



评述

大规模 MIMO 关键技术及应用

张中山^{①*}, 王兴^①, 张成勇^②, 吕少波^①^① 北京科技大学融合网络与泛在业务工程技术研究中心, 北京 100083^② 北京市海淀区唐家岭路 1 号院 5 室, 北京 100094

* 通信作者. E-mail: zhangzs@ustb.edu.cn

收稿日期: 2015-03-25; 接受日期: 2015-06-05; 网络出版日期: 2015-08-17

国家重点自然科学基金 (批准号: 61431001)、新世纪优秀人才计划 (批准号: NECT-12-0774)、东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金 (课题编号: 2013D12)、中央高校基本科研业务费专项资金和北京融合网络工程技术研究中心基金资助项目

摘要 智能终端迅速普及将移动数据业务需求推至前所未有的水平, 从而导致了频谱资源的严重短缺. 大规模 MIMO 技术能够有效地提高频谱效率 (SE, spectral efficiency) 并显著降低传输功率. 大规模 MIMO 技术的主要挑战包括导频污染、波束赋型、预编码和高性能信号检测等. 本文对大规模 MIMO 技术进行了调研, 并对相关技术的优缺点进行分析. 首先对大规模 MIMO 技术在容量、SE、能耗效率 (EE, energy efficiency)、传输分集和天线互耦等方面的性能优势进行评估, 然后从信道测量/建模、信道估计、波束赋型/预编码和信号检测算法等方面进行讨论, 并对上述技术的优缺点进行对比. 此外, 还就大规模 MIMO 系统的构成、天线选择技术、用户选择算法设计以及复杂度降低等一系列关键问题进行了讨论.

关键词 大规模 MIMO 导频污染 信道建模 信道估计 波束赋型 信号检测 频谱效率 能量效率

1 引言

无线通信技术的快速发展在推动网络基础设施不断完善的同时, 也导致移动用户数量和相关产业规模呈现爆炸式增长. 截至 2014 年, 中国移动互联网用户数量已经达到 7.49 亿. 此外, 预计到 2023 年, 全球 machine-to-machine (M2M) 产业的市场资本总额将达到 1.4 万亿美元.

智能终端的迅速普及导致无线数据业务需求的爆炸式增长, 从而使得无线接入网络暴露出频谱资源短缺以及频谱效率亟待提升等严重问题. 尽管采用诸如小小区 (small cell)、高阶调制等技术能够在一定程度上提升无线频谱效率, 但现有技术所带来的性能增益仍不能完全满足移动用户快速增长的数据业务需求.

多入多出 (MIMO, multiple-input multiple-output) 技术能够提高无线信号传输的空间自由度 (DoF, degree of freedom), 从而提高无线接入网络的频谱效率 (SE, spectral efficiency) 与信道容量. 现有研究表明, 点对点 (P2P) MIMO 衰落信道的容量与发射/接收天线数量的最小值成正比^[1], 其可靠性服从 $\text{SNR}^{N_t N_r}$ 规律, 其中 N_t 和 N_r 分别表示发射和接收天线数量, SNR 表示接收信噪比. MIMO 技术已经被国际标准第 3 代合作伙伴计划 (3GPP, 3-rd generation partnership project) 长期演进 (LTE, long-term evolution) 标准广泛采用^[2,3].

引用格式: 张中山, 王兴, 张成勇, 等. 大规模 MIMO 关键技术及应用. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 1095–1110, doi: 10.1360/N112015-00057

为了满足未来无线通信业务需求, 研究人员亟需定义第 5 代无线通信系统 (5G) 标准, 并将 SE 提升一个数量级以上. 大规模 MIMO 作为未来 5G 关键技术之一, 可有效地提升数据速率和链路可靠性^[4~9]. 文献 [7] 指出, 大规模 MIMO 技术在满足更高数据吞吐量需求的同时, 能够有效地改善下一代多用户无线通信系统的服务质量 (QoS, quality of service)^[8]. 文献 [10] 表明, 大规模 MIMO 技术能够提高 SE 1~2 个数量级, 同时提升能源效率 (EE, energy efficiency) 3 个数量级. 上述特性使得大规模 MIMO 有望成为下一代无线通信系统中的核心技术^[7,9].

本文介绍了大规模 MIMO 系统的研究现状, 并给出相关技术的性能比较. 第 2 节介绍大规模 MIMO 技术的主要特点, 第 3 节介绍大规模 MIMO 信道测量与建模技术, 第 4 节讨论大规模 MIMO 信道估计技术, 第 5 节讨论高性能的波束赋型和预编码设计, 第 6 节介绍大规模 MIMO 中信号检测的算法. 此外, 第 7 节介绍了基于毫米波的大规模 MIMO 系统设计, 第 8 节总结全文.

2 大规模 MIMO 的技术优势

为适应移动数据业务的爆炸式增长, 无线通信系统必须显著提高频谱效率. 大规模 MIMO 技术采用大量天线来服务数量相对较少的用户, 可以有效提高频谱效率^[7]. 这项技术已经引起了学术界和工业界的广泛关注^[7]. 基于文献 [6], 国内外研究机构围绕吞吐量^[11]、传输功率效率^[12]、预编码^[13]和接收端设计^[14]等方面对大规模 MIMO 技术进行了深入研究. 例如, 文献 [7] 提出, 在基站中采用大规模天线阵列, 能够显著提高系统数据吞吐量.

除了频谱效率外, 人们越来越多地关注无线通信系统中另一关键性能指标, 即能耗效率 EE^[15]. 有观点¹⁾指出, 大规模 MIMO 技术不仅能够有效提高系统信道容量, 同时还能显著改善无线系统的能耗效率. 文献 [10] 指出, 多用户 MIMO (MU-MIMO, multiuser MIMO) 系统在低容量约束的条件下, 通过不同的检测算法, 例如最大比合并 (MRC, maximal ratio combining)、最小均方误差 (MMSE, minimum mean square error) 和迫零 (ZF, zero-forcing) 等等, 对 EE 与 SE 性能进行了对比研究表明, 在基站侧采用大规模天线阵列, 相比于单天线系统能够将 EE 与 SE 同时提高几个数量级.

本节将对大规模 MIMO 系统的信道容量、EE 以及 SE 等方面的性能进行分析.

2.1 信道容量增益

在既定阵列尺寸的大规模 MIMO 系统中, 增加天线数量导致天线单元间距减小, 从而导致了天线单元间更强的互耦效应. 互耦效应将导致信道容量下降^[16]. 现有研究中, 比如文献 [17] 对 MIMO 系统空间相关性进行了研究, 而忽视了互耦效应带来的影响. 文献 [18] 对线性阵列的互耦效应的研究表明, 随着固定阵列天线数量的增加, 互耦效应会对系统容量产生巨大影响. 本节将通过设置不同的系统参数, 对大规模 MIMO 系统的容量进行分析.

2.1.1 反向链路信道容量

多用户 MIMO 在最佳传播条件下, 当基站天线数量大大超过终端数量时, 信道矩阵的列向量间渐近为正交关系. 文献 [19] 通过迭代注水算法实现了对输入协方差矩阵的求解, 并推导出了大规模 MIMO 反向链路信道遍历数据速率公式. 此外, 文献 [6] 推导了正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 调制下的非协作式多小区系统的反向链路容量. 在每个小区中, 考虑

1) 引自 GreenTouch. [Online]. Available: <http://www.greentouch.org/>

随机均匀放置 K 个终端, 同时, 小区中心的基站包含 M 个全向天线 (M 值可无限制增长). 假设终端传输信号为 Gauss 信号, 反向链路总系统开销 (以字节/秒/小区为单位) 可由系统总带宽、频率复用因子、导频/循环前缀系统开销等参数求出, 如式 (1) 所示:

$$\begin{aligned} \mathbb{C}_{\text{rsum}} &= \sum_{k=1}^K \left(\frac{B}{\alpha} \right) \left(\frac{T_{\text{slot}} - T_{\text{pilot}}}{T_{\text{slot}}} \right) \frac{T_u}{T_s} \log_2(1 + \text{SIR}_{rk}) \\ &= \sum_{k=1}^K \left(\frac{B}{\alpha} \right) \left(\frac{T_{\text{slot}} - T_{\text{pilot}}}{T_{\text{slot}}} \right) \frac{T_u}{T_s} \log_2 \left(1 + \frac{\beta_{jkj}^2}{\sum_{l \neq j} \beta_{jkl}^2} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

其中, B 表示信号总带宽, α 为频率复用因子, T_{slot} 代表信号时隙长度, T_{pilot} 为传输反向链路导频所花费的时间, T_s 和 T_u 分别表示 OFDM 符号间隔和有用符号持续时间. 变量因子 $\beta_{jkl} = \frac{z_{jkl}}{r_{jkl}^\gamma}$, 其中, r_{jkl} 表示第 l 个小区内第 k 个终端与第 j 个小区内基站之间的距离, γ 为信道衰减指数因子, z_{jkl} 表示对数正态分布 (log-normal) 随机变量 [6]. β_{jkl} 的物理意义可以理解为第 l 与第 j 个小区之间的干扰. 由于终端数量与发送导频所消耗的时间成正比, 同时瞬时吞吐量总和与所服务的终端数量成正比, 当以半个时隙发送导频、半个时隙发送数据时, 可以实现净吞吐量总和最大化 [20].

2.1.2 前向链路信道容量

随着天线数量的增加, 大规模 MIMO 信号传播矩阵的列向量间将逐渐趋近于正交关系, 信道总容量可以用简单的渐进形式描述, 同时发射机可以使用基于匹配滤波器 (MF, matched filter) 的线性预编码来降低复杂度. 文献 [6] 研究了存在小区间干扰的前向链路信道容量, 其中, 每个基站通过预编码矩阵 (对应于前向传播矩阵的共轭转置估计) 对传输信号进行处理. 每个小区的净吞吐量为

$$\begin{aligned} \mathbb{C}_{\text{fsum}} &= \sum_{k=1}^K \left(\frac{B}{\alpha} \right) \left(\frac{T_{\text{slot}} - T_{\text{pilot}}}{T_{\text{slot}}} \right) \frac{T_u}{T_s} \log_2(1 + \text{SIR}_{fk}) \\ &= \sum_{k=1}^K \left(\frac{B}{\alpha} \right) \left(\frac{T_{\text{slot}} - T_{\text{pilot}}}{T_{\text{slot}}} \right) \frac{T_u}{T_s} \log_2 \left(1 + \frac{\beta_{ikj}^2}{\sum_{j \neq l} \beta_{jkl}^2} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 频谱效率

通常情况下, 大规模 MIMO 系统中频谱效率与能量效率之间存在矛盾, 提高频谱效率及相关发射功率, 能量效率将降低. 在实际系统中, 一旦天线数量给定, 系统可通过调节其他参数 (如辐射功率、用户数量、导频序列的持续时间等) 来提高频谱效率以抵消能量效率降低的影响, 反之亦然. 在文献 [6] 中, Marzetta 证明: 当基站天线逐渐增多时, 借助于最大接收合并 (MRC, maximal ratio combining) 接收器, 多用户 MIMO 能够显著提高蜂窝上行链路的频谱效率.

2.3 能量效率

近年来, 由于能源短缺和温室效应的影响, 提高通信系统的能量效率已经变得日益迫切 [21]. 目前, 绿色通信技术已经得到广泛研究, 包括:

- (1) 在蜂窝系统中, 通过关闭低负载基站 (如使其休眠), 可以达到节约能耗的目的.
- (2) 此外, 通过电磁传输的方式可以在电源与接收器之间进行无线能量传输 [22], 能够为提升未来无线通信系统的能量效率发挥重要作用. 由于无线能量传输可以通过改善充电技术来延长无线网络的

寿命^[23], 该技术已引起学术界和工业界的广泛关注^[24]. 与无线信息传输类似, 因为路径损耗、阴影和快衰落等因素的影响, 无线能量传输也会遇到传输损耗. 因此, 为了提高能量传输效率, 无线能量传输必须采用更先进的技术 (如最优波束赋型^[25] 和鲁棒能量波束赋型技术^[26] 等).

然而, 由于电源端天线数量有限, 传统多天线系统的能量效率仍然难以满足实际需求^[27]. 大规模 MIMO 技术通过在发射端部署大量天线而获得更高的天线阵列增益, 从而显著提升能量输送效率^[6,7]. 文献^[28] 中指出, 大规模 MIMO 系统的发射功率与基站天线数量的平方根成反比, 能够大幅降低基站发射的功率^[10]. 由文献^[10] 可知, 大规模 MIMO 的频谱效率可以推导为

$$R = \begin{cases} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) N_r \log_2 \left(1 + \frac{\tau (N_t - 1) P^2}{\tau (N_r - 1) P^2 + (\tau + N_r) P + 1}\right), & \text{for MRC;} \\ \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) N_r \log_2 \left(1 + \frac{\tau (N_t - 1) P^2}{(\tau + N_r) P + 1}\right), & \text{for ZF,} \end{cases} \quad (3)$$

其中, N_t 表示基站天线个数, N_r 表示移动台个数, P 表示移动台发射功率, T 表示信道相关时间, τ 表示导频周期. 由此可以推导出大规模 MIMO 的能量效率为 $\eta = R/P$, 其中, R 表示系统可达到的数据速率. 此外, 大规模 MIMO 系统中的 SE-EE 关系可以表示为^[10]

$$\max_{P, \tau, N_r} \eta, \quad \text{s.t.} \quad R = \text{const.} \quad (4)$$

2.4 传输分集与互耦效应之间的矛盾

在多用户 MIMO 系统中, 当基站天线的数量远远大于其所服务的终端数量时, 即可达到令人满意的通信性能^[6]; 同时, 在发射端增加天线数量并保证天线间距小于发射信号波长, 可以显著提升系统容量^[29]. 然而, 在固定尺寸的基站中部署大规模天线阵列意味着这些天线必须在一定程度上紧密排列, 这将产生两大效应, 即邻近天线间的空间相关性和互耦性^[30]. 为了在有限空间内部署大规模的 MIMO 系统, 空间相关性与互耦效应之间的矛盾亟需解决. 除此以外, 还要考虑其他参数的影响, 比如, 增加天线单元的数量会增加空间分集度, 而天线间距减小到一定程度则会引起空间分集度的降低^[29].

2.5 大规模 MIMO 与传统 MIMO 性能对比

大规模 MIMO 技术与传统 MIMO 相比, 具有诸多特点, 如表 1 所示.

表 1 中给出了传统 MIMO 与大规模 MIMO 之间性能对比. 在上述因素中, 导频污染成为大规模 MIMO 技术中的关键性限制因素, 这是因为随着基站天线数量的增加, 相邻小区的用户在上行信道估计中使用同一组 (或非正交的) 训练序列, 从而导致基站端信道估计的结果并非本地用户和基站间的信道, 而是被其他小区用户发送的训练序列所污染的估计. 此外, 信道测量、建模与估计、波束赋型/预编码与检测设计、硬件复杂度等问题也将限制大规模 MIMO 系统的实现.

3 大规模 MIMO 信道的测量与建模

大规模 MIMO 技术通过在基站中部署大量天线单元来为多用户 MIMO 等场景提供足够的网络容量^[31]. 在理想的无线传播条件下, 随着大规模 MIMO 系统中天线数量的增大, 发射机与接收机之间的信道向量将变长并趋于正交.

本节将对大规模 MIMO 的信道测量与建模技术进行研究, 第 4 节将对其信道估计技术加以研究.

表 1 传统与大规模 MIMO 技术之间的性能对比
Table 1 Performance comparison between massive conventional MIMO techniques

Technical content	Conventional MIMO	Massive MIMO
Number of antennas	Usually ≤ 8	Usually ≥ 100
Channel angular value	Non-deterministic	Approaches a deterministic function as the matrix dimension grows
Channel matrix	Not necessarily well-conditional	Well-conditional
Channel capacity	Lower	Higher
Diversity gains	Lower	Higher
Link reliability	Lower	Higher
Noise combating capability	Lower	Higher
Array resolution	Lower	Higher
Antenna correlation	Lower	Higher
Coupling	Lower	Higher
SER	Higher	Lower
Pilot contamination	No	Yes

3.1 大规模 MIMO 信道测量

大规模 MIMO 系统的理论信道模型可以通过实际传播环境中的信道测量加以验证. 通过实际信道测量, 整个系统性能可以得到有效发挥 [32].

(1) 2.6 GHz 微蜂窝环境下的分布式 MIMO 信道测量. 为研究分布式 MIMO (由 4 个基站和 1 个移动台组成的场景) 不同基站链路之间大尺度衰落的互相关特性, 文献 [33] 对 2.6 GHz 微蜂窝环境下的信道进行了测量. 在这 4 个基站中, 3 个基站分别部署了 4 组空间高度同向极化的天线单元, 另一基站则只部署一个天线单元; 移动台则部署了由 64 组双极化天线单元组成的圆柱形均匀阵列. 利用上述测量方法, 通过分析不同基站链路之间的大尺度衰落互相关特性, 可得出不同位置的大尺度信道衰落值.

(2) 128 单元线性阵列的测量方法. 文献 [34] 考虑 26 个不同的视距传播用户、10 个非视线传播用户, 系统工作在 2.6 GHz, 基站装备有 128 单元线性阵列. 此外, 将天线阵列长度和天线间距分别设置为 7.3 米和半个波长. 该文献在上述场景下对大规模 MIMO 信道进行了研究, 其中主要对 Ricean K 因子、阵列的接收功率值、天线相关性和特征值分布等不同参数进行了分析. 研究表明, 由于存在某些不可见的散射, 同时散射功率值可能发生很大变化, 大规模天线阵列的传播信道不能看作是广义平稳过程. 然而, 阵列上的近场效应和非平稳性有助于消除不同用户的相关性, 从而提供一个良好、稳定且低干扰的信道条件.

3.2 大规模 MIMO 信道建模

目前, 无线信道建模方面的研究已经取得了一些进展, 能够获得与现实吻合度极高的结果. 考虑到未来无线通信系统中的大规模 MIMO 信道配置, 随之而来的, 从多路信道中提取单一信道脉冲响应的复杂度将成为该领域研究的新挑战 [35].

多天线信道采用多种建模方法, 用以简化无线链路时空随机性的表达. 例如, 在随机信道模型 COST 2100 [36] 和 WINNER 中, 多径参数 (功率、延迟、到达角、发射角等) 是从全局或大规模参

数分布中随机选取的。对大规模参数及其相关性建模的研究成果已被 3GPP SCM, COST 2100 和 Winner 信道模型所采纳。

(1) 大尺度衰落信道的 MIMO Wiener 模型。状态空间表示法可看作是 MIMO 信道的有效建模方法。基于状态空间的子空间识别算法, 其效果优于标准卷积建模方法, 并已用于无线信道的自适应估计^[37]。此外, 子空间识别算法具有非线性特征, 已应用于识别接收机的动态移动以及预测未来多径传播场强的移动通信框架^[38]。尽管上述识别技术未能完全解决收发机的移动性问题^[39], 扩展型 Wiener 系统技术的提出已经解决了 MISO 信道的建模问题, 该技术通过将接收机的移动描述成一个状态空间的动态线性系统, 以此来对无线移动通信链路的大尺度衰落进行建模。此外, 借助于 Wiener 系统子空间识别算法与多项式回归的结合, 该技术通过电场强度的时域估计实现了信道模型的建立^[40]。

(2) 大规模 MIMO 系统的随机几何建模与干扰分析^[41]。在基站和单天线移动台组成的大规模 MIMO 蜂窝系统中, 随着基站天线数量趋向于无穷, 假定准确信道的状态信息可知, 则一个固定基站能够以任意高的数据速率服务于任意数量的移动用户。在大规模 MIMO 蜂窝系统中, 上/下行性能完全由阴影衰落系数和移动台 (基站) 的位置决定, 从而有力地证明了“在不同参数设置与方案下使用随机几何模型能够对系统性能指标进行准确分析”这一论断的正确性。

3.3 大规模 MIMO 信道测量与建模中所面临的技术挑战

尽管学术界和工业界已经在大规模 MIMO 信道测量与建模方面进行了大量的研究, 但对“理想传播条件及天线特性”的假设过于理想化, 在实际系统中并不一定成立。例如, 实际基站可能装配超过 100 幅、但少于 1000 幅天线单元^[7], 而不是无穷多个天线单元。此外, 发射天线 (接收天线) 一般假设为各向同性且非偏振的电磁波辐射源 (传感器), 根据电磁学基本理论, 这种各向同性且非偏振的天线在现实中并不存在。随着空间相关性的变化, 大规模 MIMO 性能会受到各向异性天线的影响。

4 大规模 MIMO 系统的有效信道估计

基站信道状态信息 (CSI, channel state information) 的获取对于蜂窝网络容量优化至关重要。在频分双工 (FDD, frequency division duplex) 系统中, 反馈方案^[42]通常应用于 CSI 获取。然而, FDD 系统中前向链路导频的训练开销将限制基站天线数量。文献 [43] 中, FDD 系统前向链路导频的训练开销正比于基站天线数量。另一方面, 时分双工 (TDD, time division duplex) 系统具有与 FDD 系统本质不同的体系结构^[9]。在大规模 MIMO 系统中, 基站相对于终端配备更多的天线单元, 由于 TDD 中反向链路导频的训练负担独立于基站天线数量, 该模式能够比 FDD 模式提供更为理想的 CSI 获取方法。

然而, 假如终端数量小于基站天线数量, 带有 CSI 反馈的信道估计算法也可能表现出良好的性能^[44]。在这种情况下, 发射天线的信道估计可能会受到导频设计的影响。当然, CSI 可以通过有效压缩来降低反馈负担^[45]。在诸如 IEEE 802.11n^[46] 和 IEEE 802.11ac^[47] 等标准中, 在频域中应用酉矩阵能够实现 CSI 的压缩。此外, CSI 也能通过空间相关性^[48] 和迭代波束赋型^[44] 的方法进行压缩, 并通过修正不同子载波的传输权重来获取 CSI。

目前, 大规模 MIMO 系统中的信道估计技术得到了广泛研究, 具体如下所述。

4.1 无 CSI 反馈的信道估计

基于 TDD 的大规模 MIMO 传输可以不用借助于 CSI 反馈 (仅仅利用信道互易性) 来有效提高

信道估计的性能. 下面介绍两种典型的无反馈大规模 MIMO 信道估计算法.

(1) 基于 Chu 序列的导频设计. 为了降低导频污染对大规模多小区多用户 MIMO 的影响, 文献 [49] 利用信道矢量间的正交性提出了一个新的导频设计准则, 即 Chu 序列 [50]. 基于 Chu 序列的导频主要用来降低小区间的干扰. 当导频长度不小于同一时间活跃终端数量时, 正交导频既可在一个小区内进行分配, 又可被共享相同频带的多小区复用. 文献 [49] 提出的导频设计能够提高大规模多小区 MU-MIMO 系统的频谱效率, 尤其适用于具有大型阴影衰落差异的场景.

(2) 最小均方误差信道估计. 现有研究大部分假设信道独立 [9] 或是不同用户的信道矢量渐进正交 [6]. 事实上, 由于天线信号传播环境不能提供充分的散射, MIMO 系统信道间一般存在相关性. 最小均方误差估计器能够利用信道间的相关性, 在非理想信道下完成信道估计. 针对部署大型天线阵列的 MU-MIMO 系统, 文献 [51] 提出一种使用训练序列²⁾完成上行最小均方误差信道估计的方法. 有限维度信道模型中角域被划分为 P 个方向 (P 为较大的有限值). 用 $\mathbf{H}_{il}$ 表示第 i 个小区和第 j 个基站 K 个用户间快衰落系数矩阵 $P \times K$, 其中, $\mathbf{D}_{il}$ 是一个 $K \times K$ 对角线矩阵, 对角线元素 $[\mathbf{D}_{il}]_{kk} = \beta_{ilk}$, $\sqrt{\beta_{ilk}}$ 模拟路径损耗和阴影, 最小均方估计误差信道估计器可以设计为

$$\hat{\mathbf{H}}_{il} = P_p^{-1/2} (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \tilde{\mathbf{Y}}_{P,l} \left(\sum_{i=1}^L \mathbf{D}_{il} \right)^{-1} \mathbf{D}_{il}, \quad (5)$$

其中, $\mathbf{A} \triangleq [\alpha(\phi_1) \cdots \alpha(\phi_P)]$ 为满秩的 $M \times P$ 矩阵, $\alpha(\phi_k) = \frac{1}{\sqrt{P}} [e^{-j f_1(\phi_k)}, \dots, e^{-j f_M(\phi_k)}]^T$, $f_1(\phi_k)$ 为 ϕ 的函数, L 表示小区数量, $\tilde{\mathbf{Y}}_{P,l}$ 为 $\mathbf{H}_{il}$ 的有效统计.

4.2 带 CSI 反馈的信道估计

MU-MIMO 系统中基于有限反馈的信道估计已经得到广泛研究, 研究表明, 每个用户反馈负载的求取必须通过对发射天线数量和系统信噪比的分析得到, 进而得到类似具有全复用增益 [52] 效果的 CSI 性能. 尽管基于 Grassmann 空间装箱原理 [53] 可以设计最优矢量量化码本, 但该方法中量化负载会随着码本增大而增加, 这对大尺度 Grassmann 码本的设计和编码带来了新的挑战. 因此, 需要设计一种新的反馈机制来应对大尺度码本.

以下算法将对两种反馈设计进行比较.

(1) 用于提高信道估计性能的导频设计. 利用信道的互易性 (例如 TDD 系统中), 可通过上行 CSI 来估计下行 CSI, 该方法十分适用于大规模 MIMO 系统. 此外, 该方案为避免校准错误, 需要使用闭环方案来降低对信道互易性的要求. 文献 [54] 提出一种新的闭环方案, 即通过使用新型导频设计和左右奇异向量反馈的新型单位矩阵来减小训练帧的长度以提高信道估计性能. 该设计基于迭代 CSI 估计 [44], 使用 OFDM 子载波中的单元矩阵来计算 CSI 估计权重. 由于基站使用先验估计 CSI 来计算 CSI 估计权重, MU-MIMO 可通过迭代算法达到全天线估计的性能标准. 文献 [54] 中方案可实现满秩 CSI 估计, 并且保证长训练帧数量不会随发射天线数量递增. 为了弥补迭代 CSI 估计的不足, 我们可以使用 CSI 聚合与迭代 CSI 估计协作的方法. 例如 3 个终端的 32×2 MU-MIMO-OFDM 传输过程中, 在低时延和高时延扩展两种场景下, 上述方案可分别达到全 CSI 估计方案性能的 98.7% 和 98.6% [55].

(2) 使用非相干网格编码量化的有限反馈. 最优波束赋型同分组非相干序列检测 (即分组长度和发射元素相同) 之间存在对偶性, 非相干网格编码量化 (NTCQ, noncoherent trellis-coded quantization) [55] 利用这种对偶性, 对于使用有限反馈的波束赋型十分有效. NTCQ 通过调整分组大小和潜在

2) 第 L 个小区中使用的训练序列可以表示为 $\tau \times K$ 矩阵 $\sqrt{P_p} \Phi_l = \sqrt{P_p} \Phi$, 其中, τ 表示序列的长度, K 表示用户的数量, P_p 表示训练序列的能量.

的编码调制体系来分别适应天线数量和所允许的反馈速率这两方面要求. 文献 [56] 中借助于适度反馈开销的次最优波束赋型, 利用信道时空相关性的 NTCQ 扩展形式可以明显降低大规模 MIMO 系统的最低反馈速率需求. 此外, 在基于 FDD 的大规模 MIMO 系统中, 该 NTCQ 扩展方案利用了微分 [57] 和空间自适应技术 [58] 来改进传统 NTCQ 体系, 综合使用上述两种技术能够进一步提高使用 NTCQ 的有限反馈大规模 MIMO 系统的综合性能.

4.3 信道估计中有待解决的问题

随着移动用户数量和数据流量的迅速增长, 用户对高速可靠无线宽带连接提出了更高要求. 大规模 MIMO 被认为是能够将现有网络速率提高至 Gbit 甚至更高 [59] 的技术. 在理想信道传输环境下, 考虑最优信道估计, 增加基站天线数量始终能够提高吞吐量或降低发射功率. 然而, 实际的无线传播环境并不能提供足够的散射, 同时, 在基站处布置相关性为零的大规模天线阵列的可能性也近乎为零. 此外, 由于导频污染、相干时间间隔内实时高维信道估计等原因, 最优 CSI 假设难以实现.

5 波束赋型与实际预编码设计

现有研究表明, 大规模 MIMO 预编码技术在突破下行容量瓶颈方面发挥了关键作用. 目前, 为了将系统复杂度从终端侧转移到基站侧, 基于发射机的信号处理技术已经大量应用于大规模 MIMO 下行传输 [60]. 例如, 预编码器/波束赋型器已被用来消除导频污染产生的影响. 空间 MF 预编码中 [7], 无线电波的场强可以集中于一点, 从而减小不同用户间干扰. 此外, 波束赋型技术还可以用于拓展空域和时域信号空间并显著降低码间干扰, 从而获得更高的能量效率和频谱效率.

现有的几种预编码/波束赋型的算法大体上可以分为线性和非线性两类, 前者包括 ZF [61], 块对角化 (BD, block diagonalization) [62] 以及 MF 预编码 [63], 而后者则包括脏纸编码 (DPC, dirty paper coding)、矢量微扰 (VP, vector perturbation) [64]、辅助网格方法 [65] 等.

5.1 线性预编码

预编码技术 [66] 可用来消除导频污染产生的影响. 线性与非线性预编码技术得到了广泛研究. 例如, 文献 [67] 中提出了完全集群内协作和有限集群内协作的群聚网络线性预编码技术, 文献 [68] 则提出了基于 DPC 的非线性方案以及一种联合波束赋型/预编码算法. 本小节将对一些典型的线性预编码器 (例如, ZF [61], MF [69], MMSE [33] 等) 进行介绍. 下一小节将介绍非线性预编码.

(1) 迫零式预编码. 大规模 MIMO 系统中, 由于用户地理位置不相关, 预编码矩阵 $\mathbf{G}$ 的每一列随着天线数量的增加趋于正交. 文献 [61,70] 中 ZF 预编码采用了伪逆矩阵替换信道参数这一方法. 文献 [71] 中, 在基站天线数量 M 与终端数量 K 的比值 α 恒定的情况下, 通过同时增加 M 和 K , 可以使得矩阵 $\text{Trace}\{(\mathbf{G}^H \mathbf{G})^{-1}\}$ 收敛于定值 $\frac{1}{\alpha-1}$, 其中 $\mathbf{A}^H$ 代表矩阵 $\mathbf{A}$ 的 Hermite 共轭转置.

(2) 匹配滤波器. ZF 预编码中对伪逆矩阵的操作需要对 $K \times K$ 维矩阵求逆, 这增加了计算复杂度. 从上述讨论中发现, 大规模 MIMO 中 $\frac{\mathbf{G}^H \mathbf{G}}{M}$ 趋向于单位矩阵, 该矩阵可以简化求逆, 同时使 ZF 预编码器趋向于 MF 预编码器 ($\mathbf{G}^H$) 性能. 当天线阵列扩大时, MF 预编码矩阵已经相当接近于 ZF.

(3) 基于 MMSE 的预编码. 在多小区系统中, 由于非正交训练序列引起导频污染, 所以在设计预编码方案时, 必须考虑训练序列的分配. 文献 [43] 中提出了用于减小导频污染影响的 MMSE 的预编

码方法, 与单小区场景^[72]不同, 该方法可以通过求解目标函数的最优解得到, 其中目标函数 (即多单元 MMSE 预编码矩阵 $\mathbf{A}_i^{\text{opt}}$) 主要作用包括以下两部分:

- 同一小区用户接收信号的均方误差 (MSE);
- 交叉小区用户间发生的均方干扰.

基于 MMSE 的预编码器可以降低小区间和小区内的干扰, 从而得到特定单小区预编码方案下 (如 ZF 预编码) 的性能增益. 此外, MMSE 的信道估计适用于前向链路, 其估计值满足

$$\hat{\mathbf{G}}_{\text{MMSE}} = \xi \mathbf{G} + \sqrt{1 - \xi^2} \mathbf{E}, \quad (6)$$

其中, $0 \leq \xi \leq 1$ 表示估计的可信度, $\mathbf{E}$ 为分布项服从 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 的矩阵. 对于任意的可信度 ξ , 通过增加天线阵列可使 MF 和 ZF 预编码器获得足够高的信号干扰噪声比 (SINR).

5.2 非线性预编码

非线性预编码包括 DPC、向量扰动 (VP)^[64]、辅助网格方法^[65]等, 在 M 相对 K 不是特别大时表现出一定的优势. 文献^[73]推导了在带有完整 CSI 的 VP 中信噪比 (SNR) 的近似表达式.

6 大规模 MIMO 系统信号检测算法

在 MU-MIMO 系统中, 基站可以采用正交或非正交的方式将时间 — 频率资源分配给不同的用户, 以此为大量用户提供服务. 携带一个或多个天线的移动用户可能同时将信号发送到基站, 基站再通过空间签名将接收到的上行信号加以区分. 然而, 从聚合的信号中提取每个用户的部分信息需要利用复杂的信号处理技术^[1]. 为了减小用户间的干扰, 包括最大似然 (ML) 检测^[74]、下行链路 DPC^[75]等先进的预编码/检测算法能够提供很好地解决途径.

在大规模 MIMO 基站中, 当基站天线数量变大时, 基站与用户间随机信道矢量变为正交^[7], 此时, 采用简单信号处理的线性接收机即可实现低复杂度信号检测^[6]. 典型线性检测器中, 基于 Markov chain Monte Carlo (MCMC) 技术^[76]能够将指数检测复杂度降低到线性/多项式的复杂度.

本节将对多种上行链路检测算法进行介绍.

6.1 线性检测器

多小区 MU-MIMO 系统中, 根据信道估计与小区间干扰的相关性, 可设计出一种最优线性接收机, 从而实现接收 SINR 的最大化^[77]. 当基站配备天线数量很大时, 在低 SINR 环境下, MRC 接收机与最优线性接收机 (OLR, optimal linear receiver) 性能相当, 但在高 SINR 情况下低于 OLR; 在高干扰环境下, OLR 比典型 MMSE 接收机系统性能更好.

6.2 非线性检测器

(1) 随机步长 (RS, random step) 法. 除了初始阶段可能应用到 MMSE 解决方法之外, 该算法基本上不需要矩阵求逆. RS 方法原理为: 选定一个初始向量, 以 MSE 作为条件评估周边的矢量 N_{Neigh} , 用于选择 MSE 最小的向量; 将以上过程重复 N_{Iter} (预设值) 次. 两种基于 RS 的算法如下:

- 似然上升搜索 (LAS, likelihood ascent search) 算法^[78]只允许向低 MSE 转变. LAS 算法可以单调收敛于局部极小值, 达到误码率的上界和检测器渐进多用户效率的下界^[79].

- 禁忌搜索 (TS, tabu search) [80] 允许向大型 MSE 值转变, 避免局部极小值 [77].

(2) 基于树形结构的算法 (TB, tree based). 典型的算法是球解码 (SD, sphere decoding) [81,82], 实际上是一个极大似然 (ML) 解码器. 然而, SD 只考虑特定半径范围内的点. 为了找到任意信令点, 需要增大球半径. 在现有低复杂度 TB 算法中, 只扩大最有价值树节点部分, 可以有效降低搜索复杂度.

7 基于毫米波的大规模 MIMO 技术

与传统 MIMO 技术类似, 大规模 MIMO 技术旨在利用多根天线带来的空间自由度来提升信道容量. 大规模 MIMO 采用了数十乃至上百根天线的阵列进行信号传输, 从而能在提高性能方面获得极大的突破. 作为早期揭示大规模 MIMO 有效性的工作之一, Bell 实验室的 Marzetta 提出, 对于 20 MHz 带宽下的非合作多小区传输, 在每个小区具有 40 个用户的情况下, 使用简单匹配波束赋型技术的大规模 MIMO 系统能够达到平均每小区 700 Mbps (小区频率复用因子为 7) 至 1.8 Gbps (小区频率复用因子为 1) 的传输速率. 这一工作表明了大规模 MIMO 在提高系统性能方面的潜力. 为了实现容量最大化, 可以采用波束赋型/预编码 [6] 等技术. 例如, 大规模 MIMO 系统上行链路传输线性数据检测中分析了超大规模集成电路实施权衡 [83], 并对使用次优标准所引入的误差和低复杂度的矩阵求逆进行评估. 就分组误码率而言, 文献 [83] 证明文献 [84] 中提出的近似矩阵求逆性能超过了基于 Choleskey 的精确算法, 前者所需硬件复杂性比后者低 1 个数量级. 此外, 对文献 [84] 中提出的近似矩阵求逆的性能和复杂度的折衷对比已经通过 FPGA 加以验证.

鉴于目前高阶调制技术已经能够高效地使用现有频谱, 更高速率的数据传输则需要更宽的频谱. 毫米波段包括 30~300 GHz 频率, 与传统蜂窝通信或无线局域网的工作频段相比, 毫米波段信号能够获得更高的带宽. 相对于微波系统, 由于毫米波段大大缩短了信号波长, 使得多天线系统中相邻天线之间的距离大大缩短, 从而显著压缩天线系统的物理尺寸, 为大规模 MIMO 系统小型化与实用化提供了必要前提. 因此, 把大规模 MIMO 的高空间自由度与毫米波的高带宽相结合, 将带来与这两者乘积成正比的系统吞吐率, 与现有技术相比, 将带来数据速率的极大提升. 文献 [85] 中, 配备 48 单元喇叭天线和 4 单元贴片天线阵列分别被提出应用于 MMB (millimeter-wave mobile band) 基站和移动台, 并且分别达到了 26 dB 和 12 dB 的波束赋型增益. 文献 [86] 中介绍了一种 MMB 系统设计实现方案, 能够支持 350 km/h 的用户移动速度、最远距离 500 m、下行传输 Gbps 数据速率. 文献 [86] 中还介绍了 20 MHz 带宽下 MMB 系统, 相对于 LTE, 新系统能够达到超过 30 倍的小区吞吐量和小区边缘性能.

目前, 基于毫米波的大规模 MIMO 研究已经引起学术界和工业界的极大关注.

7.1 学术界研究进展

在学术界, 美国 Rice 大学于 2012 年开发了基于 WARP 软件无线电系统 (即 2.4 GHz 频带 20 MHz 带宽下具有 64 根发射天线的 Argos 系统). 基于该系统, Rice 大学的研究人员测试了多用户传输的性能, 研究结果表明, 与单天线系统相比, 采用简单下行波束赋型的实验系统在相同功耗条件下可以获得高达 12.7 倍的系统速率提升³⁾. 此外, 纽约大学与三星公司合作, 在 2012~2013 年针对 28 GHz, 60 GHz, 72 GHz 毫米波段的信道特性进行了测量, 并得到了毫米波段下室内外小尺度衰落和路径损耗的统计特性、信号穿透 (penetration) 特性等一系列结果, 为毫米波段通信系统设计提供了重要的参考 [87]. 瑞典的 Lund 大学于 2014 年完成了具有 100 根天线的大规模 MIMO 传输实验. 在 3.7 GHz

3) Rice University WARP project. Available at: <http://warp.rice.edu>.

频段、20 MHz 带宽条件下, 基于 OFDM 的实验系统在对 10 个用户的传输实验中达到了 384 Gbps 的数据吞吐量^[88].

7.2 工业界研究进展

与此同时, 工业界也正积极开发大规模 MIMO 以及毫米波的实验、测量系统. 三星公司于 2013 年较早地完成了 28 GHz 毫米波段 8×8 (64) 阵列点对点实验系统的开发, 并展示了该系统在 500 MHz 带宽下最高可以达到 1.056 Gbps 的传输速率. 2014 年 9 月, 华为携手中国移动完成全球首次 Massive MIMO 多天线解决方案应用于 TD-LTE 网络的演示, 本次演示的平台是业界第一款支持 Massive MIMO 特性的基站产品, 也是当前业界最大规格 of Massive MIMO 多天线系统⁴⁾. 和普通机械控制的天线阵列比, 相控阵具有更好的电气特性, 并且在体积、重量上都有很大的优势. 这项研究的目的是将数百根天线集成在一张信用卡大小的芯片上, 从而产生高集成度的天线阵列⁵⁾. 2014 年 11 月, 中兴通讯联合中国移动完成全球首个 3D/Massive MIMO 基站外场预商用测试, 采用中兴最新研制的 64 端口 128 天线 3D/Massive MIMO 的基带射频一体化室外型基站, 由于使用了 3D 波束成型技术, 基站除了满足水平方向的信号覆盖, 还可以垂直覆盖高达 35 层的办公楼, 该测试证明 3D/Massive MIMO 是一种解决高层覆盖的良好技术⁶⁾.

7.3 标准化工作进程

目前, 世界两大标准化组织 IEEE 和 3GPP 已开展了对基于毫米波大规模 MIMO 的研究, 其中,

(1) IEEE 802.11ax (HEW) 已有两项关于大规模 MIMO 的提案, 北京邮电大学利用大规模 MIMO 技术来满足一些 HEW 使用案例的需求, Rice 大学提出了大规模 MIMO 的实际架构, 并且利用原型系统得到了一些初步实验结果.

(2) IEEE 802.11ac (WPAN) 和 IEEE 802.11ad (WLAN) 已经提出 60 GHz 的相关标准.

(3) 3GPP Rel-12 开展了三维 (3D) 信道建模, 并开展了大规模 MIMO 以及 Elevation beamforming 的研究项目 (SI), 预计 Rel-13 将开展 Full dimension MIMO 的研究项目.

(4) 中国 IMT-2020 推进组于 2013 年底成立, 开始了关于毫米波和大规模 MIMO 的标准化进程, 其中包括大规模天线技术专题组以及高频段通信技术专题组.

8 结论

大规模 MIMO 技术能够显著提高无线接入系统的信道容量、频谱效率、能量效率等. 然而, 其理论上的性能增益往往建立在对无线信道的理想化假设上, 目前尚不能通过实际测量和建模充分证明其假设的正确性^[89]. 此外, 尽管大规模 MIMO 已得到学术界的广泛关注 (例如文献 [6,7]), 但目前仍缺乏实际应用. 未来研究需要关注以下几个方面:

(1) 为实现高速率数据传输, 大规模 MIMO 技术对硬件复杂度的要求更高, 对功率的消耗更大. 因此, 降低大规模 MIMO 发射功率将十分必要.

(2) 为了增加每个大规模 MIMO 基站服务用户的数量, 必须研究导频污染消除等先进技术.

(3) 迫切需要利用更加先进且性价比更高的非线性预编码器, 尤其是在 M 值很大的情况下.

4) [Http://pr.huawei.com/cn/news/hw-372553-td-lte.htm](http://pr.huawei.com/cn/news/hw-372553-td-lte.htm).

5) [Http://www.theregister.co.uk/2014/11/24/ibm_and_ericsson_in_aerial_antics/](http://www.theregister.co.uk/2014/11/24/ibm_and_ericsson_in_aerial_antics/).

6) [Http://www.zte.com.cn/cn/press_center/news/201411/t20141120_429166.html](http://www.zte.com.cn/cn/press_center/news/201411/t20141120_429166.html).

参考文献

- 1 Tse D N C, Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge University Press, 2005
- 2 3GPP. Release 8 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA), Physical Channels and Modulation. TS 36.211.V8.2.0 (2008-03), 2008
- 3 Dahlman E, Parkvall S, Skold J, et al. 3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband. New York: Academic, 2008
- 4 Huh H, Caire G, Papadopoulos H C, et al. Achieving 'Massive MIMO' spectral efficiency with a not-so-large number of antennas. IEEE Trans Wirel Commun, 2012, 11: 3226–3239
- 5 Hoydis J, Brink S T, Debbah M. Massive MIMO: how many antennas do we need? In: Annual Allerton Conference on Commun Control Comput, Monticello, 2011. 545–550
- 6 Marzetta T L. Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas. IEEE Trans Wirel Commun, 2010, 9: 3590–3600
- 7 Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays. IEEE Signal Process Mag, 2013, 30: 40–60
- 8 Gesbert O, Kountouris M, Jr R W H, et al. Shifting the MIMO paradigm. IEEE Signal Process Mag, 2007, 24: 36–46
- 9 Marzetta T L. How many training is required for multiuser MIMO? In: 40th Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers, Pacific Grove, 2006. 359–363
- 10 Ngo H Q, Larsson R G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. IEEE Trans Commun, 2013, 61: 1436–1449
- 11 Hoydis J, Brink S T, Debbah M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: how many antennas do we need? IEEE J Select Areas Commun, 2013, 31: 160–171
- 12 Ngo H Q, Larsson R G, Marzetta T L. Uplink power efficiency of multiuser MIMO with very large antenna arrays. In: Allerton Conference on Commun Control Comput, Monticello, 2011. 1272–1279
- 13 Mohammed S K, Larsson E G. Per-antenna constant envelop precoding for large multi-user MIMO systems. IEEE Trans Commun, 2013, 61: 1059–1071
- 14 Datta T, Kumar N A, Chockalingam A, et al. A novel MCMC algorithm for near-optimal detection in large-scale uplink multiuser MIMO systems. In: Information Theory And Applications Workshop (ITA), 2012. 69–77
- 15 Ng D, Lo E, Schobert R. Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas. IEEE Trans Wirel Commun, 2012, 11: 2392–3304
- 16 Fei Y, Fan Y, Lau B K, et al. Optimal single-port matching impedance for capacity maximization in compact MIMO arrays. IEEE Trans Antennas Propagat, 2008, 56: 3566–3575
- 17 Pollock T S, Abhayapala T D, Kennedy R A. Antenna saturation effects on MIMO capacity. In: Proceedings of IEEE International Conference communications (ICC), 2003. 2301–2305
- 18 Janaswamy R. Effect of element mutual coupling on the capacity of fixed length linear arrays. IEEE Antenn Wirel Propag Lett, 2002, 1: 157–160
- 19 Zhang J, Wen C-K, Jin S, et al. On capacity of large-scale MIMO multiple access channels with distributed sets of correlated antennas. IEEE J Select Areas Commun, 2013, 31: 133–148
- 20 Marzetta T L. BLAST training: estimating channel characteristic for high capacity space-time wireless. In: Proceedings of 37th Annual Allerton Conference Communications, Control, and Computing, Monticello, 1999
- 21 Chu F, Chen K, Fettweis G. Green resource allocation to minimize receiving energy in OFDMA cellular systems. IEEE Commun Lett, 2012, 16: 372–374
- 22 Grover P, Sahai A. Shannon meets Tesla: wireless information and power transfer. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory, Austin, 2010. 2363–2367
- 23 Zhang F, Hackworth S A, Liu X, et al. Wireless energy transfer platform for medical sensor and implantable devices. In: Proceedings of the IEEE International Conference on EMBC, Minneapolis, 2009. 1045–1048
- 24 Gozalvez J. Witricity-the wireless power transfer. IEEE Veh Technol Mag, 2007, 2: 38–44
- 25 Zhang R, Ho C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer. In: IEEE Global Telecommunications conference (GLOBECOM), Houston, 2011. 1–5
- 26 Xiang Z, Tao M. Robust beamforming for wireless information and power transmission. IEEE Wirel Commun Lett, 2012, 1: 372–375

- 27 Chen X, Yuen C, Zhang Z. Wireless energy and information transfer tradeoff for limited feedback multi-antenna system with energy beamforming. *IEEE Trans Veh Technol*, 2013, 63: 407–412
- 28 Ngo H Q, Marzetta T L, Larsson E G. Analysis of the pilot contamination effect in very large multicell multiuser MIMO systems for physical channel modes. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Prague, 2011. 3464–3467
- 29 Masouros C, Chen J, Tong K, et al. Towards massive-MIMO transmitters: on the effects of deploying increasing antennas in fixed physical space. In: *Future Network and Mobile Summit (Future Network Summit)*, Lisboa, 2013. 1–10
- 30 Kyrsti P, Cox D C, Valenzuela R A, et al. Correlation analysis based on MIMO channel measurements in an indoor environment. *IEEE J Select Areas Commun*, 2003, 21: 713–720
- 31 Gao X, Tufvesson F, Edfors O, et al. Measured propagation characteristics for very-large MIMO at 2.6 GHz. In: *2012 Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals Systems and Computers (ASILOMAR)*, Pacific Grove, 2012. 295–299
- 32 Gao X, Edfors O, Rusek F, et al. Linear pre-coding performance in measured very-large MIMO channels. In: *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, San Francisco, 2011. 1–5
- 33 Flordelis J, Dahaman G, Tufvesson F. Measurements of large-scale parameters of a distributed MIMO antennas system in a microcell environment at 2.6 GHz. In: *7th European Conference on Antennas and propagation (EuCAP)*, Gothenburg, 2013. 3026–3030
- 34 Payami S, Tufvesson F. Channel measurements and very large array systems at 2.6 GHz. In: *6th European Conference on Antennas and propagation (EuCAP)*, Prague, 2012. 433–437
- 35 Martinez J, Heusdens R. On low-complexity simulation of multichannel room impulse responses. *IEEE Signal Process Lett*, 2010, 17: 667–670
- 36 Correia L M. *Mobile Broadband Multimedia Networks, Techniques, Models and Tools for 4G*. San Diego: Academic Press, 2006
- 37 Zhang C J, Bitmead R R. Subspace system identification for training based MIMO channel estimation. *Automatica*, 2005, 41: 1623–1632
- 38 Galvao R K H, Hadjiloucas S, Izhaç A, et al. Wiener-system subspace identification for mobile wireless mm-wave networks. *IEEE Trans Veh Technol*, 2007, 56: 1935–1948
- 39 Vanderveen M C, Van der Veen A J, Paulraj A. Estimation of multipath parameters in wireless communication. *IEEE Trans Signal Process*, 1998, 46: 682–690
- 40 Galvao R K H, Izhaç A, Hadjiloucas S, et al. MIMO Wiener model identification for large scale fading of wireless mobile communication links. *IEEE Commun Lett*, 2007, 11: 513–515
- 41 Madhusudhanan P, Li X, Liu Y, et al. Stochastic geometric modeling and interference analysis for massive MIMO systems. In: *11th International Symposium on Modeling Optimization in Mobile, Ad Hoc Wireless Networks (WiOpt)*, Tsukuba Science City, 2013. 15–22
- 42 Yoo T, Jindal N, Goldsmith A. Multi-antenna broadcast channels with limited feedback and user selection. *IEEE J Select Areas Commun*, 2007, 25: 1489–1491
- 43 Jose J, Ashikhmin A, Marzetta T L, et al. Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2011, 10: 2640–2651
- 44 Kudo R, Mcgeehan J, Armour S M D, et al. CSI estimation method based on random beamforming for massive number of transmit antenna systems. In: *2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Paris, 2012. 716–720
- 45 Mondal B, Hanlen R W, Hanlen L W. Quantization on the Grassmann manifold with limited feedback of channel state information. In: *Proceedings of IEEE International Conference Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Philadelphia, 2005
- 46 IEEE. IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications-Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band. P802.11ad/D6.0. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6171799>
- 47 IEEE. IEEE Draft Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between

- systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment to IEEE P802.11-REVmcTM/D4.0: Fast Initial Link Setup. P802.11ai/D4.0. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7051202>
- 48 Kuo P H, Kung H T, Ting P A. Compressive sensing based channel feedback protocols for spatially-correlated massive antenna arrays. In: IEEE Wireless Commun and Networking Conf (WCNC), Shanghai, 2012. 492–497
- 49 Hu A, Lv H, Gao H, et al. Pilot design for large-scale multi-cell multiuser MIMO systems. In: Proceedings of IEEE Int Conf communications (ICC), Budapest, 2013. 5381–5385
- 50 Chu J D C. Polyphase codes with good periodic correlation properties. IEEE Trans Inform Theory, 1972, 18: 531–532
- 51 Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. The multicell multiuser MIMO uplink with very antenna arrays and a finite-dimensional channel. IEEE Trans Commun, 2013, 61: 2350–2361
- 52 Jindal N. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback. IEEE Trans Inform Theory, 2006, 52: 5045–5060
- 53 Love D J, Heath R W, Strohmer T. Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems. IEEE Trans Inform Theory, 2003, 49: 2735–2747
- 54 Kudo R, Armour S M D, McGeehan J P, et al. A channel state information feedback method for massive MIMO-OFDM. J Commun Network, 2013, 15: 353–361
- 55 Choi J, Chance Z, Love D J, et al. Noncoherent trellis coded quantization for massive MIMO limited feedback beamforming. In: UCSD Information Theory and Applications Workshop, San Diego, 2013
- 56 Choi J, Love D J, Madhow U. Limited feedback in massive MIMO systems: exploiting channel correlation via noncoherent trellis-coded quantization. In: Information Sciences and Systems (CISS), Baltimore, 2013. 1–6
- 57 Sacristan D, Pascual-Isert A. Differential feedback of MIMO channel gram matrices based on geodesic curves. IEEE Trans Wirel Commun, 2010, 9: 3714–3737
- 58 Raghavan V, Jr R W H, Sayeed A M. Systematic codebook designs for quantized beamforming in correlated MIMO channels. IEEE J Select Areas Commun, 2007, 25: 1298–1310
- 59 Zirwas B Raaf W, Friederichs K J, Tirola E, et al. Vision for beyond 4 G broadband radio systems. In: IEEE Int Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Commun (PIMRC), Toronto, 2011. 2369–2373
- 60 Harashima H, Miyakawa H. Matched transmission techniques for channels with intersymbol interference. IEEE Trans Commun, 1972, 20: 774–780
- 61 Peel C B, Hochwald B M, Swindlehurst A L. A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna communication, part I: channel inversion and regularization. IEEE Trans Commun, 2005, 3: 195–202
- 62 Choi L U, Murch R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO system using a decomposition approach. IEEE Trans Wirel Commun, 2004, 3: 20–24
- 63 Murch R D, Muller R. Vector precoding for a single-user MIMO channel: matched filter vs. distributed antenna detection. In: ISABEL'08 First International Symposium on Applied Sciences on Biomedical and Communication Technologies, Aalborg, 2008. 1–4
- 64 Hochwald B M, Peel C B, Swindlehurst A L. A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna communication, part II: peturbation. IEEE Trans Commun, 2005, 53: 537–544
- 65 Windapassinger C, Fischer R F H, Huber J B. Lattice-reduction-aided broadcast precoding. IEEE Trans Commun, 2004, 52: 2057–2060
- 66 Venkatesan S, Lozano A, Valenzuela R. Network MIMO: overcoming intercell interference in door wireless systems. In: Asilomer Conf on Signals, Systems and computers, Pacific Grove, 2007. 83–87
- 67 Zhang J, Chen R, Andrews J G, et al. Networked MIMO with clustered linear precoding. 2009, 8: 1910–1921
- 68 Zhang H Y, Dai H Y. Co-channel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks. Euro J Wirel Commun Netw, 2004, 2004: 222–235
- 69 Lee C, Chae C B, Kim T, et al. Network massive MIMO for cell-boundary user: from a precoding normalization perspective. In: IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Anaheim, 2012. 233–237
- 70 Li H, Leung V C M. Low complexity zero-forcing beamforming for distributed massive MIMO systems in large public venues. J Commun Network, 2013, 15: 370–382
- 71 Hochwald B, Vishwanath S. Space-time multiple access: linear growth in the sum rate. In: Proceedings of 40th Annu Allerton Conf Commun, Conf Contr Comput, Monticello, 2002
- 72 Gomadam K S, Papadopoulos H C, Sundberg C E W. Techniques for multi-user MIMO with two-way training. In:

- Proceedings of IEEE International Conference Communications (ICC), Beijing, 2008. 3360–3366
- 73 Ryan D J, Collings I B, Clarkson I V L, et al. Performance of vector perturbation multiuser MIMO systems with limited feedback. *IEEE Trans Commun*, 2009, 57: 2633–2644
 - 74 Verdu S. *Multiuser Detection*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998
 - 75 Viswanath P, Tse D N C. Sum capacity of a vector gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality. *IEEE Trans Inform Theory*, 2003, 49: 1912–1921
 - 76 Chen R, Liu J S, Wang X. Convergence analyses and comparisons of Markov chain Monte Carlo algorithms in digital communications. *IEEE Trans Signal Process*, 2002, 50: 255–270
 - 77 Ngo H Q, Matthaiou M, Larsson E G. Performance analysis of large scale MU-MIMO with optimal linear receivers. In: *Communication Technologies Workshop (Swe-CTW)*, Lund, 2012. 59–64
 - 78 Vardhan K V, Mohammed S, Chockalingam A, et al. A low-complexity detector for large MIMO systems and multi-carrier CDMA systems. *IEEE Select Areas Commun*, 2008, 26: 473–485
 - 79 Sun Y. A family of likelihood ascent search multiuser detectors: an upper bound of bit error rate and a lower bound of asymptotic multiuser efficiency. *IEEE J Select Areas Commun*, 2009, 57: 1743–1752
 - 80 Zhao H, Long H, Wang W. Tabu search detection for MIMO systems. In: *IEEE Int Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun (PIMRC)*, Athens, 2007. 1–5
 - 81 Fincke U, Pohst M. Improved methods for calculating vectors of short length in a lattice, including a complexity analysis. *Math Comput*, 1985, 44: 463–471
 - 82 Larsson E G. MIMO detection methods: how they work. *IEEE Signal Process Mag*, 2009, 26: 91–95
 - 83 Yin B, Wu M, Studer C, et al. Implementation trade-offs for linear detection in large-scale MIMO systems. In: *Proceedings of IEEE International Conference Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Vancouver, 2013. 2679–2683
 - 84 Wu M, Yin B, Vosoughi A, et al. Approximate matrix inversion for high-throughput data detection in the large-scale MIMO uplink. In: *IEEE Int Symposium on Circuits and System (ISCAS)*, Beijing, 2013. 2155–2158
 - 85 Rajagopal S, Abu-Surra S, Pi Z, et al. Antenna array design for multi-Gbps mm-wave mobile broadband communications. In: *IEEE Global Telecommn Conf (GLOBECOM)*, Houston, 2011. 1–6
 - 86 Pi Z, Khan F. A millimeter-wave massive MIMO system for next generation mobile broadband. In: *Conference Record of the 46th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, Pacific Grove, 2012. 693–698
 - 87 Azar Y, Wong G N, Wang K, et al. 28 GHz propagation measurements for outdoor cellular communications using steerable beam antennas in New York City. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Budapest, 2013
 - 88 Larsson E, Edfors O, Tufvesson F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Commun Mag*, 2014, 52: 186–195
 - 89 Hoydis J, Hock C, Wild T, et al. Channel measurements for large antenna arrays. In: *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Paris, 2012. 811–815

Massive MIMO technology and challenges

ZHANG ZhongShan^{1*}, WANG Xing¹, ZHANG ChengYong² & LV ShaoBo¹

¹ *Technology Research Center for Convergence Networks and Ubiquitous Services University of Science and Technology Beijing (USTB), Beijing 100083, China;*

² *The fifth office, Tangjialing Road No. 1, Beijing Haidian district, Beijing 100094, China*

*E-mail: zhangzs@ustb.edu.cn

Abstract The explosive growth of wireless device usage has pushed the demand for wireless data to unforeseen levels, resulting in a serious spectrum shortage problem. Hence, the wireless research community is aiming to develop massive Multi-input Multi-output (MIMO) technology for increasing spectral efficiency (SE, as measured in bits/s/Hz) by one or two orders of magnitude, while simultaneously saving an order of magnitude (or more)

in transmit power. The main challenge in creating a massive MIMO device is performance erosion induced by pilot contamination. Furthermore, techniques associated with beamforming, precoding, and signal detection may significantly restrict the performance gains of massive MIMO systems. In this survey, we present a comprehensive list of potential massive MIMO techniques and highlight their pros and cons. We first evaluate the performance advantages of massive MIMO techniques in terms of capacity, SE, energy efficiency (EE, as measured in bits/Joule), transmit diversity, mutual coupling, etc. Afterward, we classify the massive MIMO techniques into four categories, namely channel measurement/modeling, channel estimation, beamforming/precoding, and signal detection. Finally, we discuss a critical issue associated with the implementation and standardization of millimeter-wave based massive MIMO systems.

Keywords massive MIMO, pilot contamination, channel modeling, channel estimation, beamforming, signal detection, spectral efficiency, energy efficiency



ZHANG ZhongShan was born in 1974. He received his B.E. and M.S. degrees in computer science from the Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT) in 1998 and 2001, respectively, and received his Ph.D. degree in electrical engineering in 2004 from BUPT. In February 2006, he joined the University of Alberta, Edmonton, AB, Canada, as a postdoctoral fellow. He is currently a Professor of

the School of Computer and Communication Engineering in the University of Science and Technology Beijing (USTB). His main research interests include statistical signal processing, synchronization and channel estimation in Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems, and cooperative communications.



WANG Xing was born in 1984. He received his B.S. degree in Electronic Information Engineering from the Electronic Engineering Institute (EEI), Hefei, China, in 2007. After six years' work associated with astronautics, he is currently working toward an M.S. degree at the Technology Research Center for Convergence Networks and Ubiquitous Services, University of Science and Technology Beijing (USTB). His current research interests include

mobile wireless communications theory, deep space communication, and cooperative relay communication.



ZHANG ChengYong was born in 1972. He received his B.S. degree in wireless communication from Chongqing Communication Institute (CQCI), Chongqing, China, in 1997. His current research interests include wireless communications theory, diversity, and cooperative communications. He is currently a communications engineer in the army.



LV ShaoBo was born in 1990. He received his B.S. degree in communication engineering from the University of Science and Technology Beijing (USTB), Beijing, China, in 2015. He is currently working toward an M.S. degree with the Technology Research Center for Convergence Networks and Ubiquitous Services, University of Science and Technology Beijing (USTB). His current research interests include wireless communications theory, information theory,

and massive MIMO.