

5G 关键技术系列丛书

5G 超密集 组网技术

Ultra-Dense Networks for 5G Communication Systems

◆ 朱剑驰 刘佳敏 曾捷 粟欣 王达 杨蓓 刘洋 杨姗 编著

5G 关键技术系列丛书

5G 超密集 组网技术

Ultra-Dense Networks for 5G Communication Systems

◆ 朱剑驰 刘佳敏 曾捷 栗欣 王达 杨蓓 刘洋 杨姗 编著



人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

5G超密集组网技术 / 朱剑驰等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2017. 6
(5G关键技术系列)
ISBN 978-7-115-45693-9

I. ①5… II. ①朱… III. ①无线网—组网技术
IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第164061号

内 容 提 要

本书全面介绍了 5G 超密集组网的应用场景、问题与挑战和关键技术, 主要内容包括超密集组网的网络架构、小区虚拟化技术、干扰管理、回传管理和典型应用场景的性能评估。

本书适合从事移动通信技术的研发人员、系统设计人员阅读, 也可供高等院校通信及相关专业的师生参考。

◆ 编 著 朱剑驰 刘佳敏 曾捷 粟欣
王达 杨蓓 刘洋 杨姗
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: 5.375 2017年6月第1版
字数: 144千字 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

移动通信经历了从话音业务到高速宽带数据业务的飞跃式发展。未来 10 年，移动网络数据流量预计将呈爆发式增长。同时，面向“万物互联”的物联网的蓬勃发展将带来海量的设备连接和多样化的业务和应用。与 4G 相比，未来的无线网络将需要支持更多的接入方式、更多的频段及更多样化的场景。从网络运营的角度，需求的高速增长和多样化使得未来无线网络面临网络部署、投资、维护及满足用户体验等各方面的巨大挑战。

移动互联网和物联网的高速发展，驱动未来第五代（5G）移动通信网络提供更高流量、服务更多终端并支持无限连接。与第一代（1G）至第四代（4G）移动通信网络相比，5G 网络将以用户体验为中心，实现更为个性化、多样化、智能化的业务应用。

目前，5G 移动通信研究正在世界范围内展开。欧盟的 METIS、5GPPP、中国的 IMT-2020(5G)推进组、韩国的 5G Forum、NGMN、日本的 ARIB Ad hoc 以及北美的一些高校等。我国在 2013 年 2 月由我国工业和信息化部、国家发展和改革委员会、科学技术部联合推动成立 IMT-2020（5G）推进组，其组织框架基于原中国 IMT-Advanced 推进组，成员包括我国主要的运营商、制造商、高校和研究机构，目标是成为聚合我国产学研用力量，推动我国 5G 移动技术研究和开展国际交流与合作的主要平台。国内的 FuTURE 论坛也在积极开展 5G 系统的相关技术研究，韩国、日本也已有相应的研究组织开展工作，纵观目前全球 5G 研

究进展可以看出，全球 5G 组织研究的热点技术趋同。面向无线通信标准化，ITU-R WP5D 已给出了关于 IMT-2020 的研究计划，按此时间点，全球各研究组织和机构将会提交代表各自观点的技术文稿。另外，标准化组织 3GPP 已经开始对 5G 系统展开研究定义工作。

面对移动互联网和物联网等新型业务发展需求，5G 系统需要满足各种业务类型和应用场景。一方面，随着智能终端的迅速普及，移动互联网在过去的几年中在世界范围内发展迅猛，面向 2020 年及未来，移动互联网将进一步改变人类社会信息的交互方式，为用户提供增强现实、虚拟现实等更加身临其境的新型业务体验，从而带来未来移动数据流量的飞速增长；另一方面，物联网的发展将传统人与人通信扩大到人与物、物与物的广泛互联，届时智能家居、车联网、移动医疗、工业控制等应用爆炸式增长，将带来海量的设备连接。

为了满足移动互联网和物联网等新型业务发展需求，满足移动数据流量爆发式增长和海量连接设备的需求，增加单位面积内小基站密度是最有效的手段。超密集组网通过更加“密集化”的无线网络基础设施部署，获得更高的频率复用效率，从而在局部热点区域实现百倍量级的系统容量提升。

超密集组网可以带来可观的容量增长，然而在实际部署中，密集部署的无线设备会带来严峻的挑战，如基站站址的获取、网络建设和维护的成本、干扰管理、移动性管理、回传资源等。为了解决超密集组网面临的问题与挑战，本书介绍了超密集组网在网络架构、干扰管理、移动性管理、回传管理等方面的关键技术，同时本书评估了办公室、密集住宅、大型集会、公寓等典型应用场景的性能。

本书作者长期从事无线新技术研究与国际标准化工作。本书由中国电信技术创新中心的朱剑驰担任主编，中国电信技术创新中心的王达、杨蓓、刘洋、杨姗、余小明、陈鹏，大唐电信的刘佳敏、贺媛、鲍炜，以及清华大学的曾捷和粟欣老师参与了各个章节的编

写。本书凝聚了各位同事和老师的多年研究成果，为读者提供 5G 无线通信系统演进方面的思考。

由于作者的知识视野有一定的局限性，书中如有不准确、不完善之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2017年3月

目 录

第 1 章 背景	1
1.1 异构网技术及演进	8
1.2 超密集组网必要性	10
1.3 超密集组网应用场景	13
1.4 超密集组网的问题与挑战	16
参考文献	18
第 2 章 网络架构	21
2.1 概述	22
2.2 分布式网络架构	22
2.3 集中式网络架构	26
2.4 以用户为中心的网络架构	28
参考文献	29
第 3 章 小区虚拟化技术	31
3.1 虚拟层技术	33
3.2 以用户为中心的虚拟小区技术	41
3.2.1 虚拟小区系统模型	43
3.2.2 基于虚拟小区合并的下行传输	46
3.2.3 虚拟小区性能分析	50
参考文献	56

第4章 干扰管理	59
4.1 基于网络侧的干扰管理	61
4.1.1 协同多点传输	61
4.1.2 时域干扰协调	65
4.1.3 频域干扰协调	76
4.2 基于终端侧的干扰管理	80
4.2.1 终端干扰抑制接收机	81
4.2.2 基于网络辅助的终端干扰抑制/删除接收机	89
4.2.3 终端内多个数据流间的干扰抑制/删除接收机	98
参考文献	100
第5章 回传管理	105
5.1 无线回传	107
5.1.1 回传演进及基本结构	107
5.1.2 回传的拓扑结构及实现途径	109
5.1.3 混合分层回传	115
5.2 接入和回传联合设计	119
5.2.1 多跳路由机制	119
5.2.2 路径更新机制	121
5.2.3 多路径联合传输机制	122
5.3 前传的挑战及方案	125
5.3.1 超密集组网中的前向传输挑战	125
5.3.2 前向传输接口方案	126
参考文献	130
第6章 典型应用场景性能评估	131
6.1 办公室场景	132
6.1.1 办公室场景评估模型	132
6.1.2 办公室场景性能评估	134

6.2 密集住宅场景	142
6.2.1 密集住宅场景评估模型	142
6.2.2 密集住宅场景性能评估	146
6.3 大型集会场景	148
6.3.1 大型集会场景评估模型	148
6.3.2 大型集会场景性能评估	149
6.4 公寓场景	150
6.4.1 公寓场景评估模型	150
6.4.2 公寓场景性能评估	151
6.5 移动性性能评估	153
参考文献	158
第7章 总结	159
名词索引	161



第1章 背景

- 1.1 异构网技术及演进
- 1.2 超密集组网必要性
- 1.3 超密集组网应用场景
- 1.4 超密集组网的问题与挑战

从美国贝尔实验室提出蜂窝小区的概念起，移动通信系统的发展可以划分为各个“时代”。到 20 世纪 80 年代，移动通信系统实现了大规模的商用，可以被认为是真正意义上的 1G 移动通信系统，1G 由多个独立开发的系统组成，典型代表有美国的 AMPS (Advanced Mobile Phone System, 高级移动电话系统) 和后来应用于欧洲部分地区的 TACS (Total Access Communications System, 全址接入通信系统)，以及 NMT (Nordic 移动电话) 等，其共同特征是采用 FDMA (Frequency Division Multiple Access, 频分多址) 技术，模拟调制话音信号。第一代系统在商业上取得了巨大的成功，但是模拟信号传输技术的弊端也日渐明显，包括频谱利用率低、业务种类有限、无高速数据业务、保密性差以及设备成本高等。为了解决模拟系统中存在的这些根本性技术缺陷，数字移动通信技术应运而生。

2G (The Second Generation, 第二代) 移动通信系统基于 TDMA (Time Division Multiple Access, 时分多址) 技术，以传输话音和低速数据业务为目的，因此又称为窄带数字通信系统，其典型代表是美国的 DAMPS (Digital AMPS, 数字化高级移动电话系统)，IS-95 和欧洲的 GSM (Global System for Mobile Communication, 全球移动通信系统)。相对于模拟移动通信，数字移动通信网络，提高了频谱利用率，支持针对多种业务的服务。从 20 世纪 80 年代中期开始，欧洲首先推出了 GSM 体系，随后，美国和日本也制订了各自的数字移动通信体制。其中，GSM 是一个可互操作的标准，使得全球范围的漫游首次成为可能，从而被广为接受；进一步地，由于第二代移动通信以传输话音和低速数据业务为目的，从 1996 年开始，为了解决中速数据传输问题，又出现了 2.5 代的移动通信系统，如 GPRS (General Packet Radio Service, 通用分组无线服务) 技术、EDGE (Enhanced Data Rate for GSM Evolution, 增强型数据速率 GSM 演进) 技术和 IS-95B。这一阶段的移动通信主要提供的服务仍然是针对话音以及低速率数据业务为主，但由于网络的发展，数据和多媒体通信的发展势头很快，所以逐步出现了以移动宽带多媒

体通信为目标的 3G (The Third Generation, 第三代) 移动通信。

在 20 世纪 90 年代 2G 系统蓬勃发展的同时, 世界范围内已经开始了对 3G 移动通信系统的研究热潮。3G 最早由 ITU(International Telecommunication Union, 国际电信联盟) 于 1985 年提出, 当时称为 FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunication System, 未来公众陆地移动通信系统), 1996 年更名为 IMT-2000 (International Mobile Telecommunication-2000), 意即该系统工作在 2 000 MHz 频段, 最高业务速率可达 2 000 kbit/s, 预期在 2000 年左右得到商用。3G 的主要通信制式包括欧洲、日本等地区主导的 WCDMA(Wideband Code Division Multiple Access, 宽带码分多址)、美国的 CDMA2000 和中国提出的 TD-SCDMA, 影响范围最广的当属 WCDMA。最初对 WCDMA 的研究工作是在多个国家地区并行开展, 直到 1998 年底 3GPP (3rd Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴计划) 成立, WCDMA 才结束了各个地区标准独自发展的情况。WCDMA 面向后续系统演进出现了 HSDPA (High Speed Downlink Packet Access, 高速下行分组接入) /HSUPA (High Speed Uplink Packet Access, 高速上行分组接入) 系统架构, 其峰值速率可以达到下行 14.4 Mbit/s, 而后又进一步发展的 HSPA+, 可以达到下行 42 Mbit/s/上行 22 Mbit/s 的峰值速率, 仍广泛应用于现有移动通信网络中。

作为目前移动通信发展影响力最受关注的 3GPP, 在进行 WCDMA 系统演进研究工作和标准化的同时, 继续承担了 LTE (Long Term Evaluation, 长期演进) /LTE-A (Long Term Evaluation-Advanced, 长期演进技术升级版) 等系统的标准制定工作, 对移动通信标准的发展起到至关重要的作用。3GPP 的成员单位包括 ARIB (Association of Radio Industries and Businesses, 日本无线工业及商贸联合会)、CCSA (China Communications Standards Association, 中国通信标准化协会)、ETSI (European Telecommunications Standards Institute, 欧洲电信标准化协会)、美国 ATIS (The Alliance for Telecommunications Industry Solutions, 无

线通信解决方案联盟)、韩国的 TTA (Telecommunications Technology Association, 电信技术协会) 和日本的 TTC (Telecommunications Technology Committee, 电信技术委员会) 等。另外,除了 3GPP, 3GPP2 和 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 电气和电子工程师协会) 也是目前国际上重要的标准制定组织。

在移动通信系统的发展过程中,国际电信联盟的无线通信委员会 (International Telecommunications Union-Radio Communications Sector ITU-R) 作为监管机构起到了至关重要的作用,ITU-R WP5D (Working Party 5D) 定义了国际上包括 3G 和 4G (The Fourth Generation, 第四代) 移动通信系统的 IMT 系统,其中 2010 年 10 月确定的 4G 系统也称为 IMT-Advanced,包括了 LTE-Advanced (3GPP Release10) 以及 IEEE 802.16m 等。ITU-R WP5D 定义 4G 与定义 3G 的过程相似,首先提出面向 IMT-Advanced 研究的备选技术、市场预期、标准准则、频谱需求和潜在频段,而后基于统一的评估方法,根据需求指标来评估备选技术方案。为满足 ITU 的需求指标,3GPP 提交的 4G 候选技术是 LTE-Advanced (Release 10),而非 LTE (Release 8),所以严格意义上说 LTE 并非 4G。从技术框架来看,LTE-Advanced 是 LTE 的演进系统,一脉相承地基于 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, 正交频分多址) 的方式,满足如下技术指标: 100 MHz 带宽; 峰值速率为下行 1 Gbit/s, 上行 500 Mbit/s; 峰值频谱效率为下行 30 bit/s/Hz, 上行 15 bit/s/Hz。在 LTE 的 OFDM/MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 多入多出) 等关键技术基础上, LTE-Advanced 进一步包括频谱聚合、中继、CoMP (Coordinated Multiple Points Transmission/Reception, 多点协同传输) 等。

近年来,在经历了移动通信系统从 1G 到 4G 的更替,移动基站设备和终端计算能力极大提升,集成电路技术得到快速发展,通信技术和计算机技术深度融合,各种无线接入技术逐渐成熟并规模应用。可以预见,对于未来 5G 系统,不能再用某项单一的业务能力或者某个典型技术特征来定义,5G 网络应是面向业务应用和用

用户体验的智能网络，通过技术的演进和创新，满足未来包含广泛数据和连接的各种业务的快速发展需要，提升用户体验。

在世界范围内，已经涌现了多个组织对 5G 开展积极的研究工作，如图 1-1 所示。例如欧盟的 METIS^[1]、5GPPP^[2]、中国的 IMT2020 (5G) 推进组^[3]、韩国的 5G Forum^[4]、NGMN^[5] (Next Generation Mobile Networks, 下一代移动通信网络)、日本的 ARIB Ad hoc 以及北美的一些高校等。



图 1-1 全球关于 5G 的主要研究组织

欧盟早在 2012 年 11 月就正式宣布成立面向 5G 移动通信技术研究的 METIS (Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Twenty (2020) Information Society) 项目。该项目由 29 个成员组成，其中包括爱立信 (组织协调)、法国电信等主要设备商和运营商、欧洲众多的学术机构以及德国宝马公司。项目计划时间为 2012 年 11 月 1 日至 2015 年 4 月 30 日，共计 30 个月，目标为在无线网络的需求、特性和指标上达成共识，为建立 5G 系统奠定基础，取得在概念、雏形、关键技术组成上的统一意见。METIS 认为未来的无线通信系统应实现以下技术目标：在可接受范围内的总体成本和能耗前提下达到稳定的容量增长，提高效率；能够适应更大范围的需求，包括业务量大和小；另外，系统应具备多功能性，来支持各种各样的需求 (例如可用性、移动性和服务质量) 和应用场景。为达到以上目标，5G 系统应较现有网络实现 1 000 倍的无线数据流量、10~100 倍的连接终端数、10~100 倍的终端数据速率、端到端时延降低到现有网络的 1/5 以及实现 10 倍以上的电池寿命。

METIS 设想这样一个未来——所有人都可以随时随地获得信息、共享数据、连接到任何物体。这样“信息无界限”的“全联接世界”将会大大推动社会经济的发展和增长。METIS 已发布多项研究报告，近期发布“Final report on architecture”，对 5G 整体框架的设定有一定参考意义。

另外，欧盟于 2013 年 12 月底宣布成立 5GPPP(5G Infrastructure Public-Private Partnership)，作为欧盟与未来 5G 技术产业共生体系发展的重点组织，5GPPP 由多家电信业者、系统设备厂商以及相关研究单位共同参与，其中包括爱立信、阿尔卡特朗讯、法国电信、英特尔、诺基亚、意大利电信、华为等。可以认为 5GPPP 是欧盟在 METIS 等项目之后面向 2020 年 5G 技术研究和标准化工作而成立的延续性组织，5GPPP 将借此确保欧盟在未来全球信息产业竞争中的领导者地位。5GPPP 的工作分为 3 个阶段：阶段一（2014~2015 年）的基础研究工作、阶段二的（2016~2017 年）系统优化以及阶段三的（2017~2018 年）大规模测试。在 2014 年初，5GPPP 也已由多家参与者共同提出一份 5G 技术规格发展草案，其中主要定义了未来 5G 技术重点，包括在未来 10 年中，电信与信息通信业者将通过可编程持续往共同基础架构发展，网络设备资源将转化为具有运算能力的基础建设。与 3G 相比，5G 将会提供更高的传输速度与网络使用效能，并可通过虚拟化和软件定义网络等技术，让运营商得以更快速、更灵活的应用网络资源提供服务等。

与此同时，由运营商主导的 NGMN 组织也已经开始对 5G 网络开展研究，并发布 5G 白皮书：“Executive Version of the 5G White Paper”。NGMN 由包括中国移动、DOCOMO（都科摩）、沃达丰、Orange、Sprint、KPN 等运营商发起，其发布的 5G 白皮书从运营商角度对 5G 网络的用户感受、系统性能、设备需求、先进业务及商业模式等进行阐述。

中国在 2013 年 2 月由中国工业和信息化部、国家发展和改革委员会、科学技术部联合推动成立 IMT-2020（5G）推进组，其组织框架基于原中国 IMT-Advanced 推进组，成员包括我国主要的运

营商、制造商、高校和研究机构，目标是成为聚合我国产学研用力量，推动我国第五代移动通信技术研究和开展国际交流与合作的主要平台。IMT-2020（5G）推进组的组织架构如图 1-2 所示，定期发布关于 5G 的研究进展报告，已发布《IMT-2020（5G）推进组-5G 愿景与需求白皮书》^[6]，提出“信息随心至，万物触手及”的 5G 愿景、关键能力指标以及 5G 典型场景。2015 年 2 月发布《5G 概念白皮书》^[7]，认为从移动互联网和物联网主要应用场景、业务需求及挑战出发，可归纳出连续广域覆盖、热点大容量、低功耗大连接和低时延高可靠 4 个 5G 主要技术场景。另外，2015 年 5 月发布《5G 网络技术架构白皮书》^[8]和《5G 无线技术架构白皮书》^[9]，认为 5G 技术创新主要来源于无线技术和网络技术两方面，无线技术领域大规模天线阵列、超密集组网、新型多址和全频谱接入等技术已成为业界关注的焦点；在网络技术领域，基于软件定义网络（Software Defined Network, SDN）和网络功能虚拟化（Network Function Virtualization, NFV）的新型网络架构已取得广泛共识。

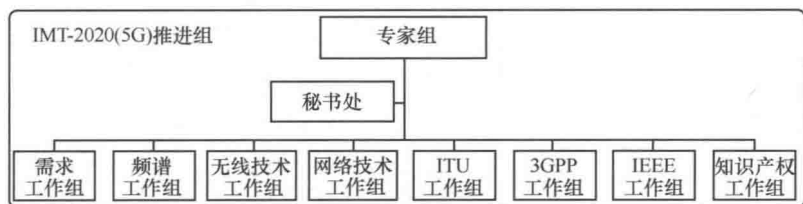


图 1-2 IMT-2020（5G）推进组组织架构

另外，国内的 FuTURE 论坛^[10]也在积极开展 5G 系统的相关技术研究，韩国、日本也已有相应的研究组织开展工作，纵观目前全球 5G 研究进展可以看出，全球 5G 组织研究的热点技术趋同。面向无线通信标准化，ITU-R WP5D 已给出了关于 IMT-2020 的研究计划（如图 1-3 所示），按此时间点，全球各研究组织和机构将会提交代表各自观点的技术文稿。另外，标准化组织 3GPP 也已经在 Release14 开始对 5G 系统的研究定义工作。

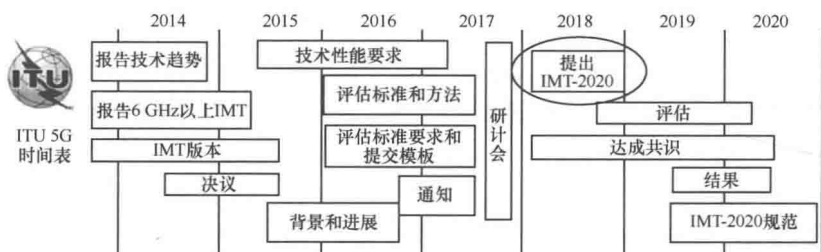


图 1-3 ITU-R WP5D 关于 IMT-2020 的研究计划

1.1 异构网技术及演进

移动通信网络分为同构网和异构网。同构网络是通过以宏基站为中心的规划布局而实现的，如图 1-4 所示。同构网络的核心是有详尽规划和部署的基站以及一系列用户终端。所有这些精心规划的基站都有着相近的发送功耗、天线模型、接收灵敏度、覆盖范围、拓扑结构以及相同的数据网络回路连接，并且所有基站都可以为用户提供平等非受限的网络接入，服务数量相同的用户终端，承载相同的数据流量和保证对等的 QoS（Quality of Service，服务质量）性能。

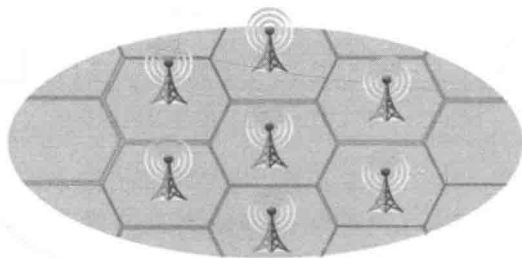


图 1-4 同构网示例

对于宏站点的选择而言是通过严谨的网络规划实现的，这些基站的设置都需要合适的调试，以达到尽可能大的覆盖范围和控制好站点之间的干扰。当负载需求增加和网络环境发生改变时，同构网