

自然科学与技术探索文库
ZIRAN KEXUE YU JISHU TANSUO WENKU

面向5G的多层多小区协作技术

MIANXIANG 5G DE DUOCENG DUOXIAOQU XIEZUO JISHU

蒋峥 龙航 / 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

自然科学与技术探索文库

面向 5G 的多层多小区 协作技术

蒋 峥 龙 航 编著



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

本书系统、全面地分析和介绍了多层多小区网络的发展趋势,以及在多层异构网络中多小区多天线协作的关键技术和方法,涉及多小区多天线协作技术、多小区协作调度技术、多小区移动性管理、多小区组网架构等多方面的内容,既有理论仿真分析,也有对网络实际部署问题的思考,能够对读者研究和理解多层异构网络技术有很大的帮助。

本书的读者对象可涵盖移动通信技术领域内的研究、开发、系统设计、网络运营等相关人员。同时本书也可供高校通信及相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

面向 5G 的多层多小区协作技术 / 蒋峥, 龙航编著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2017.8
ISBN 978-7-5635-5149-1

I. ①面… II. ①蒋… ②龙… 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 (2017) 第 168124 号

书 名: 面向 5G 的多层多小区协作技术

著作责任者: 蒋 峥 龙 航 编著

责任编辑: 毋燕燕 孙宏颖

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编: 100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本: 720 mm×1 000 mm 1/16

印 张: 17.75

字 数: 348 千字

版 次: 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5149-1

定 价: 40.00 元

• 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

无线通信系统在人们之间搭建了一个无所不在的沟通桥梁。第2代通信系统以语音业务为主,使人们从有限的定点通信变为随时随地的交流,1996—2006年是我国移动通信系统和移动用户大发展的高峰。随后在2008年,第3代通信系统开始发展,智能终端开始兴起,至今已逐渐替代原有语音终端,第3代、第4代通信系统越来越向着数据业务方向发展,人们的通信习惯也逐渐从语音通话为主变为以数据通信为主,从低速率的文字交流变为有高速率需求的图片和视频交流。手持终端已经从早先的电话功能终端变为具有多媒体功能的娱乐、办公工具。很难说是用户需求驱动了技术进步,还是技术进步发掘了用户需求,现实是,随着通信系统的更新换代,频谱利用效率被最大化挖掘,小区部署越来越密,小区覆盖范围越来越短,网络部署形态已经从单层宏蜂窝网络逐步向多层宏微异构网络演变。

多层异构网络从3G网络开始出现,在4G标准化过程中进行深入研究,并成为未来5G标准化的一个重要部分。

多层多小区网络形态是由于无线通信系统通信环境的复杂性导致的,是无线通信系统逐步完善的一种必然形态。在3G网络建设中,异构网络中的微基站主要用于补盲,即解决覆盖盲区没有信号的问题;在4G网络中除了补盲之外,一些热点区域已经采用微基站分流宏基站数据的方法,以减少宏基站的数据压力。目前3GPP在5G标准化中定义了超密集网络的部署场景,将来5G网络也一定是一个宏微结合的异构网络。

宏微异构组网面临的主要技术问题是系统容量和小区干扰问题。为了提高系统容量,我们需要复用频率,复用频率会造成小区间干扰,最后又会导致系统容量降低。看上去这是一个死循环的问题,但实际中多层多小区核心技术问题就是在频率复用条件下,通过多小区多天线协作来解决多小区间干扰和提升用户容量的。

本书的目的就是分析和介绍如何在一个多层异构网络中,采用多小区多天线协作技术和资源调度技术来解决小区间干扰,提升用户容量。细心的读者可能会发现本书不仅涉及多小区技术,也涉及大量多天线技术,这是因为多天线技术本身也是一项出色的干扰抑制技术。由于多天线技术本身博大精深,本书主要聚焦多

天线技术在异构网络多小区协作中的作用。

本书第1章从全球用户增长、业务变化角度给出多层多小区网络的发展趋势；第2章通过理论研究和仿真评估分析多层多小区网络的容量；第3章分析和介绍了多层多小区下行多天线协作技术；第4章分析和介绍了多层多小区上行多天线协作技术；第5章分析和介绍了多层多小区网络中的干扰管理技术；第6章分析和介绍了多层多小区网络中的移动性管理技术；第7章分析和介绍了多层多小区组网架构；第8章介绍了多层多小区回传方案；第9章介绍了多层多小区间的同步方法。

综上所述，本书较为全面、深入地介绍了多层异构网络中的多小区多天线协作技术，从多维技术角度，包括多天线数据、资源调度、移动性管理、网络架构等方面，来分析和阐述异构网络组网通过多小区多天线协作控制和消除小区间干扰来提高网络整体容量的技术方案。

本书根据目前多层多小区技术的发展，参考国内外最新的专著和文献资料，以及结合我们在该领域的研究成果编写而成。本书较为系统地讲述了多层异构网络中的多小区多天线协作技术，尽管国内外已经出版过一些异构网络方面的书籍，但是像本书这样深入和系统地讲述多层多小区协作技术的书籍仍然很少。希望本书能对广大读者学习和掌握异构网络下的多小区多天线协作技术提供帮助。

本书的完成离不开众多科研专家的指导和帮助，感谢中国电信技术创新中心的毕奇院士，陈鹏博士，朱剑驰、杨蓓、韩斌等各位专家；以及北京邮电大学的郑侃教授、中国科学院计算技术研究所的周一青研究员、上海交通大学的刘静和甘小莹副教授等专家的大力支持，在此表示诚挚的感谢！

由于学识有限，书中错误在所难免，希望读者不吝赐教。

编者

目 录

第 1 章 背景介绍	1
1.1 全球移动业务的发展	1
1.1.1 移动用户发展迅猛	1
1.1.2 全球数据流量的变化	2
1.2 移动网络的发展趋势	3
1.2.1 移动业务迁移	3
1.2.2 多层网络部署	4
1.3 多层多小区协作技术概述	5
1.4 本章参考文献	6
第 2 章 多层多小区网络容量分析	8
2.1 网络容量分析概述	8
2.1.1 多层网络构成	8
2.1.2 网络容量分析基础	10
2.2 多层多小区网络容量影响因素	11
2.2.1 单层宏网络容量影响因素	11
2.2.2 多层网络容量影响因素	16
2.3 多层多小区网络容量优化	21
2.3.1 部分频率复用	21
2.3.2 协作多点传输	22
2.3.3 网络容量优化小结	25
2.4 小结	25
2.5 本章参考文献	25

第3章 多小区多天线下行协作技术	28
3.1 多小区多天线协作概述	28
3.1.1 多小区协作网络架构	28
3.1.2 多小区协作应用场景	32
3.1.3 多小区协作技术分类	34
3.1.4 多小区协作传输模式	35
3.1.5 协作小区分簇技术	36
3.1.6 小结	37
3.2 多点协作中的预编码技术	38
3.2.1 预编码原理及研究现状	38
3.2.2 多点协作典型预编码技术	39
3.2.3 下行码本增强	42
3.3 多点协作中的干扰对齐技术	45
3.3.1 干扰对齐技术概述	46
3.3.2 基于干扰对齐的预编码矩阵设计	48
3.3.3 基于干扰对齐提高系统吞吐量的算法	51
3.3.4 基于干扰对齐提高系统总速率的算法	53
3.3.5 基于干扰对齐提高系统容量的算法	55
3.3.6 基于分簇和系统容量最大化的干扰对齐算法	57
3.3.7 应用于广播信道中的干扰对齐算法	60
3.3.8 在多层网络中应用干扰对齐面临的挑战	63
3.4 多点协作中的反馈机制	64
3.4.1 反馈机制概述	64
3.4.2 针对 CoMP 的能效反馈设计	65
3.5 小结	66
3.6 本章参考文献	67
第4章 多小区多天线上行协作技术	71
4.1 单小区上行干扰抑制技术	71
4.1.1 最大比合并	71

4.1.2 干扰抑制合并	72
4.1.3 MRC 与 IRC 的比较	73
4.2 多小区联合接收算法	75
4.2.1 JR 算法	75
4.2.2 DPS 算法	75
4.2.3 SIC 算法	76
4.2.4 联合接收算法性能的比较	76
4.3 多小区联合接收性能评估	78
4.3.1 仿真参数	78
4.3.2 单小区多天线 IRC 性能评估	79
4.3.3 多小区协作 IRC 接收性能评估	80
4.3.4 上行联合接收 SIC 算法性能评估	81
4.4 小结	82
4.5 本章参考文献	82
第 5 章 多层网络中的干扰管理技术	84
5.1 多小区干扰管理概述	84
5.2 多小区干扰管理方法	85
5.2.1 时域干扰管理方案	85
5.2.2 频域干扰管理方案	86
5.2.3 功率干扰管理方案	92
5.3 多小区干扰管理性能评估	97
5.3.1 仿真参数	97
5.3.2 频域干扰管理性能	99
5.3.3 软频率复用改进方案的性能	110
5.3.4 功率技术方案性能评估	112
5.4 多小区资源调度方法	115
5.4.1 资源调度与传输模式	115
5.4.2 资源分配 RDD 方案	126
5.5 多小区资源调度性能评估	128
5.5.1 仿真参数	128

5.5.2 基站独立调度性能分析	129
5.5.3 优化协作资源调度性能分析	131
5.6 小结	133
5.7 本章参考文献	133
第6章 多层网络中的移动性管理	135
6.1 移动性管理概述	135
6.1.1 LTE 移动性管理架构	135
6.1.2 移动性管理分类	137
6.1.3 多层网络移动性管理的特点	138
6.2 空闲状态下的小区移动性管理	138
6.2.1 系统内移动性管理	139
6.2.2 系统间移动性管理	149
6.3 连接状态下的移动性管理	152
6.3.1 连接状态的特征	153
6.3.2 测量与切换	153
6.3.3 切换算法的设计	160
6.3.4 切换算法的性能评估	165
6.3.5 切换自优化	166
6.4 多层网络移动性管理	167
6.4.1 多层网络移动性概述	167
6.4.2 多层网络切换类型	167
6.4.3 多层网络切换的决策因子	168
6.4.4 多层网络切换的性能指标	169
6.5 多层多小区网络切换算法设计	169
6.5.1 多层网络切换算法的研究现状	169
6.5.2 负载均衡切换研究	171
6.5.3 基于负载均衡的多层切换算法	178
6.6 多层网络移动性管理性能分析	183
6.6.1 仿真场景及参数	183
6.6.2 单层网络移动性评估	187

6.6.3 多层网络移动性评估	187
6.7 小结	196
6.8 本章参考文献	197
第7章 多层多小区网络架构研究	200
7.1 网络架构发展简述	200
7.2 分布式架构	203
7.2.1 分布式架构的特点	203
7.2.2 分布式架构的优势	205
7.2.3 分布式架构面临的问题	205
7.3 集中式架构	207
7.3.1 集中控制	209
7.3.2 集中处理	213
7.3.3 集中控制方式和集中处理方式的比较	217
7.4 集中控制组网架构和集中处理组网架构的比较	217
7.4.1 上行资源调度和联合接收性能的比较	218
7.4.2 集中控制网络架构和集中处理网络架构的下行性能评估	221
7.4.3 Backhaul 需求分析	222
7.5 LTE-A 多层多小区网络架构	224
7.6 5G 多层网络展望	226
7.7 本章参考文献	227
第8章 多层多小区同步技术研究	229
8.1 基站间同步技术概述	229
8.1.1 移动通信系统同步概述	229
8.1.2 主流基站间的同步方法	231
8.2 LTE 系统基站间同步要求	236
8.2.1 LTE 宏蜂窝的基站间同步要求	236
8.2.2 影响分层组网基站间同步的因素	237
8.3 多小区高同步需求技术	237
8.3.1 MBMS 技术同步的需求	237

8.3.2 CoMP 技术同步需求	241
8.3.3 eICIC 技术同步需求	243
8.4 LTE 多层多小区同步增强方法	248
8.4.1 现有技术分析	248
8.4.2 可能的增强技术	251
8.5 小结	255
8.6 本章参考文献	255
第9章 多层多小区回传技术研究	257
9.1 多层多小区回传概述	257
9.2 典型回传链路分析	257
9.2.1 有线介质	257
9.2.2 无线介质	259
9.3 多层多小区组网的回传解决方案	261
9.3.1 无线回程	261
9.3.2 有线回程	263
9.3.3 无线与光纤	264
9.4 小结	265
9.5 本章参考文献	265
附录 缩略语表	267

第1章 背景介绍

1.1 全球移动业务的发展

1.1.1 移动用户发展迅猛

随着智能手机、智能平板等设备的性能不断增强,应用不断完善,全球移动用户不断增加。

据联合国预测,2021 年全球人口数量预计约为 78 亿。根据思科 Visual Networking Index(VNI)全球移动数据流量预测(2016—2021 年),到 2021 年全球手机用户数(55 亿)将超过银行账户用户数(54 亿)、自来水用户数(53 亿)和固定电话用户数(29 亿)。移动用户、智能手机和物联网(IoT)联接的迅猛增长,网络速度的快速提升,以及移动视频消费的大幅增加,预计将在未来五年内促使移动数据流量增长 7 倍^[1]。

根据爱立信最新的报告^[2],全球移动用户数以大约 3% 的年增长率不断增加,在 2016 年的第一季度达到了 74 亿。2016 年 1 季度,在新增用户数方面,印度排名第一(2 100 万),其次是缅甸(500 万)、印度尼西亚(500 万)、美国(300 万)和巴基斯坦(300 万)。移动宽带用户数年同比增长了大约 20%,仅在 2016 年第一季度就新增了大约 1.4 亿用户。LTE 发展依然强劲,到 2016 年 1 季度总用户数达到了大约 12 亿。

各地区移动业务的渗透率(人口数的百分比)如图 1-1 所示,从图中可以看出,很多地区的移动业务数已经超过人口数,这是因为很多用户办理了多项移动业务或者拥有多张 SIM 卡,如果将办理多项移动业务的一个用户作为唯一移动用户(unique mobile subscribers)来计算,74 亿移动业务中约有 50 亿的唯一移动用户。

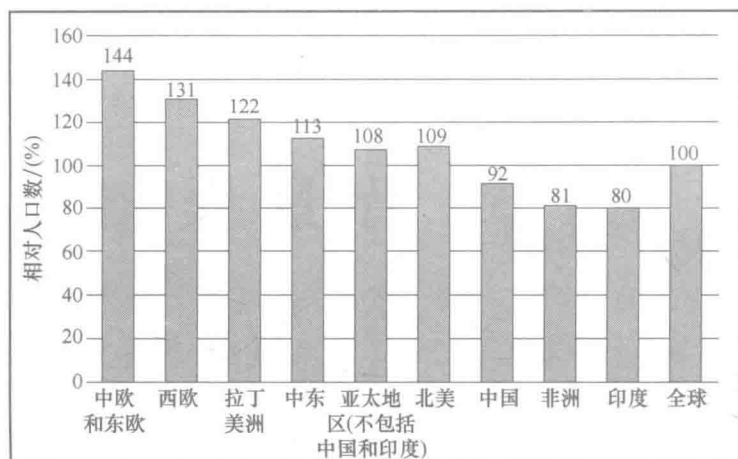


图 1-1 各地区移动业务的渗透率

到 2021 年,思科预测^[1]移动数据流量将达到多个里程碑:移动数据流量将占 IP 总流量的 20%,2016 年这一数字为 8%;人均拥有 1.5 台移动设备,包括 M2M (机器对机器)模块在内,总计近 120 亿台移动联网设备(2016 年为 80 亿台,人均 1.1 台);移动网络联接速率将增长 3 倍,从 2016 年的 6.8 Mbit/s 增长至 2021 年的 20.4 Mbit/s;机器对机器联接将占移动联接总量的 29%(33 亿),相比 2016 年的 5%(7.8 亿)增长显著;随着全球物联网应用日益受到消费者和商业环境的青睐,M2M 将成为增长最快的移动联接类别,预计 2021 年全球将有 9.29 亿部可穿戴设备,而使用嵌入式蜂窝联接的可穿戴设备的数量将达到 6 900 万部;到 2021 年 4G 将支持移动联接总量的 58%,届时 4G 将占移动数据总流量的 79%;智能手机(包括平板手机)的总数量(62 亿)将占全球设备和联接总量的 50%以上,相比 2016 年的 36 亿有大幅增长。

智能终端的快速增长表明用户终端的使用习惯正在逐步转变,由原来的语音和短信逐步向更丰富多样的数据业务转变,从而带动全球移动数据流量的增长。

1.1.2 全球数据流量的变化

移动应用的爆炸式增长和移动联接在用户终端的广泛采用,正在推动 4G 急速增长,很快将带动 5G 的增长。思科和其他行业的专家预测,2020 年 5G 基础设施将开始大规模部署。移动通信运营商希望通过 5G 网络提供颠覆性的速率、极低延迟和动态配置能力,以满足日益增长的用户需求,并更好地迎合跨移动、住宅和商业市场的全新服务趋势。思科预测,到 2021 年 5G 将占移动数据总流量的 1.5%,将生成达 4G 联接平均水平 4.7 倍以上的流量,即 3G 联接平均水平 10.7

倍以上的流量^[1]。

从2016年到2021年,移动视频将增长8.7倍,在移动应用类别中享有最高的增长率。到2021年,移动视频将占据总移动流量的78%。其中,实时移动视频将增长39倍,实时移动视频到2021年将占据总移动视频流量的5%^[1]。

1.2 移动网络的发展趋势

1.2.1 移动业务迁移

为了满足用户快速增长的移动宽带业务需求,运营商一方面大力部署4G网络通信系统,提高网络频谱利用率,将原有2G网络用户向3G、4G网络迁移;另一方面希望通过加大宏、微基站部署的密度,来提高用户网络体验速率,满足用户需求。

尽管目前GSM/EDGE的移动业务仍然是占据全部移动业务的最大部分,但预计到2021年,LTE和WCDMA HSPA的业务数量将是GSM/EDGE业务用户的两倍。在发达的市场,已经有大量2G用户向3G和4G网络迁移,但是平均到全球范围,还仅仅反映在2G用户有轻微下降的趋势。

但是将2G用户向3G和4G系统迁移是一个全球现象。预计到2020年,北美地区59%的移动设备和联接将来自4G系统,西欧地区的4G联接将达到53%。预计到2020年,中国和美国将领导全球4G网络的发展,他们的联接数将分别占全球4G联接总数的28%和12%。

根据爱立信的报告^[2],LTE业务在2015年达到第一个10亿,预计在2021年年底将达到43亿,如图1-2所示。

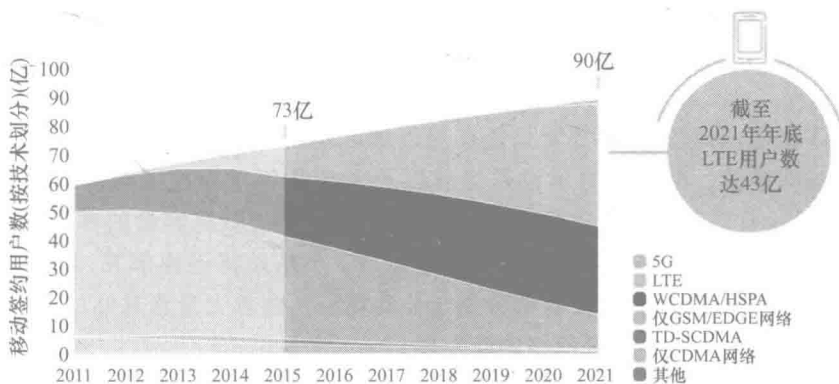


图 1-2 不同通信系统的业务 2011—2021 年变化预测

1.2.2 多层网络部署

随着全球移动用户不断增长,移动用户业务不断丰富,用户数据流量不断增加,使得移动通信基站的部署形态发生了变化。首先是宏基站数目不断增加,基站越来越密集,站间距逐步缩短。即使如此,为了在热点地区减轻宏基站的压力,向用户提供满意的数据服务,微基站逐步开始部署,并呈现增长趋势。

Informa Telecoms & Media 发布报告称,小基站整体数量已经超过了传统的宏基站,在 2012 年 10 月到 11 月间,小基站就已经达到 600 万(6 069 224)个,而世界范围内的基站总共才有约 592 万(5 925 974)个。这里的小基站包括了 Metro Cell、Micro Cell、Femto Cell 和 Pico Cell,它们的特点是可改善深度覆盖,增加网络容量,提升用户感知。其中,针对室外补盲、补热等场景,Micro Cell 具有部署快速灵活、性价比高的综合优势;针对城市、小区等场景,Metro Cell 具有覆盖半径广的特点;针对室内公共场所,Pico Cell 具有低成本、易部署的综合优势;针对家庭、企业的室内,Femto Cell 具有部署迅速、容量大等优势。

ABI 认为,由于越来越多的运营商希望增加小区基站密度,小基站市场复合年增长率将达到 43%。ABI 认为,LTE 小基站在 2015 年有成倍的增长,而且在未来几年中会保持高增长率,到 2020 年,LTE 小基站部署将占到全部小基站市场的 85%^[3,4]。

企业小基站芯片在 2015 年步入增长轨道,从 2014 年的 189 500 片增加到 2015 年的 398 000 片,增长了 110%。在 2013—2014 年,大多数小基站部署在低中密度场景,分别占小基站总体部署的 90%和 88%,但是在 2015 年,小基站部署逐步向高密度区域发生转变。预计到 2020 年,小基站将有 40%部署在超高密度区域,33%部署在高密度区域。

这种新的基站部署方式将改变未来移动网络的发展方向。这代表着少量昂贵基站塔的时代已经过去了,到了大量使用便宜的小接入点的时代。如果不做这种改变,移动网络将不能兼顾本身持续增长的数据使用要求,从这点看,这种改变是必然的。

总体而言,新宏基站的部署只是在局部地区还在大规模进行,并且主要是 4G 网络的基础建设。小基站的建设是当前以及未来几年世界范围内基站部署的重点,主要的运营商都在大力进行小基站建设,以实现网络数据容量的增加和服务质量的提高。随着 4G 网络宏基站部署的完成,4G 小基站将迅速部署,超过 90%的小基站用于室内环境,其中又有部分用于公共场所。随着大量新基站的部署,整个移动网络将迎来多层多小区网络的新发展。

1.3 多层多小区协作技术概述

根据移动业务和移动网络的发展趋势,未来网络部署将越来越密集,基站间距将越来越短,同时基站类型更加丰富,未来网络必然是宏小区、微小区,甚至微微小区结合的多层多小区网络结构。在这种网络结构中,小区间的相互影响日益严重,多层多小区协作技术变得更为重要,需要在原有 LTE 分布式基站的基础上增加基站间协作,才能更好地发挥多层密集小区部署的网络优势。

多小区协作技术起源于两个重要的通信理论,即中继信道容量分析和多天线传输理论。中继信道模型是协作多点技术的最本质模型,可从信息论角度对 3 个以上节点组成的通信网络的容量进行中继信道容量分析^[5-7]。多天线传输理论(即 MIMO 技术)是指在发送端和接收端配备多根天线或天线阵列,利用多天线间形成的多个空间子信道的复用增益提高发送端与接收端之间的信道容量^[8]。利用空间复用提高收发两端间的信道容量是协作多点通信技术产生的根本动因,同时多天线传输理论的研究发展使在实际通信系统中使用协作多点技术成为可能。

分布式天线系统的研究也为如今的协作多点技术奠定了一定的研究基础。在分布式天线系统的基础上提出的广义分布式天线系统,则第一次将多点协作的概念引入了分布式天线系统。而群小区理论的提出,第一次引入了蜂窝小区间协作通信的概念,是现代协作多点技术的雏形,标志着面向整个蜂窝移动通信系统的协作多点技术的问世。

随着正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)及 MIMO 技术被确定为 4G 的关键技术,基于 OFDM-MIMO 系统的协作通信研究引起了广泛关注,诸如虚拟 MIMO、网络 MIMO、协作 MIMO 等新概念和新技术不断涌现,它们都属于现代协作多点通信技术的范畴。在 3GPP 标准化研究中,现代协作多点通信技术被命名为多用户 CoMP(Coordinated Multi-Point)技术,成为 LTE-A 系统中的重要研究项目之一^[9,14]。在 2008 年,3GPP RAN1 第 53 次会议上提出了 CoMP 技术的概念,将 CoMP 作为 LTE-A 的一种传输方案。LTE-A 系统在小区干扰消除技术上使用 CoMP 技术,被认为是提高系统吞吐量,尤其是小区边缘吞吐量的重要手段。此外,在无线局域网(IEEE 802.11 系列标准)和宽带无线网络(IEEE 802.16 系列标准)的相关标准制定中也考虑了如何引入多点协作处理的问题,以提升系统的性能。

由于目前全球范围内主流运营商都采用 LTE 系统设备部署 4G 移动网络,因此本书的多层多小区协作技术是以 LTE 网络为基础进行研究的。本书在第 2 章

对影响多层多小区网络容量的因素进行了分析,然后在第3章和第4章分别针对下行和上行多小区多天线协作技术进行分析和研究,在第5章介绍了多层网络中的干扰管理技术,在第6章介绍了多层多小区中的用户移动性管理技术,在第7章和第8章分别介绍了多层多小区网络架构和多层多小区同步技术,最后在第9章介绍了与多层网络部署息息相关的多层多小区回传技术。

1.4 本章参考文献

- [1] Cisco. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016—2021 White Paper [R/OL]. [2017-04-06]. http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html?CAMPAIGN=Mobile+VNI+2017&COUNTRY_SITE=us&POSITION=Press+Release&REFERRING_SITE=PR&CREATIVE=PR+to+MVNI+white+paper.
- [2] Ericsson. Ericsson Mobility Report [R/OL]. [2017-04-06]. <https://www.ericsson.com/res/docs/2016/ericsson-mobility-report-2016.pdf>.
- [3] Small Cell Forum. Crossing the Chasm: Small Cells Industry [R/OL]. [2017-04-06]. http://www.scf.io/en/white_papers/Crossing_the_Chasm_Small_Cells_Industry_2015.php.
- [4] Small Cell Forum. Small Cell Deployments Market Status Report [R/OL]. [2017-04-06]. <http://www.smallcellforum.org/site/wp-content/uploads/2016/05/Small-Cells-Forum-Market-Status-Report-April-2016.pdf>.
- [5] van der Meulen E. A Survey of Multi-way Channels in Information Theory: 1961—1976 [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1977, 23 (1): 1-37.
- [6] Cover T M, Gamsl A A E. Capacity Theorems for the Relay Channel [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1979, 25 (6): 572-584.
- [7] 朱松, 王文博, 程昱, 等. 异构与同构协同中继信道容量分析 [J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31 (4): 77-81.
- [8] Tse D, Viswanath V P. Fundamentals of Wireless Communication [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [9] 3GPP. 3GPP TD RP-101425: Revised SID Proposal, Coordinated Multi-Point Operation for LTE [R/OL]. [2016-03-11]. <http://www.3gpp.org/DynaRe->