

大规模MIMO的技术特性及其前景应用

曹思齐, 王秀程

2018年3月25日

摘要

随着电子无线通信技术的发展,更加高效的无线通信手段成为需求的焦点。继4G通信之后,5G通信的概念逐渐成型。而大规模MIMO的概念也在天线成本降低,电子技术发展的条件下应运而生。

大规模MIMO,也称大型MIMO系统,是一种通过使用带有大量物理天线的终端从而使其能够提供较普通终端更多通信流量的技术。由于其拥有大量的天线以及其他诸多特性,在实验中较之于传统通信设备表现出了出色的性能,但是在实际应用中仍然存在部分问题。

本文将从大规模MIMO的定义开始,由现有的实验数据及结果,对MIMO的具体功能和弊端作出详细描述,并且提出在大规模MIMO成熟以后,部分可能的应用前景

术已很难充分满足用户的服务需求。

为了满足日趋增长的用户需求,研究人员亟需制定第5代通信标准,并使频谱效率提升一个数量级。而作为未来5G关键技术之一的大规模多入多出(Massive Multiple-Input Multiple-Output)技术利用在基站侧布置100根以上天线的策略,使其不仅能够满足数据吞吐量的需求还能有效改善通信服务质量^[10],从而时信号的空间自由度和信道容量得到提高。文献^[9]则表明大规模MIMO系统能使频谱效率提升1~2个数量级。上述特性使得大规模MIMO有望成为未来5G通信系统中的核心技术^[3]。

本文主要研究大规模MIMO系统的技术特性及研究现状,并对前景应用做出了一定的展望。第2节介绍大规模MIMO系统的基本特性。第3节介绍大规模MIMO系统的优势。第4节则就大规模MIMO系统所面临的挑战进行了分析。第5节则主要讨论大规模MIMO系统的应用前景。

1 引言

随着第四代通信技术的不断完善与普及,使得我国移动互联网用户数量呈现爆发性增长,截至2017年12月,我国移动互联网用户数量已突破12.5亿户,电信业务总量同比增长72.2%,电信业务收入同比增长6.5%。移动互联网用户数的爆炸式增加,也使得现有的频谱资源数量及频谱利用效率难以完全满足用户日益增长的服务需求。

尽管利用更小更紧密的小区划分、更高阶的调制等技术可以在一定程度上提高频谱利用效率。但是面对移动互联网用户如此高速的增长,现有的技

2 大规模MIMO的基本特性

大规模MIMO由于通信终端众多,天线规模巨大,在理论和实践上与传统意义上的MIMO有着很大的区别,因此也具备了较传统MIMO更好的功能和特性。本节将以大规模MIMO与普通MIMO的不同点为基础,详细比较二者的性能优劣。

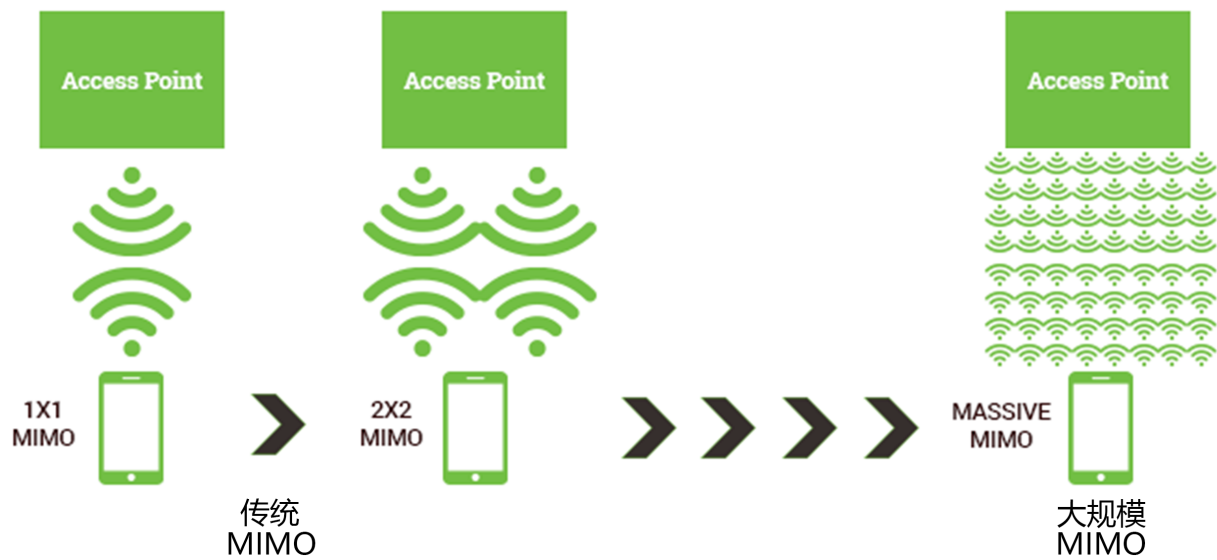


图 1: 天线规模的跃迁

2.1 大规模MIMO与传统MIMO系统的区别

2.1.1 天线规模的跃迁

在传统MIMO系统中天线数量一般不多于8根，而在大规模MIMO系统中，为利用天线的阵列增益。其天线的配置数量一般不低于100根

2.1.2 确定性提高

在传统MIMO系统中首先于信道矩阵的维数，其通道转角值一般是不确定的。而在大规模MIMO系统中由于矩阵维数的增加，对于其通道转角值的计算已经基本接近一个确切的数值

2.1.3 信道矩阵良好

相较于传统MIMO系统的信道矩阵，大规模MIMO系统中的信道矩阵条件则较为良好

2.1.4 其他各类性能的对比^[3]

综合来看大规模MIMO系统利用其天线数量所增加带来的增益，可以显著的提高信道质量与频谱效率等特性。但是由于天线数量得众多，使一定空间内的天线分布将更为紧密，甚至可能会有天线间

表 1: 其他各类性能的对比

	传统MIMO系统	大规模MIMO系统
信道质量	较低	优异
分集增益	低	较高
连接可靠性	普通	高可靠性
抗噪能力	低	高
阵列分辨率	普通	高
频谱效率	普通	高
信道相关性	低	较高
互耦效应	低	较高
导频污染	无	有

距小于发射信号的波长的情形出现，这将增加天线的互耦效应并使系统的空间分集性降低。因此大规模MIMO未来能否取得突破性进展，将在一定程度上取决于空间相关性于互耦效应间、一定空间内天线数量的增加与空间分集效应间矛盾的解决，与导频污染等关键性技术瓶颈的突破。

2.2 大规模MIMO的主要工作流程

- **信道估计** 在大规模MIMO中终端首先需要通过处理由基站发送而来的数据，来确定无线传输信

道的状态

- **预编码** 之后基站中的预编码器利用信道的状态信息，产生预编码矩阵，以对通信信号进行预处理
- **权值计算** 最后系统利用已生成的预编码矩阵，实现M个永辉数据流到N个天线数据流的交换。

2.3 天线特性

大规模MIMO 相对与传统MIMO的4~12个天线的数量，其天线的配置数量有一个数量级的上升，其基本含有100余个阵列天线，同时服务于一组单天线用户，并且其产生的复用增益可以由多个用户终端共享。

由于基站天线的配置数量增多，于是在信号分析的过程中，可采用大数定理以及中心极限定理。因此对于大规模MIMO系统的信号处理不必采用复杂的非线性运算来避免瑞利衰落、高斯白噪声和小区内干扰，而只需要采用简单的线性设计来实现较好的系统性能^[7]。

2.4 编码特性

传统的MIMO一般使用脏纸等非线性预编码方式，但随着MIMO系统中天线数目的激增，非线性的预编码方式会使基站侧的计算复杂度快速增加。因此在大规模MIMO系统中一般采用最大比发送（MRT）、迫零（ZF）、最小均方误差（MMSE）等线性预编码理论。而且在根据文献^[1]中提供的数据，瑞士隆德大学在实际测量中发现，在大规模MIMO系统中，采用MMSE等线性预编码方式，可以实现脏纸（DPC）预编码方式98%的性能^[2]。

2.5 全双工通信方式

2.5.1 FDD模式

即在基站于终端间的上下行链路采用不同的频段进行通信。由于上下链路的状态特性不同，终端需将导频信息传输至基站，以采集上行参数，之后用户接收基站计算出的加权参数，用于对上行链路

的计算。

但是在FDD模式下信道的导频符号开销正相关于基站的天线数目。于是在一定时间内可发送的数据符号有限的情况下，过大的导频开销会降低导频效率，而且用户为估计信道往往需要消耗大量的资源。这对于移动终端而言，将对电池的使用寿命造成较大的挑战。而过大的资源耗费则对FDD模式下的大规模MIMO系统的商业化造成了较大的困难^[6]。

2.5.2 TDD模式

在TDD模式中用户和基站使用相同的频段进行上下行通信。由此带来的最大优势便是导频接收所需要的时间不再与天线的数量相关，对终端的计算压力将大大降低。

而且我国工信部已正式将LTE TDD技术定位为我国自主3G标准TD-SCDMA技术的后继，因此可以预见LTE TDD技术的发展将受到我国政府的支持^[1,7]。

2.5.3 TDD还是FDD?

从工信部对增大我国在通信领域标准制定话语权方面来考虑，国家或许会对TDD技术的发展提供一定的技术支持，甚至政策福利。但是不论是工信部最新划分的5G试验频段还是日本、菲律宾等国与华为进行的5G技术试验。频谱波段一般都在25~30GHz等高频波段乃至最新的37~42.5GHz的高频波^[11]。在如此高频的波段下LTE FDD模式将具有显著的优势。

而且目前全球多个通信服务运营商已将FDD模式下的大规模MIMO技术发展列入其自身的商用计划。而且若TM9模式能日趋成熟将更加有利于FDD模式下大规模MIMO的发展。另外目前市场上已有20余款手机在硬件上支持TM9，这意味着，用户若想享用其技术革新带来的福利只需要在软件上进行一定的升级。对于运营服务商而言这无疑使一个利好消息。

2.6 电磁辐射特性

由于目前5G试验阶段的频谱一般都是高

于6GHz的高频率波段，其在空气中衰落率以及穿透率，将受到一定的挑战。所以在大规模MIMO系统中，一般推荐使用波束成形技术。区别于纯铜的基站于终端之间的单天线通信方式，在波束成形技术中，基站端将拥有数目众多的天线，而且其可以根据一定的算法自动地调节每个天线信号的相位，使其可以在用户接收端形成电磁波的叠加，从而打到提高接收信号强度的目的。

此外利用此技术，基站发射的能量可以汇集到用户所在的位置，并且基站可以实时的监测用户信号的变化，并对其实施信号跟踪监测，调整至最佳的发射方向，使终端所接收到的电磁信号始终处于信号叠加状态。

于是大规模MIMO系统利用基于多用户的波束成形原理，在基站侧布置大量天线，从而对不同的接收者调制其各自的波束。而且利用空间信号间隔，使同一频段的资源可以同时传输数十条信号^[4]。

2.7 空间分布特点

2.7.1 集中式：

其优点在于集中式的天线阵列分布利于空间的节省，而且避免了光纤通信的同步性问题。然而集中式的天线阵列其信道相关性过强，易使终端设备无法区分信道，导致天线的数量优势无法被完全利用。

2.7.2 分布式：

分布式的天线分布则有利于降低信道相关，使得信道易于区分。但是分布式的天线阵列空间占用而且不同的基站之间需用光纤连接，考虑到实际分布中基站很难做到完全均匀的分布，光纤信号的同步将是一个主要问题^[5]。

2.7.3 对比：

在目前看来集中式和分布式的MIMO系统均是利弊参半。而且单采用哪一种模式都具有一定的局限性。或许根据实际情景灵活的布置集中式和分布式MIMO更有利于大规模MIMO的商用化。譬如在

诸如CBD的核心城区以及大型居民区等人口密集、地价昂贵的区域则可以使用集中式的MIMO系统以减少对空间的利用。另外考虑到我国目前居民对基站辐射的但又，大量的建设分布式基站，可能会引起民意强烈的反抗。甚至导致诸如东莞刘家墩村类似的基站被迫全部拆除的极端事件的出现¹。

但是对于人口相对稀释的城郊与开发区，甚至空旷地带较为充沛的大学城中，由于土地资源较为充沛，可以近圆地配置基站，从而充分发挥大规模MIMO的天线数量优势。

3 大规模MIMO的优势

作为一个新兴的技术，大规模MIMO表现出了优异的性能，本节将从传输质量及功耗等方面介绍大规模MIMO对功能的优化以及能够带来的效益，以及大规模MIMO对现阶段信号传输终端所做的改进，对现有问题所作出的解决方案。

3.1 传输效率提升

在传统得单天线通信系统中，由于现实环境得复杂行，电磁波在传播过程中经过空气等媒介得多层反射之后，用户甚至最终可能接收到相位相反，互相削弱得信号，导致信号出现较大得衰落，进而影响用户得使用体验。但当基站的天线数量趋向于无穷时，则根据大数定理和中心极限定理，多个信号同时出现衰落的概率几乎可以忽略，进一步而言高斯白噪音和瑞立衰落亦可以极大的减小，从而使传输效率提高^[2]。

3.2 空间复用效益增强

目前无线通信数据业务的突出特点是：超过70%的流量业务，集中发生在20%左右的如CBD、大学城等热点区域之中。于是通信业务负荷高、容量不足，是目前此类地区共同面临的困境。而MU-MIMO（多用户MIMO）系统可以提供的较高的空间复用效益和波束成形技术，可以在时频资源有限

¹ 王晓易，通信基站遭村民抵制三大运营商联合停闭，大洋网-广州日报(广州)，2015-07-22.

的情况下增强多个用户之间的空间复用能力。从而减少大规模的通信对基站密度与带宽的需求。

3.3 能量利用率的提升

在理想状态下,大规模MIMO的发射功率与天线的数量成反比^[2,4,7]。即使在实际的非理想状态下,经验证其发射功率依然与天线的数量成平方根反比。在目前注重绿色环保的大背景下,其必将受到各国政府的重视。

另一方面,如果发射功率一定,大规模MIMO可以扩展操作空间,提高用户的使用体验。

3.4 覆盖功耗水平降低

在4G通信系统中,由于基站天线配置数量一般不多于8根,为满足一定区域内的信号覆盖,通常使用功率较高的射频组建,而且往往又需与之配备相应的散热装置,使得总体功耗较大。而在大规模MIMO系统中,由于天线的数量众多,可以利用波束成形技术,使得信号增益扩大,由此所需要得射频组件则有望降至毫瓦级^[2]。

3.5 3D传输能力增强

目前在大中型城市中高层建筑较多,如何使每个楼层都获得优质得通信服务是目前通信服务中得一大困境。现阶段一般采用多组天线来对所有楼层进行覆盖,然而其天线得布置站点又往往难以获取。而且信号再穿透墙壁之后会被较大程度得削弱,导致在一些大型CBD的内部,通信信号往往不佳。

但是大规模MIMO系统中其在垂直面上采用了大量的天线阵列,以保证高层覆盖。而且利用其波束成形技术可以灵活的调整波束的宽度与方向,于是可以在一定程度上增补信号在穿透过程中的损失^[11]。

3.6 可兼容性增强

在4G技术的发展过程中,MIMO技术已经有了较为成熟的技术积累,但是其天线配置一般不多于8个,不过好在目前正在研发中的MU-MIMO系统

与目前的协议以及已经商用化的4G终端存在可兼容行。这意味着现有的4G运营商可以在配置大规模MIMO系统享受其带来的竞争优势的同时,又可以从已有的4G网络部署中得到持续的投资回报,甚至使现有的投资回报增值。

3.7 终端压力减小

现有技术条件下若采用LTE TDD技术则可以将计算压力在基站端解决,有助于缩小终端的电池容量,从而开发更加轻薄的移动终端。

3.8 鲁棒性增强

由于在大规模MIMO中天线数量远多于终端数量,系统的空间自由度得到了很大的提高,并使得大量零空间出现在信道矩阵中。利用这些大量的零空间可以高效地处理许多干扰,增强了系统地抗干扰能力。而且由于天线数量大量增加使得可以利用大数定律和中心极限定理以抵抗高斯白噪声和瑞利衰落。而且天线数量地增加也使得系统的选择性和灵活性得到增强,有利于提高系统应对突发状况的能力^[7]。

4 大规模MIMO研究的主要挑战

虽然大规模MIMO表现出了出色的特性,但是在现阶段仍然处在概念阶段。要将大规模MIMO应用到实际的场景中,还存在诸多问题,因此目前还无法将其大规模地投入应用,本节将主要探讨目前研究过程中遇到的问题及挑战。

4.1 传播模式

现有阶段对大规模MIMO系统的研究主要基于贝尔实验室提出的独立同分布模型(IID)下进行的但是在实际验证中发现真实的天线相关系数明显大于贝尔实验室所提出的预期。若对于MIMO系统研究的模型出现重大错误,将使基于此模型进行的后续研究失去意义。因此尽快的提出一种能较好的拟

合试验数据的模型将有利于MIMO系统向更深层次发展^[6]。

4.2 导频污染

由于天线数量的激增, 高斯白噪声以及瑞利衰落和小区内干扰对大规模MIMO系统所造成的影响几乎可以忽略不计。然而导频污染则成为限制大规模MIMO发展的主要瓶颈之一。由于MIMO系统中符号周期要小于相干时间, 即使在LTE TDD 模式下用户可以使用不同的正交导频信号分别估计信道, 但是导频信息无法无限增多, 可能会使附近小区的用户使用相似的导频信息, 从而导致基站接收到非本小区用户的导频信号, 进而出现导频污染。由于目前对于导频污染现象国内外均没有较好的解决方案。于是对于降低导频污染的研究势必成为大规模MIMO系统研究中的热点问题^[6,7]。

4.3 FDD模式下的研究

由于下行信道估计得导频开销正比于天线数目, 因此过大的导频开销将降低频谱利用效率。而且终端对信道的估算也将对终端的电池使用寿命构成较大的挑战^[7]。

4.4 降低硬件开销的研究

传统的MIMO系统对于信号的处理, 通常需要对一个耗费昂贵的射频电路。然而伴随着天线数量的增加, 硬件于能量的开销也将变得十分昂贵。而且对于厂商而言, 为了降低硬件成本, 通常会采用使用低成本、低精度的硬件的方式。所以, 如何在如此情形下进行较为精确的信号处理, 将成为一个较为重要的研究方向^[12]。

5 大规模MIMO的前景应用

如果大规模MIMO可以被很好地应用到实际生活中, 将会给无线通信领域带来颠覆性的革新。尤其是在互联网方面, 现阶段诸多问题都可以得到有效解决, 并且由此可以进一步激发物联网和移动网

络的快速发展。本节将着重根据大规模MIMO的特性对其未来的部分应用作出推断。

5.1 更快更清晰的通信服务

根据大规模MIMO在北京的试验数据, 即使是目前依然存在种种技术阻碍的情形下, 利用64根天线组成的天线组, 其传输速率已经比传统的8天线组的传输高出了5倍左右。在蓝光、1080P等高清电影需求度渐增的现状下, 大规模MIMO系统为移动终端线上实时观看、下载高清视频提供了有利的支持。

5.2 3D、全息通信不再遥远

目前市场上已经出现了几款可以实现裸眼3D的移动游戏终端。伴随着消费者对视觉享受要求的日益提升, 裸眼3D显示将成为未来手机等终端制造商的一个角力点。而大规模MIMO的高速传输特性则有利于3D画质的网络实时对抗游戏的研发与普及。

而且在“2017重庆科技智能峰会暨Link开放日”中全息通信技术已经被提出, 全息通信相较于现有的语音与视频通信方式, 其在单位时间内所需的上行与下行流量将有一个数量级的提升。大规模MIMO则恰好能提供如此巨大的单位时间的上下行流量, 或许能带来通信方式的又一次变革。

5.3 利用相控阵天线技术提供廉价通信

随着“中华神盾”技术的实现, 我国的相控阵技术已接近成熟。而相控阵雷达技术在原理上和大规模MIMO有一定相同之处。而且若利用李世东教授提出的“超稀疏设计”, 则又希望解决克服相控阵的成本高昂、散热困难的难题。另外大规模MIMO相控阵天线的造价仅为5G基站系统的 $\frac{1}{3}$, 十分利于运营商降低服务成本。

5.4 降低Wi-Fi延迟

在现有的Wi-Fi 802.11ac标准中一个路由只能同时对一个用户终端提供服务。在标准制定初期, 家用终端数量不多的情况下, 该标准的缺陷还未能完全显现。然而随着家庭中移动终端数量的增加,

这种标准所造成的网络卡顿、延时变得十分明显。而且目前国内高校普遍采用Wi-Fi实现校园网覆盖，由于高校内用户众多，其产生的卡顿现象则尤为突出。若采用MU-MIMO技术则可以实现一个路由像多个用户终端提供服务。MU-MIMO可将信号在频域、空域、时域三个维度上进行分解，由于三个信号互不干扰，每个用户可以在同时得到相等的通信资源，从路由的角度出发，此项技术等同于将速度提高了2倍以上。

5.5 高速且廉价的移动数据

由于大规模MIMO的特性，允许同时小范围提供更大的数据流量，高速移动网络将成为现实，进而降低物联网和云计算的实现成本，将互联网融入世间万物。自动驾驶，智能家居，便携智能终端也将得到大规模的推广。

5.6 更优的卫星通信解决方案

位于地面的大规模MIMO天线阵列可以更加有效的和卫星进行高码率的通信，而卫星上也可以搭载MIMO天线阵列，这将使得空间通信更加高效，稳定，快捷，这将解决现在通信卫星所存在的诸多问题，甚至能够使星际间通信成为可能。

参考文献

- [1] E Bjornson, EG Larsson, TL Marzetta. Massive MIMO. Ten Myths and One Critical Question. IEEE Communications Magazine: 2015 , 54 (2) :114-123.
- [2] L Lu, GY Li, AL Swindlehurst, et al. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing: 2014, 8 (5): 742-758.
- [3] 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.
- [4] 杨中豪, 王琼, 乔宽. 面向 5G 通信的 Massive MIMO 技术研究. 中国新通信: 2015, 07, 101-103.
- [5] 王东明, 张余, 魏浩等. 面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术. 中国科学: 信息科学: 2016, 46: 3 - 21. doi: 10.1360/N112015-00296.
- [6] 尤力等. 大规模MIMO无线通信关键技术. 中兴通讯技术: 2014, 20(2): 26-28.
- [7] 戚晨皓, 黄永明, 金石. 数据采集与处理: 2015 (3) :544-551.
- [8] X Gao, O Edfors, F Rusek. Linear pre-coding performance in measured very-large MIMO channels: Vehicular Technology Conference: 2011: 1-5.
- [9] HQ Ngo, EG Larsson, TL Marzetta. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. IEEE Transactions on Communications: 2013, 61 (4) : 1436-1449.
- [10] F Rusek, D Persson, BK Lau, et al. Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays. Signal Processing Magazine IEEE, 2012, 30 (1): 40-60.
- [11] CMCC, Huawei, ZTE, et al. Massive MIMO WHITE PAPER. V 0.1. 8 9.
- [12] EG Larsson, O Edfors, F Tufvesson, et al. Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems. IEEE Communications Magazine: 2014, 52 (2): 186-195.