



未来移动通信论坛
FUTURE MOBILE COMMUNICATION FORUM

5G 关键技术系列丛书

5G 大规模 天线技术

Massive MIMO Technologies in 5G Communication Systems

◆ 苏昕 曾捷 栗欣 韩斌 刘继民 缪庆育 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

5 G 关键技术系列丛书

5G 大规模 天线技术

Massive MIMO Technologies in 5G Communication Systems

◆ 苏昕 曾捷 栗欣 韩斌 刘继民 缪庆育 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

5G大规模天线技术 / 苏昕等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2017. 6

(5G关键技术系列)

ISBN 978-7-115-46299-2

I. ①5… II. ①苏… 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165173号

内 容 提 要

多天线技术已经在无线接入系统中得到了广泛的标准化与商业应用。面对未来移动通信系统的迅猛发展和更为严苛的性能需求,多天线技术的理论研究和标准化推进仍然在向着更高的目标发展。针对多天线技术的最新发展动向,本书对下一代移动通信系统中最为关键的物理层支撑技术之一——大规模天线技术进行了较为全面的介绍与分析。书中对大规模天线技术的发展背景、技术原理等进行了概括,对其基础理论进行了分析。在此基础上,对大规模天线系统的信道与应用场景建模、传输、接收、参考信号、阵列结构以及组网等关键技术问题进行了探讨。

本书适合从事移动通信领域的科研人员、技术人员以及高等院校相关专业的研究生与教师使用,也可以作为相关专业研究生的教学参考书。

◆ 编 著 苏 昕 曾 捷 栗 欣 韩 斌

刘继民 缪庆育

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

面对多种多样的新兴业务形态以及终端连接数和数据流量规模的爆炸式发展，未来移动通信系统对无线传输链路的容量和质量有着近乎无止境的需求。为了应对系统需求的巨大压力，对无线信道资源的拓展及其充分利用成为传输链路设计中最为核心的两个问题。而新一代移动通信系统的研究与标准化工作也始终在围绕“开源”和“节流”这两条主线进行推进。随着 6 GHz 以下频段资源的日益紧张，5G (IMT-2020) 系统将要进一步将频段资源扩展至高达 100 GHz 的频带。同时，5G 系统也将通过新型多址、编码调制、更为密集的组网以及大规模天线等技术手段，更为有效地提升对频带资源的利用效率。

鉴于 MIMO 技术在改善信道资源的利用效率以及提升传输质量方面的巨大优势，这一技术在第四代 (4G) 移动通信系统中得到了非常广泛的应用。例如，LTE 系统的整个物理层构架都是建立在 MIMO+OFDM 的基础上。LTE 系统中，根据多种应用场景，分别设立了几种传输模式。而每种传输模式又都采用了以一种主要的 MIMO 传输方案为基础、一种高可靠性 MIMO 传输方案为辅助的设计方式。其中，发射分集、闭环及开环空分复用、多用户 MIMO、波束赋形技术等主要的 MIMO 技术方案，已经得到了标准化。

MIMO 技术的性能增益都来自于多天线所引入的空间自由度，因此从多到更多，或者说 MIMO 的维度扩展，一直是 MIMO 技术演进的一个重要方向。具体来讲，其演进体现在：能够支持的并行传输数据流数量的增长；从单用户传输优化到多用户传输优化的转换；从单小区 MIMO 到网络化、协作化 MIMO 技术的扩展。

由于数据业务量与用户数激增，以及信道资源日益紧张，因此对 MIMO 维度的持续扩展，是无线通信系统发展的现实需求，也是标准化演进过程的一个重要方向。从理论角度出发，对 MIMO 维度的扩展，也有着坚实的理论依据。而这一基础正是近年来出现的大规模天线理论。根据这一理论，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，系统的发射功率可以任意低，而大量的用户可以在几乎没有干扰和噪声的理想条件下进行通信，从而极大地提升系统容量和频带利用效率。

这一技术理论的合理性在波束域可以得到更为直观的解释：随着天线数量的增加，通过波束赋形技术可以形成更为窄细、指向性更强、更为准确且增益更高的波束。在这种情况下，针对多个用户的发射波束之间的交叠（或者说用户间的干扰）将逐渐近乎消失，而加性噪声相对于巨大的波束增益也将变得可以忽略。

大规模天线理论为我们展示了 MIMO 技术在进一步提升系统容量、频带利用率与用户体验方面的巨大潜力。因此，这一理论出现之后，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中最有潜力的物理层技术之一。近几年来，经过学术界与产业界的共同努力，目前已经对大规模天线信道容量、能效与谱效优化、传输与检测算法等方面进行了较为充分的研究，同时也从信道建模和评估等基础性工作方面对后续的研究和推进进行了大量准备。而针对这一技术的技术验证与原型平台开发工作也在积极地进行中。在上述工作基础上，产业界对相关技术的标准化发展也给出了明确的推进计划，并已经在 LTE 系统中完成了初步版本的大规模天线技术标准化方案。而在面向下一代系统的标准化研究工作中，大规模天线技术的推动仍然是非常重要的工作方向，并正在热烈地开展针对这一技术的研究、评估和讨论。

我国政府对于大规模天线技术的研究和推进工作非常重视，陆续设立了多项国家“863”和国家科技重大专项课题以支持相关工

作的展开。在 IMT-2020 推进组和 FuTURE 论坛中，也专门设立了大规模天线技术相关的议题，组织企业和科研院所进行大规模天线关键技术研究、系统方案设计和推进工作。在上述研究工作基础上，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，进一步将大规模天线技术等 IMT-2020 系统的重要支撑技术推向实用化发展道路。

综上所述，MIMO 是提升无线通信系统的频带利用效率和传输可靠性的一种重要技术手段。这一技术已经在现有系统中得到了非常广泛的应用，而且 MIMO 技术仍然在沿着维度进一步扩展的方向持续演进。大规模天线理论的出现以及有源天线技术在移动通信领域的实用化发展为 MIMO 维度的进一步提升奠定了坚实的理论与实现基础，也为 MIMO 技术的大规模化与三维化创造了条件。随着系统频段资源的拓展，在高频段通信系统中，MIMO 技术仍将继续发挥其不可替代的基础性作用，成为构建未来移动通信系统的一块重要基石。

本书由大唐电信科技产业集团（电信科学技术研究院）的苏昕，清华大学的曾捷、粟欣，中国电信技术创新中心的韩斌、朱剑驰、赵嵩、余小明，上海贝尔股份有限公司的刘继民、张路、蔡振浩与爱立信的缪庆育共同编写。

感谢各位作者所在的大唐电信科技产业集团（电信科学技术研究院）、清华大学、中国电信技术创新中心、上海贝尔股份有限公司、爱立信以及 FuTURE 论坛的领导和同事们的大力支持与帮助。

限于作者的水平和能力，书中存在诸多不足和谬误，还望各位专家和读者提出宝贵的意见和建议。

作 者

2017年5月

目 录

第 1 部分 多天线技术概论

第 1 章 多天线技术发展背景	3
第 2 章 多天线技术发展现状	9
第 3 章 多天线技术发展趋势	13

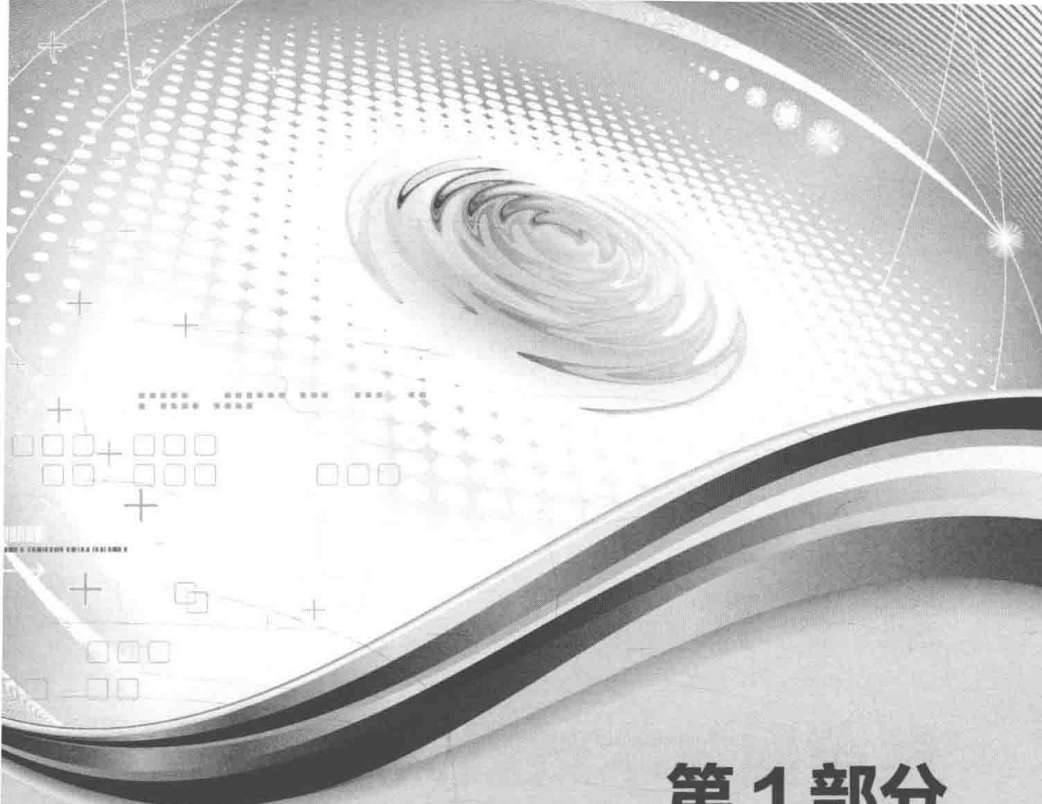
第 2 部分 大规模多天线技术理论

第 4 章 大规模天线系统基本原理	21
4.1 多天线技术理论基础	22
4.1.1 MIMO 信道容量	22
4.1.2 天线分集与空时编码	26
4.1.3 MIMO 信号检测	30
4.2 大规模 MIMO 的信息理论	32
4.2.1 点对点大规模 MIMO	33
4.2.2 多用户大规模 MIMO	37
4.3 现实中的限制因素	41
4.3.1 信道非互易性	41
4.3.2 导频污染	42
4.3.3 非理想传播条件	43

参考文献	44
第 5 章 大规模天线系统的频谱效率	47
5.1 单小区大规模天线系统的频谱效率	48
5.2 多小区大规模天线系统的频谱效率	54
参考文献	58
第 6 章 大规模天线系统的能量效率	61
6.1 单小区 MU-MIMO 系统的能量效率	64
6.2 多小区 MU-MIMO 系统的能量效率	66
6.3 大规模 MIMO 系统中频谱效率与能量效率的关系	67
参考文献	69
 第 3 部分 大规模多天线关键技术	
第 7 章 大规模天线信道建模	73
7.1 3D 场景模型	74
7.2 大尺度信道建模	75
7.3 小尺度信道建模	77
参考文献	78
第 8 章 大规模天线传输方案设计	79
8.1 恒包络预编码	80
8.2 低复杂度预编码算法	83
参考文献	91
第 9 章 大规模天线接收方案设计	93
9.1 基于 SCBiCG 和 Lanczos 的软输出 MMSE 检测	96
9.2 基于 GS 的软输出 MMSE 检测	102

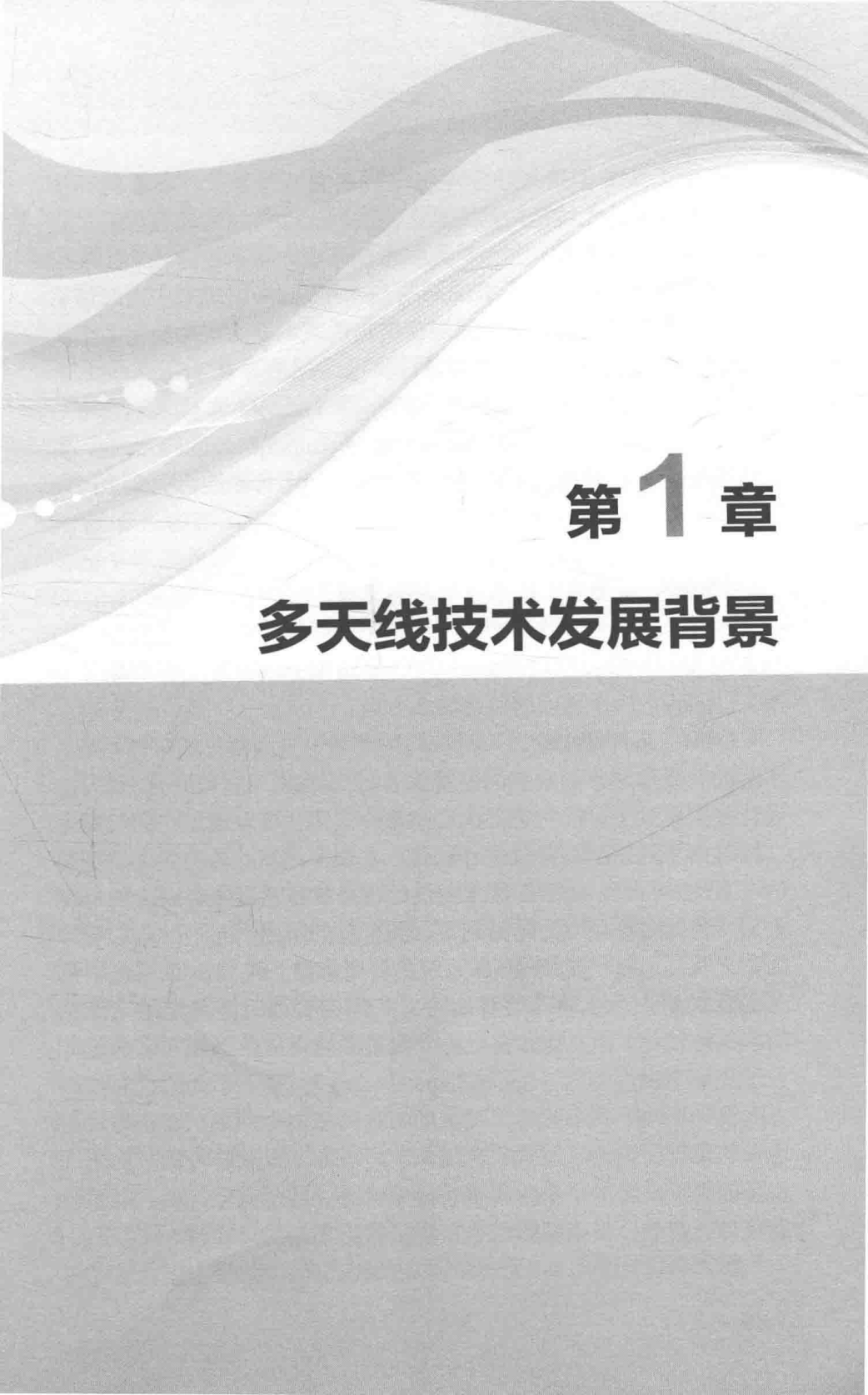
9.3 不同衰落信道中 ZF 接收机性能分析	104
9.3.1 可达和速率下界闭式表达式	106
9.3.2 低信噪比分析	108
9.3.3 仿真验证	108
参考文献	110
第 10 章 大规模天线参考信号设计	113
10.1 LTE 系统参考信号结构	114
10.2 5G 系统参考信号	119
10.2.1 压缩感知技术	120
10.2.2 天线端口虚拟化技术	121
参考文献	124
第 11 章 大规模天线阵列结构与波束赋形方案	125
11.1 数字波束赋形	126
11.2 模拟波束赋形	127
11.3 混合波束赋形	129
参考文献	130
 第 4 部分 大规模天线系统的应用场景与组网方案	
第 12 章 大规模天线系统的应用场景	133
12.1 6 GHz 以下频段部署	135
12.2 6 GHz 以上频段部署	141
12.2.1 毫米波频段电磁波传输特点	142
12.2.2 毫米波通信外场实测性能分析	142
12.3 5G 大规模天线毫米波通信的优势	143
12.4 大规模天线毫米波通信典型应用场景	146
参考文献	148

第 13 章 大规模天线系统的组网方案	151
13.1 集中式大规模天线的组网方案	152
13.2 分布式大规模天线的组网方案	157
参考文献	160
名词索引	161



第 1 部分

多天线技术概论



第1章

多天线技术发展背景

高速无线数据接入业务与用户数量的迅速增长，需要更高速率、更大容量的无线链路的支持，而决定无线链路传输效能的最根本因素在于信道容量。然而单纯以增加带宽、功率的方式来扩展信道容量是不切实际的。E. Telatar 与 G. J. Foschini 通过对多天线信息理论的深入研究证明，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，将远远超越香农（Shannon）于 1948 年给出的 SISO（Single Input Single Output，单输入单输出）系统信息传输能力极限。MIMO（Multiple Input Multiple Output，多输入多输出）信息理论的出现突破了传统技术传输能力的瓶颈，展现了 MIMO 技术在未来高速无线接入系统中的广阔应用前景。多天线信息理论为空时编码技术提供了坚实的理论基础并拓展了诸多新研究领域，例如多天线信息与编码理论、多天线信道模型、MIMO 天线设计、支持多天线通信系统的信令、网络结构设计以及 MIMO 与 OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交频分复用）、Relay、协作通信的结合等多方面。

MIMO 系统是指收、发两端均使用多个天线的无线传输系统，不同的天线对应不同的空间位置或者极化状态，这样信号与编码的设计被扩展到了时间与空间的二维集合之中，可以通过空间与时间二维对信号的发送与接收进行优化，以获得更高的传输效率及更高的可靠性。可以说 MIMO 技术的核心思想就是通过空时联合的处理方式，利用多径环境的随机衰落，甚至包括由此引起的时延扩展等因素来获得远高于传统 SISO 系统的信道容量。而 MIMO 系统中信号的发送是一个由输入信息比特向空间位置与时隙确定的二维空间映射的过程，因此往往将这种映射关系所对应的编码与信号设计方法统称为空时编码（Space-Time Coding）。基于不同的空时编码方案设计策略，各个发送天线上的信号可能完全独立，以获得成倍增长的数据传输速率或频带利用率。同时各个天线与时隙上的信号也可能在一个或多个空时码字矩阵中部分、甚至完全冗余，以尽可能获得较高的分集或编码增益，提高数据传输的可靠性。

如上所述，利用多天线引入的信号在空间维的自由度，通过与

时域、频域的联合处理以及与信道编码的结合, MIMO 信道中的多个子信道可用于并行数据的传输以提高传输速率, 也可以用于提高信息传输的可靠性。在不同的应用场景中针对不同的优化目标, 实际系统中采用的 MIMO 技术大致可以分为空间复用、发射分集、波束赋形以及多用户 MIMO。

空间复用技术可以支持多个数据流的并行传输, 可以大大地提高数据的峰值速率和传输效率。MIMO 信道所能支持的数据流数量取决于信道的空间相关性以及信噪比情况, 因此空间复用技术主要适用于传播环境中散射体较丰富且信道质量较好的场景。为了避免将有限的发射功率馈送至传输能力较差的子信道, 发射机需要根据信道条件动态地调整发送的数据流数量, 这一过程称为 Rank 自适应。此外如果发射机能够通过反馈或者利用信道互易性获得更充分的信道状态信息, 并且信道的变化速度相对于反馈与传输时延较慢, 还可以通过预编码的方式对发送信号进行优化, 使其空间特性与信道更加匹配。

与空间复用技术以提高传输效率为主要目标相比较, 发射分集技术则侧重于利用多天线带来的自由度提高信号的抗衰落性能和传输的稳健性。在 TD-LTE 系统中, 发射分集不仅作为恶劣环境下一种可靠的传输方案, 也作为一种备份方式用于传输模式 (Transmission Mode, TM) 切换过程中的过渡阶段 (因为过渡过程中因高层信令交互时间较长往往会有一段时间传输可靠性下降)。实际使用的发射分集方案主要有两种: 第一种方案利用空域、时域及频域的联合编码, 通过特殊的信号设计形式在空域、时域及频域引入冗余度, 使接收端获得历经不同衰落的发送信息的多个冗余版本, 以此保证合并后的信号具有较小的波动 (较低的方差); 另一种方案则依赖于信道编码引入冗余, 通过天线切换或对预编码方式的随机调整使等效信道具有一定的时域或频域选择性, 在信道译码过程中可以通过对冗余信息的合并而获得分集增益。需要说明的是, 在实际应用中上述两种方案可以结合使用。

波束赋形技术是一种天线信号预处理技术, 发射机根据信道状

态信息对各阵元的加权系数的调整,使得功率集中在期望的方向性的波束内,以此实现接收 SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio, 信号与干扰加噪声比) 的提高并降低对其他用户的干扰。一般的波束赋形技术特指基于小间距天线阵列(阵元间距 $\lambda/2$) 的线性预处理技术。从信号处理角度来看,波束赋形与预编码都属于阵列信号的预处理技术,它们所使用的算法和阵列形式可以是完全相同的,而波束赋形技术在无线接入网中也并非仅限于单流传输,因此二者并没有本质差异。

波束赋形一个重要的应用是利用空间选择性支持 SDMA (Spatial Division Multiple Access, 空分复用接入)。受限于应用场景和终端的尺寸及天线数量,单个用户往往难以支持高 Rank 数据传输。而当系统的用户数较多时,一般基站总是可以找到信道空间独立性较强的两个用户,这时如果基站配备多天线,则可以利用波束赋形的信号空间隔离度实现对多个用户的并行传输,即 MU-MIMO 技术。上行 MU-MIMO 中,由于基站能够获得多个用户的信道信息以及 MCS (Modulation & Coding Scheme, 调制与编码策略),因此基站可以采用一些相对复杂的接收处理算法抑制用户之间的干扰。但是在下行 MU-MIMO 传输中,各用户很难获取其他用户的信道及 MCS 信息,因此往往无法支持较为复杂的检测算法。相对于 SU-MIMO 而言,下行 MU-MIMO 需要依靠更优化的调度算法选择相互耦合较小的用户进行调度,同时也需要更加准确的信道信息以及更灵活的预编码机制以保证在基站侧能够有效地抑制用户之间的干扰。

无论对于单天线或多天线系统,准确而及时的 CSI (Channel State Information, 信道状态信息) 都对传输质量、传输效率、干扰协调能力以及调度性能的提升具有重要意义。对于中低移动速度的 UE,由于信道变化较慢,利用当前或过去信道信息可以较好地预测短时间内下一次传输时的信道状态,因此往往采用闭环传输方案;而高速移动用户因信道变化剧烈而一般采用开环技术。因此,CSI 的获取机制以及发射机对 CSI 的利用方式的选择是 TD-LTE 系统设

计中的重要一环。

下行 CSI 的获取可以通过 UE 测量导频信号并反馈给基站的方式实现;上行 CSI 的获取可以通过基站对 UE 发送数据信道或者 SRS 的测量实现。相对来说, MU-MIMO 对信道信息的准确性比 SU-MIMO 敏感。测量并反馈的 CSI 获取方式可以同时适用于 TDD 和 FDD 系统,对于 TDD 系统,由于上下行使用相同的载频, TDD 系统也可以通过信道互易性的方式获得 CSI。对于 FDD 系统,虽然也可以利用信道中长期统计特性的对称性获取下行 CSI,但是瞬时或短期 CSI 只能通过终端的上报获得。如果基站能够及时地获得准确且完整的信道矩阵,则基站可以根据一定的优化准则直接计算出与信道传输特性匹配的预编码矩阵,因此 TDD 系统对于非码本预编码方法的应用具有较为突出的优势。非码本方式的预编码可以避免量化精度的损失,并可以灵活地选择预编码矩阵,但是预编码的频域和时域颗粒度可能会对性能带来较为显著的影响。另外需要说明的是,如果利用互易性获取瞬时或短期 CSI,则需要对射频链路的收/发对称性进行校准;如果终端的发射机数量少于接收机数量,则必须通过天线切换或其他方式使基站获得完整的 CSI。