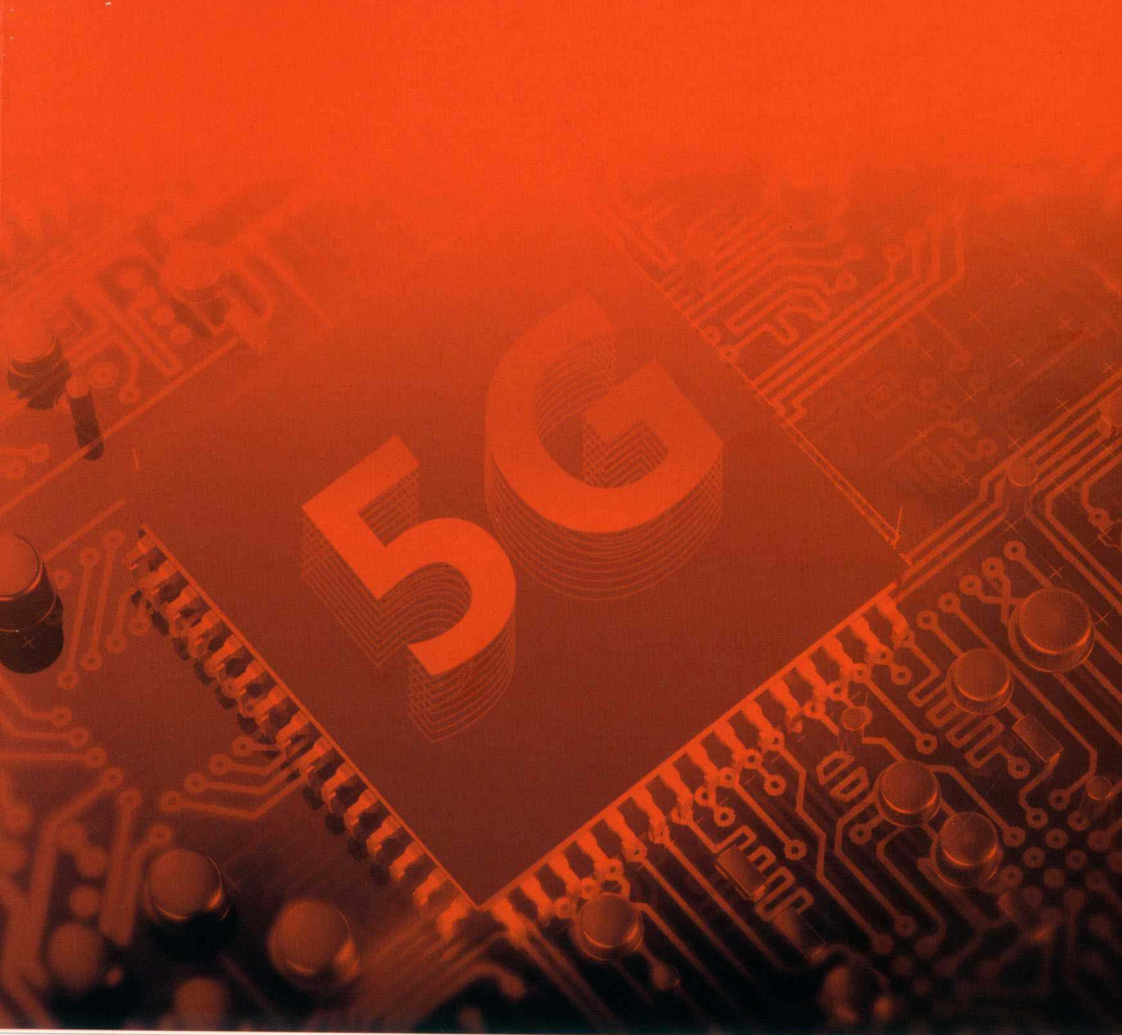




5G大规模MIMO技术原理、 性能及算法应用

王 毅 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

5G大规模MIMO技术原理、 性能及算法应用

王 毅 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

本书以第五代移动通信为背景,详细介绍了大规模 MIMO 技术的相关原理、系统性能及算法应用。全书重点对大规模 MIMO FDD 系统下行导频开销分析、大规模 MIMO FDD 系统导频信号设计及优化、大规模 MIMO FDD 下行系统信道估计与数据发射联合能效资源分配等内容进行了分析。

本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,可作为移动通信技术研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

5G 大规模 MIMO 技术原理、性能及算法应用/王毅著.
—北京:中国水利水电出版社,2019.3
ISBN 978-7-5170-7550-9

I. ①5… II. ①王… 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 056782 号

书 名	5G 大规模 MIMO 技术原理、性能及算法应用 5G DAGUIMO MIMO JISHU YUANLI、XINGNENG JI SUANFA YINGYONG
作 者	王 毅 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京亚吉飞数码科技有限公司
印 刷	三河市华晨印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 13.25 印张 237 千字
版 次	2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	62.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

大规模 MIMO 技术通过充分挖掘空间维度资源,获得了与传统 MI-MO 技术大不相同的传输特性,显著提升了无线通信系统在频谱效率、能量效率、空间分辨率等多方面的性能,因此被业内普遍认为是第五代移动通信系统的核心关键技术之一。本书以第五代移动通信为背景,详细介绍了大规模 MIMO 技术的相关原理、系统性能及算法应用。

全书共 8 章,从大规模 MIMO 的技术背景和基本概念出发,逐步介绍大规模 MIMO 系统的基础理论、大规模 MIMO FDD 系统下行导频开销性能分析、大规模 MIMO FDD 系统导频信号设计及优化、大规模 MIMO FDD 下行系统信道估计与数据发射联合能效资源分配、成对用户大规模 MIMO 中继系统的频谱效率性能分析、能效最优的大规模 MIMO 中继系统资源分配方案设计、分布式大规模 MIMO 系统的频谱效率性能分析。

本书由郑州航空工业管理学院电子通信工程学院王毅老师编写而成。在本书的撰写和出版过程中,得到了郑州航空工业管理学院电子通信工程学院的大力支持,并得到了航空经济发展河南省协同创新中心的支持和赞助,在此表示衷心感谢。此外,还要感谢郑州航空工业管理学院张松炜老师、郭慧老师、杨少川老师以及河南科技大学信息工程学院冀保峰老师等人在本书出版过程中所给予的帮助。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(编号 61801435, U1833203)、中国博士后科学基金项目(编号 2018M633733)、河南省科技攻关计划项目(编号 182102210449, 192102210246)、河南省高等学校重点科研项目(编号 19A510024)、河南省高校科技创新团队支持计划基金资助项目(编号 17IRTSTHN014)以及河南省航空经济发展协同创新中心的大力支持,在此表示深深地感谢。

由于本书涉及无线通信前沿技术以及多个学科领域,加之作者认知水平有限和写作时间较短,因此书中不免存在不足之处,恳请同行专家和读者给予批评指正,我们将不胜感激。

王 毅

2018 年 11 月于郑州

目 录

前 言

第 1 章	绪论	1
1.1	无线通信发展概况	1
1.2	大规模 MIMO 的特性概述和技术难点	6
1.3	大规模 MIMO 技术的研究现状	9
1.4	本书内容安排	19
第 2 章	大规模 MIMO 系统基础理论	23
2.1	大规模 MIMO 系统模型	23
2.2	导频污染形成机理	26
2.3	大规模 MIMO 信道容量分析	28
2.4	本章小结	32
第 3 章	大规模 MIMO FDD 系统下行导频开销分析	33
3.1	引 言	33
3.2	系统模型	34
3.3	不同导频长度下的系统可达速率渐进性分析	37
3.4	仿真结果与分析	43
3.5	本章小结	47
3.6	附 录	47
第 4 章	大规模 MIMO FDD 系统导频信号设计及优化	49
4.1	引 言	49
4.2	模型建立	50
4.3	速率最大化导频信号设计方法	53
4.4	仿真结果与分析	57
4.5	本章小结	63
4.6	附 录	63
第 5 章	大规模 MIMO FDD 下行系统信道估计与数据发射联合能效资源分配	65

5.1	引 言	65
5.2	系统模型与问题描述	66
5.3	能效资源分配算法设计	70
5.4	仿真结果与分析	79
5.5	本章小结	86
5.6	附 录	86
第 6 章	成对用户大规模 MIMO 中继系统的频谱效率性能分析	91
6.1	引 言	91
6.2	系统模型	93
6.3	频谱效率与功率效率渐进性分析	94
6.4	仿真结果与分析	109
6.5	本章小结	115
6.6	附 录	115
第 7 章	能效最优的大规模 MIMO 中继系统资源分配方案设计	119
7.1	引 言	119
7.2	系统模型	120
7.3	问题描述	122
7.4	最优能效联合系统参数设计	125
7.5	仿真结果与分析	134
7.6	本章小结	140
7.7	附 录	141
第 8 章	分布式大规模 MIMO 系统的频谱效率性能分析	145
8.1	引 言	145
8.2	单小区分布式大规模 MIMO 系统频谱效率分析	147
8.3	多小区含有导频污染时的频谱效率分析	161
8.4	本章小结	172
8.5	附 录	172
附录 A	缩略语对照表	183
附录 B	数学符号表	185
参考文献		187

第 1 章 绪 论

1.1 无线通信发展概况

自 1895 年无线电报诞生以来,无线通信技术经历了百余年高速迅猛的发展,也在潜移默化之中影响着人们的生活方式、工作方式、社交方式以及政治经济等各个领域。特别是在 20 世纪 80 年代,当以模拟技术和频分多址技术为基础的第一代模拟蜂窝通信系统出现之后,无线移动通信系统基本上以十年一代的速度进行演变与革新,继而出现了以数字技术和时分多址为核心的第二代数字移动通信系统,以及后来出现的以码分多址技术为物理层核心的第三代准宽带移动通信系统^[1-2]。无线通信系统也从最初的单一语音业务,逐步发展为语音业务为主,并能支撑中等速率数据业务的系统模式,而促使移动通信系统快速革新的一个重要原因就是全球范围内巨量增长的用户业务需求。然而,随着集成电路、器件工艺、软件技术的快速发展,移动终端以及无线接入设备日趋小型化和智能化,各类型终端的持有量也陡然增加,这使得数据通信和宽带多媒体业务的快速发展具备了充分的内在驱动力。由此所带来的移动数据、移动计算以及移动多媒体业务需求也日益高涨,移动通信也朝着“宽带化”“数据化”“分组化”的方向演进。更高的数据速率,更大的系统容量以及更多样化的移动应用使得传统通信业与 IT 产业不约而同地认识到,用户能够随时随地接入无处不在的移动因特网将会是未来移动通信发展的主流方向。在这种情况下,以正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)技术和多天线(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术为核心的第四代移动通信系统(4th Generation Mobile Communication System, 4G)应运而生,并于 2010 年前后推出了正式商用版本。

4G 网络能够提供更大的频宽,更广的覆盖率以及更高的传输容量和速率,在移动数据业务、多媒体应用等方面提供了较大幅度的性能提升和灵活性。但是,在新型移动互联网业务的强势推动下,越来越多的固定互联网业务将通过无线方式提供给用户。根据权威机构预测,到 2020 年左右,全

球移动通信网络较之 2010 年将面临 1000 倍左右的容量升级,100 倍左右的终端或节点连接数增长,以及 10 倍左右的电池续航时间需求等^[3-4];同时还需要满足用户友好接入、网络本身灵活升级部署和低成本运营维护等需求。除此之外,随着物联网、车联网、移动医疗、工业自动化、智慧城市等新兴领域的出现^[5],传统的通信用户类型和规模也出现了根本性的转变,用户终端的种类、业务类型及通信场景将呈现出复杂多变的特性。种种迹象表明,从工农业生产、金融商业的发展到人们日常生活的各个领域对于无线通信系统的需求和依赖程度有增无减,且呈现井喷之势,这无疑给无线通信系统的发展增加了巨大的挑战。

然而,挑战也意味着机遇,在世界范围内各大标准化组织和电信厂商如火如荼的部署 4G 网络的同时,越来越多的国家、机构和组织将目光纷纷投向了后四代(Beyond 4th Generation, B4G)也称为第五代移动通信系统(5th Generation Mobile Communication System, 5G)的研究和构建,充分挖掘可利用的新技术、新理论和新方法以寻求更大的创新与突破^[6-9]。正所谓 4G 方兴未艾,5G 研究便已悄然拉开序幕。早在 2012 年,由欧盟出资 2700 亿欧元支持的 5G 研究项目 METIS(Mobile and Wireless Communications Enablers for the 2020 Information Society)正式启动^[10],由包括华为公司在内的 29 个参加方共同承担,项目分为 8 个组分别对场景需求、空口技术、多天线技术、网络架构、频谱分析、仿真及测试平台等方面进行深入研究;英国政府联合多家企业,创立 5G 创新中心,致力于未来用户需求、5G 网络关键性能指标、核心技术的研究与评估验证;亚太地区方面,由韩国科技部、ICT 和未来计划部共同成立了韩国 5G 论坛,专门推动其国内 5G 发展,而中国政府则由工业和信息化部、发改委和科技部共同成立 IMT-2020 推进组,作为 5G 工作的平台,旨在推动国内自主研发的 5G 技术成为国际标准,并于 2013 年 6 月和 2014 年 3 月启动了中国 863 计划 5G 重大项目一期和二期研发课题^[11]。同期,第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)在完成了 4G 长期演进项目(Long-Term Evolution, LTE)的 Release 11 版本之后,也开始了对下一代移动通信系统标准(Release 12 and Beyond)的征集和制定工作^[12]。可见,许多国家或组织都在积极地开展 5G 技术的相关研究,力求在 2016 年后启动有关标准化进程^[13]。面向 2020 年后的 5G 宽带移动通信系统将使人们的通信生活发展到一个全新的阶段,并着力构建一个多业务、多技术融合的网络系统,通过技术的演进和创新,满足未来广泛的数据业务及连接数的发展需求,并进一步提升用户体验^[14-17]。对于 5G 系统所需要面临的未来移动数据业务指数级增长的需求,包括学术界和工业界在内的各大厂商和研究机构普遍定义

了关于 5G 的八大关键能力指标用来应对未来网络的发展需要^[18-19],其中包括:峰值速率、用户体验速率、移动性、端到端时延、连接数密度、流量密度、网络能效效率和频谱效率,并且给出了未来 5G 的 3 大主要应用场景^[20],分为增强移动宽带通信(连续广域覆盖和热点高容量场景)、海量传感设备及机器与机器(Machine-to-Machine, M2M)通信(低功耗大连接场景)、超高可靠低延时通信^[21]。对于 5G 系统的关键能力指标,具体来讲,在传输速率方面,下一代移动通信技术相对于 4G 网络,速率将提升 10~100 倍。这种提高并不像之前的移动通信系统只关注于峰值速率,而是同时关注用户实际体验速率,从而在 5G 移动通信系统中,用户的峰值速率可达 10Gbps,特定场景可达 20Gbps,而用户体验速率也要达到 1Gbps。在移动性管理方面,5G 系统需要支持 500km/h 的设备移动速度。特别是针对高铁等高速移动场景,需要克服信道快速时变带来的多普勒效应、阴影衰落效应;同时也需要解决小区覆盖和小区快速切换等一系列问题。在传输时延方面,5G 网络为了满足未来超高清视频、在线游戏、无人驾驶汽车、移动医疗等新的业务需求,提出了毫秒级空口时延的新目标,即在 4G 系统的基础上,将端到端的传输时延再降低 5~10 倍。伴随着智能终端、物联网等技术的发展,未来移动通信网络中的终端也会更加密集。为此,下一代移动通信系统提出需要在接入节点密度上增加 10~100 倍,达到每平方公里 106 个接入站点。而终端高密度的接入加上终端业务量没有大幅减少反而有所增加,整个网络的流量密度也会大幅上升。因此 5G 移动通信系统要求网络的流量密度达到每平方米 10Mbps,相当于比 4G 网络提升 100 倍以上。对于网络频谱效率,则相对于 IMT-A(International Mobile Telecommunications Advanced)至少提升 3 倍,特定场景下可以提高 5 倍,而网络能量效率则相对于 IMT-A 提升 100 倍。为了实现上述关于 5G 系统在千倍传输容量、极低空口延时、超高速率及支持多样化应用方面的技术指标,5G 移动通信也将与其他无线通信技术密切结合,构成新一代无所不在的移动信息网络,满足未来 10 年移动互联网流量增加千倍的发展需求。各大标准化组织及电信厂商虽然在主流技术与发展路线上各持己见,但是总体来说,按照目前业界的初步估计,要实现千倍以上系统容量的提升需求,以 5G 为支撑的未来无线移动网络将在 3 个维度上同时进行业务能力的提升,包括提升频谱效率、增加接入节点密度和扩充可用频带资源,如图 1.1 所示,具体如下^[11,22]:

(1)通过引入新的无线传输技术将资源(时域、频域、空域、功率域资源)利用率在 4G 的基础上提高 10 倍以上。

(2)通过引入新的体系结构(如超密集网络)和更加深度的智能化能力

将整个系统的吞吐率提高 25 倍左右。

(3) 进一步挖掘新的频带资源(如高频段、毫米波与可见光等),使未来无线移动通信的频率资源扩展 4 倍左右。

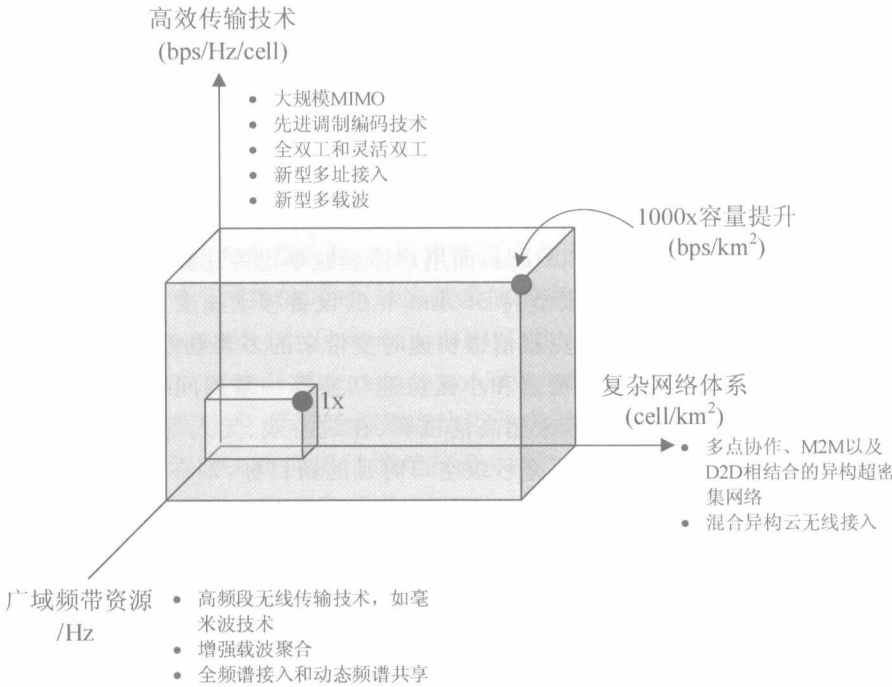


图 1.1 第五代移动通信系统达到千倍容量增长的主要方式

从图 1.1 中看到,为了提高无线链路的频谱效率,目前的研究工作大都集中在新型编码和调制技术,包括大规模多输入多输出(Massive MIMO, 又称为 Large-scale MIMO)技术^[23]、全双工技术^[24]以及非正交多址接入技术(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)^[25-29]等,这些技术都可以在不增加新的时频资源条件下大幅提升系统频谱效率性能。无线接入节点部署规模的增加,诸如所谓的超密集网络(Ultra Dense Network, UDN)^[30]和云无线接入网(Cloud Radio Access Network, CRAN)^[31]是指未来网络小区结构的微型化、分布化、密集化,在负责基础覆盖的宏站小区范围内部署有大量承担热点覆盖的低功率小站,如 Micro、Pico、Relay 和 Femto 等多层覆盖的异构网络^[32]。密集化的网络节点使得其与终端之间的距离变得更近,再结合增强型多站点协作(enhanced Cooperative Multi-Point, eCoMP)、干扰管理以及设备间通信(Device-to-Device, D2D)等技术,最大限度地提高整个网络的系统容量。此外,虽然加大频带宽度(如毫米波通信^[33])是提升系统容量最为直接和有效的途径,但是考虑到无线频率资源

的紧缺性,还应当结合更为有效的频谱管理方案以实现目标容量提升。

针对上述3种增加网络系统容量的主要途径,学术界和工业界也相应地提出了实现5G系统各类指标的关键技术^[34],而在这其中大规模MIMO技术成为众多备选关键技术中的亮点,赢得了业内的普遍认可并吸引了越来越多的关注。相对于传统的MIMO系统,大规模MIMO技术通过使用比现有空口标准中天线端口高出若干数量级的大规模天线阵列,来获得与传统MIMO系统大不相同的物理特性和传输特性。该项技术不需要额外的时频资源,仅需要增加空域资源便可在频谱效率、能量效率、低复杂度预编码以及简化上层调度等诸多方面带来显著提升。因而,大规模MIMO技术被公认为是5G系统中最为核心的关键技术之一^[35-38]。

值得注意的是,由于未来移动通信网络面对的是更为复杂的信息交互环境,为了满足各类型的业务需求和场景,下一代系统不可能再像前述四代移动通信系统那样,只靠一种或者两到三种关键技术来实现这些性能指标,5G网络势必是各类先进技术相互融合、交叉利用、深度协作的架构^[18,35,39]。图1.2给出多种技术相融合的5G多小区大规模MIMO系统应用场图,其中展示了大规模天线阵列的不同排布方式,如均匀线阵、均匀圆阵和均匀柱阵。综上所述,本书将主要针对大规模MIMO技术中所存在的一系列关键问题进行详尽的分析与讨论,并结合中继异构网络、分布式天线架构以及高效能传输等关键技术,对5G系统中可能的复杂混合场景进行深入探索,给出相应的系统性能分析以及传输方案设计。

在下一节中,将着重介绍大规模MIMO技术的传输特性以及存在的技术难点,并对其进行全方位的分析。

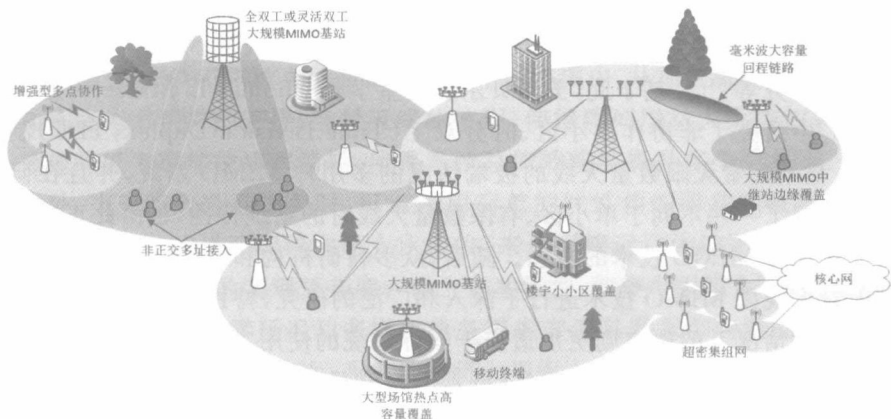


图 1.2 多种关键技术相融合的 5G 大规模 MIMO 应用场图

1.2 大规模 MIMO 的特性概述和技术难点

众所周知,MIMO 技术自提出以来为无线通信领域的发展提供了更加灵活的技术实现空间^[40-42],使得通信域从最初的时域和频域维度扩展到了更为广阔的空间域维度,进而给无线蜂窝通信带来了不需要使用附加发射功率和带宽的复用增益和分集增益,从而使无线蜂窝通信系统获得明显的性能改善。从最初的点对点 MIMO 技术(Single-User MIMO, SU-MIMO)到后来的多用户 MIMO 技术(Multi-User MIMO, MU-MIMO),通过在发射端和(或)接收端配置多根天线,可以在不增加时频资源开销的情况下,获取空间分集增益、空间多路复用增益、空间阵列增益以及多用户分集增益等,提高系统容量和链路可靠性,最终极大提升了系统的总吞吐量,该项技术也已经应用于多种无线通信系统,如 3G 系统、LTE、LTE-A、WLAN 等。

从信息论的角度来说,随着天线数的不断增多,系统性能在频谱效率、链路可靠性和干扰抑制等方面的提升就越加明显。尤其是,当发射天线和接收天线数量很大时,在信道散射充分环境下 MIMO 信道容量将随收发天线数中的最小值近似线性增长。因此,采用大数量的天线,为大幅度提高系统的容量提供了一个有效的途径。然而,受到多天线所占空间、实现复杂度等技术条件的限制,早期对 MIMO 系统的研究和标准化制也仅仅支持 8 个天线端口^[43]。与丰富的空间资源相比,现有 MIMO 技术的开发程度仍与之相距甚远,特别是巨大的容量和可靠性增益也使得针对大天线数的 MIMO 系统相关技术的研究越来越受到专家学者和工业界人士的关注,如单个小区情况下,基站配有远远超过移动台天线数量的天线的多用户 MIMO 系统的研究等^[44]。基于此,美国贝尔实验室学者 Thomas L. Marzetta 在文献^[45]中研究了非协作多小区、时分双工(Time Division Duplex, TDD)制式下,基站配置无限数量天线的极端情况的多用户 MIMO 系统,并且在研究中发现了一些不同于单小区、有限数量天线时的系统特性,也由此正式提出了大规模 MIMO 技术的概念。随后,众多科研机构和电信厂商便在此基础上对大规模 MIMO 技术进行了深入和广泛的研究,特别是针对大维且有限天线数情况下的研究则更加适应于实际系统的使用。

目前业内对于大规模 MIMO 技术的定义是指在发射站点配置远多于现有系统天线数的大规模天线阵列(通常为几十到几百根天线,是现有系统天线数量的 1 到 2 个数量级以上),在同一时频资源上为数量相对较少的多个用户提供服务。最初业界针对大规模 MIMO 的研究是在基站部署大规

模天线阵列,后续研究扩展至中继等节点,形成大规模 MIMO 中继系统。在天线的配置方式上,这些天线可以是集中地配置在一个站点上,形成集中式的大规模 MIMO,也可以是分布式地配置在多个节点上,形成分布式的大规模 MIMO 系统。本书中若未特别指出分布式大规模 MIMO 系统,则所提到的大规模 MIMO 通常都默认为集中式天线排布。考虑到天线尺寸以及架设的要求,大规模天线阵列的使用与天线部署方式密切相关。目前,业内关注较多的天线排布方式包括均匀线性阵列、均匀圆阵列、均匀面阵列以及三维圆柱阵列。上述几种天线排布方式,也正是通常意义上的集中式天线排布,即天线集中部署在基站架顶端。作为一种有益扩展,近年来有学者将大规模 MIMO 与 CRAN 架构相互融合,提出了新型的分布式大规模 MIMO 系统,有机地结合了两种技术的优势,获得了进一步的性能提升。

大规模 MIMO 技术之所以受到如此关注,在于部署大规模天线阵列之后,可以获得许多传统 MIMO 系统所无法比拟的物理特性和性能优势^[23,46,48]。其主要包括:随着天线数的急剧增长,不同用户之间的信道将呈现渐进正交性,这意味着用户间干扰可以得到有效的甚至完全的消除,从而大大提升系统总容量;基站天线数的增加,使得信道小尺度衰落和热噪声将被有效地平均,即信道硬化作用,从而以极大概率避免了用户陷于深衰落,大大缩短了空中接口的等待延迟,简化了上层调度策略;大规模 MIMO 的空间分辨率与现有 MIMO 相比显著增强,充分挖掘了空间维度资源,这使得网络中的多个用户可以在同一时频资源上利用大规模 MIMO 提供的空间自由度与基站同时进行通信,从而在不需要增加基站密度和带宽的条件下大幅度提高频谱效率;大量额外的自由度,可以用于发射信号波束赋形,甚至于采用恒定包络信号,从而有效降低发射信号的峰均比,这就使得射频前端可以采用低线性度、低成本和低功耗的功放,大大降低系统部署成本;大规模 MIMO 可将波束能量聚焦在很窄的范围内,从而大幅度降低小区间和小区内多用户的干扰;巨量天线的使用,使得阵列增益大大增加,从而有效地降低发射端的功率消耗,使得系统总能效能够提升多个数量级。除此之外,当天线数量足够大时,可以采用简单的线性预编码和线性检测接收机,如最大比发送预编码和最大比接收,来达到接近最优的系统性能,从而大大简化了系统的实现复杂度。以上这些特性,使得大规模 MIMO 技术在实现千倍数据量、零延迟和多样化业务需求方面具有无穷的潜能。也正是由于这些前所未有的特性,业内普遍将大规模 MIMO 技术认为是第五代移动通信系统中最具前景的关键技术之一。

尽管大规模 MIMO 技术存在许多潜在性能优势,但是要真正实现大规模 MIMO 技术仍需要面对许多极具挑战性的问题。近些年,针对大规模

MIMO 技术的应用性研究内容主要集中在信道模型、容量和传输技术性能分析、预编码技术、信道估计与信号检测技术等方面,虽然取得了一定的先期成果,但还存在一些难点需要着重关注,主要包括:由于理论建模和实测模型工作较少,还没有被广泛认可的信道模型,以至于现有的研究结果在实测环境中的真实性能到底如何尚待研究;由于需要利用信道互易性减少信道状态信息获取时的导频资源开销,早期的大多数传输方案大都假设采用 TDD 制式,以至于当采用频率复用和导频复用时,存在有较强的导频污染现象,从而制约系统性能提升;TDD 制式下由于需要利用上下行信道的互易性,难以适应高速移动场景,特别是高速移动场景下的信道时变特性对于系统性能的影响以及应对策略也有待进一步讨论;现有蜂窝网络中主流制式依然是 FDD 系统,考虑到 4G 到 5G 的平滑过渡以及兼容性,并且今后 5G 系统中也势必为 TDD 与 FDD 共存补充的局面,因而,必须对大规模 MIMO 应用于 FDD 系统中可能存在的问题加以重视,首当其冲的便是下行导频和上行反馈开销,由于 FDD 制式下信道互易性不再成立,下行导频开销将正比于天线数,这对于系统开销将带来巨大的负担;在分析信道容量及传输方案的性能时,大都假设独立同分布信道,使得分析结果存在明显的局限性,尤其是天线数众多时,发射端天线相关性是不可避免的,因而需要将其列入影响系统性能的重要考察因素;大规模天线阵列的使用,射频(Radio Frequency, RF)链路中的能耗开销也会等比例增加,这对于未来以绿色通信为主流的无线系统而言也会是巨大的挑战;收发天线数量增加,收发机波束矩阵的计算复杂度也呈指数级增加,特别是涉及矩阵乘法、矩阵求逆的波束成型优化设计,其复杂度将导致现有收发机的计算能力无法承受;异构网络中(如中继、小区等)部署大规模天线阵列后,对于传统传输模式下的系统容量分析与性能影响。因此,为了充分挖掘大规模 MIMO 的潜在技术优势,需要深入研究符合实际应用场景的信道模型,分析其对信道容量的影响,并在实际信道模型、适度的导频开销、可接受的实现复杂度下,分析其可达的频谱效率、功率效率,并研究最优的无线传输方法、信道信息获取方法、多用户共享空间无线资源的联合资源调配方法。

综上所述,虽然大规模 MIMO 技术具有诸多特点和优势,但是如何突破基站侧天线个数显著增加所引发的无线传输及资源调配技术中的瓶颈问题,及探寻适于大规模协作通信场景的无线传输与空中接口理论方法等,将成为大规模 MIMO 通信技术研究中亟待解决的核心问题。特别是在 FDD 制式下通信系统中上下链路间不存在互异性的特点,基站发射端难以获得信道信息,导致简单的相关波束设计也将难以实现。而且,在复用因子为 1 的无线通信系统中,如何有效地解决大规模 MIMO 的 TDD 通信系统的信

道估计与导频污染问题也是相关研究的难点。因此,在 5G 通信系统中使用大规模 MIMO 技术仍然需要解决许多关键问题^[45,49]。

针对上述大规模 MIMO 技术在理论研究和实际系统中所存在的问题,要将其较好地应用于 5G 系统仍然面临诸多挑战和困难,但随着研究的不断推进与深入,大规模 MIMO 预期所带来的性能优势也得到了业内的充分肯定,越来越多的人对其在 5G 系统中的重要作用寄予厚望。同时,随着大规模 MIMO 技术中关键问题的不断解决,有理由相信该项技术将成为 5G 无线通信系统区别于现有系统的核心技术之一,并且会发挥更广阔的作用。下面将主要介绍大规模 MIMO 技术的相关研究现状,以及本书关注的主要内容。

1.3 大规模 MIMO 技术的研究现状

本节将从系统工作制式(TDD 和 FDD)、天线排布方式(集中式和分布式)、部署位置(基站宏系统和中继异构系统)以及绿色高效通信等方面,对大规模 MIMO 技术在国内外的研究现状进行介绍。不同的工作制式、不同的部署方式以及不同天线排布方式都会大大影响到大规模 MIMO 技术的性能以及实现,因此,我们分门别类地对相关的大规模 MIMO 技术领域进行介绍说明^[50]。

1.3.1 TDD 和 FDD 制式下的大规模 MIMO 技术

从大规模 MIMO 技术出现至今,众多具有鲜明特性的研究结果都是基于对信道状态信息(Channel State Information, CSI)的获取程度。针对现有蜂窝系统中的两种双工制式,即 TDD 和 FDD,其 CSI 获取方式和导频开销也有很大的不同,图 1.3 给出了蜂窝小区集中式大规模 MIMO 系统在两种双工制式下的传输流程。在大规模 MIMO 技术发展的初期,大多数研究人员都是基于 TDD 系统进行相关内容的研究,这主要是从 CSI 获取时的导频开销角度来考虑的。由于在 TDD 制式下,可以利用信道互易性,通过用户发送上行训练序列,基站端直接估计出 CSI,因而导频开销量只与用户数成正比,而用户数相对较小,所以导频开销量基本可以忽略不计。而在 FDD 制式下,需要基站发送下行训练序列,由各用户估计 CSI 再通过上行反馈链路发送至基站端,导频开销量将与基站端天线数成正比。而在大规模 MIMO 系统中,基站端天线数众多,直接导致了下行导频开销量和反馈

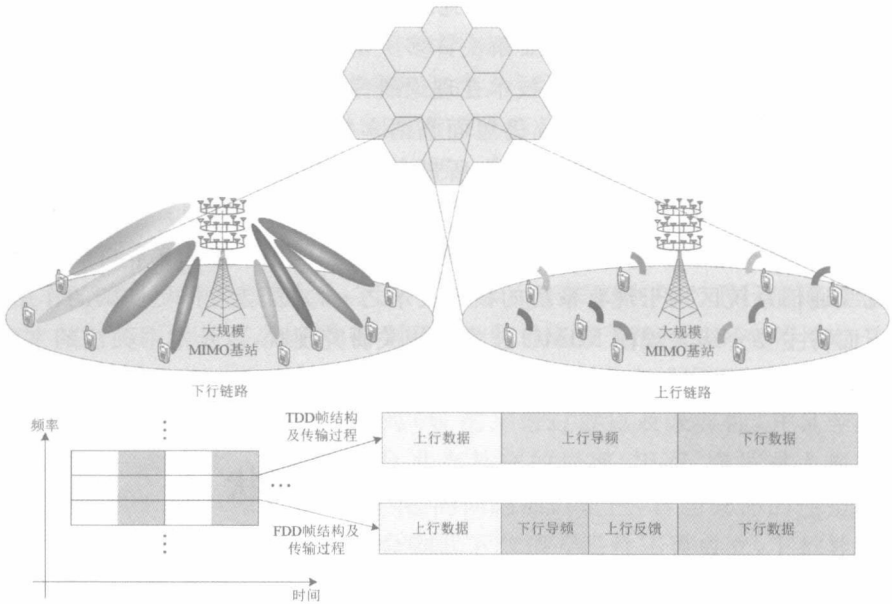


图 1.3 蜂窝小区大规模 MIMO 系统及 TDD 和 FDD 两种制式传输流程示意图

开销庞大,这会对有限的时频资源造成巨大的开销,也直接影响到了系统的有效可达速率,也正是这一关键因素使得 FDD 制式下大规模 MIMO 技术的相关研究进展缓慢。虽然 TDD 制式对于实施大规模 MIMO 技术具有先天的优势,但是考虑到多小区蜂窝系统时,由于导频数量的有限,在不同小区间势必需要共用导频序列,而这将导致严重的导频污染现象,直接影响到 TDD 制式下大规模 MIMO 系统的容量性能。针对导频污染问题,文献[51]利用多用户与基站间的到达角空间分离特性,采用协作信道估计结合导频分配的方法给出了一种抗导频污染的方案;文献[52]则提出了一种基于子空间映射的非协作式“盲”信道估计方案,该方法无需通过导频信号即可找到合适的子空间基,从而将接收信号进行子空间映射后消除来自其他小区的干扰,进而可利用导频信号估计出降维后的有效信道信息以达到消除导频污染的效果;文献[53-56]分别从导频调度和最优导频设计的角度出发,给出了抑制导频污染的方案。研究结果也表明,通过有效的导频分配策略以及合适的导频结构设计,可以降低一定程度的导频污染情况。由此可见,CSI 的获取精度对于大规模 MIMO 技术的重要性。除此之外,文献[57]研究了含有导频污染情况下的预编码策略和性能分析;J. Hoydis 等人在文献[58]中给出了同时考虑信道估计误差、导频污染、天线相关时上/下行采用不同接收机/预编码时可达速率的近似闭合表达式,并从 QoS 需求的角度出发,揭示了不同的接收机/预编码方案下所需要的基站天线数。文

献[59]和文献[60]分别在空间相关信道和独立同分布信道下,考虑用户移动场景中时变信道特性对于单小区集中式大规模 MIMO 系统和多小区集中式大规模 MIMO 系统的和速率影响,以及此时可以获得的发射功率缩放增益,并推导了系统速率关于信道时变系数的解析表达式。文献[61]针对大规模 MIMO 系统提出一种低复杂度的启发式软解调检测接收算法。

尽管 FDD 制式下大规模 MIMO 系统的训练序列开销过大,但是考虑到现行蜂窝系统中绝大多数都是 FDD 制式,而且全球范围内颁发的 LTE 牌照中多数频带指定使用 FDD 制式,并且在中长期内 FDD 制式仍将占据宏蜂窝通信的主导方式。因而,为了系统能够平滑过渡以及前向兼容,从工业界的角度看,在 FDD 制式下推广大规模 MIMO 技术是大势所趋,更具有实际应用价值。正是基于这样迫切的行业需求,以 A. Adhikary、D. Love 和 J. Choi 等学者为代表的各大研究机构和课题组先期开展了大规模 MIMO 技术应用于 FDD 制式下的相关问题的研究和探索,特别是针对大规模 MIMO FDD 系统中的低导频开销设计、最优导频结构、低反馈开销方案以及预编码设计等方面展开研究,除此之外,如文献[62]所述,多用户 FDD 系统的导频设计仍是一个开放性难点问题,因而大规模 MIMO FDD 系统目前主要关注单用户和具有特殊属性的多用户场景。文献[63]针对大规模 MIMO FDD 单用户下行系统,通过释放导频正交性约束条件,利用信道反馈来序贯优化导频信号,从而降低导频开销的同时保证信道估计精度。J. Choi 等人在文献[64]中研究了通过利用时间相关性信道特性并结合信道预测技术,提出一种低开销的开环和闭环信道估计方案。文献[65]研究了正交导频集合中通过功率分配方法获得的最优导频序列结构。文献[63-65]中的研究主要都是针对单用户场景,而 A. Adhikary 等人则基于某些特殊属性的多用户场景下,利用信道相关性和稀疏特性,提出了两级预编码方案——联合空分复用(Joint Spatial Division and Multiplexing, JSDM)。该方案是通过用户调度将具有相同或相似空间特性的用户分配至同一组内,并使用信道统计信息进行第一层预编码,将原始高维信道转化为低维有效信道,从而大大降低了估计有效信道时所需要的导频开销,并且简化了预编码方案设计^[66-68]。仿真实验也验证了 JSDM 方案的可行性,这为大规模 MIMO 技术在 FDD 系统中的推广奠定了基础。但是, JSDM 方案中关于导频开销优化、信道估计方案、有效信道降维程度等详细设计并未给出,仍需要后续进一步深入讨论。考虑到信道统计信息是随时间缓慢变化的,因而 JSDM 方案中的外层预编码也需要定期更新。基于此, J. Chen 等人^[69]将 JSDM 方案扩展至时变信道场景下,给出了一种低复杂度的在线更新算法用于跟踪信道统计变化时的外层预编码设计。文献[70]和文献[71]则分别