

5G PHYSICAL LAYER
Principles, Models and Technology Components

5G NR物理层 技术详解

原理、模型和组件

[瑞典] 阿里·扎伊迪 (Ali Zaidi) 弗雷德里克·阿斯利 (Fredrik Athley) 乔纳斯·梅德博 (Jonas Medbo)

[瑞典] 乌尔夫·古斯塔夫松 (Ulf Gustavsson) 朱塞佩·杜里西 (Giuseppe Durisi)

[中] 陈晓明 (Xiaoming Chen)

著

刘阳 李蕾 张增洁 译

详解5G NR物理层技术（波形、编码调制、信道仿真和多天线技术等）及其背后的成因

5G专家和学者共同撰写，爱立信中国研发团队翻译，行业专家联袂推荐



机械工业出版社
China Machine Press

| 现代通信网络技术丛书 |

5G PHYSICAL LAYER

Principles, Models and Technology Components

5G NR物理层

技术详解

原理、模型和组件

[瑞典] 阿里·扎伊迪 (Ali Zaidi) 弗雷德里克·阿斯利 (Fredrik Athley) 乔纳斯·梅德博 (Jonas Medbo)

[瑞典] 乌尔夫·古斯塔夫松 (Ulf Gustavsson) 朱塞佩·杜里西 (Giuseppe Durisi)

[中] 陈晓明 (Xiaoming Chen)

刘阳 李蕾 张增洁 译



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

5G NR 物理层技术详解: 原理、模型和组件 / (瑞典) 阿里·扎伊迪 (Ali Zaidi) 等著; 刘阳, 李蕾, 张增洁译.
—北京: 机械工业出版社, 2019.8

(现代通信网络技术丛书)

书名原文: 5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components

ISBN 978-7-111-63187-3

I. 5… II. ①阿… ②刘… ③李… ④张… III. 无线电通信 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 139739 号

本书版权登记号: 图字 01-2019-2170

5G Physical Layer: Principles, Models and Technology Components

Ali Zaidi, Fredrik Athley, Jonas Medbo, Ulf Gustavsson, Giuseppe Durisi, Xiaoming Chen

ISBN: 978-0-12-814578-4

Copyright © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Authorized Chinese translation published by China Machine Press.

《5G NR 物理层技术详解: 原理、模型和组件》(刘阳 李蕾 张增洁 译)

ISBN: 978-7-111-63187-3

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 Physical Layer: Principles, Models and Technology Components 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 物理层技术详解: 原理、模型和组件

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: 冯秀泳

责任校对: 李秋荣

印刷: 大厂回族自治县益利印刷有限公司

版次: 2019 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 186mm × 240mm 1/16

印张: 17.75

书号: ISBN 978-7-111-63187-3

定价: 139.00 元

客服电话: (010) 88361066 88379833 68326294

投稿热线: (010) 88379604

华章网站: www.hzbook.com

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

推荐序一

物理层传输技术是无线与移动通信的核心，它在过去 40 年间的蓬勃发展直接促成了移动通信从第一代（1G）到第四代（4G）的演进，在实现任何时间、任何地点与任何人通信梦想的同时，彻底改变了人类的生活方式。今天，面向以物联网和无人驾驶等为标志的新兴应用，移动通信正在向更高容量、更大规模连接、更低时延和更高可靠性的第五代（5G）方向演进，并通过与各垂直行业应用的深度融合，让我们的城市和社会更加智能和高效。

为此，5G 将引入全新的物理层传输技术和频谱，包括大规模 MIMO（Multiple-Input Multiple-Output）技术、非正交多址（Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA）技术、全双工技术以及毫米波传输技术等。本书对 5G 物理层核心技术做了系统性的介绍，并且对这些技术的基本原理做了深入浅出的分析。有很多原理性的分析是在教科书上出现过的，但是作者赋予了它们在工程应用中的新意义。对于如何为 5G 新频谱特性和高容量低时延的新应用选择最优的技术机制，如何准确和真实建模，如何评估备选技术的适用性，如何做出成本（复杂度）和性能的折中以及标准化工作的过程都有详细的描述。这些分析和思路不仅适用于 5G 通信系统，对任何无线通信系统从理论到实现都有很好的指导作用。因此我相信无论是在校生还是无线通信领域的从业者，都能从本书中得到帮助。

5G 在毫米波波段的频谱分配对于所有的无线通信系统来说都是全新的应用，也是中国通信技术腾飞的一个重大战略机遇。本书采用大量篇幅介绍了毫米波波段的电磁波传播特性，并配有研究方法和大量实测数据，提供了在该全新领域中摸索尝试的宝贵经验和数据，值得学术界和产业界学习与借鉴。

本书由爱立信研究院的几位专家及爱立信公司的战略产品经理、瑞典查尔姆斯理工大学教授以及西安交通大学教授合作完成。该创作团队的构成也很好地体现了学术理论、工程实践、行业应用和商业价值的深度融合。

在全球移动通信学术界和产业界的通力合作下，5G 时代正渐行渐近，5G 引领的未来已经触手可及。我相信本书的翻译出版会进一步推动以 5G 为代表的移动通信技术在中国的蓬勃发展。

清华大学电子工程系教授

IEEE 会士

牛志升

推荐序二

随着 5G 技术的快速推进，5G 的产业化逐渐提上日程。5G 产品的开发和产业规模也逐渐成形，同时 5G 也将面临种种前所未有的挑战。例如如何满足多种频谱需求，尤其是高频领域的超宽带和新频谱，是之前各代移动通信系统从未涉及的；如何同时满足多种场景，比如极高用户速率、极低时延、超大容量、无缝覆盖、高能效及大规模终端性能要求等。

本书是一本具有很强技术理论性和实际操作参考性的书籍。针对 5G 面临的各个技术挑战逐一详解，尤其是 5G 技术核心之一的物理层，从物理层架构、传输和信道建模、硬件建模和实现、多载波波形及多天线技术等各个领域进行关键技术分析，并提供技术实现和测量。书中既有很扎实的理论基础，也有目前业内最先进的实现方式。

本书的作者包括爱立信研究院的几位专家及战略产品经理、瑞典查尔姆斯理工大学教授，以及中国西安交通大学教授。他们的技术水平和行业洞察力在公司内部和业界都得到了高度的认可。几位译者也是我熟识的同事，她们有的是通信标准领域资深人士，有的是产品部门的核心技术骨干。我相信本书中文版的引入会进一步推动 5G 技术在中国的产业发展与落地，并为产品开发者提供极有价值的技术参考。

作为行业的领先者和思考者，爱立信公司不仅在技术预研和标准领域孜孜不倦地做出了杰出贡献，也积极参与了中国的 5G 研发测试活动，并将技术标准转化成性能和品质过硬的产品。在此特别感谢本书的作者和译者，感谢他们在繁忙的工作之余将先进的知识和宝贵的经验进行总结，并贡献给业界；也希望本书的出版对 5G 在各个行业和领域的探索与尝试有所裨益，并期待 5G 能够成为网络社会数字化转型的强大引擎。

爱立信（中国）通信有限公司 CTO

彭俊江

译者序

随着移动通信技术的持续演进，我们已经进入 5G 时代。在这个万物互联的时代，5G 为各行各业和五花八门的应用提供了有力的技术支撑，也为层出不穷的新创意铺设了良好的技术基础。

物理层是任何通信技术的核心，其结构和设计决定了频谱效率、调度方式和网络性能。这是第一本全面介绍 5G 物理层的专业书籍，本书的作者都是在无线通信研究和标准化领域深耕多年的专家，书中通过对波形、调制、参数集、信道编码和多天线方案的详细阐述，给读者展现了一幅 5G 物理层的全景视图。本书还对 5G 物理层技术背后的成因以及无线电波传播和硬件损伤在高频下建模的重要性进行了详细说明。对于从事无线通信系统研发的人员和相关专业的高校学生，本书都具有极高的参考价值。

译者有幸参与了 3G、4G 和 5G 在中国的产生、发展和壮大过程，亲历了移动通信产业突飞猛进、波澜壮阔的伟大进程，这也是我们人生中的一段宝贵经历。

本书英文版出版后引起了业界的极大兴趣，翻译工作也紧随着启动。我们希望能够将本书的内容尽早带给国内的广大读者。但由于翻译工作主要是在业余时间进行，因此历时近四个月。虽然译者在移动通信行业已经工作多年，但是要保证译文的信、达、雅，还是很有挑战的。书中难免存在疏漏和错误，恳请读者能够不吝指正。我们希望在后续的版本里改正这些不足。

在本书的翻译过程中，译者得到了原作者的大力支持。编辑朱捷先生和冯秀泳先生在整个过程中的耐心指导和悉心审阅，也给了我们很大帮助。在翻译工作中，研究助理杨茜婷同学做了很多排版整理工作。在此，我们一并表示诚挚的感谢！

我们要感谢爱立信公司和爱立信的同事给予的热情帮助，他们提出了很多宝贵的建议和意见。我们还要感谢家人永远的支持，这是激励我们不断前行的动力。

移动通信对于人们生活方式的影响已经渗透到各个角落，5G 的发展会带来更多新的变化。我们会继续为中国的通信事业贡献自己的微薄之力，也希望和各位同道一起，为让通信营造出更加美好的生活而努力。

刘阳 李蕾 张增洁

2019 年 6 月于爱立信大厦

致 谢

感谢以下同事的持续支持、合作和鼓舞：Robert Baldemair (爱立信), Vicent Molés-Cases (前爱立信, 现 UPV), Markus Ringström (爱立信), Joakim Sorelius (爱立信), Marie Hogan (爱立信), Gianluigi Liva (德国航空航天中心), Hua Wang (是德科技), Kittipong Kittichokechai (爱立信), Mattias Andersson (爱立信), Erik Dahlman (爱立信), Stefan Parkvall (爱立信), Kristoffer Andersson (爱立信), Sven Mattisson (爱立信), Lars Sundström (爱立信), Per Landin (爱立信), Sven Jacobsson (爱立信), Thomas Eriksson (查尔姆斯大学), Christian Fager (查尔姆斯大学), Erik G. Larsson (林雪平大学), Christopher Mollén (前林雪平大学), Katharina Hausmair (前查尔姆斯大学, 现 Qamcom), Christoph Studer (康奈尔大学), Jian Luo (华为), Jaakko Vihriälä (诺基亚), Andreas Wolfgang (Qamcom), Robin Gerzaguet (ENSSAT), Yinan Qi (三星), Ning He (爱立信), Karl Werner (爱立信), Sebastian Faxér (爱立信), Shehzad Ali Ashraf (爱立信), Eleftherios Karipidis (爱立信), Peter von Wrycza (爱立信), Miurel Tercero (爱立信), Håkan Björkegren (爱立信), Mikael Wahlén (爱立信), Joakim Hallin (爱立信), Arne Simonsson (爱立信), Kjell Larsson (爱立信), Göran Klang (爱立信), Dennis Sundman (爱立信), Henrik Asplund (爱立信), Satyam Dwivedi (爱立信)。

我们感谢 mmMAGIC (欧洲合作研究项目)、3GPP (标准开发组织之间的合作项目) 和爱立信研究院为 5G NR 的开发做出的巨大贡献。我们也感谢 Qamcom Research & Technology AB 发布了本书的源代码。

目 录

推荐序一		2.8 物理层过程和测量	30
推荐序二		2.9 物理层的挑战	30
译者序		2.9.1 传播相关的挑战	30
致谢		2.9.2 硬件相关的挑战	31
		参考文献	32
第 1 章 绪论：5G 无线接入	1	第 3 章 传播和信道建模	33
1.1 移动通信的演进	2	3.1 传播的基本原理	33
1.2 5G 新的无线接入技术	3	3.1.1 电磁波	34
1.3 5G NR 全景视图	4	3.1.2 自由空间传播	34
1.3.1 5G 标准化	4	3.1.3 散射和吸收	37
1.3.2 5G 频谱	6	3.2 传播信道特性	37
1.3.3 5G 用例	9	3.2.1 频率-时延域	39
1.3.4 5G 外场试验	9	3.2.2 多普勒-时域	42
1.3.5 5G 商用部署	13	3.2.3 方向域	44
1.4 本书预览	15	3.3 试验信道特性	45
参考文献	17	3.3.1 测量技术	45
第 2 章 NR 物理层概述	19	3.3.2 分析方法	47
2.1 无线协议架构	20	3.3.3 传输损耗测量	51
2.2 NR 物理层：关键技术	21	3.3.4 时延域测量	56
2.2.1 调制	21	3.3.5 方向域测量	59
2.2.2 波形	21	3.4 信道建模	68
2.2.3 多天线	22	3.4.1 5G 随机信道模型	68
2.2.4 信道编码	23	3.4.2 基于几何的建模	75
2.3 物理时频资源	23	3.5 总结和展望	76
2.4 物理信道	25	参考文献	77
2.5 物理信号	25	第 4 章 硬件损伤的数学建模	79
2.6 双工机制	27	4.1 射频功率放大器	80
2.7 帧结构	28		

4.1.1 伏尔特拉级数	81	5.5.5 相位噪声鲁棒性对比	137
4.1.2 伏尔特拉级数的常见子集	82	参考文献	142
4.1.3 全局和局部基函数	84	第6章 NR的波形	144
4.1.4 试验模型验证	85	6.1 OFDM对于NR的适用性	144
4.1.5 正交基函数	88	6.2 NR OFDM的可扩展性	147
4.1.6 多天线环境及互耦	90	6.2.1 为什么选择15 kHz作为参数集 基线	150
4.2 振荡器相位噪声	94	6.2.2 为什么选择 15×2^n kHz作为参数 集缩放比例	150
4.2.1 相位噪声功率谱和Leeson公式	94	6.3 OFDM参数集的实现	151
4.2.2 相位噪声建模:自激振荡器	94	6.3.1 相位噪声	152
4.2.3 相位噪声建模:锁相环	95	6.3.2 小区大小、业务时延及移动性	153
4.3 数据转换器	97	6.3.3 业务复用	157
4.3.1 量化噪声的建模	97	6.3.4 频谱限制	157
4.4 统计建模	98	6.3.5 保护频带的考虑	159
4.4.1 Bussgang定理和系统模型	98	6.3.6 实现因素	162
4.5 功率放大器的随机建模	99	6.4 改善NR波形的功率效率	162
4.6 振荡器相位噪声	100	6.4.1 有失真的技术	164
4.7 数据转换器的随机建模	100	6.4.2 无失真的技术	165
4.8 模型的串联和仿真	101	6.5 同步误差的影响	167
4.8.1 信号与干扰和噪声比	102	6.5.1 定时偏移的影响	167
4.8.2 仿真	102	6.5.2 载波频率偏移的影响	169
4.8.3 仿真结果	104	6.5.3 采样频率偏移	170
参考文献	106	6.6 损伤抑制	171
第5章 多载波波形	107	6.6.1 相位噪声抑制机制	171
5.1 多载波波形概述	108	6.6.2 CFO和SFO抑制	174
5.1.1 正交性原理	108	参考文献	179
5.1.2 基于OFDM的波形	111	第7章 多天线技术	180
5.1.3 基于滤波器组的波形	117	7.1 多天线技术在NR中的作用	181
5.2 单载波DFTS-OFDM	126	7.1.1 低频	181
5.3 5G NR波形设计要求	128	7.1.2 高频	181
5.4 NR波形设计的关键性能指标	129	7.2 多天线基本原理	183
5.5 NR波形对比	131	7.2.1 波束赋形、预编码和分集	183
5.5.1 频率局部化	132	7.2.2 空间复用	188
5.5.2 功率效率	134		
5.5.3 时变衰落信道	135		
5.5.4 基带复杂度	135		

7.2.3 天线阵列架构	194	8.3 衰落信道的编码机制	247
7.2.4 UE 天线	200	8.3.1 SISO 的情况	247
7.2.5 天线端口和 QCL	201	8.3.2 MIMO 的情况	249
7.2.6 CSI 的获取	202	参考文献	251
7.2.7 大规模 MIMO	207	第 9 章 仿真器	253
7.3 NR 中多天线技术	208	9.1 仿真器概览	254
7.3.1 获取 CSI	209	9.2 功能模块	254
7.3.2 下行 MIMO 传输	212	9.2.1 信道模型	254
7.3.3 上行 MIMO 传输	213	9.2.2 功放模型	255
7.3.4 波束管理	215	9.2.3 相位噪声模型	255
7.4 试验结果	222	9.2.4 同步	257
7.4.1 波束赋形增益	222	9.2.5 信道估计和均衡	257
7.4.2 波束跟踪	224	9.3 波形	257
7.4.3 系统仿真	225	9.3.1 CP-OFDM	257
参考文献	227	9.3.2 W-OFDM	258
第 8 章 信道编码	229	9.3.3 UF-OFDM	258
8.1 前向纠错的基础限制	230	9.3.4 FBMC-OQAM	258
8.1.1 二进制 -AWGN 信道	230	9.3.5 FBMC-QAM	259
8.1.2 二进制 -AWGN 信道的编码机制	230	9.4 仿真练习	259
8.1.3 性能指标	230	9.4.1 频谱再生	259
8.2 二进制 -AWGN 信道的 FEC 机制	234	9.4.2 CFO 损伤	261
8.2.1 简介	234	9.4.3 PN 损伤	263
8.2.2 一些定义	234	9.4.4 衰落信道的损伤	265
8.2.3 LDPC 码	236	参考文献	266
8.2.4 极化码	239	缩略语表	268
8.2.5 较短码块长度的其他编码机制	244		

第 1 章

绪论：5G 无线接入

信息和通信技术（Information and Communication Technologies, ICT）为社会上的几乎每个领域都带来了频繁的创新。不断增长的信息即时传输和处理能力给社会上的各个方面都带来了变化：网上购物、社交互动、专业网络、媒体分发、网上学习、即时信息访问、远程观看直播、音频和视频沟通、虚拟办公室和虚拟办公等。各行各业都受益于信息和通信技术的发展，它们带来了本行业流程和业务模式的改进。

第五代（5G）移动通信预计将极大地扩展移动网络的能力。5G 系统在各种领域引入了新的技术和功能——无线接入、传输、云、应用以及管理系统^[6]。这些先进技术不仅针对传统的移动宽带用户，而且将新兴的机器类型用户纳入其中，这样可以为消费者和整个行业提供新的更优质的服务，从而释放出物联网（Internet of Things, IoT）、虚拟和增强现实应用的潜力。基于最新的针对 10 个不同的行业的调查报告显示^[4]，到 2026 年，由 5G 技术推动所带来的全球收入将达到 1.3 万亿美元（参照图 1-1 中各个行业的收入）。到 2023 年，预计将有 35 亿的蜂窝 IoT 连接^[24]。

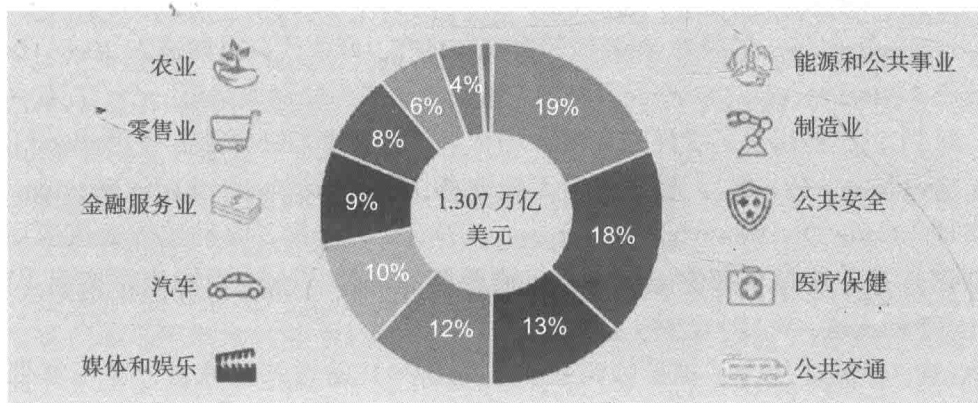


图 1-1 5G 促进了行业的数字化，为 ICT 各方带来了收入，2026（来源：爱立信^[4]）

任何移动通信系统的骨干都是它的无线接入技术，它将终端与无线基站连接起来。因

为大多数社会和行业应用都在期盼 5G 革新能够满足它们的特定需求，这就为 5G 无线网络接入的设计带来了很大的挑战。5G 无线接入技术需要提供极高的数据速率、无缝覆盖、超级可靠性、极低时延、高能效以及大规模异构连接。以人为中心的新兴应用包括增强现实、虚拟现实和在线游戏——这些都需要极高的吞吐量和低时延。大规模机器类型通信又分为两种：大规模 IoT (massive IoT) 和关键 IoT (critical IoT)。大规模 IoT 的特性是大量低成本的终端连接：每个终端数据量小并且续航时间长，以及满足深入覆盖（比如地下或者偏远地区）。这种应用常见于智能建筑、公用事业、运输物流、农业和车队管理。关键 IoT 的特点是超可靠性和极低时延连接性，比如支持自动驾驶汽车、智能电网、机器人手术、交通安全和工业控制。

本书关注的是即将到来的 5G 无线接入技术并且侧重于物理层。本章概述 5G 无线接入技术以及全球发展的状况。我们从 1.1 节移动通信历史简述开始，1.2 节介绍了 5G 无线接入技术。在 1.3 节，我们提供了一个 5G 无线接入的全景图——频谱分配、标准化、应用案例及其要求、外场试验以及未来的商用部署。1.4 节提供了本书的预览。

1.1 移动通信的演进

1946 年，美国联邦通信委员会 (FCC) 批准了第一个移动电话服务运营商 AT&T (自 1947 年开始运营)。当时设备笨重，因为重量大、耗电极高，这些设备必须安装在车内。自此，经过 30 多年的技术演进，蜂窝通信技术从模拟转向了数字模式，从以语音业务为主演进到了高速数据通信。

自 20 世纪 80 年代中期开始，第一代 (1G) 蜂窝通信主要承载语音业务，主要模式有：在美国应用的先进移动电话系统 (Advanced Mobile Phone System, AMPS) 和在挪威的纳维亚使用的北欧移动电话 (Nordic Mobile Telephone, NMT)。这些模拟模式在 20 世纪 90 年代中后期被最初的数字通信系统 (欧洲的 Global System for Mobile Communications, GSM) 和美国的数字 AMPS) 所取代，自此进入 2G 时代。此时，短消息服务 (Short Message Service, SMS) 被引入，成为蜂窝通信第一个广泛使用的非语音应用。到 21 世纪初出现了增强的 2.5G：增强型数据速率 GSM 演进 (Enhanced Data rate for GSM Evolution, EDGE)、通用分组无线业务 (General Packet Radio Service, GPRS) 和码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA)，引发了移动数据通信应用和早期蜂窝互联网连接。这是早期的尝试，而且需要特定的协议——无线应用协议 (Wireless Application Protocol, WAP) 支持。

从 2G 向 3G 演进是为了满足蜂窝接入数据速率日益增长的需求，基于宽带 CDMA (WCDMA) 的通用移动通信系统 (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS) 技术由第三代合作伙伴项目 (third Generation Partnership Project, 3GPP) 于 2000 年左右推出。移动用户设备技术的发展，使得用户不仅可以使⽤多媒体信息服务 (Multimedia Message Service, MMS) 进行通信，而且可以享受视频流服务。当发展到 4G 时，引入

了长期演进 (Long Term Evolution, LTE), 这不仅带来空口的重大改变, 而且从码分复用转到正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 以及时分双工 (Time Division Duplex, TDD) 或者频分双工 (Frequency Division Duplex, FDD)。

进入 4G 时代后, 早期主要有两种竞争技术。基于 IEEE 802.16m 的全球微波互联接入 (Worldwide inter-operability for Microwave Access, WiMAX) 以及作为 LTE 扩展的 LTE Advanced。LTE-A 引入了多种技术组件, 比如载波聚合、对协作多点 (Coordinated MultiPoint, CoMP) 传输支持的改进, 以及用于改善热点服务质量 (Quality of Service, QoS) 和提升小区边缘用户覆盖的异构网络 (HetNet) 部署。作为当今占主导地位的蜂窝接入技术, LTE-A 成为过渡到 5G 移动通信的基础。从 4G 到 5G 过渡的灵感来自新的跨多个行业的以人为中心和以机器为中心的服务的启示。

1.2 5G 新的无线接入技术

5G 无线接入使网络社会成为可能, 其中信息可以在任何时候任何地点被任何人任何物访问并且共享^[2]。5G 应该能为任何可以受益于连接的事物提供无线连接。为建立真正的网络社会, 有三个主要的挑战:

- 连接终端数量的大幅增长。
- 业务量的大幅增长。
- 具有不同需求和特性的广泛的应用场景。

为了应对这些挑战, 5G 无线接入不仅需要增加新的功能, 还需要更多频谱和更宽的频段。

图 1-2 说明了现有 (2G、3G、4G) 和未来 (5G) 移动通信系统的工作频率范围。当前蜂窝系统工作在 6 GHz 以下。在毫米波频段 (30 ~ 300 GHz) 有大量的可用频谱, 然而目前还没有在毫米波频率运行的商用移动通信系统。4G LTE 仅设计为工作在低于 6 GHz 的频率下。有一些基于 IEEE 802.11ad 和 802.15.3c 标准的局域网和 (绝大部分) 室内通信系统工作在 60 GHz 非授权频段。IEEE 802.11ay (IEEE 802.11ad 的一个后续版本) 正在制定中。3GPP 目前正在制定一个新的无线接入全球标准——5G 新空口 (New Radio, NR), 可以工作在从低于 1 GHz 直到 100 GHz 的频率范围内。5G NR 必须释放出新的频率和新的功能以支持不断增长的以人为中心及以机器为中心的应用。

5G 无线接入的愿景如图 1-3 所示。5G 无线接入包括了 5G NR 和 LTE 演进。LTE 正在持续演进以满足不断增长的 5G 需求。LTE 向 5G 的演进被称为 LTE Evolution^[13]。LTE 运行于低于 6 GHz 的频段, 而 NR 的工作频段覆盖了从低于 1 GHz 到高达 100 GHz 的范围。5G NR 经过优化, 具有卓越的性能; 它不再向后兼容 LTE, 这意味着传统的 LTE 终端将无法接入 5G 网络。但是, 一个紧密集成的 NR 和 LTE 演进的系统将会提供 NR 和 LTE 业务的高效聚合。

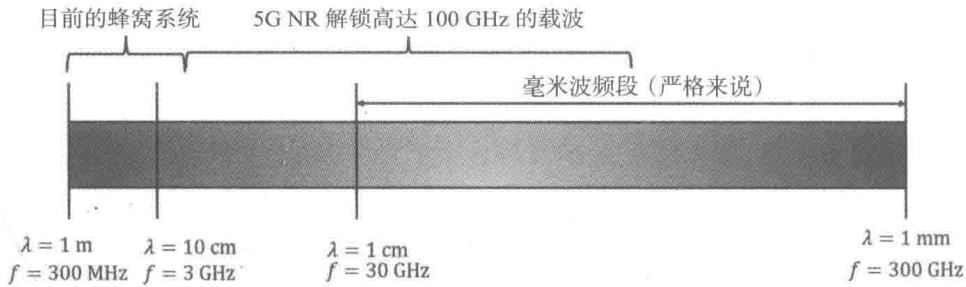


图 1-2 目前和未来移动通信系统的频率范围

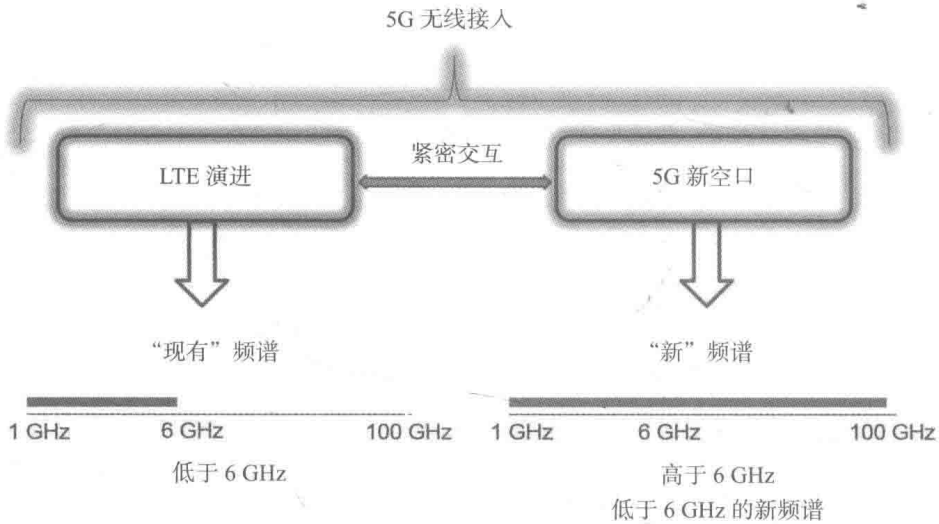


图 1-3 5G 无线接入愿景

1.3 5G NR 全景视图

5G 无线接入技术（从 2016 年开始被称为 5G NR）的研究和概念发展大约开始于十年前，受新的鼓舞人心的应用和商业案例所激励。对 5G 研究的努力和投入让我们看到 5G 的测试床不仅出现在产业界，也出现在很多大学校园。和前几代蜂窝系统一样，5G NR 也是基于全球的努力和协作——在全球或者地区层面讨论新的 5G NR 频谱划分，并且基于国际电信联盟（International Telecommunications Union, ITU）定义的 5G 需求，3GPP 制定了全球化的 5G NR 标准。为了全面了解 5G NR 的发展情况，接下来我们将讨论和介绍频谱分配和监管、标准化进程、主要用例及其要求、一些预商用试验和预期的商用部署。

1.3.1 5G 标准化

NR 和 LTE 规范是由 3GPP 开发的。3GPP 是由来自亚洲、欧洲和北美的 7 个地区

和国家标准化组织（ARIB、ATIS、CCSA、ETSI、TSDSI、TTA 和 TTC）联合成立的。3GPP 产生技术规范，然后由标准化组织转为标准。3GPP 成立于 1998 年，最初目的是为第三代（3G）移动通信开发全球适用的规范。自此之后，3GPP 的范畴不断扩大，目前包括发展和维护第 2 代（2G）GSM、第 3 代（3G）WCDMA/HSPA、第 4 代（4G）LTE 和第 5 代（5G）NR/LTE Evolution 的规范。

国际射频（Radio Frequency, RF）频谱由国际电信联盟无线通信部（ITU-R）管理。ITU-R 还负责将技术规范（比如从 3GPP）转换为国际标准，包括没有包含在 3GPP 标准化组织中的国家。ITU-R 还为国际移动通信（International Mobile Telecommunications, IMT）系统定义频谱。IMT 系统与 3G 往后的不同代的移动通信系统相对应。3G 和 4G 技术分别包含在 IMT-2000 和 IMT-Advanced 推荐技术中。ITU-R 新推荐给 5G 的是 IMT-2020，计划在 2019—2020 年开发。

ITU-R 自己不产生详细的技术规范，而是和各个地区的标准化组织合作制定满足 IMT 技术的要求。真正的技术是由其他组织（比如 3GPP）开发的，并且提交给 ITU-R 作为 IMT 技术候选方案。该技术根据指定的要求进行评估，然后被批准为 IMT 技术方案。ITU-R 为特定的 IMT 系统的无线接口技术规范推荐无线接口技术并且提供相应的详细规范，该规范由相应的标准化组织维护。IMT-2000 无线接口候选规范包括六种不同的无线接口技术，而 IMT-Advanced 只包含两种。与前几代不同，对于 5G，不期望提交存在竞争的技术作为 IMT-2020 的候选，而仅仅提交基于 3GPP 的技术。3GPP 将 LTE Evolution 和 NR 一起提交给 IMT-2020 作为候选系统。

大约每隔十年，无线通信就会出现一代新技术。但是，各个系统还会继续自己的演进步伐，不断增加新的功能。3GPP 规范被分为不同的版本（release），每一个版本包括完整的规范和该版增加的新功能。这意味着一个特定的版本包括了组建一个完整蜂窝网络需要的所有组件，而不仅仅是新增加的功能。当一个版本完成时，功能就会冻结并且正式发布用于实现。当一个版本被冻结后，只允许必要的修正。更多新功能提议只能进入下一个版本。不同版本的工作会有重叠，所以常常是在当前版本工作进行中，新版本的工作已经开始。版本必须向后兼容，这样基于某一个版本开发的用户设备（User Equipment, UE）就可以在基于前一个版本实现的小区中使用。LTE 的第一个版本是属于 3GPP release 8 规范的一部分。LTE release 10 又称为 LTE-Advanced，因为它被 ITU-R 批准为 IMT-Advanced 技术。市场上将 LTE release 13 称为 LTE-Advanced Pro。

3GPP 的日常工作分为研究项目和工作项目。研究项目专注于概念的可行性研究，研究结果汇总于技术报告（Technical Report, TR）。研究项目结论达成一致后将在工作项目中做更详细的标准化工作，会定义特性并且最终写进技术规范（Technical Specification, TS）。3GPP 的技术规范分成多个系列，编号遵循 TS XX.YYY，其中 XX 定义了系列。NR 的无线规范是 38 系列。所有 3GPP 发布的规范都在 www.3gpp.org 公开发布。

3GPP 组织层面包含三个技术规范组（Technical Specification Group, TSG），TSG 无

线接入网络 (Radio Access Network, RAN) 负责无线接入规范。TSG RAN 又包括 6 个工作组 (Working Group, WG), 其中 RAN WG1 负责物理层技术规范。WG 一年开四次 TSG 全体成员会议。3GPP 基于成员共识做出决定。

图 1-4 给出了 ITU 和 3GPP 的时间表以及预期的 5G 商用设备开发计划。5G NR 的标准化工作始于 2016 年 4 月的 3GPP 全会, 目标是在 2020 年之前可以商用。3GPP 采用分阶段的方法来制定 5G 规范。第一个标准化阶段是包含有限的 NR 功能的 NR release 15, 到 2017 年年底完成非独立组网 (Non-Stand-Alone, NSA) 的工作, 到 2018 年中期完成独立组网 (Stand-Alone, SA) 的工作。第二个标准化阶段是 NR release 16, 预期将满足所有 IMT-2020 的要求并计划在 2019 年完成。

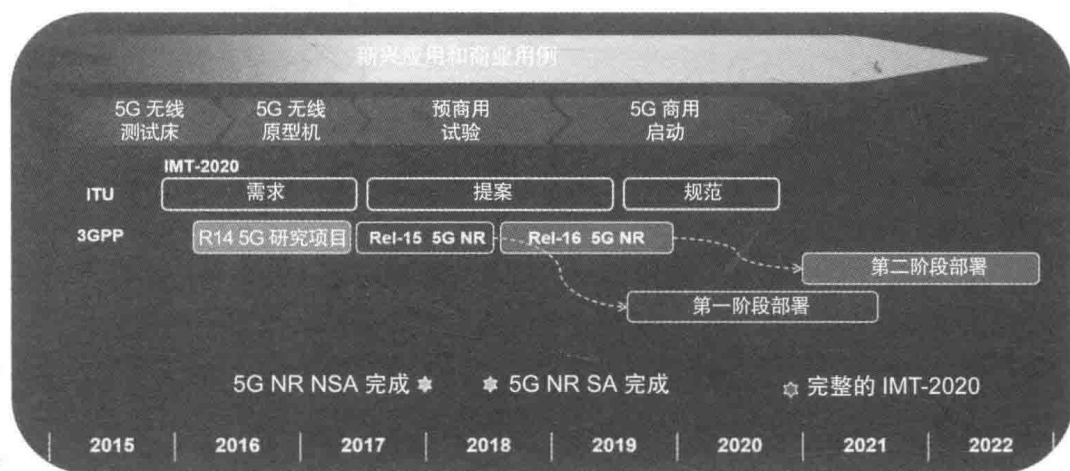


图 1-4 5G 全景视图

目前 5G 标准化进程正在加速, 5G 预商用试验也在全球展开。基于 release 15 规范, 遵从 3GPP 的基站和终端已经在开发中。商用部署预期分为两个阶段。第一阶段 NR 商用部署预期在 2019 年, 基于 release 15 规范。第二阶段 NR 商用部署将于 2021 年开始, 基于 release 16 规范。可以预见的是, 2020 年之后 3GPP 还将继续 NR 规范的演进, 产生包含更多功能和特性的一系列新版本的规范。

1.3.2 5G 频谱

从前几代移动通信进入到 5G 的一个主要变化就是将使用很高频率的频谱——毫米波范围频谱。3GPP 已经决定从第一个 NR 版本开始就支持从低于 1 GHz 到高达 52.6 GHz 范围的频谱^[12]。这个变化最主要的原因是能得到大量的有几个 GHz 的超宽带频谱。虽然毫米波频谱看起来非常诱人, 但是也面临众多挑战:

- 如果不使用多天线和波束赋形技术, 传输损耗将大幅增加。
- 射频硬件性能下降, 如相位噪声和输出功率。

- 没有未使用的频谱，意味着必须和其他系统（比如卫星系统）共存，必须确保将干扰水平控制在可接受的范围之内。

因此，5G NR 在 3GPP 中被设计为可在全频带内灵活使用。低频段和高频段使用相结合来提供可靠的覆盖（利用比如低于 6 GHz 的频率），并且可以提供非常高的容量和比特率（当存在毫米波覆盖时）。

图 1-5 给出了 5G 的频谱概况。3 300 ~ 3 600 MHz 频段是由 ITU-R 在世界无线电通信大会（World Radiocommunication Conference, WRC）-15^①指定的全球 IMT 频段。在 WRC-19 会议上通过了 6 GHz 以上频谱的全球规划。6 GHz 以下有大量额外的地区性频谱。除了 28 GHz 和 65 GHz 之外，高于 6 GHz 的地区性频谱大部分和全球 5G 频段重合。很明显 6 GHz 以下的频谱比较紧缺，因此需要 6 GHz 以上的频谱资源来满足 5G 的需求。在 5G 的早期部署中，低于 6 GHz 的频段如 600 ~ 700 MHz、3 300 ~ 4 200 MHz 以及 4 400 ~ 5 000 MHz 都在考虑之列^[11]。除了 3 300 ~ 3 600 MHz 频段已经被 WRC-15 指定为全球 IMT 频段之外，其他频段将纳入地区性法规。

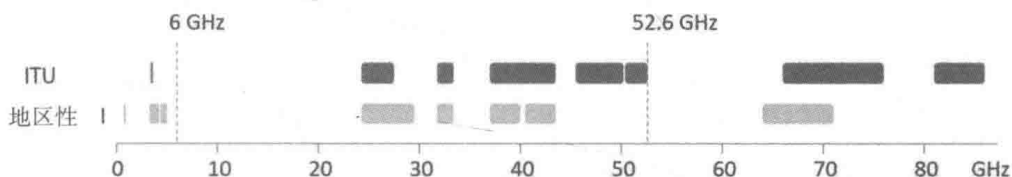


图 1-5 5G 的全球 (ITU) 和地区性频谱规划

在欧洲，早期部署集中在 3 600 ~ 3 800 MHz 频段^[3]。美国、日本、韩国和中国都在 3 300 ~ 4 200 MHz 上选择了不同的频段来进行早期 5G 部署，3GPP 也为这段频段开发了相应的规范。

目前主要由中国和日本提倡使用 4 400 ~ 5 000 MHz 这段频谱，这段频谱有潜在的可能会被亚太地区的其他国家使用。

尽管 600 ~ 700 MHz 频段带宽有限，但是因为传输损耗很低，不需要先进的多天线技术也可以提供很好的网络覆盖。在 700 MHz 频段已经有 LTE 的频谱规划，这些频段到 2020 年或之后可以迁移到 5G。而且，美国已确定将 614 ~ 698 MHz 用于移动通信。

在 IMT 分配 6 GHz 以上频谱进程中，WRC-15 会议决定对处于 24.5 ~ 86 GHz 范围内的 11 个频段进行研究，并且将在 WRC-19 会议上做出决定。ITU-R 估计 5G 的频谱需求将达到 20 GHz^[8]。目前的状况是大部分频谱已经被分配，这些频谱资源很难只供 IMT 使用，所以必须考虑共存。出于这个原因，在 WRC-19 会议之前关于频谱研究的很重要的一个方面就是评估哪些频段适合与现有系统共存，比如与卫星系统共存。

IMT 和地球上其他系统间的干扰，在空中或者空间里，主要是远距离的。因此，研究

① 每 3 ~ 4 年举行一次 WRC，对全球射频频谱使用的法规进行修订。