



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

Principles and Design of Massive Beamforming Technology

大规模天线波束赋形技术 原理与设计

陈山枝 孙韶辉 苏昕 王东明 李立华 高秋彬 等 



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



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

大规模天线波束赋形技术 原理与设计

Principles and Design of
Massive Beamforming Technology

陈山枝 孙韶辉 苏昕 王东明 李立华 高秋彬 等 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

大规模天线波束赋形技术原理与设计 / 陈山枝等著

— 北京 : 人民邮电出版社, 2019.1

(5G丛书)

国之重器出版工程

ISBN 978-7-115-50260-5

I. ①大… II. ①陈… III. ①赋形波束天线—研究

IV. ①TN82

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第283843号

内 容 提 要

本书将重点介绍面向 5G 的大规模天线波束赋形技术, 结合近年来国内外学术界和工业界的最新研究成果, 对大规模天线的基本原理、三维和高频段信道建模方法、波束赋形传输方案、系统设计、标准化制定以及试验平台开发与验证等关键技术原理和系统设计进行全面介绍和详细分析, 为读者呈现出 5G 多天线技术发展的美好前景。

本书的主要读者为从事移动通信技术研究与产品开发人员、网络规划设计工程师、系统运营管理人员以及高等院校通信专业的师生, 适合作为专业课或者培训班的教材。

◆ 著 陈山枝 孙韶辉 苏 昕 王东明

李立华 高秋彬 等

责任编辑 李 强

责任印制 杨林杰

◆ 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>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 710×1000 1/16

印张: 23.75

字数: 435 千字

2019年1月第1版

2019年1月河北第1次印刷



定价: 128.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

《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

移动通信系统作为人类信息社会发展的重要基础设施，为信息的传播与交互构建了不可或缺的便捷通道。伴随着信号处理和集成电路技术的进步，以及用户数量激增、业务需求的爆炸式增长和部署场景不断扩展，移动通信系统的发展与演进保持着蓬勃的生命活力与巨大的市场潜力，极大地促进了工业、商贸、金融、交通、安全等诸多行业的信息化变革，并带动了媒体、娱乐、社交等产业的繁荣发展。同时，移动通信系统的演进有力地驱动着相关理论研究与技术发展向更为宽阔和纵深的领域发展。

移动通信系统的发展大约十年为一代，每一代系统都以其标志性的业务类型与革命性的技术为鲜明特征：第一代移动通信系统（1G）采用了 FDMA 方式，能够提供模拟话音业务；第二代移动通信系统（2G）以 GSM 为代表，采用了 TDMA 方式，支持数字化的语音及短信业务；第三代移动通信系统（3G）采用了 CDMA 技术，能够支持移动上网和多媒体业务；第四代移动通信系统（4G）则采用了 OFDMA 技术，支持移动宽带（MBB）业务，特别是移动互联网业务的蓬勃发展。

当前正在研发的第五代移动通信系统（5G），目标是支持较 4G 的数十倍用户峰值传输速率、百倍以上流量密度、百倍以上连接数密度、十分之一的空口时延，支撑增强的移动宽带（eMBB）、低时延高可靠（URLLC）和海量的机器连接（mMTC）等应用场景。因此，5G 面对的是更具挑战性的系统需求，单纯通过对某一项技术的革新已经很难实现对多种业务类型与更为多样化的应用场景的有效支持。但无论如何，无线传输技术所构建的信息传输通道对提升整体系统性能仍然是最为关键的环节之一。

移动通信技术的核心问题在于提升频谱利用效率。针对这一问题，理论与研



产业实践过程中,科研技术人员对编码、调制、多址等技术手段进行着持续而艰苦的探索,并不断地将系统性能推向理论极限。其中,多天线技术理论的出现与实践的进展为频谱效率的提升开启了新的空间,展示了移动通信技术进一步发展的方向。

在 4G 通信系统中,多天线技术开始得到应用,成为无线物理层技术体系中最为核心的技术之一。伴随着移动通信系统的发展,多天线的技术理论也在持续演进,有源阵列天线技术在商用领域成熟度的提高为多天线技术向着三维化与规模化发展创造了有利条件。随着 OFDM 等相关技术的成熟,为多天线技术与波束赋形技术的结合创造了条件。如今 5G 因大规模天线波束赋形技术得以改善系统频谱效率、提升用户峰值速率、增强覆盖与抑制干扰,大规模天线波束赋形技术也因 5G 而得以完善并显示其应用潜力,作为新一代无线信号物理层传输的基础性技术,还将在 5G 的商用中得到进一步的发展。

我国对移动通信技术的发展非常重视,从政府、运营商、设备商到高校及科研院所分别从不同层面积极地推动着相关理论的研究与验证以及技术方案的标准化和产业化发展,逐步从跟随状态向着引领移动通信技术产业发展的方向努力。在这一过程中,中国信息通信科技集团有限公司(由大唐电信集团与烽火集团联合重组而成)作为 3G TD-SCDMA、4G TD-LTE 和 5G 技术突破及国际标准制定的重要贡献者,始终坚持深入的技术研究与技术创新,在 3G 和 4G 时提出了 TDD 智能天线波束赋型技术进入国际标准,在 5G 的研究中继续在大规模天线波束赋形技术的标准化和产业化方面创新,为大规模多天线技术从理论到实践的跨越做出了重要贡献。

该书作者在大唐电信集团长期从事多天线波束赋形技术研究开发与国际标准制定工作,具有深厚的技术积累与丰富经验,能够从工程技术与标准化角度为读者提供深入独到的见解。同时,东南大学和北京邮电大学相关领域的资深学者也作为部分章节的负责人参与了撰写工作,进一步从理论层面增强了此书的参考价值。

该书对大规模天线波束赋形技术的基本原理、关键技术及解决方案进行了较为详细的论述,并结合当前 5G 系统的标准化进展以及大规模天线试验测试情况,对该技术在 5G 系统中的发展和应用进行了介绍。该书论述条理清晰、内容深浅得当,兼具新颖性、专业性、实用性与可读性,能够为相关技术领域的研究、标准化、开发及工程技术人员提供有价值的参考,期待读者在这一技术方向的研究与实践,进一步完善大规模天线波束赋形技术并推动其更广泛的应用。

郭晓峰

2018 年 12 月 1 日



前言

从移动电话的出现到短信，再到移动上网和微信、移动支付等各类新型业务和应用的兴起以及用户数量规模的迅猛增长，推动着移动通信系统从 1G 到 4G 的持续升级与革新。如今 4G 系统的移动互联网业务发展方兴未艾，5G 的步伐就已悄然临近。5G 通过高速数据传输，实现丰富的多媒体移动互联网业务，同时通过海量连接和低时延、高可靠技术把人与人的无线连接拓展到人与物、物与物，并与云计算、大数据、人工智能、区块链等结合，即将开启“万物智联”的移动时代新篇章。

为了应对系统容量和用户通信速率不断增加的需求压力与挑战，拓展和充分利用无线信道资源是无线传输设计中最为核心的两个问题。而移动通信系统的研究与标准化发展也始终在围绕着增加频谱资源与提升频谱效率这两条主线推进。随着 6GHz 以下频段资源的日益紧张，5G 系统要进一步将频谱资源扩展至高达 100GHz 的新频段。同时，5G 系统也将通过新型的多天线传输、多址接入、编码调制、密集组网等技术手段，更为有效地提升无线频谱资源的利用效率。

决定无线链路传输效能的根本因素在于其信道容量。20 世纪 90 年代，多天线信息理论研究成果证明了在无线通信链路的收、发两端均使用多个天线的通信系统所具有的信道容量将远远超越传统单天线系统信息传输能力极限，多天线技术对于提升传输速率、传输可靠性和系统频谱效率及抑制干扰等具有十分重要的作用。该理论为多天线技术的发展提供了坚实的基础，展现了其在高速无线接入系统中的广阔应用前景。

多输入多输出（MIMO, Multiple Input Multiple Output）技术的性能增益



来自于多天线信道的空间自由度。因此，对 MIMO 空间维度的持续扩展是无线通信系统提升容量和提高效率的重要手段，也是标准化演进过程的一个重要方向。而近年来出现的 Massive MIMO 理论则为进一步扩展 MIMO 空间维度的发展路线提供了充足的理论依据。

Massive MIMO 理论展示了 MIMO 技术在提升系统容量、频谱利用率与用户体验方面的巨大潜力。因此，该理论出现之后，立即受到了学术界与产业界的热烈追捧，并被公认为未来移动通信系统最有潜力的物理层关键技术之一。

根据天线阵列内天线间距的大小和部署方式，Massive MIMO 技术通常分为分布式 Massive MIMO 和集中式 Massive MIMO 技术。分布式 Massive MIMO 通常指大规模天线的多根天线在地理位置上距离比较大（远远大于 10 个波长距离），天线间相关性较弱，通过形成大规模多天线阵列的单用户空分复用方式来提升系统传输速率和容量。而集中式 Massive MIMO 技术通过将大数量天线间密集排列（如 0.5 波长左右），从而形成小间距的天线阵列形式。通过这种集中式 Massive MIMO 天线，能够产生空间分辨能力更强的窄细波束，从而能够利用多个波束的空分多址方式，在空域实现更多用户的并行传输，以及大幅度提升系统容量。因此，集中式 Massive MIMO 也被称为大规模天线波束赋形技术（简称大规模天线）。基于大规模天线系统进行波束赋形被认为是 Massive MIMO 技术的主要实现形式。

根据大规模天线波束赋形理论，随着天线数量的无限增长，各个用户的信道向量将逐渐趋于正交，从而使多用户干扰趋于消失。同时，在巨大的天线增益下，加性噪声的影响也将变得可以忽略。因此，无线系统的发射功率可以任意低，而大量用户可以在几乎没有干扰和噪声的理想条件下进行通信，从而极大地提升了系统容量和频谱利用效率。

近几年来，经过学术界与产业界的共同努力，关于大规模天线波束赋形技术的信道容量、能效与谱效优化、传输与检测算法等方面的研究工作已经开展得比较充分，同时业界也从信道建模和评估等基础性工作方面对后续的技术研究和标准化推进进行了大量准备，而相应的技术验证与原型平台开发，以及大规模外场实测和初步部署也在积极地进行中。

在上述基础之上，产业界对相关技术的标准化给出了明确的推进计划，并已经在 LTE 的增强系统中率先完成了大规模天线技术初步版本的标准化方案。而在面向 5G 系统的标准化研究工作中，3GPP 等标准化组织仍然将大规模天线波束赋形技术作为最重要的工作方向之一。目前，在 NR（New Radio）系统的第一个版本中，已经制定了能够支持 100GHz 以下频段的 MIMO 技术国际标准。在 5G NR 系统的后续演进中，会进一步将其扩展至多点协作等更为广阔的



应用场景中,开展对信道信息反馈和波束管理的增强型关键技术的研究。

中国通信企业和高校在多天线技术的研究和应用方面一直处于业界领先地位。1998年,大唐电信集团代表中国提出的 TD-SCDMA 3G 国际标准中首次将智能天线波束赋形技术引入蜂窝移动通信系统。2006年,大唐电信集团等中国企业在 TD-LTE 4G 标准中开创性地提出了多流波束赋形技术,拓展了智能天线的应用方式,实现了波束赋形与空间复用的深度融合,大幅度提升了 TD-LTE 系统性能和技术竞争力,并实现了 8 天线多流波束赋形的全球成功商用。TD-LTE 系统的多天线技术应用能力和产业化水平领先于 FDD LTE [目前大部分商用 FDD LTE 系统仍采用 2 天线(部分采用 4 天线)]。基于 3G 和 4G TDD 系统中我国在多天线技术领域上的积累和创新,我国在 5G 大规模天线波束赋形技术的发展过程中保持着领先地位,并展现出了积极的引领作用。

在新一代 5G 移动通信系统的研发过程中,中国政府非常重视大规模天线波束赋形技术的研究和推进工作,设立了多项“863”和国家科技重大专项课题,有力地支持了相关技术研究工作,不断深化和提升大规模天线研究和应用水平。2013 年成立的 IMT-2020 推进组,专门设立了大规模天线技术专题研究组,负责组织企业和高等院校及科研院所进行大规模天线关键技术研究 and 系统方案设计工作。在此基础之上,工业和信息化部制定了我国的 5G 技术研发与试验工作总体规划,将大规模天线技术在 IMT-2020 系统中推向了实用化发展道路。

在上述研究和推进工作中,我国的通信企业、高等院校与科研院所积极参与了相关基础理论与关键技术的研究、标准化方案的制定与推动、原理验证平台的开发以及大规模外场实测,在全球大规模天线技术的发展过程中发挥了重要的影响力并做出了重要贡献。

本书体现了国内在大规模天线波束赋形技术领域中“产、学、研、用”紧密协作的研究成果,从以下几个方面论述了大规模天线技术的基础理论与关键技术,并介绍了其标准化、产业化的发展现状。

第 1 章从多天线技术的基本原理着手,分析了理想情况下的信道容量;在此基础上,结合不同的应用场景、信道条件和业务需求,简要介绍了对闭环空间复用、开环空间复用、波束赋形与发射分集等多种常用的多天线技术方案,并对各种技术方案的适用条件及特点进行了对比;随后,探讨了多天线技术理论的发展动态及天线阵列结构的演进趋势,并介绍了大规模天线波束赋形技术的研究方向及应用场景;最后,简要介绍了多天线技术的标准化进展情况。

第 2 章主要介绍了大规模天线波束赋形技术的基本理论,包括独立同分布瑞利衰落信道下大规模天线技术的基本理论,以及理想信道下的容量和存在导



频污染时上行和下行链路的容量，并从理论上分析了天线数量大规模增加对系统性能的提升以及导频污染对系统性能的影响；深入研究和分析了在实际应用场景下非理想因素对大规模天线波束赋形系统性能的影响；推导出大规模天线的系统级容量与系统参数之间的显式关系，为高频谱效率和高能效的大规模多天线波束赋形系统设计提供了理论指导。

第3章主要分析和介绍了大规模天线波束赋形系统的应用场景与无线信道建模，重点探讨了垂直维度的引入对信道建模的影响，以及大尺度和小尺度建模方法。具体包括：局部坐标系与全局坐标系之间的转换方法，用于在全局坐标系内建模天线单元的增益和场分量；天线模型以及双极化天线在局部坐标系中的天线单元增益和场分量到全局坐标系的转换方法；三维（3D）距离的定义和应用条件，由于垂直维度的引入，部分信道建模参数需用3D距离进行计算；大尺度信道建模，包括LOS概率计算模型、路径损耗计算模型和穿透损耗计算模型；小尺度信道建模，包括垂直角度参数模型、多径分量统计相关矩阵、垂直角度生成方法等；最后，给出了信道建模的完整流程。

第4章主要介绍了大规模天线波束赋形系统中的若干关键技术，包括大规模天线信道估计方法，如传统的线性估计以及新型的基于特征值分解与压缩感知的信道估计方法、接收端的信号检测与发送端的信号预编码技术、信道状态信息（CSI）的获取及反馈的典型方案、大规模天线的校准技术、小区间的协作技术，以及多小区传输方案。

第5章在前面章节讨论的大规模天线波束赋形理论和关键技术基础上，结合5G NR系统的标准化研究和制定工作，向读者介绍了3GPP标准化组织针对5G大规模天线波束赋形的标准设计方案，主要包括了大规模天线波束赋形的上下传输方案、参考信号设计、信道状态信息反馈设计、波束管理、准共站址（QCL, Quasi Co-Location）等关键技术，以及大规模多天线传输技术对物理信道方案设计的影响。通过本章介绍，读者可以了解到大规模天线波束赋形在5G的应用方式及设计特点，加深对大规模天线波束赋形技术的认识和理解，并对大规模天线波束赋形技术的工程设计具有重要的参考意义。

第6章对大规模天线波束赋形系统的总体架构与阵列设计方案进行了分析，给出相应的实现方案建议和设计案例，并介绍大规模天线波束赋形技术的试验测试情况。本章旨在为读者提供一个视角，用以见证大规模天线波束赋形技术如何转化为实际工业产品的过程，以及产业界为之付出的努力与所取得的阶段性成果。

本书由来自中国信息通信科技集团（大唐电信集团）、东南大学及北京邮电大学的多位作者合作完成。全书由陈山枝主持编写和统稿，第1~6章分别



由陈山枝、王东明、高秋彬、李立华、孙韶辉、陈山枝负责编写，中国信息通信科技集团的苏昕、陈润华、李辉、黄秋萍、蔡月民、段滔，东南大学的魏浩、辛元雪、曹娟，北京邮电大学的卢光延、杜留通、李兴旺等也参与了编写工作。

本书作者感谢中国信息通信科技集团、东南大学、北京邮电大学等单位及 IMT-2020 推进组和 FuTURE 论坛的领导与同事们的大力支持和真诚帮助，感谢在 5G 技术研究和标准化过程中中国信息通信研究院、中国移动研究院以及众多国内外厂商及研究机构与作者的交流与合作，感谢“863”“高效能 5G 无线关键技术研发”课题组的参与单位。限于作者的水平和能力，本书还有诸多不足与谬误之处，恳请各位读者和专家提出宝贵的意见和建议。

作者

2018 年 9 月



目 录

第 1 章 多天线及波束赋形技术发展概述	001
1.1 绪论	002
1.2 多天线及波束赋形理论基础	005
1.3 多天线传输技术分类	010
1.3.1 闭环空间复用	011
1.3.2 开环空间复用	017
1.3.3 波束赋形	018
1.3.4 发射分集	022
1.3.5 多天线传输方案的选择	025
1.4 多天线及波束赋形技术的应用与发展趋势	028
1.5 天线阵列结构对 MIMO 技术发展的影响	030
1.6 大规模天线技术的研究方向	033
1.7 大规模天线技术的应用场景	038
1.8 多天线技术的标准化状况	038
1.9 小结	040
第 2 章 大规模天线理论	041
2.1 Massive MIMO 技术基本原理	042
2.2 Massive MIMO 的基本理论	044



2.2.1	理想信道下 Massive MIMO 的容量	044
2.2.2	基于导频污染的 Massive MIMO 上行链路容量分析	046
2.2.3	基于导频污染的 Massive MIMO 下行链路容量分析	048
2.2.4	Massive MIMO 的容量仿真	050
2.3	Massive MIMO 系统容量的最新研究进展	053
2.3.1	莱斯衰落信道下 Massive MIMO 的容量	053
2.3.2	时变信道下 Massive MIMO 容量分析	061
2.3.3	非理想互易性对 Massive MIMO 容量的影响	067
2.3.4	Massive MIMO 的系统性能分析	073
2.4	小结	081
第 3 章 大规模天线无线信道建模		083
3.1	概述	084
3.2	部署场景	085
3.3	场景建模	088
3.3.1	3D 信道场景	088
3.3.2	UMa 场景和 UMi 场景	089
3.3.3	Indoor Office 场景	090
3.4	坐标系模型	090
3.4.1	坐标系的定义	091
3.4.2	坐标系间的转换	091
3.4.3	简化坐标系转换	096
3.5	天线模型	096
3.5.1	双极化天线模型	098
3.5.2	UE 方向及天线模型	099
3.6	大尺度信道建模	100
3.6.1	3D 距离的定义	100
3.6.2	LOS 概率的定义	101
3.6.3	路径损耗计算模型	104
3.6.4	穿透损耗计算模型	108
3.7	小尺度信道建模	109
3.7.1	垂直角度参数模型	110
3.7.2	多径分量统计互相关矩阵的定义	112
3.7.3	ZSD/ZSA 随机分布参数的定义	114

3.7.4 ZOD/ZOA 的生成方法	114
3.8 信道建模流程	116
3.9 小结	126
第 4 章 大规模天线波束赋形关键技术	135
4.1 大规模天线信道估计	136
4.1.1 系统分析模型	136
4.1.2 最小二乘 (LS) 信道估计算法	137
4.1.3 最小均方误差 (MMSE) 信道估计算法	139
4.1.4 特征值分解信道估计算法	140
4.1.5 基于压缩感知的信道估计	142
4.2 检测技术	150
4.2.1 线性检测技术	151
4.2.2 非线性检测技术	153
4.3 预编码技术	155
4.3.1 线性预编码技术	156
4.3.2 非线性预编码技术	161
4.4 CSI 获取及反馈	166
4.4.1 基于码本的隐式反馈方案	167
4.4.2 基于信道互易性的反馈方式	170
4.4.3 基于压缩感知的反馈方式	172
4.4.4 预感知式反馈方式	174
4.5 大规模天线的校准	176
4.6 大规模天线波束协作技术	181
4.6.1 多小区协作传输方案	183
4.6.2 多小区协作传输技术分析	186
4.6.3 大规模多天线波束协作技术	189
4.7 小结	195
第 5 章 5G 多天线传输标准	197
5.1 概述	198
5.2 多天线传输方案	203
5.2.1 下行传输方案	203
5.2.2 上行传输方案	211