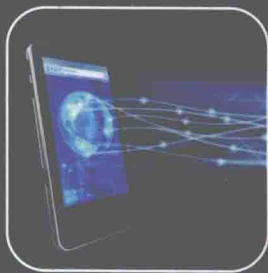


5G丛书

# 5G大规模 MIMO 理论、算法与关键技术

The Theory, Algorithm and Key Technologies of Massive MIMO for 5G

李兴旺 张辉 等著



- ▶ 以5G为背景，详细介绍大规模MIMO相关理论、算法及关键技术
- ▶ 为大规模MIMO标准化和产业化提供理论指导
- ▶ 兼具理论体系的严密性，应用的先进性，行业需求的实用性



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

5G 丛书

# 5G 大规模 MIMO 理论、算法与关键技术

李兴旺 张 辉 王小旗 王俊峰 著



机械工业出版社

本书从理论研究、标准化、产业化等角度出发,详细介绍大规模 MIMO 在实际衰落场景应用中存在的问题。主要围绕 K 复合衰落信道分布式大规模二维 MIMO 信道容量界、广义 K 复合衰落信道分布式大规模二维 MIMO 接收检测近似性能、莱斯/伽马复合衰落信道小小区协作二维 MIMO 接收检测技术及性能、瑞利/对数正态三维 MIMO 接收检测技术及性能、K 复合衰落信道三维多用户 MIMO 系统接收检测及性能、多小区非协作大规模三维 MIMO 预编码技术及性能、多小区协作大规模三维 MIMO 接收技术及性能,为大规模 MIMO 标准化和产业化提供理论指导。

本书既可作为高等学校高年级本科生、研究生的前沿技术课程教材,也可以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: 理论、算法与关键技术/李兴旺等

著. —北京: 机械工业出版社, 2017. 8

(5G 丛书)

ISBN 978-7-111-58020-1

I. ①5… II. ①李… 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 227981 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李馨馨 责任编辑: 李馨馨

责任校对: 潘蕊 责任印制: 张博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 10.25 印张 · 198 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-58020-1

定价: 55.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



# 前言

## Preface

大规模 MIMO 被认为是第五代移动通信系统中最核心的技术之一。本书以第五代移动通信为背景,详细介绍大规模 MIMO 相关理论、算法及关键技术。

本书从大规模 MIMO 基本概念讲起,由浅入深,逐步介绍大规模性能指标(信噪比、误符号率、中断概率)、大规模 MIMO 信道模型、大规模 MIMO 传输技术(预编码技术、检测技术)。主要围绕 K 复合衰落信道分布式大规模二维 MIMO 信道容量界、广义 K 复合衰落信道分布式大规模二维 MIMO 接收检测近似性能、莱斯/伽马复合衰落信道小小区协作二维 MIMO 接收检测技术及性能、瑞利/对数正态三维 MIMO 接收检测技术及性能、K 复合衰落信道三维多用户 MIMO 系统接收检测及性能、多小区非协作大规模三维 MIMO 预编码技术及性能、多小区协作大规模三维 MIMO 接收技术及性能。为大规模 MIMO 标准化和产业化提供理论指导。

本书由河南理工大学相关专业老师编写而成,其中第 1、4、7 章由李兴旺老师撰写,第 2、5 章由张辉老师撰写,第 3、9 章由王小旗老师撰写,第 6、8 章由王俊峰老师撰写,全书由李兴旺老师统稿。

本书在撰写过程中,得到了河南理工大学物理与电子信息学院的大力支持,在此表示衷心的感谢。由于本书涉及无线通信前沿技术以及多个学科领域,加之作者水平有限,因此书中难免有不足指出,敬请各位专家、学者、同行批评指正。

李兴旺

2017 年 5 月



# 目录

Contents

## 前言

### 第1章 引言 / 1

- 1.1 研究背景 / 2
- 1.2 研究现状 / 5
- 1.3 技术优势 / 8
- 1.4 面临挑战 / 9
- 参考文献 / 11

### 第2章 基础理论 / 13

- 2.1 系统性能指标 / 14
  - 2.1.1 平均信噪比 / 14
  - 2.1.2 中断概率 / 15
  - 2.1.3 平均误符号率 / 15
  - 2.1.4 衰落量 / 16
  - 2.1.5 平均中断周期 / 17
- 2.2 信道模型 / 17
  - 2.2.1 二维 MIMO 信道 / 18
  - 2.2.2 三维 MIMO 信道 / 20
- 2.3 大规模 MIMO 传输 / 23
  - 2.3.1 上行检测技术 / 23
  - 2.3.2 下行预编码技术 / 27
- 2.4 本章小结 / 29
- 参考文献 / 29

### 第3章 K 复合衰落信道分布式大规模二维 MIMO 信道容量界 / 31

- 3.1 研究背景 / 32



|       |                    |
|-------|--------------------|
| 3.2   | 系统模型与信道容量 / 33     |
| 3.2.1 | 分布式 MIMO 衰落模型 / 33 |
| 3.2.2 | 信道容量 / 34          |
| 3.3   | 预备数学知识 / 34        |
| 3.3.1 | 随机变量分布 / 34        |
| 3.3.2 | 盖优化理论 / 35         |
| 3.4   | 分布式 MIMO 容量界 / 35  |
| 3.4.1 | 遍历容量上界 / 35        |
| 3.4.2 | 遍历容量下界 / 39        |
| 3.4.3 | 大规模 MIMO 渐进性能 / 41 |
| 3.5   | 仿真结果 / 43          |
| 3.6   | 本章小结 / 45          |
|       | 参考文献 / 45          |

#### 第4章 广义 K 复合衰落信道分布式大规模二维 MIMO 接收检测近似性能 / 47

|       |                    |
|-------|--------------------|
| 4.1   | 研究背景 / 48          |
| 4.2   | 衰落模型 / 49          |
| 4.3   | 分布式 MIMO 性能 / 50   |
| 4.4   | 矩匹配近似方法 / 52       |
| 4.5   | 近似性能分析 / 54        |
| 4.5.1 | 近似可达和速率 / 54       |
| 4.5.2 | 近似误符号率 / 58        |
| 4.5.3 | 近似中断概率 / 59        |
| 4.6   | 大规模 MIMO 渐进性能 / 60 |
| 4.7   | 仿真结果 / 62          |
| 4.8   | 本章小结 / 66          |
|       | 参考文献 / 66          |

#### 第5章 莱斯/伽马复合衰落信道小小区协作二维 MIMO 接收检测技术及性能 / 68

|     |                     |
|-----|---------------------|
| 5.1 | 研究背景 / 69           |
| 5.2 | 协作模型与 SNR 统计特征 / 70 |
| 5.3 | 可达和速率 / 73          |



5.4 误符号率和中断概率 / 75

5.4.1 误符号率 / 75

5.4.2 中断概率 / 77

5.5 仿真结果 / 77

5.6 定理证明过程 / 81

5.6.1 定理 5.1 证明 / 81

5.6.2 定理 5.2 证明 / 82

5.6.3 推论 5.2 证明 / 82

5.6.4 定理 5.3 证明 / 83

5.6.5 推论 5.3 证明 / 84

5.6.6 定理 5.4 证明 / 85

5.7 本章小结 / 86

参考文献 / 86

第6章 瑞利/对数正态三维 MIMO 接收检测技术及性能 / 88

6.1 研究背景 / 89

6.2 系统模型与用户三维分布 / 90

6.2.1 系统模型 / 90

6.2.2 用户三维分布 / 92

6.3 可达和速率与理论下界 / 93

6.3.1 可达和速率 / 93

6.3.2 可达和速率下界 / 94

6.4 大规模 MIMO 渐进性能 / 96

6.5 仿真结果 / 97

6.5.1 场景一 / 98

6.5.2 场景二 / 101

6.6 本章小结 / 103

参考文献 / 103

第7章 K 复合衰落信道三维多用户 MIMO 系统接收检测及性能 / 105

7.1 研究背景 / 106

7.2 系统模型 / 107



- 7.2.1 衰落信道模型 / 107
- 7.2.2 用户分布模型 / 108
- 7.3 三维 MIMO 系统性能分析 / 108
  - 7.3.1 可达和速率分析 / 108
  - 7.3.2 下界速率分析 / 109
  - 7.3.3 大规模 MIMO 系统渐进性能 / 111
- 7.4 仿真结果 / 112
- 7.5 本章小结 / 114
- 参考文献 / 114

## 第8章 多小区非协作大规模三维 MIMO 预编码技术及性能 / 116

- 8.1 研究背景 / 117
- 8.2 系统模型 / 118
  - 8.2.1 MIMO 信道衰落模型 / 118
  - 8.2.2 三维 MIMO 信道 / 120
  - 8.2.3 归一化 MRT 预编码 / 120
- 8.3 三维 MIMO 性能 / 122
  - 8.3.1 数据速率 / 123
  - 8.3.2 误符号率 / 124
  - 8.3.3 中断概率 / 126
- 8.4 大规模 MIMO 渐进性能 / 127
- 8.5 仿真结果 / 128
- 8.6 本章小结 / 132
- 参考文献 / 132

## 第9章 多小区协作大规模三维 MIMO 接收技术及性能 / 134

- 9.1 研究背景 / 135
- 9.2 系统模型 / 136
  - 9.2.1 MIMO 信道衰落模型 / 136
  - 9.2.2 三维 MIMO 模型 / 137
  - 9.2.3 上行协作模型 / 138
- 9.3 可达和速率下界 / 140



9.4 渐进性能与最佳用户数方案 / 141

9.4.1 渐进性能分析 / 141

9.4.2 最佳用户数方案 / 144

9.5 仿真结果 / 146

9.6 本章小结 / 149

参考文献 / 150

附录 / 151

附录 A 缩略语对照表 / 152

附录 B 数学符号表 / 153



# 第1章

## 引言

## 1.1 研究背景

随着第三代移动通信（the Third Generation Mobile Communication, 3G）网络以及第四代移动通信（the Forth Generation Mobile Communication, 4G）网络在全球范围内的大规模部署，移动通信数据业务急剧增长，移动通信网络能源消耗也随之剧增，移动设备能源消耗造成的环境污染日益严重。未来第五代移动通信系统（the Fifth Generation Mobile Communication, 5G）将主要面临以下三个方面的挑战。

首先，随着无线通信的发展，移动智能终端和多媒体设备的普及，无线通信数据业务以及能源消耗呈现爆炸式增长。2015年3月思科公司在《Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014-2019》白皮书中指出，2014年底全球移动通信设备连接数量超过全球人口数量达到74亿部，这一数字比2013年增加了4.97亿部，其中，智能手机增长最快，年复合增长率为88%，到2019年底，这一数字将达到115亿（包括机器通信设备），如图1-1所示。海量移动设备的增长造成了移动通信数据量爆炸式增长，思科公司报告指出，2014年全球移动通信数据流量达到30EB，比2013年增加12EB，2014年至2019年，全球移动通信数据流量年组合增长率预计为57%，达291.6EB<sup>[1]</sup>。此外，思科2016年发布的白皮书指出，与2015年相比，2020年移动数据业务量将由3.7EB/月增长到30.6EB/月，年复合增长率为53%，如图1-2所示。未来无线通信要满足容量迅速增长的需求，提升无线通信系统容量将是未来移动通信面临的重要挑战。

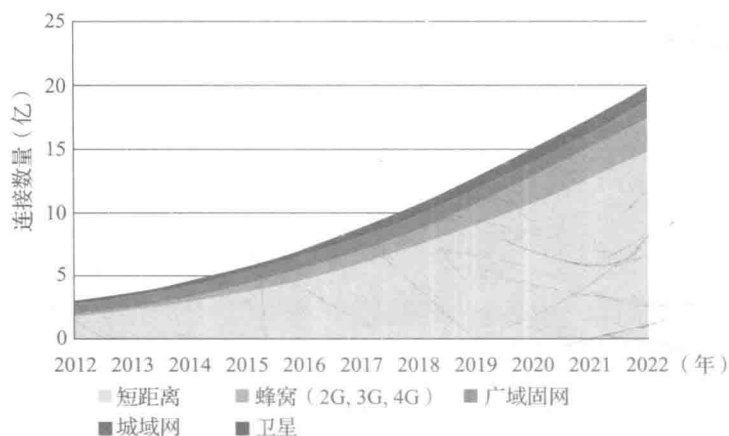


图 1-1 无线设备连接数量预测<sup>[1]</sup>

其次，海量无线网络设备造成的能源消耗对全球气候产生巨大的影响，逐渐成为各国政府和运营商亟待解决的问题。2012年12月，GeSI SMARTer 2020在报告《GeSI SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future》中指出，从2002年至2020年，全球



信息通信产业温室气体（二氧化碳）排放量由 5.3 亿吨增加至 14.3 亿吨，占全球温室气体排放量的比重由 1.3% 增加至 4%。在全球信息通信产业能源消耗中，无线通信网络能源消耗所占比重逐渐增大。2002 年，无线通信的温室气体排放为 0.64 亿吨，虽然其仅仅占信息通信产业温室气体总排放量的 12%，但是却是排放量增长率最快的一项，预计到 2012 年这一数字将增加一倍。来自 MVCE（Mobile Virtual Centre of Excellence）的研究报告指出，基站和其他网络设备能源消耗分别占到整个无线通信能源消耗的 57% 和 28%。巨大的能源消耗不仅增加了网络的运营成本，也给环境造成严重的污染。因此，为了节约网络运营成本，减小温室气体排放，保证社会可持续发展战略的实施，绿色通信被提上日程，绿色通信致力于研究高能量效率的无线通信关键理论及技术。为了推动高能量效率绿色通信技术的发展，学术界和产业界相继设立了 OPERA-Net/OPERA-Net2（Optimising Power Efficiency in Mobile Radio Networks）、Green Radio、EARTH（Energy Aware Radio and Network Technologies）、GreenTouch、TREND（Towards Real Energy-Efficient Network Design）、C2POWER（Cognitive Radio and Cooperative Strategies for Power saving in multi-standard wireless devices）、eWin 等国际合作项目或组织，共同致力于绿色通信的关键理论与技术研究。因此，满足海量设备造成的能源消耗需求，提高无线通信系统的能量效率将是未来移动通信需要面临的又一挑战。



图 1-2 信息通信领域移动数据业务量预测（单位：EB/月）<sup>[1]</sup>

最后，随着 2G、3G、4G 移动通信网络的同时运行，无线通信的频谱资源（几百兆赫兹至几吉赫兹频谱）短缺的问题日益突出，在传统频带内几乎没有新的频段用于未来无线通信的服务，而传统室外移动通信使用高频段仍有许多亟待解决的问题，包括视距通信（Line of Sight, LoS）、高路径损耗、低射频效率。鉴于此，美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）在 2010 年的《Connecting America: The National Broadband Plan》报告中指出，美国频谱赤字在未来 5 年将达 300MHz，未来 10 年将达 500MHz。由此可见，要满足未来无线通信的频谱需求，提高无线通信频谱效率以及寻找新的频谱资源是

未来无线通信面临的重要挑战。

为了应对上述挑战,推进无线通信技术不断向前发展,鉴于4G网络在全球大规模商用部署的同时,5G相关理论及技术的研究在国内外受到广泛的关注。2013年,欧盟(European Union, EU)在第7框架计划(7th Framework Programme, FP7)启动了面向5G移动通信演进的METIS(Mobile and Wireless Communication Enablers for the 2020 Information Society)和5G NOW(5th Generation Non-Orthogonal Waveform for Asynchronous Signalling)项目,重点研究未来5G移动通信关键理论与技术。2014年2月,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)成立了IMT-2020推进组,该组织讨论5G相关技术,推进5G的标准化进程。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中国IMT-2020(5G)推进组,5G推进组集合我国高校、科研院所以及企业精干力量共同致力于我国5G移动通信技术的研究与标准化进程。同年底,我国启动了国家高技术研究发展计划(国家863计划)“第五代移动通信(5G)系统前期研究开发(一期)”项目,项目面向2020年移动通信应用的需求,从网络系统架构、无线传输技术、无线组网技术,系统评估与测试验证四个方面出发研究面向5G技术。2014年2月20日,又启动了国家863计划“第五代移动通信(5G)研究开发前期研究(二期)”项目,二期在一期基础上,重点关注灵活可配置实验平台、毫米波、无线网络虚拟化、接入安全以及新型编码调制五个方面。上述计划与项目预测,与当前4G移动通信系统相比,未来5G移动通信系统将满足以下系统需求<sup>[1]</sup>。

- 1) 单位区域系统容量提高1000倍。
- 2) 无线设备连接数量提高10~100倍。
- 3) 用户数据传输速率提高10~100倍。
- 4) 通信设备电池寿命提高10倍。
- 5) 端到端延迟降低5倍。

为了满足5G移动通信需求,未来无线通信技术将主要从空中接口、频谱资源和网络设备三个方面来满足1000倍容量以及其他需求,如图1-3所示。

由图1-3和文献[2]可知,近20年,5G无线通信需求主要通过空中接口和频谱资源获得,分别提供20倍左右和25倍左右容量提升需求,再后来的20年,系统容量的提升将分别通过网络设备和频谱资源获得,分别提供20~50倍和5~10倍容量提升。

空中接口技术包括大规模多输入多输出(massive Multiple-Input Multiple-Output, massive MIMO)技术<sup>[3,4]</sup>、三维多输入多输出(Three Dimensional MIMO, 3D MIMO)<sup>[5]</sup>技术、多点协作(Coordinated Multipoint, CoMP)技术、高阶调制编码(High-Order Modulation Code, HOMC)技术、非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术等。

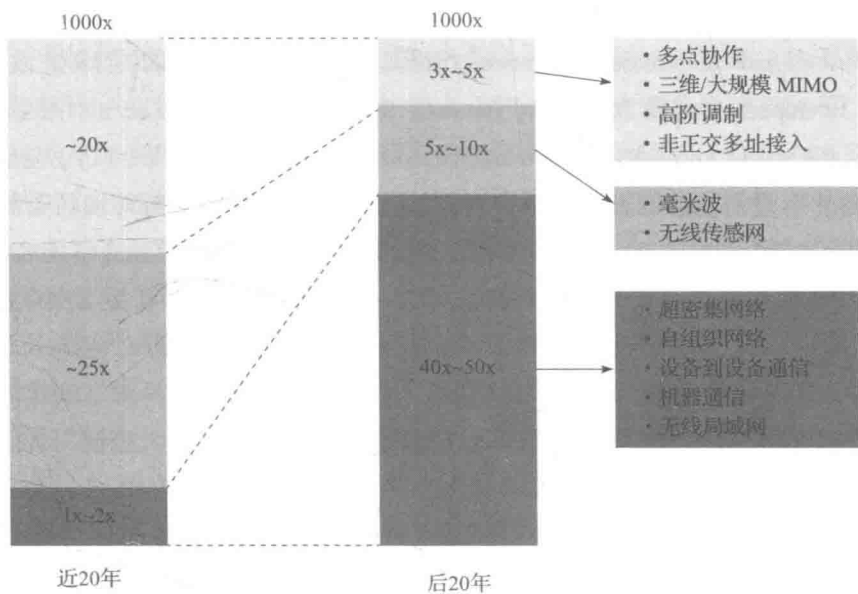


图 1-3 网络吞吐量趋势<sup>[2]</sup>

频谱资源包括毫米波（Millimeter Wave, MMW）、无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）等。

网络设备包括超密集网络（Ultra-Dense Network, UDN）、无线自组织网络（Wireless self-Organized Network, WSON）、设备到设备通信（Device to Device, D2D）、机器通信（Machine Type Communication, MTC）等。

## 1.2 研究现状

MIMO 技术的发展经历从简单到复杂的发展过程，从最初点到点通信，到单小区单用户，再到单小区多用户，最后到多小区多用户。单小区主要有单输入单输出（Single-Input Single-Out, SISO）、多输入单输出（Multiple-Input Single-Output, MISO）、多用户 MIMO（Multiuser MIMO, MU-MIMO）、多用户大规模 MIMO；而多小区 MIMO（Multicell MIMO）主要分为多小区非协作和协作 MIMO、多小区协作和非协作大规模 MIMO。MIMO 技术发展如图 1-4 所示。

MIMO 技术由于能够显著提高频谱效率和增强系统可靠性而成为学术界和产业界研究热点，并广泛应用于多种国际移动通信标准中，例如通用移动通信系统（Universal Mobile Telecommunications System, UMTS）中的高速下行分组接入（High Speed Downlink Packet Access, HSDPA）、第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）中的长



期演进 (Long Term Evolution/LTE-advanced, LTE/LTE-A)、电气和电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 802.16e/m 中的全球微波互联接入 (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX)、802.11n/ac/ah 中的无线局域网网络无线保真 (Wireless Local Area Networks/Wireless-Fidelity, WLAN/WI-FI)。随着移动通信向 5G 的演进, 容量需求急剧膨胀、频谱资源极度匮乏、能源消耗与环境污染问题凸显其重要性。鉴于 MIMO 技术在 3G、4G 移动通信的成功运用, 未来 5G 移动通信技术中 MIMO 技术也必将为物理层关键技术之一。2010 年底, T. L. Marzetta 提出一种新型 MIMO 技术——大规模 MIMO 技术 (又称作 massive MIMO, Large-scale Antenna Systems, Very Large MIMO, Hyper MIMO, Full-Dimension MIMO, ARGOS)<sup>[6]</sup>, 大规模 MIMO 技术对空间维度的利用达到空前的水平, 能够有效地提高频率效率、降低能量消耗。因此, 大规模 MIMO 技术成为 5G 移动通信突破性技术之一。

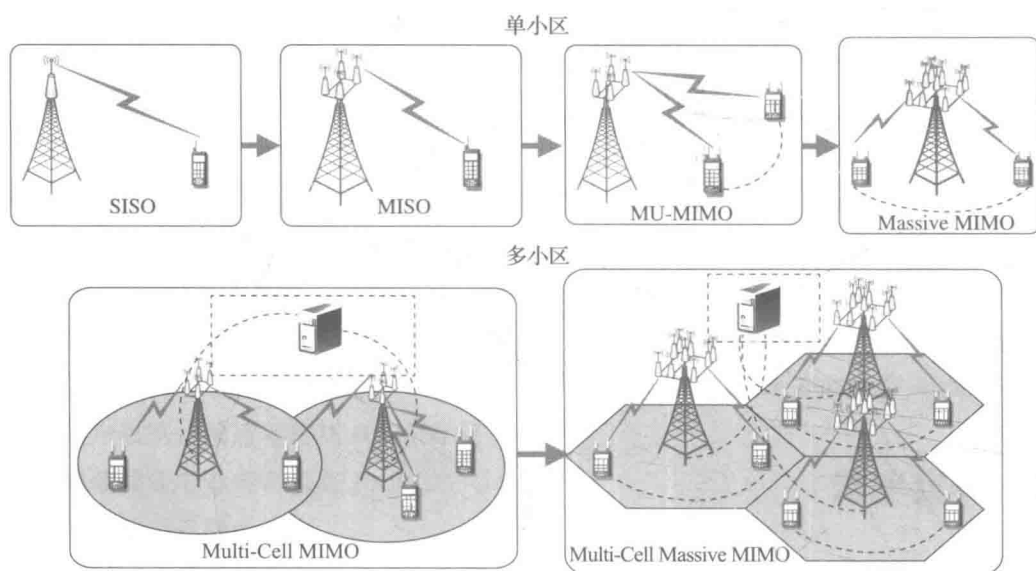


图 1-4 MIMO 技术的发展

T. L. Marzetta 指出, 大规模 MIMO 技术通过多余空间自由度可以大大地降低终端信号处理复杂度, 并且在基站端使用简单的线性信号处理算法就可以减小或者消除小区内干扰、小区间干扰、信道估计误差以及噪声的影响, 从而达到系统最佳性能。T. L. Marzetta 在文献 [6] 中研究指出, 在大规模 MIMO 系统中, 常用的低复杂度线性信号检测和预编码技术被认为是最实用的候选方案, 例如最大比合并 (Maximum Ratio Combining, MRC)、最大比发送 (Maximum Ratio Transmission, MRT)、迫零 (Zero-Forcing, ZF)、正则化迫零 (Regularized Zero-Forcing, RZF)、最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 等。在大规模 MIMO 系统中, 由于不同的用户分布在不同的地理位置, 因此系统同时受多

径衰落、阴影衰落以及路径损耗的影响，此外大规模 MIMO 能够应用于不同的场景，如图 1-5 所示，大规模 MIMO 能够用于广域覆盖的宏小区，也能够用于承担热点覆盖的密集小小区，还能够用于室内覆盖的分布式天线以及承担小区边缘覆盖中继系统等，共同形成未来移动通信网络。天线部署形式有宏蜂窝覆盖的圆柱形天线阵列，分布在不同地理位置的分布式天线阵列、线性阵列以及平面阵列，还有中国移动提出的“中”字形排列的大规模天线阵列。H. Q. Ngo 等人研究指出，在基站天线数趋于无穷时，原本随机的信道趋于确定，并且给出理想信道状态信息（Channel State Information, CSI）和非理想 CSI 下使用 MRC、ZF 以及 MMSE 接收检测技术时大规模 MIMO 系统和速率渐进性能，并对基于 MRC 和 ZF 接收检测的频谱效率和能量效率进行对比分析<sup>[7]</sup>。研究者在文献 [7] 中进一步指出：在理想 CSI 情况下，用户天线的发射功率与基站天线数目成反比；在非理想 CSI 情况下，用户天线发射功率与基站天线数目的平方根成反比。利用随机矩阵理论工具，S. Wager 等人研究分析了基站天线数与用户天线数以固定比例趋于无穷时使用 ZF 和 RZF 预编码算法大规模 MIMO 系统和速率渐进性能<sup>[8]</sup>。除了集中式大规模 MIMO 之外，M. Matthaiou 等人研究基于 ZF 接收的分布式 MIMO 和速率性能，并给出和速率下界以及高信噪比和低信噪比（Signal-to-Noise, SNR）和速率渐进性能，并对大规模 MIMO 渐进性能进行分析<sup>[9]</sup>。

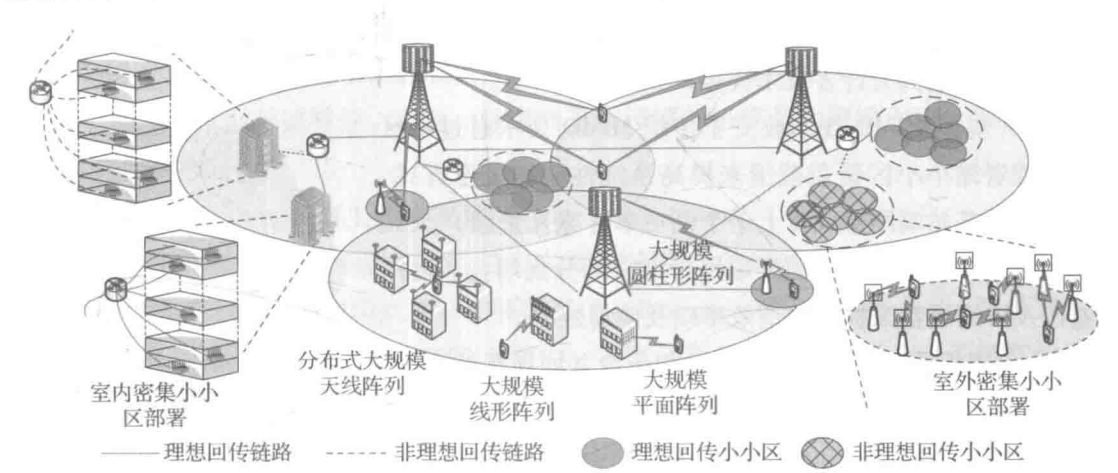


图 1-5 大规模天线场景示意图

在多小区大规模 MIMO 系统中，频率复用产生的同道干扰（Co-Channel Interference, CCI）严重影响了系统性能。许多干扰减小和消除技术用于减小和消除多小区干扰，例如最大似然多用户检测技术（Maximum Likelihood Multi-user Detection, MLMD）、多点协作技术（Coordinated Multipoint, CoMP）、干扰对齐技术（Interference Alignment, IA），然而这些非线性技术由于具有很高的计算复杂度，在大规模 MIMO 技术中很难应用。因此，简单的线性信号处理算法成为研究热点。H. Q. Ngo 研究给出多小区上行线性 ZF 接收检测可达



数据速率、误符号率、中断概率的理论分析表达式，并详细分析多小区间干扰对系统性能的影响<sup>[10]</sup>。此外，大规模 MIMO 由于同时服务众多的用户，不同小区使用正交导频序列的可能性不大，因此需要在不同小区复用相同导频序列，从而产生的干扰称为导频污染。T. L. Marzetta 第一次指出导频污染是大规模 MIMO 极限性能限制的唯一因素。Jubin Jose 对大规模 MIMO 中的导频污染问题进行详细分析，提出一种减少导频污染的预编码方案。Ralf Muller 等分别从协议、预编码技术、协作、角度谱以及盲检测等角度研究导频污染减小或消除方案，上述研究指出在一定条件下，导频污染可以完全消除。T. L. Marzetta 在文献 [6] 中研究指出，在 FDD 系统中，大规模 MIMO 所需导频序列数目与基站天线数目成正比，因而限制了大规模 MIMO 在 FDD 系统中的应用。Giuseppe Caire 提出了一种联合空分复用方案，可以有效地解决 FDD 系统中导频污染的问题，使得大规模 MIMO 在 FDD 系统下的应用成为可能。虽然针对大规模 MIMO 技术的研究已经有大量的理论和技术成果，然而对于大规模 MIMO 的研究还不够充分，许多实际问题尚未解决。因此，研究大规模 MIMO 技术具有重大的理论和实际意义。

### 1.3 技术优势

大规模 MIMO 作为一种新型 MIMO 技术，它并不是简单的天线增加，而是一种新型蜂窝网络架构，它具有许多技术优势，如图 1-6 所示。

1) 大规模 MIMO 技术改变了传统 MIMO 技术通过小区间协作或者缩小小区覆盖范围来提高系统性能的工作方式，而是通过在基站端配置成百上千个低功率（毫瓦量级）天线阵列，同时服务数十上百的终端用户带来的分集增益、复用增益以及阵列增益来提高频谱效率以及能量效率。

2) 大规模 MIMO 技术可以通过相干合并增加天线孔径，降低上行和下行发射功率，从而提高能量效率，这不仅从商业角度出发，也与环境健康问题休戚相关，并且符合当前绿色通信的发展需求。

3) 在 TDD 模式下，利用信道互易性，所需导频序列的数目仅仅与每个小区用户（用户单天线）数目成比例，而与基站的天线数目无关，因此大大降低了导频开销，使得大规模 MIMO 技术在 TDD 中的应用成为可能。

4) 当基站天线数远远大于用户数（用户单天线）的条件下，简单的预编码（MRT、ZF、RZF）和检测（MRC、ZF、MMSE）算法将是最实际、实用的传输方案。在极限情况下，热噪声、小区内干扰、小区间干扰以及信道估计误差将被消除，系统性能限制的唯一



图 1-6 大规模 MIMO 技术优势