3GPP2) 也成立了, 其任务是制定 3G 技术的替代