



★ ★ ★ ★
“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

Ultra Dense Networks of 5th Generation Mobile Communications

5G UDN (超密集网络) 技术详解

杨立 黄河 袁弋非 鲁照华 郝鹏 著

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 UDN (超密集网络) 技术详解

Ultra Dense Networks of
5th Generation Mobile Communications

杨立 黄河 袁弋非 鲁照华 郝鹏 著



人民邮电出版社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

5G UDN(超密集网络)技术详解 / 杨立等著. — 北京: 人民邮电出版社, 2019.3
(国之重器出版工程·5G丛书)
ISBN 978-7-115-50234-6

I. ①5… II. ①杨… III. ①蜂窝式移动通信网—研究 IV. ①TN929.53

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第265560号

内 容 提 要

本书先以5G UDN的移动业界大背景为切入点,阐明其诞生的基础,发展主脉络和规律;然后分章节,从不同网络层面和不同角度,综合地叙述诠释,诸如UDN在未来5G异构网络中将扮演何种角色?其成功部署运营的主要支撑技术机制有哪些?从网络高层到低层,其系统架构、网络部署方式、空中接口高层和物理层的关键技术有哪些?它们之间的有机联系如何等业界十分关注的问题。由于撰写本书时间窗的限制,某些具体问题的最终方案,可能还在业界标准化的研讨和反复商定之中。本书自始至终,紧密结合了当前5G 3GPP标准化的动态进展,内容不断地迭代更新,同时融汇了笔者过去在行业内外丰富经验与体会,因此,相信读者仍能从整体层面牢牢把握住今日和未来5G UDN技术发展的方向和演进的规律、特点等。与此同时,本书中还尽量插入一些3GPP标准外的其他研究成果,丰富了本书内容。

本书适合从事无线通信的科技人员、工科大学通信类专业师生阅读,同时也适合作为工程技术及科研教学的参考书。

◆ 著 杨 立 黄 河 袁弋非 鲁照华 郝 鹏
责任编辑 李 强
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>
北京盛通印刷股份有限公司印刷

◆ 开本: 800×1000 1/16
印张: 21.5 2019年3月第1版
字数: 397千字 2019年3月北京第1次印刷

定价: 169.00 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



序 言

5G 作为构筑社会和经济发展的**重要基石**，受到社会和产业界的广泛关注。5G 是新一代信息技术的代表，引入了新型的架构和多种创新关键技术。超密集网络，即 UDN 技术是 5G 时代下的移动蜂窝网络的重要部署方式和关键技术的集成创新。5G 目标服务于三大场景类别，即增强移动宽带（eMBB）、超高可靠低时延（URLLC）和海量机器类通信（mMTC）。其中，eMBB 仍是 5G 初期商用最为重要的应用场景，即提供更高的系统容量、更高的数据吞吐率、更无缝的无线连接、更好的用户体验等。5G UDN 技术是支撑 5G eMBB 场景类别的关键手段，它不仅能保证 5G eMBB 场景下的所有性能要求达标，还可以极大地降低网络设备商和运营商的设备服务和运维成本。

本书全面深入地阐述了 UDN 技术的发展历史、当今的现状 & 未来趋势，内容涵盖上层业务应用、部署组网、系统架构、无线接入侧高层和物理层关键技术等方面。本书从 5G 移动业界大背景为切入点，紧密结合了当前 5G 在 3GPP 的标准化进展，系统化地梳理和诠释了 5G UDN 的诸多相关技术，从宏观到微观，从高层到低层。通过本书，读者不仅可以全面丰富地了解目前 5G 在 3GPP 的标准化状况和未来趋势，系统化地学习 UDN 技术体系的相关知识，还可以体察标准制定背后的诸多缘由和规律。

2018 年是 5G 标准化元年，相信读者通过阅读本书，他们能够加深对 5G 移动通信和 3GPP 国际标准组织的丰富认知，也可以进一步促进、激发无线科研工作者的创新灵感。

中国信息通信研究院副院长
IMT-2020(5G) 推进组副主席
王志勤



前言

超密集网络 (UDN, Ultra Dense Networks) 的核心特点, 可用 4 个词来高度抽象地概括, 即基站小型化、小区密集化、节点多元化和高度协作化。超密集网络是未来蜂窝移动系统必然的发展趋势, 它不仅关系到 5G 网络的系统容量, 还密切关系到 5G 网络的各层面综合性能和各种中高级移动应用业务的用户体验。UDN 部署组网方式及其相关技术的发展, 是由蜂窝移动业务市场、丰富暴增的各类业务应用需求和计算机通信软硬件技术, 不断地发展演进, 而强力双重驱动的。一方面, 随着过去十余年, 移动互联网业务应用的高速发展和伴随而来的数字问题, 蜂窝业务市场对蜂窝系统的网络容量和无线覆盖的要求越来越高, 对更高性能 / 更大商业价值的各类新式业务应用的渴望、追求也越来越强烈。这些市场诉求, 迫使蜂窝移动网络中的网元节点 (如基站) 部署, 必须朝着小型化、小小区化、密集化、云化、异构化和高度协作化的方向发展, 从而呈现出: 运营商“同一大网”中, 多种无线接入制式并存、多频段 / 多带宽 / 多类型的小区部署并存、多种不同的节点部署方式并存、多种不同程度的耦合工作方式并存等特征。另一方面, 伴随着计算机和通信软硬件技术、芯片集成技术等的高速发展, 相同能力通信网元节点的物理小型化和低成本化, 在工程实现方面, 已变得不再困难且愈发成熟。就像今日强大的各种智能终端, 其各种功能和处理性能, 相当于几十年前的大型服务器工作站。UDN 下的各种类型的网元节点, 同样可具备强大的数据传输和分析处理能力。那些小微基站, 除了在无线发射功率和无线覆盖方面天然较小之外, 其网络内和空口的数据传输功能和数据处理性能, 亦堪比昔日强大的大型宏基站。

UDN 概念并不诞生和局限于 5G 时代, 或仅限于移动通信领域之内, 但 5G UDN 的部署和相关技术的应用, 在蜂窝 5G 时代, 却十分具有典型性和代表性。本书和其他专门介绍 5G 某方面技术的书籍或参考资料不同, 倾向从 5G 蜂窝移动业务应用和 5G UDN 部署场景之根本出发, 其涉及的应用场景和技术解决方案可



谓包罗万象,涵盖整个 5G 蜂窝系统,具体包含:5G 蜂窝业务应用、网络部署组网、系统架构功能、诸多网元节点和网络接口、空中接口,以及各式各样的物理层关键技术(含已被标准化的和尚未标准化的)。因此,本书力图以 5G UDN 的实际部署应用为线索和原点,紧密串接起 5G 系统,从网络高层到空口物理层,自上而下的一系列关键技术点。这些不同协议层面和网元节点的技术,只有当它们全部有机地结合、运用在一起时,才能更高效地支撑起 5G UDN 的成功部署,以及各类新旧蜂窝业务应用的顺利开展。反过来说,若没有这些和 5G UDN 息息相关的关键技术的支撑,5G UDN 将会面临诸多在系统网络性能、部署组网维护、运营成本、用户通信体验等方面的问题挑战,因此不利于蜂窝移动新兴业务的普及应用和深入开展,不利于运营商们既提升用户通信体验,又实现商业利润的最大化;蜂窝移动运营商们未来可能仍将面临:蜂窝市场收益、利润和财力、人力投入不平衡和不匹配的窘境。

最后,特别感谢中兴通讯的王欣晖、杜忠达、柏钢、胡留军、窦建武、韩玮、赵孝武、向际鹰、姚强、任震、刘巧艳、方敏、朱龙明、Sergio Parolari 等专家,对本书撰写成形过程中,直接或间接的大力支持和指导;特别感谢施小娟、高波、李文婷、赵亚军、马子江、刘静、王昕、谢峰、艾建勋、陈中明、戴谦、高音、刘旸、高媛、李剑、方建民、李大鹏、彭佛才、戴博、夏树强、陈琳、张峻峰、左志松、马志锋、薛飞、方惠英、陆婷、刘红军、朱进国、许玲、李冬梅、李楠、刘俊强、方敏、马伟、卢飞、谢振华等同事,在本书素材收集和编辑方面的大力协助和支持,也衷心感谢业界友人对此书的殷切关注和鼓励。谨此,衷心希望本书能够在 5G UDN 方面抛砖引玉,为行业内外的广大读者提供 5G UDN 最新技术发展状况的参考。受限于有限的创作时间和能力,以及移动业界日新月异的动态变化和发展,内容若有不足和不周之处,还恳请读者见谅,不吝指正和建议。

编 者



目 录

第 1 章 5G 前蜂窝移动历史	001
1.1 5G 前蜂窝移动系统和业务概述	002
1.2 4G LTE 同构宏蜂窝和异构微蜂窝概述	008
1.3 4G LTE/LTE-A 系统的主要性能特点	013
1.4 3GPP 标准化九大原则	015
第 2 章 LTE 微蜂窝和小小区技术	023
2.1 LTE 小小区技术需求背景	024
2.2 LTE 小小区技术发展历史	026
2.3 LTE 小小区关键技术	030
2.3.1 LTE 同构小区间干扰协调	030
2.3.2 LTE 异构小区间增强干扰协调	031
2.3.3 LTE-A CA	032
2.3.4 LTE-A 协作多点传输	037
2.3.5 LTE-A 小小区开关	041
2.3.6 LTE-A DC 双连接	043
2.3.7 LTE-A LAA 及 LWA 联合互操作	048
2.4 Pre5G 概念简介	054
第 3 章 5G UDN 技术概述	057
3.1 IMT-2020 定义的 5G UDN 应用场景性能指标与现有技术的差距	059
3.2 3GPP 相应的 5G UDN 场景及性能需求	070



3.3	5G UDN 中的主要技术问题和挑战	072
3.4	5G 系统的功能架构概述	073
3.5	5G UDN 物理层关键使能技术	075
第 4 章 5G UDN 部署组网关键技术		077
4.1	5G 网络架构和扁平化部署	078
4.1.1	gNB 和 eLTE eNB 共站部署	079
4.1.2	gNB 和 eLTE eNB 异站部署	080
4.1.3	5G 网络主要逻辑接口	081
4.2	基于 C-RAN 概念的集中式部署	087
4.2.1	CU/DU 分离集中式部署	087
4.2.2	CU/DU 分离的候选方案	089
4.2.3	gNB-CU 和 gNB-DU 分离后的典型流程	096
4.3	gNB 控制面、用户面分离式部署	098
4.3.1	控制面、用户面实体分离需求	098
4.3.2	gNB 控制面、用户面分离的技术难点	098
4.3.3	gNB 控制面、用户面实体分离和 CU/DU 实体分离的关系	101
4.3.4	gNB-CU 实体的控制面 / 用户面分离后典型流程	102
4.4	异构双 / 多连接方式部署	104
4.4.1	NR 系统内双 / 多连接部署	104
4.4.2	多 RAT 之间双 / 多连接部署	108
4.4.3	高低频独立 SA / 非独立 NSA 部署	112
4.5	基于授权 / 非授权频谱资源的部署	114
4.6	LTE 和 NR 共享频谱资源的部署	115
4.7	5G 网络切片化部署	117
4.8	5G UDN 部署中的工程化挑战	118
第 5 章 5G UDN 空口高层关键技术		119
5.1	NR 用户面	120
5.1.1	空口协议栈概述	120
5.1.2	MAC 子层	122
5.1.3	RLC 子层	125
5.1.4	PDCP 子层	126
5.1.5	SDAP 子层	127



5.1.6	空口层 2 数据流示意	128
5.2	LTE 和 NR 系统间双 / 多连接操作	129
5.2.1	MR-DC 概述	129
5.2.2	MR-DC 工作架构	131
5.3	NR RRM 测量和移动性管理	144
5.3.1	Layer 3 移动性管理	145
5.3.2	波束间移动性管理	173
5.4	INACTIVE 新状态和 CS Grant Free 传输	180
5.5	NR 系统消息新广播机制	182
5.5.1	On Demand SI 机制	183
5.5.2	Stored SI 架构	187
5.6	5G E-UTRA ng-eNB 的演进	190
第 6 章	5G UDN 空口物理层关键技术	193
6.1	波束赋形在 5G UDN 中的使用	194
6.1.1	模拟 / 数字 / 混合 / 波束赋形特点	194
6.1.2	波束赋形工作架构	197
6.1.3	5G NR 多波束操作	201
6.2	5G NR 随机接入技术	205
6.2.1	随机接入触发事件	205
6.2.2	随机接入信道	206
6.2.3	随机接入过程	211
6.3	5G NR 协作多点传输	222
6.3.1	FeCoMP 操作概述	222
6.3.2	FeCoMP 定义与分类	223
6.3.3	仿真评估场景及仿真参数配置	224
6.3.4	仿真结果及结论	228
6.3.5	潜在增强	231
6.4	5G 小区虚拟化技术	233
6.4.1	小区虚拟化技术概述	233
6.4.2	小区虚拟化与移动性	237
6.4.3	小区虚拟化与干扰协调	239
6.5	无线干扰管理和抑制概述	240
6.5.1	频域协调技术	241



6.5.2	功率域协调技术	241
6.5.3	多小区协同技术	241
6.5.4	以用户为中心的传输节点选择技术	242
6.5.5	干扰抵消技术	243
6.5.6	干扰测量和反馈技术	243
第 7 章	5G UDN 物理层其他潜在技术	245
7.1	接入链路与回程链路联合设计	246
7.1.1	5G 回程问题概述	246
7.1.2	自回程技术	248
7.1.3	回程链路 with 接入链路资源的联合优化	255
7.2	干扰管理与抑制	264
7.2.1	频率协调技术	264
7.2.2	功率协调技术	272
7.2.3	多小区协同技术	279
第 8 章	5G UDN 智能化关键技术	291
8.1	网络自组织	293
8.2	网络自配置	294
8.2.1	5G 网络接口建立	294
8.2.2	典型流程	295
8.3	网络自优化	296
8.3.1	自动邻区关系优化	296
8.3.2	典型场景和流程	296
8.4	无线自回程	298
8.4.1	无线自回程简介	298
8.4.2	无线自回程的设计需求	300
8.5	移动边缘计算	301
缩略语		303
参考文献		309
索引		311



第1章

5G 前蜂窝移动历史

蜂 窝移动网络经历了1G、2G、3G、4G、5G五大阶段或时代，伴随着ICT技术和移动市场业务应用的不断快速变化，蜂窝移动系统的形态和架构也经历了相应的变化，或演进或变革，或渐变或剧烈。深入了解5G前蜂窝移动历史，有助于理解当下5G蜂窝网络的核心特点和未来发展趋势。



| 1.1 5G 前蜂窝移动系统和业务概述 |

蜂窝移动通信学术界,早在21世纪初,就已开始了对未来更先进的蜂窝移动技术的研究,它里面其实已包含了,今日正在被工业界大力推向5G系统标准化的大量技术雏形,如大规模多天线输入输出技术(Massive MIMO、3D MIMO)、高频波束赋形技术(HF Beamforming)、非正交多址技术(Non-orthogonal Access)、高频超大带宽传输技术(HF Wider Band Transceiving)、新空口波形技术(F-OFDM、FB-OFDM和UF-OFDM)、新编码调制技术(Turbo Code 2.0、LDPC、Polar、256QAM等)、全双工技术(Simutaneous Tx/Rx、Super Duplex)、无线接入网云化技术(RAN Clouding)、端到端网络切片技术(NW Slicing)、移动边缘计算技术(Mobile Edge Computing)、终端3D定位技术、人工智能大数据应用化技术等。过去多年,由于受到商业模式、业务应用、各种客观工程条件和开发实现成本等方面因素的制约,上述当中的蜂窝移动系统先进技术,在5G之前的时代,并不能以较低的工程成本和稳定度实现,或者即使技术层面实现了,但由于相应的蜂窝业务市场还不够成熟,商业层面无法推广应用,因此无法获取到相应的市场价值回报。因此大部分移动通信先进技术,只能“静静地”躺在论文和专利库之中,等待时机成熟之时,被重新发现并利用,以发挥出其工程和市场价值。可以这么说,蜂窝移动早期既广阔又深厚的技术理论储备,早已为后续移动通信产业的蓬勃发展,提供了充足的理论积淀和基础。一切似干柴待烈火,



蓄势待发而已。

相比之下,移动通信工业界国内外的一些组织,如 EU 欧盟的 METIS 项目、中国 IMT-2020、韩国 5G Forum 等,还有 NGMN、GSMA,2013 年前后,先后开展了 5G 蜂窝移动系统的前期预研和技术规划,力图基于过去几代蜂窝移动系统的标准化和工程化经验教训,紧密结合未来新兴蜂窝业务市场和技术等诸多客观条件因素,充分挖掘和利用过去移动通信学术界的大量先进理论技术的积累,聚合业界的广泛力量,设计开发出更先进、更强大、更灵活、性价比更高的 5G 蜂窝移动系统。因此在详细介绍 5G 系统和 UDN 技术之前,笔者先简单地梳理一下,5G 之前的蜂窝移动系统的一些特点,如代表性关键技术、主要业务应用、用户市场状况。5G 之前,蜂窝移动系统的发展,大概经历了 1G → 2G → 3G → 4G 几大阶段,而每个大阶段内其实还有一些小阶段,比如:4G LTE 早期、LTE 中期、LTE 后期。每个大阶段的历时长短不同,但平均约 10 年左右的时间。目前,除了 1G 系统基本从蜂窝移动市场消失了,2G 及其之后的几代系统都还在广泛地部署使用中。

1G 被称为模拟移动通信时代,世界范围内,分属于众多通信设备厂家的各种无线接入技术制式林立,各具特色和优劣,没有全球性,甚至地区性的蜂窝移动系统的统一标准,网络设备市场极度地分裂,终端市场手机的机型也非常有限,用户使用移动通信的成本也非常高。最形象的代言物就是“大哥大”手提电话。1G 时代,相对有区域代表性的标准如 AMPS,它采用了模拟调制解调技术和 FDMA 频分多址方式,蜂窝系统容量很低。1G 时代主要服务于语音类业务,用户能轻松地接打电话,听清彼此的对话,通话不掉线,那就是高质量网络的性能标准。

2G 开启了数字移动通信时代,随着数字集成电路 / 计算机技术等初步发展,很多模拟电路系统逐步被数字电路系统所取代,如 2G 采用的 GMSK 数字调制,2G 蜂窝系统架构和协议栈设计也愈发完备、成熟和精炼,且网元节点的物理实现集成度不断提高。由于通信设备市场有着互联互通的天然需求,在市场推动下,逐渐形成了一些地区性或地域性标准,如欧洲的 GSM/GPRS(采取时分多址方式)、美国的 IS-95 CDMA(采取窄带 CDMA 码分多址方式)。虽然从全球层面看,网络设备市场仍然存在区域性分割,但终端市场的手机机型却逐渐丰富,出现了高、中、低端的差异,用户移动通信的成本也逐渐降低。2G 时代主要服务于语音类和中低速率的数据业务,如:短信、传真、电子邮件等,2G 为之后的全球移动市场迈向统一化奠定了良好基础,因为人们已能充分感受到:移动通信方式所带来的便利和高效,逐步摆脱了传统的固网固话方式。

3G 被称为宽带移动通信时代,随着高集成电路 / 计算机 / 互联网等技术的