

# Massive MIMO和波束赋形： 5G流行词背后的信号处理

作者：Claire Masterson

共享



## 简介

我们对高速移动数据的渴求是无止境的。可是在城市环境中可用RF频谱已经饱和，显然需要提高基站收发数据的频谱利用率。

基站包含大量天线，因此，提升基站频谱效率的一种方案是通过这些天线实现同一频率资源与多台空间上分离的用户终端同时通信，并利用多径传输。这种技术常被称为massive MIMO（大规模多入多出）。您可能听到过massive MIMO被描述为大量天线的波束赋形。随之而来的问题是：何谓波束赋形？

## 波束赋形与Massive MIMO的关系

不同的人对于波束赋形这个词有着不同的理解。波束赋形是指根据特定场景自适应的调整天线阵列的辐射图。在蜂窝通信中，许多人认为波束赋形是将天线功率主瓣指向用户，如图1所示。调整各天线收发单元幅度和相位，使得天线阵列在特定方向上的发射/接收信号相干叠加，而其他方向的信号则相互抵消。一般不考虑阵列和用户所处的空间环境。这是波束赋形，不过只是它的一种特别实现。

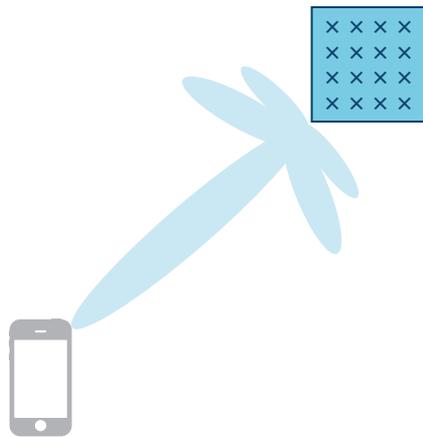


图1. 传统波束赋形

Massive MIMO可被视为更广泛意义上的波束赋形的一种形式，不过它与传统形式相去甚远。*Massive*意指基站天线阵列中的大量天线；*MIMO*意指天线阵列使用同一时间和频率资源满足空间上分离的多位用户的需求。*Massive MIMO*也认为在实际系统中，天线与用户终端—以及相反过程—之间传输的数据经过了周围环境的滤波。信号可能会被建筑物和其他障碍物反射，这些反射会有相关的延迟、衰减和抵达方向，如图2所示。天线与用户终端之间甚至可能没有直接路径。人们发现，这些非直接传输路径同样有利用价值。

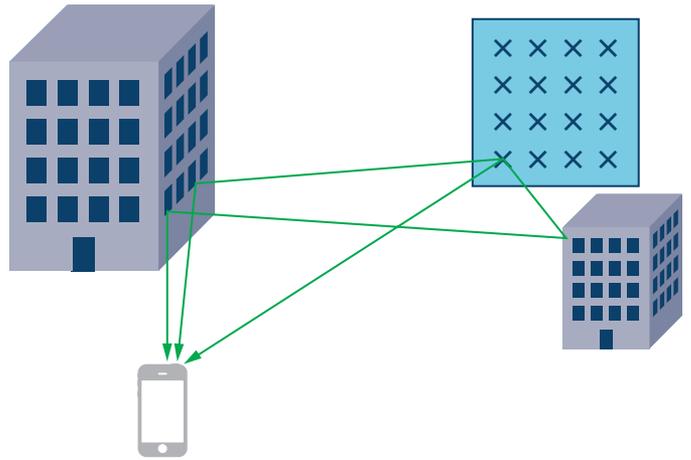


图2. 天线阵列和用户之间的多路径环境

为了利用多路径，天线元件和用户终端之间的空间信道需要加以表征。文献中一般将这种响应称为信道状态信息(CSI)。此CSI实质上是各天线与各用户终端之间的空间传递函数的集合。用一个矩阵(H)来收集此空间信息，如图3所示。下一节将详细讨论CSI概念及其收集方法。CSI用于数字化编码和解码天线阵列所收发数据。

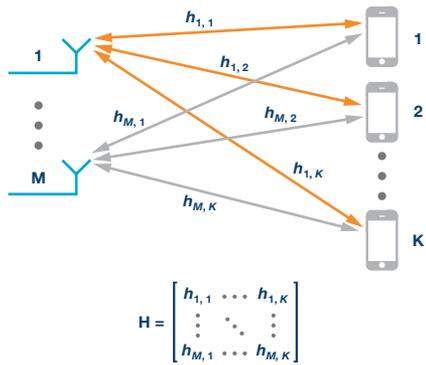


图3. 表征massive MIMO系统需要信道状态信息

### 表征基站与用户之间的空间信道

不妨考虑一个有趣的类比：一个气球在某个位置被戳破了，发出“啪”的一声，在另一个位置记录此声音或脉冲，如图4所示。在麦克风位置记录的声音是一个空间脉冲响应，其包含的信息是周围环境中气球和麦克风在该特定位置所独有的。与直接路径相比，被障碍物反射的声音会有衰减和延迟。

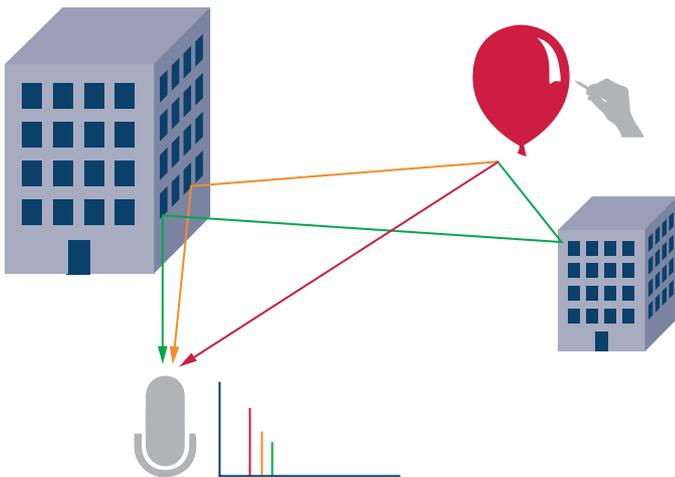


图4. 通过声音类比说明信道的空间特性

如果扩大该类比以模拟天线阵列/用户终端场景，那么需要更多气球，如图5所示。注意，为了表征各气球与麦克风之间的信道，我们需要在不同时间戳破各气球，使得麦克风记录的不同气球的反射不会重叠。另一方面也需要表征，如图6所示。本例中，可以在用户终端位置的气球戳破时同时完成所有录音。这样所花的时间要少得多！

图3. 去耦对AD8000运算放大器性能的影响

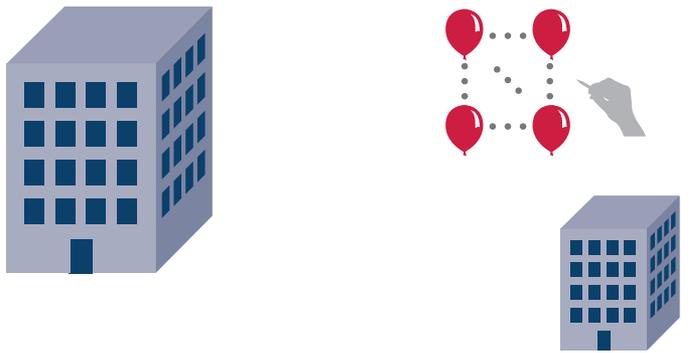


图5. 通过声音类比下行链路信道表征

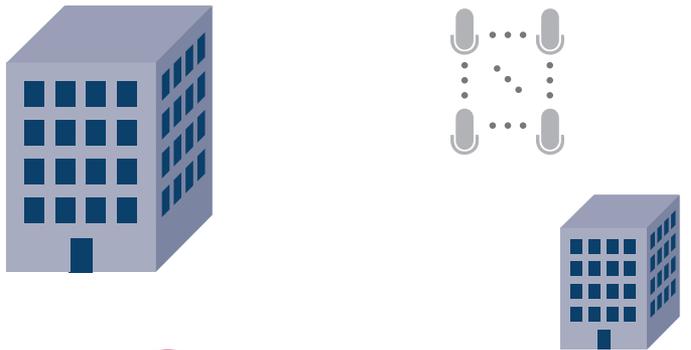


图6. 通过声音类比上行链路信道表征

RF领域利用导频信号表征空间信道。天线与用户终端之间的空中传输信道是互易的，即该信道在两个方向是相同的。这与系统工作在时分复用(TDD)模式还是频分复用(FDD)模式有关。在TDD模式下，上行链路和下行链路传输使用相同频率资源。互易性假设意味着只需要在一个方向上表征信道即可，上行链路信道是显而易见的选择，因为只需要将一个导频信号从用户终端发送，并由所有天线元件接收。信道估计的复杂度与用户终端数成比例，而非与阵列中的天线数成正比。这点非常重要，因为用户终端可能在移动，故信道估计需要频繁进行。基于上行链路表征还有一个重要优势，那就是所有繁重的信道估计和信号处理任务皆在基站完成，而非在用户端完成。

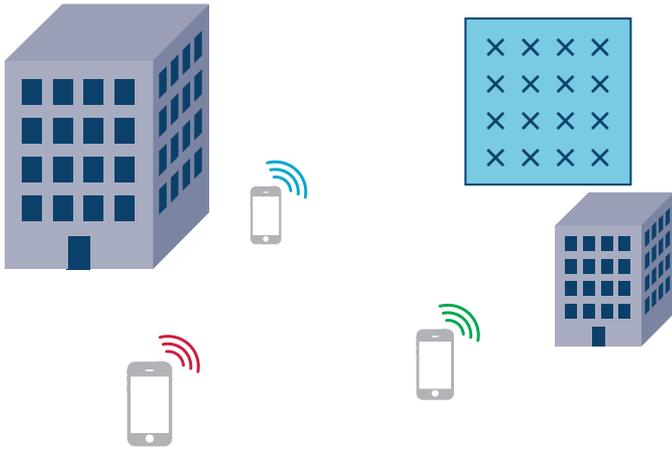


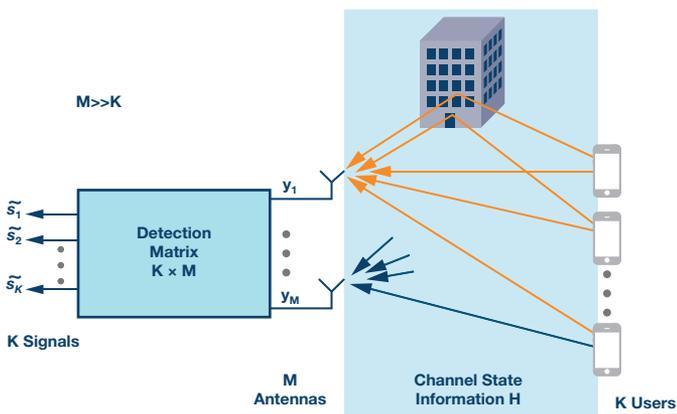
图7. 每个用户终端发射正交导频符号

现在，收集CSI的概念既已建立，那么如何将此信息应用于数据信号以支持空间复用呢？滤波基于CSI而设计，以对天线阵列传输的数据进行预编码，使得多路径信号会在用户终端位置相干叠加。这种滤波还可以用来线性组合天线阵列RF路径收到的数据，从而检测来自不同用户的数据流。下一节更详细讨论这个问题。

### 支持Massive MIMO的信号处理

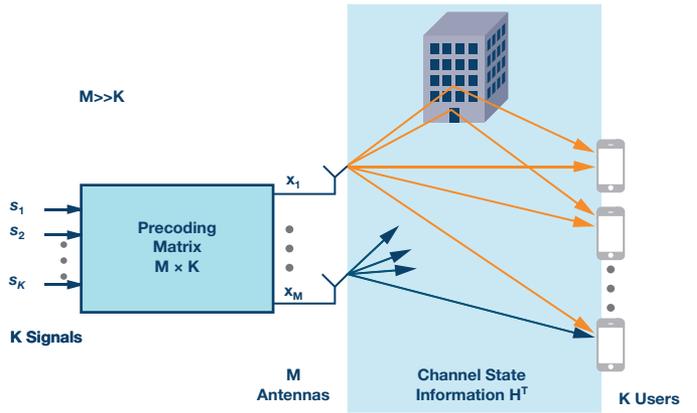
上一节介绍了如何估计CSI（用矩阵H表示）。检测和预编码矩阵基于H计算。这种矩阵有多种计算方法。本文重点讨论线性方案。线性预编码/检测方法的例子有最大比率(MR)、迫零(ZF)和最小均方误差(MMSE)。本文未提供从CSI导出预编码/检测滤波器的全过程，但讨论了其优化标准及每种方法的优缺点。关于这些话题的更详细介绍，请参阅文末给出的参考文献<sup>1,2,3</sup>。

对于上述三种线性方法，图8和图9分别显示了上行和下行链路中信号处理的工作方式。针对预编码，可能还有某种缩放矩阵，用以归一化阵列上为简单起见而忽略的功率。



检测类型	
最大比率(MR)	$\tilde{s} = H^H y$
迫零(ZF)	$\tilde{s} = (H^H H)^{-1} H^H y$
NMSE或RZF	$\tilde{s} = (H^H H + \beta I)^{-1} H^H y$

图8. 上行链路信号处理<sup>H</sup>表示共轭转置。



预编码类型	
最大比率(MR)	$x = H^T s$
迫零(ZF)	$x = H^T (H^T H)^{-1} s$
NMSE或RZF	$x = H^T (H^T H + \beta I)^{-1} s$

图9. 下行链路信号处理<sup>T</sup>表示转置。\*表示共轭。

顾名思义，最大比率滤波旨在最大程度提高信噪比(SNR)。从信号处理角度看，这是最简单的方法，因为检测/预编码矩阵刚好是CSI矩阵H的共轭转置或转置。其最大缺点是忽略了用户间干扰。

迫零预编码试图解决用户间干扰问题，通过设计优化标准来使其最小。检测/预编码矩阵是CSI矩阵的伪逆。伪逆的计算开销高于MR情况中的复共轭。然而，由于太注重降低干扰，用户的接收功率会受影响。

MMSE试图在放大信号与降低干扰之间取得平衡。这种整体观需付出的代价是信号处理复杂度较高。MMSE方法给优化引入了一个正则项——在图8和图9中表示为 $\beta$ ——利用它可以找到噪声协方差与发射功率的平衡点。此方法在文献中有时也被称为正则化迫零(RZF)。

以上并未囊括所有预编码/检测技术，只是简单介绍了主要线性方法。另外还有非线性信号处理技术，例如脏纸编码和连续干扰消除便可用来解决此问题。这些方法可提供最优容量，但实现起来非常复杂。上述线性方法对massive MIMO而言一般是足够的，天线数目可以很大。预编码/检测技术的选择取决于计算资源、天线数目、用户数目和系统所处环境的多样性。对于天线数目远大于用户数目的大天线阵列，最大比率方法可能足以满足需要。

### 现实系统向Massive MIMO提出的实际挑战

在现实场景中实现massive MIMO时，还有其他实际问题需要考虑。举个例子，假设一个天线阵列有32个发射(Tx)信道和32个接收(Rx)信道，工作在3.5 GHz频段。那么需要放置64个RF信号链，在给定工作频率下，天线间距约为4.2 cm。这说明，有大量硬件需装入一个很小的空间中。它还意味着会耗散大量功率，不可避免会带来温度问题。ADI公司的集成收发器为此类问题提供了高效解决方案。下一节将详细讨论AD9371。

上文讨论了利用系统的互易性来大幅削减信道估计和信号处理开销。图10显示了一个实际系统中的下行链路信道。它分为三个部分：空中信道(H)、基站发射RF路径的硬件响应( $T_{BS}$ )和用户接收RF路径的硬件响应( $R_{UE}$ )。上行链路与此相反， $R_{BS}$ 表征基站接收硬件RF路径， $T_{UE}$ 表征用户发射硬件RF路径。互易性假设虽然对空中接口成立，但对硬件路径不成立。由于迹线不匹配、RF路径间同步不佳和温度相关的相位漂移，RF信号链会给系统带来误差。

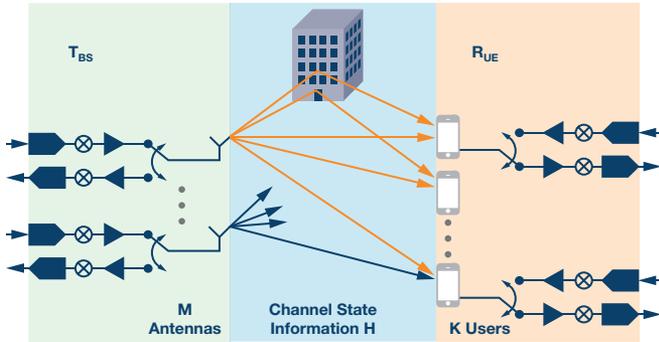


图10. 实际下行链路信道

对RF路径中的所有LO（本振）PLL使用同一同步参考时钟，并对基带数字JESD204B信号使用同步SYSREF，有助于解决RF路径间的延迟问题。但在系统启动时，RF路径之间仍会有通道间的相位失配，由温度引起的相位漂移会进一步扩大此问题。因此很显然，系统在启动时需要初始化校准，此后运行中需要周期性校准。通过校准可实现互易性优势，使信号处理复杂度维持在基站，并且只需要表征上行链路信道。这样可获得一般意义上的简化，从而仅需要考虑基站RF路径（ $T_{BS}$ 和 $R_{BS}$ ）。

有多种方法可校准这些系统。一种是在天线阵列前面放置一个校准天线，利用此校准天线来校准接收和发射RF信道。以这种在阵列前方放置一根天线的方式是否满足实际系统校准的需求，是有疑问的。另一种方法是利用阵列中现有天线之间的互耦作为校准机制，这有很高的可行性。最简单直接的方法或许是在基站中的天线之前增加一些无源耦合路径。这会增加硬件复杂性，但应能提供一个鲁棒的校准机制。为了全面校准系统，从一个指定校准发射信道发送一个信号，所有RF接收路径通过无源耦合连接接收该信号。然后，每个发射RF路径依次发送一个信号，该信号在各天线的耦合点被接收，被传回到一个合路器，再被送至指定校准接收路径。温度相关效应的变化一般很慢，故与信道特性不同，无需频繁执行温度相关校准。

### ADI公司收发器和Massive MIMO

ADI公司的集成收发器产品系列特别适合需要高密度RF信号链的应用。AD9371具有2个发射路径、2个接收路径和一个观测接收机，并有3个小数N分频PLL用于RF LO生成，采用12 mm × 12 mm封装。这一无与伦比的集成度使得制造商能够及时且经济高效地创建复杂系统。

图11显示了一个使用多个AD9371收发器的可能系统实现。该系统有32个发射信道和32个接收信道，采用16个AD9371收发器。三个AD9528时钟发生器为系统提供PLL参考时钟和JESD204B SYSREF。AD9528是一款双级PLL，提供14路LVDS/HSTL输出，集成JESD204B SYSREF发生器，可用于多器件同步。AD9528排列成扇出缓冲配置，其中一个用作主器件，它的一些输出用于驱动时钟输入和从器件的SYSREF输入。图中包括一个可能的无源校准机制一如绿色和橙色部分所示——一个专用发射和接收信道通过分相器/合相器校准所有接收和发射信号路径，正如上一节所述。

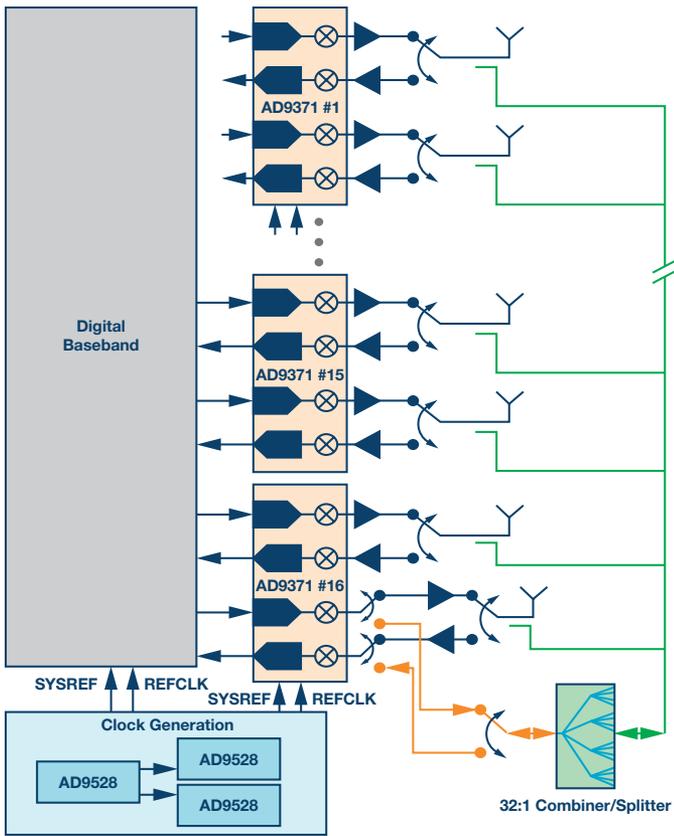


图11. 采用ADI公司AD9371收发器的32 Tx、32 Rx massive MIMO射频头框图

## 结语

Massive MIMO空间复用有望成为蜂窝通信领域的革命性技术，其支持在高流量城市区域实现更高的蜂窝容量和效率。它利用了多路径传播所带来的分集性，允许基站与多位用户之间使用同一时间和频率资源进行数据传输。基站天线与用户之间的信道具有互易性，故所有复杂的信号处理可以保留在基站进行，信道表征可以在上行链路中完成。ADI公司的RadioVerse™系列集成收发器产品支持在小的空间中实现多通路的RF路径，因此非常适合massive MIMO应用。

## 参考文献

1. Xiang Gao. [实际传播环境中的Massive MIMO](#)。Lund University, 2016年。
2. Michael Joham、Josef A. Nossek和Wolfgang Utschick。“[MIMO通信系统中的线性发射处理](#)”。*IEEE信号处理论文集*，第53卷第8期，2005年8月。
3. Hien Quoc Ngo. [Massive MIMO：基本原理和系统设计](#)。Linköping University, 2015年。

Claire Masterson [claire.masterson@analog.com]是ADI公司利默里克通信系统团队的系统应用工程师，从事系统实现、软件开发和算法开发。Claire拥有都柏林三一学院BAI和博士学位，于2011年毕业后加入ADI公司。



Claire Masterson