

· 专题:5G移动通信基础理论与关键技术 ·

大规模 MIMO 传输技术与展望

卢安安^{1,2} 高西奇^{1,2*}

1. 东南大学信息科学与工程学院移动通信国家重点实验室,南京 210096
2. 紫金山实验室,南京 211111

[摘要] 移动互联网和物联网应用需求的持续增长,带来对无线移动通信速率和用户终端容量量级提升的技术需求。为应对此技术需求,第五代(5G)移动通信目前已经正式进入商用。大规模 MIMO 作为 5G 移动通信的关键技术之一,在 5G 移动通信中起着至关重要的作用,近年来被广泛研究。未来,大规模 MIMO 或超大规模 MIMO 也必将是 B5G 和 6G 移动通信的关键技术之一。本文围绕大规模 MIMO 导频开销、移动性增强、频段扩展等因素引发的信道信息获取瓶颈问题和信道信息非精确问题,从大规模 MIMO 信息理论分析基础、信道信息获取与后验信道模型、波束域鲁棒传输理论方法以及同步与控制信息传输理论方法几个方面论述其传输理论与技术,并提出未来大规模 MIMO 研究中具有挑战性的关键技术问题。

[关键词] 大规模 MIMO;信息理论;信道信息获取;后验信道模型;鲁棒传输

随着科学技术的迅速发展,人类已经逐步进入智能时代。在不久的未来,虚拟现实、物联网、远程医疗、智能制造、自动驾驶等新兴技术将逐渐普及。新技术必将带来移动智能设备的持续高速增长,并导致移动互联网和物联网应用需求呈指数式的增长。为应对移动互联网和物联网应用需求的持续增长,第五代(5G)移动通信目前已经正式进入商用。到 2023 年,全球移动网络平均速率将增长到 44 Mbps,其中 5G 移动通信网络的速率将达到 575 Mbps^[1]。与 4G 移动通信相比,5G 移动通信能够支持更高质量、更高传输率、更高用户密度、更高移动性、更低时延、更低能耗等场景^[2]。国际电信联盟定义了 5G 移动通信的最低性能需求^[3],其中上下行最低峰值速率分别为 10 Gbps 和 20 Gbps,上下行最低频谱利用率分别为 15 bps/Hz 和 30 bps/Hz,并且需要支持最高为 500 km/h 的移动速度。

作为 5G 移动通信的关键技术之一,大规模 MIMO 无线通信技术^[4]近年来受到广泛关注。利用



高西奇 东南大学教授,移动通信国家重点实验室副主任,紫金山实验室兼职教授,长江学者特聘教授,国家杰出青年科学基金获得者,IEEE Fellow。长期从事移动通信和信号处理理论与技术研究,先后主持承担国家自然科学基金、国家 863 计划、国家科技重大专项、国家重点研发计划等项目多项,并与企业长期合作研究,发表核心期刊以上及重要学术会议论文 300 余篇,获授权专利 90 余项,获国家技术发明一等奖 1 项、省部级科技奖励 5 项。曾先后担任国际核心期刊 *IEEE Transactions on Wireless Communications*、*IEEE Transactions on Signal Processing*、*IEEE Transactions on Communications* 编委。



卢安安 东南大学移动通信国家重点实验室讲师、紫金山实验室兼职科研人员,主要研究方向为信息理论、大规模 MIMO 鲁棒传输、大规模 MIMO 同步与控制信息传输等。

收稿日期:2020-03-27;修回日期:2020-04-03

* 通信作者,Email:xqgao@seu.edu.cn

本研究受国家重点研发计划(2018YFB1801103),国家自然科学基金项目(61801113, 61761136016, 61960206006, 61971136),江苏省基础研究计划(SBK2019050020),江苏省自然科学基金项目(BK20180362)以及华为合作项目资助。

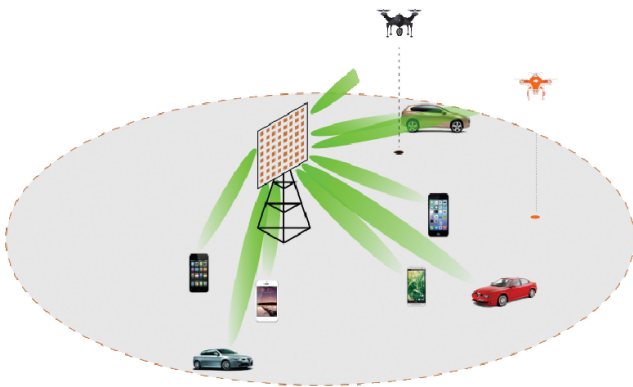


图 1 大规模 MIMO 系统示意图

大规模天线阵列增加的空间自由度,大规模 MIMO 能够在同一时频资源上抑制用户间干扰,真正实现多用户 MIMO 传输,从而大幅提升系统频谱资源的利用率。同时,由于基站配置大规模天线阵列所提供的分集和阵列增益,每个用户与基站之间通信的功率效率也得到显著提升。未来,大规模 MIMO 将仍然是 Beyond 5G (B5G) 和 6G 移动通信研究的热点,而且将不仅限于地面移动通信系统,还将应用于卫星移动通信系统、海洋移动通信系统以及高空平台移动通信系统,是形成全景通信的关键技术之一。

大规模 MIMO 无线通信初步构想最早由贝尔实验室的 Marzetta 博士于 2009 年提出^[5]。其主要理论结果是,在用户配置单天线并且信道系数服从独立同分布的情况下,多用户信道随着基站天线数量增加满足渐近正交,并且高斯噪声和小区间干扰渐近消失,进一步,单个用户仅受到其它小区中采用相同导频序列的用户的干扰,即导频污染。在 Marzetta 博士提出大规模 MIMO 无线通信的初步构想后,国际上掀起了一阵大规模 MIMO 无线通信研究热潮,并持续至今。与最初提出的大规模 MIMO 构想相比,目前大规模 MIMO 研究已经有了显著的变化,主要研究集中在大规模 MIMO 系统信道模型、渐近容量分析、导频设计、传输方案性能、上行多用户检测以及下行多用户预编码设计等^[6]。本文重点从大规模 MIMO 信息理论分析基础、信道信息获取与后验信道模型、波束域鲁棒传输理论方法以及同步与控制信息传输理论方法几个方面论述大规模 MIMO 理论方法研究,并探讨未来大规模 MIMO 研究中具有挑战性的关键技术问题。

1 大规模 MIMO 信息理论分析基础

信道容量和系统可达性能的信息理论分析对传

输理论方法研究和系统优化设计具有重要的基础作用。为评估大规模 MIMO 系统的性能,信道模型不可或缺。大规模 MIMO 信道模型主要可以分为两类:解析信道模型和几何随机信道模型^[7]。解析信道模型具有相对简单的数学结构,通常用于大规模 MIMO 系统性能的理论分析研究。几何随机信道模型则相对复杂,但是信道特性也更接近真实的物理信道,可用于评估实际信道环境中大规模 MIMO 系统的性能。

文献中的解析信道模型分为两类:独立同分布信道模型和相关信道模型^[7]。独立同分布信道模型假设各天线信道系数为独立同分布随机变量,易于应用中心极限定理和随机矩阵理论进行分析,比较容易得到简洁的数学表达。但是独立同分布的假设一般要求较大的天线间距,因此该模型更适用于配置分布式天线的大规模 MIMO 系统。相关信道模型主要包括 Kronecker 相关模型^[8]和联合相关模型^[9, 10]。对于配置均匀线阵的大规模 MIMO 系统,基于 DFT 矩阵的联合相关模型是目前文献中使用较为广泛的一种信道模型。

基于大规模 MIMO 信道模型,可进行信道容量分析。大规模 MIMO 系统中,基站侧天线数量大幅增加带来的信道维度大幅增加,使得准确的容量分析变得极其困难。文献中广泛研究的确定性等同容量分析方法^[11-15],是用来计算大规模 MIMO 信道容量的近似闭式表达的经典方法。确定性等同容量分析方法具有良好的近似效果,在很多场景下可取得和真实信道容量几乎一致的结果。根据所采用的数学方法不同,确定性等同容量分析方法可分为四类: Bai-Silverstein 方法^[11]、高斯方法^[12]、replica 方法^[13]和基于自由概率理论的容量分析方法^[14, 15]。

对于大规模 MIMO 无线通信系统,在理想信道条件和精确信道信息假设下,理论上信道速率容量和用户终端容量可以随天线数量增加而线性增长。然而,在实际的导频和控制资源开销下,可获得的大规模天线阵列与大量用户之间的信道信息已无法保证理想的精确程度。因此,非精确信道信息问题将成为未来大规模 MIMO 无线传输必须面对的挑战,其信道速率容量极限有待探索。随着未来 B5G 或者 6G 无线通信天线规模进一步增加,传统的依赖于精确信道信息的大规模 MIMO 无线通信信息理论分析将难以适应,利用确定性等同容量分析方法分析信道信息不准确情形下的大规模 MIMO 信道容量极限或将是一个新的有价值的研究方向。

2 大规模 MIMO 信道信息获取与后验信道模型

大规模 MIMO 无线传输依赖于所能获得的信道信息,而用于获取信道信息的导频信号会消耗系统的时频资源。采用常规的正交导频信道信息获取方法,导频开销随着发送天线或数据流总数、时延扩展、多普勒扩展及载波频率等因素均呈线性增长,存在着信道信息获取瓶颈问题。在导频资源受限情况下,能否尽可能精确地获得所需的信道信息及对所获得的信道信息较为精确地建模,是实现高性能大规模 MIMO 无线传输的先决条件。

随着基站所配置天线的增加,大规模 MIMO 无线系统基站侧的角度分辨率显著提升,其角度域信道呈现稀疏特征。目前信道信息获取的研究主要集中在导频资源受限情况下如何利用信道稀疏特性从低维接收信号中恢复用户高维信道。基于大规模 MIMO 无线信道角度域稀疏特性,You 等分别提出了导频复用方法及非正交导频设计理论方法,能够大幅降低导频开销,提升系统的传输性能^[16,17]。Wen 等研究了基于混合高斯模型假设下实施贝叶斯学习的大规模 MIMO 信道估计方法,基于波束域信道稀疏性,根据压缩感知和贝叶斯推断方法学习出信道分布统计参数和信道估计值,降低了导频污染对信道估计的影响^[18]。Gao 等研究了频分复用(FDD)大规模 MIMO 系统基于空间公共稀疏性的自适应信道估计,信道模型采用虚拟角度域表征模型,利用各子载波信道具有相同角度域稀疏性以及稀疏性随时间慢变的特点,通过压缩感知方法获得各用户信道估计,降低了导频污染影响以及待反馈的信道维度^[19];Xie 等提出用空间基扩展模型来表征大规模 MIMO 信道,采用经过旋转的 DFT 矩阵将用户信道转为波束域信道,用户角度域信道更加稀疏,降低了导频开销以及反馈代价^[20]。Haghighatshoar 等提出了基于低维投影的大规模 MIMO 信道子空间估计,提出多种算法从接收的导频信号中恢复出信道协方差矩阵的低维主特征向量矩阵,为基于信道子空间信息的预编码方案提供统计信道信息获取方法^[21]。

已有研究表明,导频复用或非正交导频设计理论方法能够突破导频获取瓶颈问题。导频复用方法的原理在于同一时频资源上的用户信道之间具有不同的角度特性,因而能够复用相同或使用具有一定相关特性的导频序列。在同一时频资源上使用非正

交导频进行信道信息获取的用户组,其信道估计性能取决于各用户信道之间及导频序列之间的相关性。为避免具有相同角度特性的用户进行导频复用,需要利用统计信道信息进行导频资源调配和用户分组。如何从理论上揭示出估计性能与统计信道信息及导频序列之间的关系,进而探寻基于统计信道信息的最优导频资源调配理论方法,是突破未来大规模或者超大规模 MIMO 信道信息获取瓶颈需要解决的关键问题。

在导频复用与非正交导频情况下,存在着导频间干扰,为支持大维空时传输,不仅要获得信道估计值,而且需要获得估计误差的统计信息。此外,在中高速移动通信场景还存在基站侧所获瞬时信道信息老化等因素。在接收导频信号已知的条件下,Lu 获得了配置均匀线阵下大规模 MIMO 信道的分布信息,包括均值和方差等信息,并建立了信道的波束域后验统计模型^[22]。该后验统计模型能够描述由信道估计误差、移动性等因素引起的信道信息不准确,为研究导频资源受限条件下的最优预编码传输理论方法提供了信道模型基础。

随着未来 B5G 和 6G 移动通信系统基站侧配置天线进一步的增加,信道呈现出更加显著的波束域局部特性,同一时频资源上空分用户数可进一步大幅提升。如何考虑实际系统配置天线、导频资源受限等约束,研究统计模型已知情形下的大规模 MIMO 信道信息估计方法,进一步拓展大规模 MIMO 信道后验波束域统计模型,是形成同一时频资源上大量用户同时通信的大规模 MIMO 无线传输理论方法,进一步量级提升大规模 MIMO 系统速率容量、频谱和功率效率的先决条件。

3 大规模 MIMO 波束域鲁棒传输理论方法

大量用户共享空间无线资源是提升大规模 MIMO 系统速率容量、频谱和功率效率的关键。为支持大量用户同时通信,需实施多用户预编码传输理论方法以对抗多用户干扰。传统多用户 MIMO 系统中,预编码方法主要分为线性预编码和非线性预编码方法。非线性预编码方法虽然可取得最优性能,但是其极高的复杂度限制了它在大规模 MIMO 系统中使用,而简单的典型线性 RZF 预编码方法,需要基站侧已知精确瞬时信道信息,随着所配置天线的增加,无法适用于典型移动场景、FDD 系统、广域覆盖、大范围立体覆盖以及高频段应用等信道信息非理想场景。

当前依赖统计信道信息的预编码传输方法研究比较广泛。Alrabadi 等提出将覆盖范围划分为若干互不重叠的扇形波束的方案,在用户信道角度扩展较小的假设下,直接将用户信号映射到预定扇区波束,在提升用户和速率的同时放宽对信道信息获取的要求^[23]。基于信道的空域相关特性,Adhikary 等提出两级预编码传输理论方法,即联合空分复用(JSDM)方法,将具有相似信道协方差特征向量的用户分为同一组,并通过统计预编码降低甚至去除组间干扰,同时降低等效用户信道维度,进而在组内降维后的等效信道上实施基于瞬时信道信息的多用户 MIMO 预编码传输,在较为理想的情况下可以降低对信道信息获取的要求^[24]。Sun 等提出波束分多址(BDMA)传输方法,提出基于 DFT 矩阵的大规模 MIMO 波束域信道模型,并推导遍历和速率上界的闭式表达,进而推导最优传输渐近充要条件,在此基础上提出只依赖于统计信道信息的传输理论方法,通过选择具有互相不重叠波束的用户,将多用户 MIMO 信道转为多个单用户 MIMO 信道,显著放宽对信道信息获取的要求^[25]。Lin 等提出基于混合预编码的非正交角度域多址传输方案,利用过采样 DFT 矩阵估计出各用户信道最强径对应到达角,并据此构建由非正交波束组成的模拟预编码,使得发送信号指向所有用户最强方向,波束间干扰则通过数字预编码处理,降低了能量泄露带来的损失^[26]。Ding 等提出有限反馈下大规模 MIMO-NOMA 传输方案,首先利用统计信道信息将用户分为若干个空间簇,接着将每一簇分为若干组,组间实施正交预编码以消除组间干扰,每组实施除功率分配系数不同外的相同预编码,功率分配系数由各用户信道决定^[27]。

上述预编码传输方法没有充分利用到能获取的信道信息,没能对其进行较为精确的建模。为取得接近最优性能,从可获得的信道信息出发,Lu 等提出了基于后验统计模型的大规模 MIMO 波束域鲁棒预编码传输理论方法^[22]。首先,考虑信道估计误差、信道老化、信道物理模型等因素,建立了包含信道均值和方差的波束域信道后验统计模型。然后,提出后验统计模型下加权遍历和速率最大化问题。由于基于后验统计模型的加权遍历和速率简洁表达式很难获得,推导过程中需应用确定性等同容量分析方法。最后,从理论上推导了最优线性预编码应满足的条件,并据此进行鲁棒线性预编码设计。该鲁棒传输理论方法基于较为精确的波束域后验统计

模型,能够解决大规模 MIMO 技术在各种典型场景下的适应性问题。

大规模 MIMO 信道信息获取的精度受导频开销、移动性、载波频率、时延扩展、系统配置等多种因素影响。未来 B5G 和 6G 通信中,大规模 MIMO 系统用户数量进一步大幅提升,移动性进一步增强,并可能会用到太赫兹^[28]、光波段^[29]等更多频段甚至全频段进行通信。探讨非理想信道信息下容量可达最优空时传输理论方法,适应各种信道条件和系统配置,进而利用后验信道统计模型的波束域结构特征,研究并形成具有普适性的波束域鲁棒传输理论方法,是未来大规模 MIMO 无线通信需要解决的核心问题。

4 大规模 MIMO 同步与控制信息传输理论方法

同步与控制信息传输在无线通信系统中起着重要的作用,是诸多无线业务信息传输的前提。同步与控制信息传输需要服务于小区内的所有用户,这些用户可能是活动的,也可能是休眠的。对于处于休眠状态的用户,基站无法获得其信道状态信息;而对于处于活动状态但还没建立与基站同步的用户,基站同样无法获得其信道状态信息。因此,同步与控制信道信息的传输需建立在基站无法获取用户信道状态信息的基础上,并且为了确保同步与控制信息的有效传输,需要同步与控制信道信息的传输能够覆盖基站整个所服务的小区,使得处于任何空间方向的用户都能够获得可靠的同步与控制信息。

传统多用户 MIMO 通信系统的同步与控制信息传输方法有天线选择、空时编码、波束扫描等。然而,将上述传统多用户同步与控制信息传输方法应用于大规模 MIMO 系统,分别存在着覆盖范围严重受限、导频资源开销随基站天线数线性增长、实时性和可靠性低等问题。近年来,文献中提出的大规模 MIMO 全向预编码传输理论方法^[30-37],能够实现全功率利用、大范围覆盖的高效可靠传输。全向预编码传输是在降维的预编码域实施同步和控制信息传输,实现全功率利用的大范围全向覆盖,并解决导频开销瓶颈问题。

在全向预编码设计中需要考虑的约束有三个:全向约束、天线等功率约束以及预编码矩阵半酉约束。Meng 基于 Zadoff-Chu(ZC)序列设计了离散角度上平均接收功率相同的单流全向预编码,并进一步将 ZC 序列进行扩展设计出了多流全向预编

码^[30]。基于 ZC 序列的多流全向预编码和单流预编码相比,在连续角度方向平均功率波动更小,因此能够带来传输性能的提升。Xia 和 Meng 将空时码与全向预编码相结合,提出了能在任意时刻进行全向覆盖的预编码设计^[31,32]。其中 Meng 的研究为基于 Golay 互补序列的全向预编码设计方法,可以在任意连续角度上取得相同的平均接收功率,能够取得较 ZC 序列更优的性能^[32]。在 Guo 的研究中,全向预编码被进一步用于毫米波大规模 MIMO 同步与控制信息传输^[33]。Guo 等将自由空间全向覆盖扩展到小区全向覆盖,提出了宽覆盖预编码的概念,并将天线等功率约束和预编码矩阵半酉约束分别看作 Oblique 流形和 Stiefel 流形,进而利用流形优化方法进行宽覆盖预编码设计^[34]。

前面描述的全向预编码设计方法都是针对大规模均匀线阵的。对于实际 5G 移动通信系统而言,更可能的天线配置是大规模均匀面阵。当大规模 MIMO 天线阵列由均匀线阵变为均匀面阵时,需要进一步设计全向预编码。Guo 等提出的方法可直接扩展到大规模均匀面阵^[34]。Su 等分别研究了基于互补序列和优化方法的大规模 MIMO 均匀面阵全向预编码设计^[35,36]。Lu 等提出了能够用于大规模 MIMO 均匀面阵全向预编码设计的新型二维阵列构造方法,该阵列构造方法较 Golay 互补阵列和 Welfi 码更加一般,能够用于更多天线配置下的大规模 MIMO 系统^[37]。

对于配置均匀线阵和均匀面阵的大规模 MIMO 系统,全向预编码传输理论方法已经被广泛研究。未来 B5G 或者 6G 系统中,可能会出现更多的天线结构。针对不同天线结构,开展全向预编码同步与控制信息传输理论方法研究,阐明预编码矩阵最优设计准则及需要满足的条件,探讨其最优设计理论方法仍然是十分重要的问题。此外,随着基站侧配置天线的增加,大规模 MIMO 信道呈现出显著的波束域稀疏特性。如何利用波束域稀疏特性进行波束域分区并行同步与控制信息传输理论方法研究,提高其资源利用率和可靠性,进而解决大幅提升的多普勒效应问题及大时延扩展问题,是具有重要理论意义和实际应用价值的研究课题。

5 结 语

大规模 MIMO 无线通信能够充分利用空间维度无线资源,极大地提高无线通信频谱效率和功率效率,是 5G 移动通信的关键技术之一,并仍将是未

来 B5G 和 6G 移动通信最重要的研究方向之一。虽然被研究者们广泛研究,但大规模 MIMO 传输仍存在着具有挑战性的理论和技术问题,有待进一步深入系统地研究,以形成新的传输理论方法和技术体系,突破大规模 MIMO 无线通信信道信息获取瓶颈,解决大规模 MIMO 传输对典型频段和场景的适应性等问题,并带来无线通信的频谱和功率效率、速率和用户终端容量的量级提升。

参 考 文 献

- [1] Cisco Annual Internet Report (2018—2023), white paper, 2020.
- [2] ITU-R. IMT vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. ITU Working Document, Tech. Rep., October 2015.
- [3] ITU-R. Minimum requirements related to technical performance for IMT2020 radio interface(s). ITU Working Document, Tech. Rep., 2017.
- [4] Larsson EG, Edfors O, Tufvesson F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(2): 186—195.
- [5] Marzetta TL. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(11): 3590—3600.
- [6] Björnson E, Hoydis J, Sanguinetti L. Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency. *Foundations and Trends in Signal Processing*, 2017, 11(3-4): 154—655.
- [7] Wang CX, Wu SB, Bai L, et al. Recent advances and future challenges for massive MIMO channel measurements and models. *Science China Information Sciences*, 2016, 59(2): 021301.
- [8] Kermoal JP, Schumacher L, Pedersen KI, et al. A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(6): 1211—1226.
- [9] Weichselberger W, Herdin M, Ozcelik H, et al. A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(1): 90—100.
- [10] Gao X, Jiang B, Li X, et al. Statistical eigenmode transmission over jointly correlated MIMO channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(8): 3735—3750.
- [11] Couillet R, Debbah M, Silverstein JW. A deterministic equivalent for the analysis of correlated MIMO multiple access channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(6): 3493—3514.

- [12] Hachem W, Khorunzhiy O, Loubaton P, et al. A new approach for mutual information analysis of large dimensional multi-antenna channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(9): 3987—4004.
- [13] Taricco G. Asymptotic mutual information statistics of separately correlated rician fading MIMO channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(8): 3490—3504.
- [14] Far RR, Oraby T, Bryc W, et al. On slow-fading MIMO systems with nonseparable correlation. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(2): 544—553.
- [15] Lu AA, Gao X, Xiao CS. Free deterministic equivalents for the analysis of MIMO multiple access channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(8): 4604—4629.
- [16] You L, Gao XQ, Xia XG, et al. Pilot reuse for massive MIMO transmission over spatially correlated Rayleigh fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(6): 3352—3366.
- [17] You L, Gao XQ, Swindlehurst A L, et al. Channel acquisition for massive MIMO-OFDM with adjustable phase shift pilots. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(6): 1461—1476.
- [18] Wen CK, Jin S, Wong KK, et al. Channel estimation for massive MIMO using Gaussian-mixture Bayesian learning. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(3): 1356—1368.
- [19] Gao Z, Dai LL, Wang ZC, et al. Spatially common sparsity based adaptive channel estimation and feedback for FDD massive MIMO. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(23): 6169—6183.
- [20] Xie HX, Gao FF, Zhang S, et al. A unified transmission strategy for TDD/FDD massive MIMO systems with spatial basis expansion model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(4): 3170—3184.
- [21] Haghhighatshoar S, Caire G. Massive MIMO channel subspace estimation from low-dimensional projections. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(2): 303—318.
- [22] Lu AA, Gao XQ, Zhong W, et al. Robust transmission for massive MIMO downlink with imperfect CSI. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(8): 5362—5376.
- [23] Alrabadi ON, Tsakalaki E, Huang H, et al. Beamforming via large and dense antenna arrays above a clutter. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(2): 314—325.
- [24] Adhikary A, Nam J, Ahn JY, et al. Joint spatial division and multiplexing—the large-scale array regime. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(10): 6441—6463.
- [25] Sun C, Gao XQ, Jin S, et al. Beam division multiple access transmission for massive MIMO communications. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(6): 2170—2184.
- [26] Lin H, Gao FF, Jin S, et al. A new view of multi-user hybrid massive MIMO: Non-orthogonal angle division multiple access. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 2268—2280.
- [27] Ding ZG, Poor HV. Design of massive-MIMO-NOMA with limited feedback. *IEEE Signal Process. Letters*, 2016, 23(5): 629—633.
- [28] You L, Gao XQ, Li GY, et al. BDMA for millimeter-wave/terahertz massive MIMO transmission with per-beam synchronization. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(7): 1550—1563.
- [29] Sun C, Gao XQ, Wang JH, et al. Beam domain optical wireless massive MIMO communications with transmit lens. *IEEE Transactions on Communication*, 2019, 67(3): 2188—2202.
- [30] Meng X, Gao XQ, Xia XG. Omnidirectional precoding based transmission in massive MIMO systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(1): 174—186.
- [31] Xia XG, Gao XQ. A space-time code design for omnidirectional transmission in massive MIMO systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(5): 512—515.
- [32] Meng X, Xia XG, Gao XQ. Omnidirectional space-time block coding for common information broadcasting in massive MIMO systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 1407—1417.
- [33] Meng X, Gao XQ, Xia XG. Omnidirectional precoding and combining based synchronization for millimeter wave massive MIMO systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(3): 1013—1026.
- [34] Guo W, Lu AA, Meng X, et al. Broad coverage precoding design for massive MIMO with manifold optimization. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(4): 2933—2946.
- [35] Su DL, Jiang Y, Wang X, et al. Omnidirectional precoding for massive MIMO with uniform rectangular array-part i: complementary codes-based schemes. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(18): 4761—4771.
- [36] Su DL, Jiang Y, Wang X, et al. Omnidirectional precoding for massive MIMO with uniform rectangular array-part ii: numerical optimization based schemes. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(18): 4772—4781.
- [37] Lu AA, Gao XQ, Meng X, et al. Omnidirectional precoding for 3D massive MIMO with uniform planar arrays. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(4): 2628—2642.

Prospects and Overview of Massive MIMO Transmission

Lu An-An^{1,2} Gao Xiqi^{1, 2*}

1. *National Mobile Communications Research Laboratory, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096*

2. *Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111*

Abstract The continuing increase of the application demand on mobile internet and internet of things (IoT), brings the technique demand of increasing the rate and the user equipment capacity of wireless communications by an order of magnitude. To fulfill the technique demand, the fifth generation (5G) mobile communications is now in commercial use. As one of the key technologies in 5G mobile communications, massive multi-input multi-output (MIMO) plays a very important role and has been widely investigated in recent years. In the future, massive MIMO or ultra-massive MIMO will also be one of the key technologies in the beyond 5G and the sixth generation (6G) wireless communications. This paper focus on the bottleneck problem of channel estimation and the imperfect channel state information problem in massive MIMO caused by pilot overhead, mobility enhancement, the extended spectrum and etc. , reviews the massive MIMO transmission on the aspects of the information theory, channel acquisition and the posterior channel model, beam domain robust transmission, and synchronization and control information transmission, and also discusses the challenging problem in the future massive MIMO researches.

Keywords massive MIMO; information theory; channel acquisition; posterior channel model; robust transmission

(责任编辑 姜钧译 吴妹)

* Corresponding Author, Email: xqgao@seu.edu.cn