

★ ★ ★ ★ ★
“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

An Introduction to 5G Air Interface and Key Technologies

5G 空口特性与关键技术

郭铭 文志成 刘向东



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

★ ★ ★ ★
★ “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

5G 空口特性与关键技术

An Introduction to 5G
Air Interface and Key Technologies

郭铭 文志成 刘向东 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

5G空口特性与关键技术 / 郭铭, 文志成, 刘向东编
著. — 北京: 人民邮电出版社, 2019.8
(5G丛书)
国之重器出版工程
ISBN 978-7-115-51540-7

I. ①5… II. ①郭… ②文… ③刘… III. ①无线电
通信—移动通信—通信技术 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第126931号

内 容 提 要

本书介绍第五代移动通信系统(5G)波形、多址、编码和帧结构等技术,并主要基于3GPP R15版本,详细描述5G接入、功控、调度和链路自适应、大规模天线mMIMO、NSA架构及主要信令过程、射频的相关特性等方面的内容。

本书可作为通信技术人员了解5G技术和学习3GPP规范的阅读材料,也可作为高等院校信息通信专业师生教学的参考书。

-
- ◆ 编 著 郭 铭 文志成 刘向东
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: 710×1000 1/16
印张: 29 2019年8月第1版
字数: 536千字 2019年8月河北第1次印刷
-

定价: 159.00元

读者服务热线: (010)81055493 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



前 言

5G 是面向 2020 年以后移动通信需求而发展的新一代移动通信系统。早在 2013 年年初，工业和信息化部、国家发展改革委和科技部就联合成立了我国 IMT-2020 (5G) 推进组，并启动了 5G 国家重大专项和“863”计划的 5G 研发项目。IMT-2020 (5G) 推进组发布的多个 5G 相关的白皮书对 5G 愿景与需求、主要应用场景、关键性能指标、主要挑战和关键技术、测试阶段和计划等方面都提出了明确的要求。

国际上，从 2016 年起 3GPP 开始启动 R14 研究项 (Study Item)，其目标是在 2020 年前实现 5G 的商业化部署。5G 标准的制定分为 Release 15 (R15) 和 Release 16 (R16) 两个阶段，R15 的目标是完成 5G 有限功能的规范，3GPP 已经于 2017 年 12 月完成了 R15 标准的非独立组网 (NSA) 部分，2018 年 6 月完成了独立组网 (SA) 标准，形成了 5G 标准的第一个正式版本。R16 阶段将完成规范 IMT-2020 所定义的所有功能，预计将于 2019 年年底至 2020 年完成。

本书基于 3GPP R15 的 2018 年 6 月的版本，从通信业界工程从业人员的视角来介绍 R15 的 5G 新空口相关的标准和关键技术，力图用有限的篇幅将 5G 的新空口技术的主要方面以深入浅出的方式介绍清楚。与此同时，本书也以一定篇幅简单介绍了 3GPP R15 标准讨论过程中的一些技术观点，有助于读者了解标准形成过程，加深对基本原理和关键技术的认识。

本书的主要章节构成如下。

第 1 章首先回顾了移动通信从 1G 到 5G 的发展历史，然后简单介绍 5G 的主要特点、应用场景、标准化进程以及频谱的分配状况。



第 2 章主要介绍了 5G NR 的关键技术（如波形设计、多址接入、信道编码、灵活可扩展的参数集和帧结构）。侧重点在于介绍相关关键技术的基本概念和标准的形成过程。

第 3 章主要介绍了物理资源的一些基本概念，如资源粒子、资源块、公共参考点、频率栅格、带宽部分和天线端口等。

第 4 章详细描述了 5G NR 的传输信道/逻辑信道/物理信道间的映射关系，以及 R15 中上/下行各信道和信号的用途、原理、具体设计原则和处理过程。

第 5 章主要介绍了 5G NR 中一些较为复杂的关键处理过程。如小区搜索过程、随机接入过程、上行功率控制、上/下行调度和资源配置、链路自适应以及大规模 MIMO 的工作过程。

第 6 章主要介绍了 5G 在试验和商用时的网络架构和部署方式，着重描述了非独立组网（NSA）部署的基本原理和关键协议流程，另外，还给出了一些从 LTE 现网向 5G 网络演进的范例。

第 7 章简单介绍了 5G 的频谱特性（如频谱范围、带宽配置、信道栅格），以及射频部分发射机和接收机的一些主要规范和基本原理。

在本书的写作中得到了中国信息通信研究院的聂秀英教授级高工，上海诺基亚贝尔的李保才、娄彧博士和刘继民博士，爱立信（中国）的李俊龙和贾翠霞等专家的指导帮助，在此特别表示感谢。

本书编写时间较紧，加之 R15 标准仍在不停地更新，因此一些技术细节可能存在遗漏和理解偏差，敬请读者谅解并指正。



目 录

第 1 章 移动通信及 5G 标准化进程概述	001
1.1 从 1G 到 5G——移动通信系统演进	002
1.1.1 1G (1979—)	004
1.1.2 2G (1991—)	004
1.1.3 3G (1999—)	006
1.1.4 4G (2009—)	007
1.1.5 5G (2019—)	008
1.2 5G 标准化进程	011
1.3 5G 频谱分配	012
1.3.1 5G 不同业务的频谱需求	012
1.3.2 频谱分配现状	013
第 2 章 5G 新空口关键技术	015
2.1 5G 波形设计	016
2.1.1 5G 主要候选波形	018
2.1.2 波形实现方式总结	025
2.1.3 波形的几项主要指标对比	026
2.1.4 主要波形提案综合比较总结	028
2.1.5 3GPP 对波形规范的讨论过程	030



2.1.6	R15 中的 5G 波形规范	031
2.2	5G 多址接入	032
2.2.1	主要正交多址接入方式回顾	032
2.2.2	主要非正交多址接入方案选项	034
2.2.3	3GPP 对多址接入规范的讨论过程	045
2.2.4	R15 中的多址接入规范	047
2.3	5G 信道编码	048
2.3.1	信道编码概述	048
2.3.2	Turbo、LDPC 和 Polar 码的综合分析对比	050
2.3.3	5G NR 编码方案选项的综合比较	055
2.3.4	3GPP 对信道编解码方案的讨论过程	056
2.3.5	R15 中的信道编码	058
2.4	5G 帧结构	061
2.4.1	5G 参数集 (Numerology)	061
2.4.2	5G 子载波间隔讨论背景	062
2.4.3	R15 中 5G 帧结构的分析和说明	065
2.4.4	时隙配置及调度	070
2.4.5	帧结构实际配置举例	071
第 3 章	5G 物理资源	075
3.1	频段及带宽特性	076
3.1.1	5G 频段定义	076
3.1.2	基站信道带宽	076
3.1.3	传输带宽配置	077
3.1.4	绝对频点和信道栅格	079
3.1.5	信道栅格到资源粒子的映射	083
3.2	资源块	084
3.3	RB 栅格的公共参考点	085
3.4	资源栅格	087
3.5	资源粒子	088
3.6	带宽部分 (BWP)	089
3.6.1	BWP 的定义	089
3.6.2	BWP 的位置	090
3.6.3	BWP 自适应	091



3.6.4	BWP 的配置参数	092
3.6.5	BWP 的种类	092
3.6.6	BWP 工作过程	093
3.6.7	BWP 激活和转换	094
3.7	物理资源块	095
3.8	天线端口	095
第 4 章	信道与信号的设计与处理	097
4.1	5G 信道与信号概述	098
4.2	基础序列	102
4.2.1	伪随机序列	102
4.2.2	低峰均比序列	103
4.3	上行信道	104
4.3.1	PRACH 设计与处理	104
4.3.2	PUCCH 设计与处理	121
4.3.3	PUSCH 设计与处理	138
4.4	下行信道	149
4.4.1	PDCCH 信道设计与处理	149
4.4.2	PDSCH 信道设计与处理	168
4.4.3	PBCH 设计处理	178
4.5	参考信号	181
4.5.1	DMRS 详解	181
4.5.2	PTRS 详解	195
4.5.3	SRS 设计与处理	205
4.5.4	SSB 设计与处理	215
4.5.5	CSI-RS 设计与处理	224
第 5 章	5G 新空口关键过程	239
5.1	小区搜索	240
5.1.1	小区搜索概述	241
5.1.2	同步信号的构成和搜索过程	241
5.1.3	后续处理	244
5.2	随机接入	245
5.2.1	随机接入过程概述	245



5.2.2	基于竞争的随机接入过程	246
5.2.3	基于非竞争的随机接入过程	253
5.3	上行功率控制	253
5.3.1	上行功率控制概述	253
5.3.2	PUSCH 功率控制	254
5.3.3	PUCCH 功率控制	258
5.3.4	SRS 功率控制	261
5.3.5	PRACH 功率控制相关过程	262
5.3.6	功率余量	263
5.3.7	功率降低优先级	266
5.3.8	双连接 EN-DC 模式下的功率控制	266
5.4	上下行调度与资源分配	267
5.4.1	调度特性	267
5.4.2	时域资源分配	273
5.4.3	频域资源分配	284
5.5	链路自适应	292
5.5.1	链路自适应工作过程	292
5.5.2	CQI 测量和上报	293
5.5.3	MCS 作用过程	297
5.5.4	下行 TBS 选择	302
5.5.5	上行 MCS 及 TBS 选择	308
5.6	大规模天线及波束赋形	308
5.6.1	多天线技术及其分类	308
5.6.2	MIMO 分类	311
5.6.3	MIMO 的演进	314
5.6.4	5G NR 中的 mMIMO 技术概述	322
5.6.5	下行准同站和传输配置指示	334
5.6.6	波束管理	340
5.6.7	下行传输模式	365
5.6.8	上行传输模式	369
第 6 章	5G 部署方案及相关架构和流程	371
6.1	NSA/SA 方案及架构选择概述	372
6.1.1	非独立组网 (NSA) 和独立组网 (SA)	372



6.1.2	SA/NSA 系统架构选项	374
6.1.3	SA 和 NSA 特性对比	377
6.2	5G 部署选项介绍	378
6.2.1	5G 非独立组网下的架构选择	378
6.2.2	5G 独立组网下的架构选择	381
6.2.3	5G 网络部署演进方案举例	382
6.3	双连接方案及协议	385
6.3.1	双连接基本概念	385
6.3.2	多系统双连接	387
6.3.3	空中接口控制面处理	388
6.3.4	空中接口用户面的处理	389
6.4	NSA 主要流程	391
6.4.1	EN-DC 网络结构和协议	392
6.4.2	EN-DC 主要流程	395
6.4.3	EN-DC 几个主要处理流程分析（当前主要是 3X 场景）	416
第 7 章	5G 频谱和射频特性	423
7.1	5G 频谱和射频概述	424
7.2	频谱分配和带宽配置	425
7.3	频率点和信道栅格	427
7.4	射频规范概述	428
7.4.1	发射机特性	428
7.4.2	接收机特性	429
7.4.3	基站传导要求和 OTA 参考点	429
7.4.4	基站类型	431
7.5	发射功率要求	431
7.5.1	基站发射功率	431
7.5.2	基站发射功率动态范围	431
7.5.3	终端发射功率	432
7.5.4	终端发射功率动态范围	432
7.6	发射信号质量	433
7.6.1	频率误差	433
7.6.2	误差矢量幅度（EVM）	433
7.6.3	终端带内辐射和载波泄漏	434



7.6.4	基站端口时间对齐误差	434
7.7	非期望辐射	435
7.7.1	占用带宽	435
7.7.2	邻信道泄漏比	435
7.7.3	频谱发射模板	436
7.7.4	发射机杂散辐射	437
7.8	发射机互调	437
7.9	接收机参考灵敏度	438
7.10	接收机动态范围	438
7.11	接收机抗干扰性	438
7.11.1	信道内选择性	439
7.11.2	邻信道选择性	439
7.11.3	阻塞	439
7.11.4	接收机互调响应抑制	439
7.12	接收机杂散辐射	439
	参考文献	441
	缩略语	447



第 1 章

移动通信及 5G 标准化进程概述

本章简单回顾了移动通信从 1G 到 5G 发展的历史，并简要介绍了 5G 的主要特点、应用场景、标准化进程以及频谱的分配状况。



| 1.1 从 1G 到 5G——移动通信系统演进 |

移动通信是整个通信业领域中发展最快的，它在过去几十年中获得了非常快速的增长。目前，根据 GSMA 的统计，全世界已有超过 50 亿的移动用户和超过 90 亿的移动设备（如图 1-1 所示），在许多国家和地区，手机和各种移动终端已成为人们生活和工作中不可缺少的工具。



图 1-1 全球移动用户数/全球移动设备连接数以及过去 3 年的增长

最早期的无线电语音通信可以追溯到 1914 年，采用的是模拟调制方式，当时的无线电通信多为专用的，主要用途为军队、警察、公共安全、紧急通信等。到 1946 年，美国的 AT&T 公司在 25 个城市实现了公共无线电话系统。当