从MIMO到大规模MIMO

From MIMO to Massive MIMO

Paul Harris, Mark Beach and Simon Armour, University of Bristol;
Ian Mings, British Telecom

当我们迈向第五代（5G）无线网络时，智能手机的用户量和新的无线应用的增长，导致了预测的容量需求是长期演进（LTE）-4G的100倍以上[1]。这些预测现在正在被纳入到第3代合作伙伴计划（3GPP）的需求中，3GPP的标准化正在稳步进行[2]。近年来备受关注的一种物理层技术是大规模多输入多输出（MIMO），它能够将频谱效率大幅提升到前所未有的水平。

在一个可用频谱稀缺而昂贵的时代，这是一个极具吸引力的解决方案，让运营商可能在6GHz以下的频带内增加容量；并且，早在LTE 13版中就已经考虑到了被称作“全尺寸（FD）MIMO”的该技术的一种早期形式[3]。在取得很大进展之前，大规模MIMO还远非一个成熟的解决方案。当工程师们试图用商业可部署的解决方案取得理论上的收益时，对于学术界和工业界它都还只是一个活跃的研发领域。

从运营商的角度看，大规模MIMO能够帮助解决无线接入网络（RAN）中的两个关键挑战——容量和覆盖。对于移动运营商而言，频谱仍然是一种稀缺而较昂贵的资源，但也是RAN容量和速度的一个关键驱动力。在许多城市中尤为如此：其中基站的间距由容量决定，而非覆盖；这就需要一个密集的蜂窝部署，从而需要额外的开销来获取基站和场地。大规模MIMO空间复用带来的高频谱效率，提供了一个利用现有场地增大容量的机会。在蜂窝部署由覆盖而非容量驱动的区域中，也有机会利用大规模MIMO阵列的增益来提高基站的覆盖范围——特别是采用2~6GHz频谱的时候。

大规模MIMO的概念

大规模MIMO是利用多径散射来提高系统容量的多用户（MU）MIMO多天线技术的一种演进[4]。一般的MU-MIMO模型如图1所示，图中一个有M个天线的基站（BS），在同一个时-频资源上为多达K个单天线用户终端服务。M大于或等于K，严格地讲，终端可以各自有多根天线，但由于这并非一个必要条件，简单起见而忽略了这一点。所有的BS天线都有完整的RF链及它们之后的数字化，与大规模MIMO相关的信号处理仅应用于从射频头开始的每个信号通道。

当BS天线之间有足够的间距且多个用户终端足够分散时，在每个BS天线和用户终端之间就形成了独立的多径信道，在空间中提供了额外的自由度。对于每个用户终端，通过使用信道信息恰当地将符号预编码到BS天线上，这些空间的自由度就能够用于在同一个频段上同时为多个用户终端提供服务——这样一个过程就是空间复用。LTE Advanced和802.11ac Wi-Fi两个标准之中都已有MU-MIMO了。

在一个大规模MIMO系统中，BS天线的数量大增，远远超过了所服务的用户终端的数量，通常是其10倍。使用MU-MIMO时，这个自由度的增加，可以更好地保证用户之间的空间正交性，降低用户间干扰（IUI），提供一个更稳定、更确定的空间复用增益。大数值的阵列增益是可能的，它使得低功率的RF链能够达到同样的范围；大数定律也开始发挥作用，平均掉了噪声、快速衰落和硬件损伤的多种效应。

此外，在空间维度中获得的天然正交性允

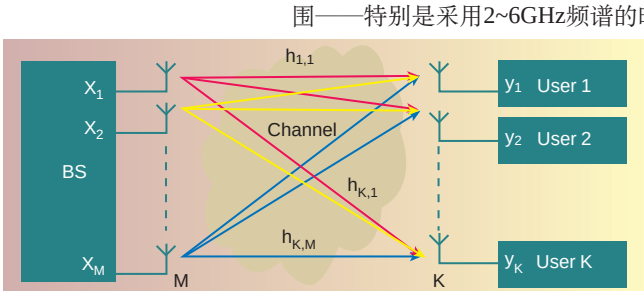

图1：MU-MIMO模型。

表1 线性解码/预编码技术一览

线性解码器/预编码器	说明
匹配滤波(MF)	又名最大比例合成/传输(MRC/MRT)。应用了共轭频域信道矢量，因而不考虑IUI。通常最适合低信噪比的情况。
迫零(ZF)	采用了直到零IUI的自由度。放大了噪声。高信噪比时，在大部分实际案例中优于MF。
正则迫零(RZF)	考虑了噪声对增强性能的影响(MMSE)的ZF。

许在BS上进行低复杂度的线性解码和预编码，减小了计算的开销和延迟。表1给出了常见的线性技术的一个概览。用户终端本身除了传输它的训练信号之外不需要做任何事情——其余的都交给了BS。大规模MIMO并不包括全部有一个大阵列天线的系统，其中一些系统通常执行更传统的波束控制（beam steering），而是特指那些使用数十或数百个数字RF链来实施健壮的空间复用的系统。

应该指出的是，虽然从一个阵列尺寸的角度看使用毫米波频率似乎很有吸引力，但这会带来几个问题：高的路径损耗、在整个GHz带宽上昂贵到不可行的全大规模MIMO处理（见表1）和快速的多径信道的退相干（decoherence）。基于这些原因，有大阵列的毫米波系统倾向于采用一种混合方法：用模拟波束控制来补偿链路预算，接着在模拟波束中使用一个降级的数字MIMO运算。

随着BS天线数量的增加，需要训练的信道数目也随之增加。为了避免不可行的训练开销并得到最大的容量，大规模MIMO必须工作在时分双工（TDD）模式下并利用信道的互易性。为了这样做，所需的正交训练信号的数量就不再取决于M，而仅取决于当前的用户终端数。然而，正在探索的是频分双工（FDD）大规模MIMO解决方案，因为世界上大部分4G网络目前都工作在这种模式下。

实现大规模MIMO

在过去的一年里，促使大规模MIMO问世的势头相当惊人。中兴通讯发布了一套Pre5G大规模MIMO BS[5]，通过多种试验展示了4~6倍的频谱效率提升；Nokia联合Sprint，在2017移动世界大会上展示了一个大规模MIMO解决方案[6]。Facebook构建了一个用于远程乡村接入的大规模MIMO原型[7]；甚至Intel也加入了这场派对，为大规模MIMO系统提供它自己的处理方案[8]。

回到这些开发工作的数年之前，2014年瑞典Lund大学与美国国家仪器公司的先进无线研究小组合作建造了世界上第一个大规模MIMO测试平台[9]。Bristol大学于2015年加入了合作，致力于正在进行的软件开发，使用相同的硬件构建了自己的大规模MIMO平台。这两个系统分别如图2和图3所示。这些系统完全是用商用现货硬件组件构建的，组件全部是用Gen-2 PCIe连接在一起的。表2给出了技术指标概览。

在实现这些系统时，有两个关键的挑战：数据处理和处理延迟。对于单独一个20MHz的LTE频段，每个RF链要产生和消耗30.72MS/s，使用4字节/样本时这相当于每链路122.9MB/s。对于一个128根天线的系统，这汇总为一个15.7GB/s的双向速率。不仅要处理大量的数据，还需要一个0.5ms的快速TDD切换周期来保证下行链路的信道有效性，这就给处理延迟提出了一个严苛的要求。图4所示的结构图显示了一个完整的10ms无线帧中的正交频分复用（OFDM）符号布局，特别是一个0.5ms时隙内的7个OFDM符号。接收到UL引导符号之后，所有频域资源块的预编码矩阵必须是可用的，并且仅三个OFDM符号（214μs）之后样本就要准备好发射了。

图2：Lund 100根天线大规模MIMO测试平台[13]。

利用基于Kintex 7 FPGA的软件定义无线电（SDR），在RF前端进行OFDM调制与解调，每链路的数据率得以降低。当每个复合样本采用3字节的子载波速率时，每条链路有50.4MB/s的双向吞吐量。于是通过细致的采样选路形成多个16根天线的子系统，来提供8条返回到中央MIMO协处理器的806.4MB/s的双向链路——一个正好小于6.5GB/s的总双向速率。在该系统的核心处，另外4只Kintex 7 FPGA执行128×12（M×K）的MIMO处理，每只FPGA处理四分之一的带宽（300个子载波）。

每个协处理器跨越PCIe的最大点对点连接速率是2.4GB/s，这意味着3个协处理器已能满足吞吐量的要求；然而，选择4个协处理器是为了进一步减轻低延迟设计的负担。每个协处理器必须为其负责的带宽部分完成信道估计并产生线性解码和预编码矩阵。设计中所包含的线性解码和预编码选项有匹配滤波（MF）、迫零（ZF）和正则ZF，后两种需要求解逆矩阵。

图3：Bristol 128根天线大规模MIMO测试平台，由Bristol大学和Bristol市政委员会合资的Bristol Is Open (BIO)管理。

通过具有部分平行脉动阵列的改进Gram-Schmidt方法，利用QR分解求解矩阵的逆[10]，主频为200MHz的这4只FPGA卡协处理器能满足140万矩阵/秒的吞吐量要求。显然，实现一个全数字的大规模MIMO解决方案

表2 系统指标

天线的数量	100(Lund)，128(Bristol)
终端的数量(空间复用)	12
每个链路的最大发射功率	15dBm
载波频率范围	1.2-6GHz (Bristol用的是3.51GHz)
带宽	20MHz
波形	LTE规格的OFDM(1200个15kHz子载波)
调制	QPSK，16-QAM，64-QAM，256-QAM
双工	TDD (0.5ms的切换周期)
MIMO解码/预编码	ZF、正则ZF和匹配滤波(MF)

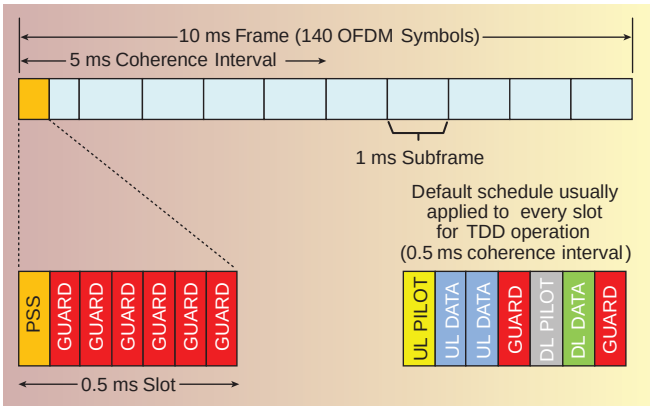

图4：类似于TD LTE的PHY帧结构图。

图5：室内试验1：Bristol大学的下中庭[14]。

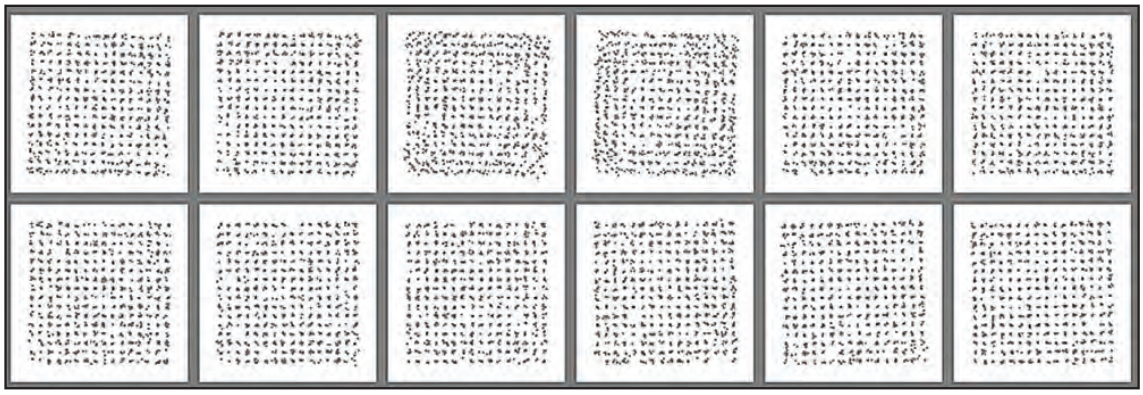

图6：室内场景1中，ZF解码后每个用户终端的星座图[14]。

再次采用了256-QAM传输，这可能实现多达22个用户终端的空间复用，通过后仿真推测可实现约146bits/s/Hz（仅20MHz的带宽中约3Gb/s）的频谱效率。图8所示的接收星座图再次显示了ZF极好地减轻了IUI。在此

绝非易事，但这些系统进一步展示了频谱效率的提高可以有多么巨大[11,12]。

极限频谱效率

通过增强MU-MIMO的空间复用，大规模MIMO通过在同一时-频资源上服务于多个用户终端而提供了将频谱效率提升到空前水平的机会。虽然理论结果充满希望，但直到最近还鲜有取得这些提升的切实方法的公开演示。

2016年初，采用新开发的实时系统，Bristol大学和Lund大学首次冒险走出实验室去看一看什么是有可能的。在Bristol大学的一个室内中庭环境中，采用一个5.4m长的112个偶极天线的线性阵列，为距离18m处的12个用户终端提供服务(图5)。用户终端是紧密排列的（2.5至6λ），并且上行链路只使用256-QAM传输。在此场景下，得到了一个约80bits/s/Hz的破纪录的频谱效率，每个用户终端的速率是132Mb/s；在20MHz的带宽内，总速率是1.59Gb/s。图6中清晰的接收星座图显示了该系统仅用线性解码（ZF）降低IUI的效果已有多好。

第一次试验两个月之后，装备了一个新的128单元贴片阵列天线，在同一栋大楼的上中庭进行了第二次室内试验。这一次，改为向24个用户终端提供服

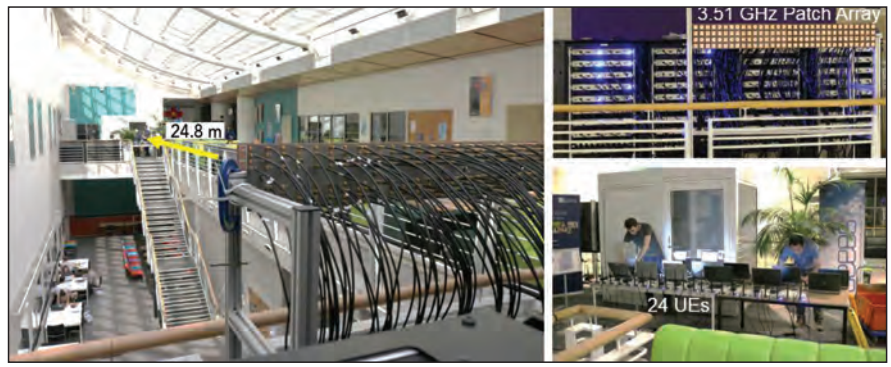

图7：室内试验2：Bristol大学的上中庭[15]。

务，目的是看一看它实际上能达到的极限。如图7所示，BS和用户终端被放置在中庭的两端，相距约25m。BS阵列是4×32的结构，H&V交替极化，因此仍然表现出方位角的优势；用户终端排成一条直线，间距和第一次试验的2.5~6λ相同。

上行链路中

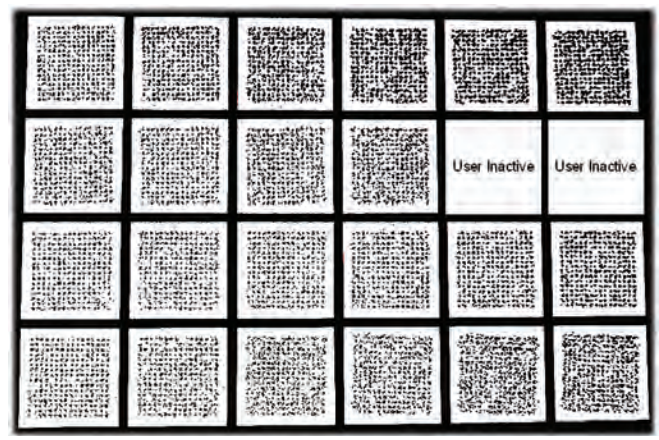

图8：室内试验2中，ZF解码后22个用户的下行链路星座图[15]。

图9：在Adastral Park（英国电信研发中心），Bristol大规模MIMO测试平台从24个用户端接收64–QAM信号。

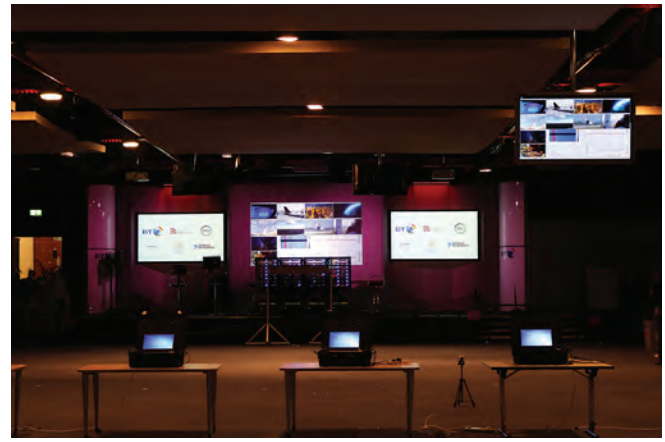

图10：Bristol大规模MIMO测试平台演示了来自10个用户的空间复用高清视频传输。

场景下，添加第23个用户引起了SINR的显著降低[14,15]。

为了获得网络运营商的认可，2017年初，这两所大学和美国国家仪器联合英国电信（BT）在英国Suffolk的Adastral Park的BT实验室进行了多次试验[16]。在一个展厅环境中使用128根天线系统，向24个用户终端提供空中（OTA）同步和高达64-QAM的调制服务，推算频谱效率超过了100bits/s/Hz（图9）。同时，还演示了来自10个用户的空间复用高清视频传输（图10）。与Bristol大学的第二个室内试验相比，这显示了空间复用的性能在不同环境下会如何变化。这些结果表明了大规模MIMO可能带来难以置信的收益，下一步是要考虑户外的环境和用户终端的移动性。

移动性

预计移动性将给大规模MIMO带来问题，原因是信道老化对解码和预编码的影响。使用一种诸如迫零的线性技术，可以在大规模MIMO中给干扰用户们设置更深的零位以得到更高的精度，但这样做会减少误差的裕量。系统会对终端移动所导致的IUI急速上升更加敏感。增加信道回响间隔可能有助于克服这个问题，但这最终会消耗相干间隔并限制可以服务的用户终端的数量。

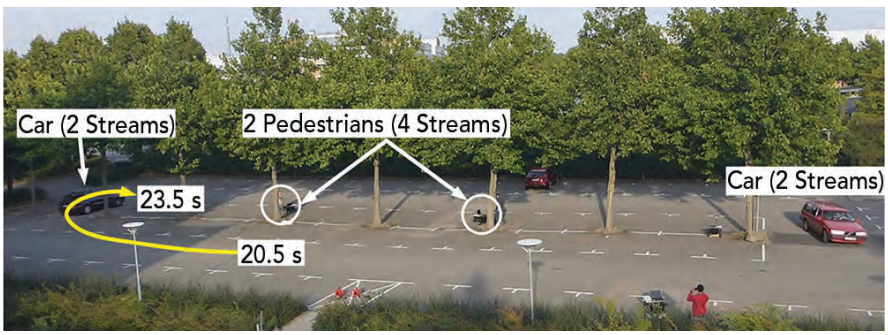

图11：从BS看到的信号衰减场景[13]。

2016年夏季，Lund大学和Bristol大学进行了工作在移动信道条件下的大规模实时MIMO系统的世界首次公开演示。工作在3.7GHz、有100根天线的Lund BS放置在一幢三层楼的屋顶上，为30~50米开外的停车场内行驶速度高达50km/h的汽车提供服务。该场景主要是直线传输（LOS）的，采用了一个4×25、方位角主导的BS天线阵列以及H&V交替极化。8个用户终端的上行和下行传输都是空间复用的，并且每个终端以0dBm的固定功率传输。

采用没有功率控制、用户分组或编码的QPSK时，该场景中全部8个用户实现的第80个百分位的实时误码率（BER）对于上行链路是1%、下行链路是10%。

这次测量试验的一些重要结论来自于对所测信道数据的时间分析。对于感兴趣的周期，通过确保上行链路引导符号是在等于或高于Nyquist空间率（λ/2样本间距）时被捕获，可以形成信道行为随时间变化的一幅精确图像。图11显示了一个场景的一部分，图中观测到了BS和一个汽车用户终端之间的复合信道幅度（composite channel magnitude）。这是从BS阵列看到的，目标汽车在3秒钟内的路径用一根黄色箭头示出。

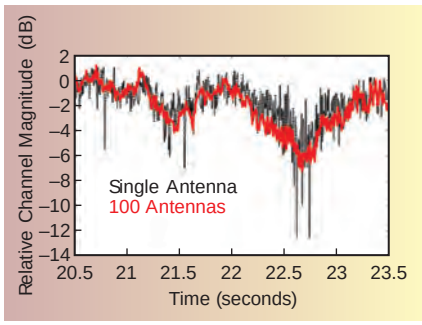

图12：信道大小随时间变化的对比：100根天线与单天线[13]。

图13：汽车2的时间相关场景[13]。

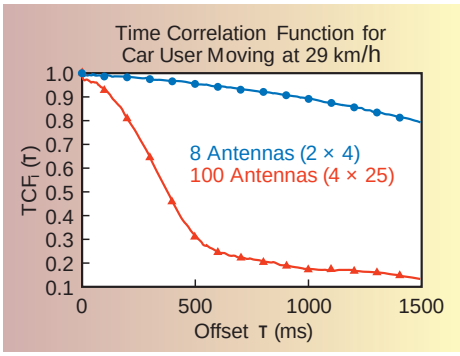

图14：信道去相关的对比：100根天线与8根天线[13]。

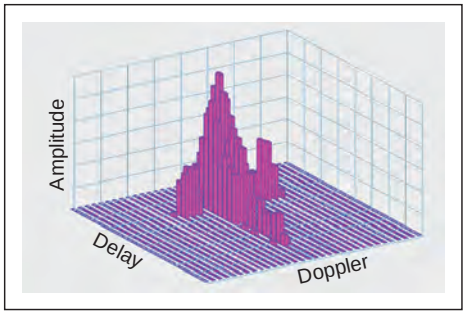

图15：OTFS的延迟-多普勒域[18]。

图12比较了100根天线与单根BS天线在同一个3秒钟的周期内的归一化复合信道幅度。由于空间分集的巨大增益，大规模MIMO平滑掉了单天线所经历的类Rician衰落。事实上，检查同一周期中功率与时间的相关性，表明100根天线的功率控制更新率可以减小5倍。

如上所述，移动性给大规模MIMO带来的一个关键问题是信道去相关的速度提高。为了深入了解其可能产生的影响，如图13所示构建了第二种场景。目标用户是汽车2，它以29km/h的速度沿着箭头方向穿过停车场，以这个车速，5ms的信道捕获率可以满足Nyquist速率。然后对该用户的信道矢量进行时移相关，其结果如图14所示。通过比较100根天线与8根天线的结果，可以清楚地看到去相关率的显著提高。

这里，100根天线系统所经历的去相关率是8根天线系统的7倍之大。125ms中有90%以上的相干时间仍然相当大了，但一个有最小散射的户外LOS代表了信道相干最好的一个示例。除了最近公布的这些结果之外[13]，其它的测量已经开始表明非直线传输（NLOS）场景下情况有多么严峻，有一个报道是500ms中90%的相干时间仅可支持0.1km/h的移动性[17]。

展望未来

大规模MIMO已经为实现前所未有的频谱效率奠定了基础，并且将成为5G无线通信系统中一个毋庸置疑的功能。尽管毫米波技术在进步，但6GHz以下技术的传播特性在很多场景下更令人满意，因此要从较低的频段中榨取更多收益，大规模MIMO就至关重要。

乍看上去，似乎高移动性会导致大规模MIMO部署的一些困难，但这是否成为一个难题取决于它瞄准的应用和环境。在室外——更大范围的LOS场景——具有典型车速的信道去相关率可能用很少的训练开销就行得通。另一方面，NLOS，具有丰富的多径散射的城市密集环境能提供更快速的信道去相干，但这要在步行速度下才行得通。

一个令人兴奋的机会是全面改变我们看待信道和调制信号的方式，一种被称为正交时间频率和空间调制（OTFS）的新兴无线调制技术就是这么做的[18]。OTFS在延迟-多普勒域中构造一个无线信道的二维表示（图15），而非摄取频域中信道的快照。通过选择合适的时间和带宽的观测区间，就像雷达那样标记每个多径分量的延迟和多普勒频移，这就在本质上提供了一个完整的无线信道表示。由于环境和多普勒轨迹的变化与时变的多径信道相比较慢，延迟-多普勒的相干时间要比频域中的大。

这意味着OTFS可以使闭环大规模MIMO工作在OFDM不能工作的环境中。通过使用二维基向量在延迟-多普勒域中进行调制，每个符号的能量在时间和频率上分散开，就能利用无线信道的全部分集。结果是一个静态的信道响应和稳定的SNR。初步的结果已经表明，OTFS不仅优于OFDM，还能在500km/h的速度下使用64-QAM工作，而OFDM在此速度下为了有一个适当的块误码率（BLER）而必须降低到16-QAM。

然而，除了以上所述，大规模MIMO在成为运营商的主流之选之前还有许多难题需要解决。这些难题包括：

- 基于有源天线单元（AAU）的大规模MIMO装置的维护成本可能更高，因为AAU中无线电电子器件与天线集成并安装在无线电塔的顶端。这些只能由熟练的安装团队来维护。尽管这一问题可能部分缓解：一个单元的失效可能不会对整体性能有重大影响，但仍需要进一步的研究。
- 大规模MIMO系统对辐射功率极限的影响。来自于这些系统的潜在天线增益可能对国际非电离辐射防护委员会（ICNIRP）的合规性有显著的影响。
- 是否有执行大规模MIMO无线电规划的工具。■

参考文献

1. Ericsson, “Ericsson Mobility Report,” www.ericsson.com/en/mobility-report.
2. T. Norp, “5G Service Requirements,” 27 February 2017, www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1831-sa1_5g.
3. D. Flore, “Evolution of LTE in Release 13,” 18 February 2015, www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1628-rel13.
4. T. L. Marzetta, “Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas,” 7 October 2010, www.ieeexplore.ieee.org/document/5595728/.
5. ZTE, “Pre5G Massive MIMO Base Station,” 2017,www.zte.com.cn/global/products/wireless/Base-Station-Series/Pre5G-Massive-MIMO-Base-Station.
6. Nokia, “Nokia and Sprint Demonstrate Massive MIMO at MWC17,” 27 February 2017,www.nokia.com/en_int/news/releases/2017/02/27/nokia-and-sprint-demonstrate-massive-mimo-at-mwc17.
7. C. Metz, “Facebook’s Massive New Antennas Can Beam Internet for Miles,” Wired, 13 April 2016, www.wired.com/2016/04/facebooks-massive-new-antennas-can-beam-internet-miles/.
8. Intel, “Intel Accelerates the Future with World’s First Global 5G Modem,” 4 January 2017,www.newsroom.intel.com/editorials/intel-accelerates-the-future-with-first-global-5g-modem/.
9. National Instruments, “National Instruments and Lund University Announce Massive MIMO Collaboration,” 24 February 2014, www.ni.com/newsroom/release/national-instruments-and-lund-university-announce-massive-mimo-collaboration/en/.
10. Y. Rao, “Implementing Modified QR Decomposition in Hardware,” U.S. Patent US20140214910 A1, 31 July 2014.
11. S. Malkowsky, J. Vieira, K. Nieman, N. Kundargi, I. Wong, V. Owall, O. Edfors, F. Tufvesson and L. Liu, “Implementation of Low-Latency Signal Processing and Data Shuffling for TDD Massive MIMO Systems,” 12 December 2016, www.ieeexplore.ieee.org/document/7780107/.
12. S. Malkowsky, J. Vieira, L. Liu, P. Harris, K. Nieman, N. Kundargi, I. C. Wong, F. Tufvesson, V. Owall and O. Edfors, “The World’s First Real-Time Testbed for Massive MIMO: Design, Implementation and Validation,” 18 May 2017, www.ieeexplore.ieee.org/document/7931558/.
13. P. Harris, S. Malkowsky, J. Vieira, F. Tufvesson, W. B. Hasan, L. Liu, M. Beach, S. Armour and O. Edfors, “Performance Characterization of a Real-Time Massive MIMO System with LOS Mobile Channels,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), Vol. 35, No. 6, 2017, pp. 1244–1253.
14. P. Harris, S. Zhang, M. Beach, E. Mellios, A. Nix, S. Armour, A. Doufexi, K. Nieman and N. Kundargi, “LOS Throughput Measurements in Real-Time with a 128-Antenna Massive MIMO Testbed,” presented at IEEE Globecom 2016, Washington D.C., 2016.
15. P. Harris, W. B. Hasan, S. Malkowsky, J. Vieira, S. Zhang, M. Beach, L. Liu, E. Mellios, A. Nix, S. Armour, A. Doufexi, K. Nieman and N. Kundargi, “Serving 22 Users in Real-Time with a 128-Antenna,” presented at IEEE International Workshop on Signal Processing Systems, Dallas, 2016.
16. University of Bristol, “Bristol and BT Collaborate on Massive MIMO Trials for 5G Wireless,” 24 February 2017, www.bris.ac.uk/news/2017/february/massive-mimo-trials.html.
17. C. Shepard, J. Ding, R. E. Guerra and L. Zhong, “Understanding Real Many-Antenna MU-MIMO Channels,” presented at Conference on Signals, Systems and Computers, 2016 50th Asilomar, Pacific Grove, Calif., 2016.
18. Cohere Technologies, “Constant 1 Gbps at 500 Km/h,” 2017, www.cohere-technologies.com/.
19. R. Hadani, S. Rakib, M. Tsatsanis, A. Monk, A. J. Goldsmith, A. F. Molisch and R. Calderbank, “Orthogonal Time Frequency Space Modulation,” presented at Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017 IEEE, San Francisco, 2017.