

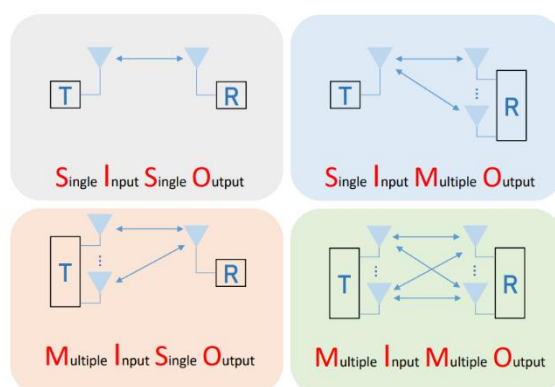
MIMO 技术相关原理

第 6 组

在 5G 的关键技术中，MIMO 多入多出技术扮演着举足轻重的角色，通信过程中之所以能够几乎准确无误地进行高速数据传输，很大部分都归功于 MIMO 技术。本次研讨我们小组从与 MIMO 技术最紧密相关的几个部分切入，简要分析介绍其基本原理。

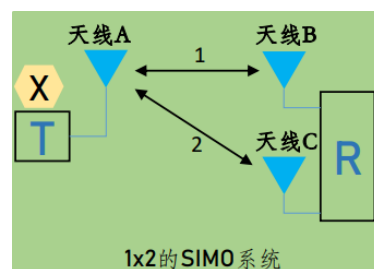
一. 什么是 MIMO

所谓 MIMO 是 multiple input multiple output 的缩写，也就是多输入多输出，这里的输入输出指的分别是发射端和接收端的天线，所以这一命名是根据发送端与接收端的天线数来定义的，发送端与接收端分别只有一个天线的系统可以成为单入单出系统，英文简称为 SISO，同理单入多出系统为 SIMO，多入单出系统 MISO。



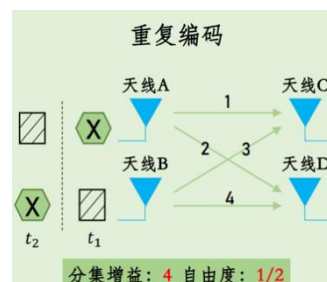
知道 MIMO 是什么之后，我们再来了解 MIMO 中两个最重要的概念，那就是分集与复用，分集指的是把数据重复发送，分集的意义在于可以提高数据传输可靠性，复用则是把天线资源用来发送不同的数据，复用可以提高数据传输速率。但有个基本的常识，就是可靠性与传输速率往往是鱼和熊掌的关系，像是一对矛盾体，往往为了提高传输可靠性，选择分集传输，就要牺牲传输速率，反之亦然。

如何衡量一个系统的分集与复用的程度呢？有两个衡量标准，分别是分集增益和自由度，分集增益指的是从发送天线到接收天线间有多少条“可辨识”的传播路径，自由度指的是每时刻最多可以发送多少个不同的数据。这两个概念适用于任何通讯系统，这里我们拿一个最简单的单入多出 SIMO 系统来举例，发送端一个天线，接收端两个天线，发送端到接收端有两条可辨识的传播路径，所以该系统分集增益为 2，又因为发送端只有 1 个天线，每时刻只能发送 1 个数据，所以自由度是 1。

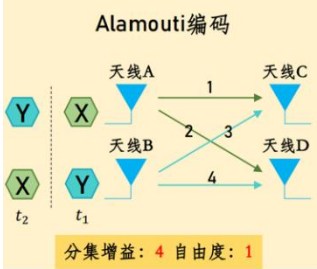


既然传输分集与空间复用会影响系统的可靠性和传输速率，通信系统如何权衡两者之间关系呢？我们通常采用不同的发送策略来衡量系统的分集增益与自由度，针对 MIMO 系统，我们选择 3 种简单策略来举例：

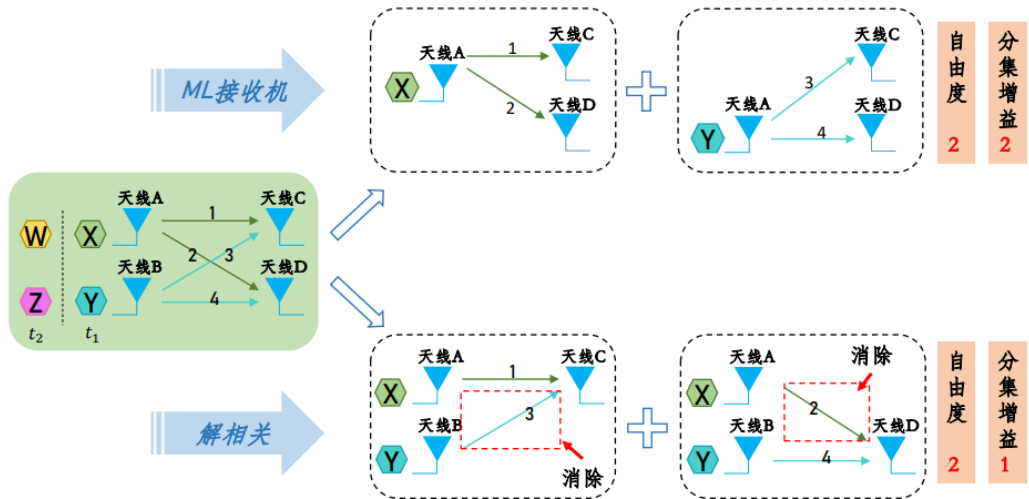
第一种为重复编码。在一个 2x2 的 MIMO 系统中，显然从发送端到接收端有四条可选择的不同传播路径，因此其分集增益为 4，重复编码的意思是在 T_1 时刻天线 A 发送数据 X，天线 B 不发送数据， T_2 时刻天线 B 仍然发送数据 X，天线 A 不发送数据。这样一来，两个时刻只发送了一个数据，因此其自由度为 1/2，这一系统因为重复发送了同样的数据，提高了数据传输的可靠性，但是很明显，发送端天线有资源浪费的问题。



第二种发送策略为 Alamouti 编码。这种编码方式在重复编码的基础上进行了扩展，T1 时刻天线 A 传输数据 X，此时天线 B 不再保持空闲状态，而是传输数据 Y，T2 时刻天线 B 传输数据 X 的同时，天线 A 再传输数据 Y，这样空闲的天线资源能够得以利用，同时系统的自由度，从原来的 1/2 提高到了 1。



第三种是 v-blast 系统。也就是发送端不同天线在每个时刻发送不同的数据，2x2MIMO 系统举例就是，T1 时刻天线 A 发送数据 X，天线 B 发送数据 Y，T2 时刻天线 A 发送数据 W，天线 B 发送数据 Z，对于接收端而言有两种接收方式，分别是最佳（ML）接收机以及解相关，这两种不同的接收方式，分别对应不同的自由度和分集增益。首先是最佳接收机方式，是从发送端进行考虑，将发送端不同的天线路径分离出来，这样每一个数据所有两条可选路径，分集增益就是 2，同时每时刻可以发送两个不同的数据，因此自由度为 2；如果接收端采用解相关接收，这种方式是从接收端考虑，将每个接收端天线分离开来，当接收数据 X 时，将数据 Y 的传播路径进行消除，当接收数据 Y 时，将数据 X 的传播路径进行消除。这样的话每个数据每时刻只有一条可选传播路径，因此分集增益是 1，因为发送端没有改变，因此自由度仍是 2。



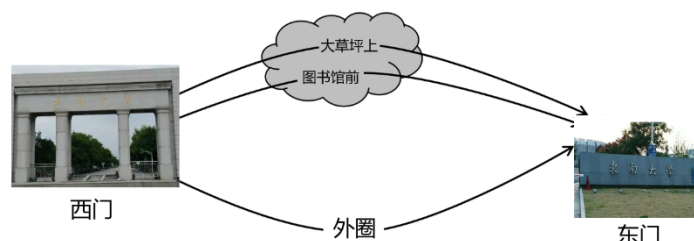
做一个表格，将这些不同的发送策略放在一起进行比较，我们发现分集和复用是我们调节系统传输可靠性和传输速率的两种方式，采用不同的发送策略可以获得不同的平衡，一个完整的通信协议往往会定义多种发送方式，当无线信道条件很差时，更多地用到分集技术，以保证传输可靠性，而当无线信道条件良好时，则更多选择复用来提高传输速率。分集和复用就是这样你进我退你退我进的关系。

	分集增益	自由度
2x2 MIMO 系统本身	4	2
重复编码	4	1/2
Alamouti编码	4	1
V-BLAST (ML)	2	2
V-BLAST (解相关)	1	2

二. 衰落与干扰

举个例子来理解衰落相关性，假设骑车从学校西门到东门有三条路，分别经过大草坪上、

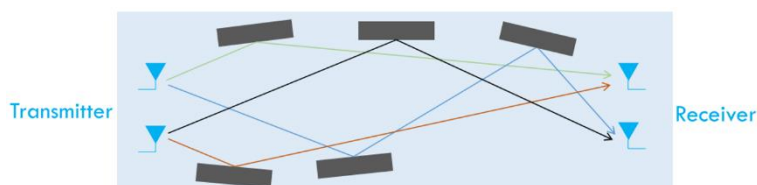
图书馆前、学校外圈。因为大草坪与图书馆离得很近，举办校庆时大草坪上的通道被管制了，从西门到东门本来有三条路可选择，现在因为大草坪举办活动封锁不能过车，怕出事故，学校在图书馆前也设了关卡不能过车，这种因



为道路相近，使得堵塞连累的现象就是衰落相关性。这种现象对 MIMO 系统产生影响的话，假如是一个 2×2 的 MIMO 系统，如果四条路径没有分离开，而是靠得很近，那么一个 2×2 的 MIMO 系统就容易退化成 1×1 的系统，天线资源完全浪费了。

解决衰落相关性的方法，首先最容易想到的解决方案就是拉大天线间距离，增加发送端和接受端彼此天线间的距离，让传输路径尽可能分离开，但是采用这种方法的话，用户设备的天线会变得很大，很显然，这种方法在用户设备端不可取。

还有一种方法就是差异化信号发射角度和到达角度。如图所示，当发射信号经过多个物



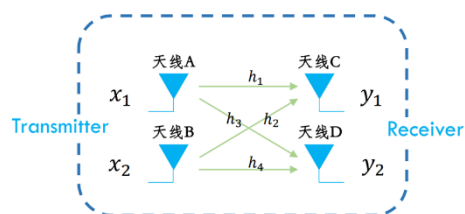
体反射之后，会沿着不同角度，不同方向进行传播，这样一来，传播路径自然就分开了。发送端基站往往建在高处，四面开阔，很少有反

射体，故而在基站侧增大天线间距离；用户周围充斥着大量的建筑物，处于天然反射体中，所以不需要拉大天线间隔，这样一来，衰落相关性的问题就得以解决。

再介绍一下 MIMO 系统中的信道状态信息(channel state information)简称 CSI，正如前面提到的例子，如果在出发之前就知道消息，图书馆和大草坪前面都会被封，那我们就可以直接避开这两条路，信道状态信息 CSI 就是例子中的消息。

还是以的一个 2×2 的 MIMO 系统为例，在 MIMO 系统中，每一个传输路径对应一个权重参数，这些权重参数组合在一起构成一个 CSI 矩阵，二乘二的 MIMO 系统的 CSI 就是一个 2×2 的矩阵，输出 Y_1 、 Y_2 是输入 X_1 、 X_2 经过矩阵变换得到的结果。最理想的 CSI 当然是单位阵，因为输出和输入可以完全一样，但真实的信道因为有噪声的存在，不可能是单位阵的形式，可能都不是对角阵，用数学方法可以将现实中的传输矩阵转换出一个对角阵，运算过程不做详细描述。随机信道的 CSI 矩阵，每个元素都是按照一定的随机概率出现的数字，最差矩阵是全一矩阵，

信道相关性高，意味着发送两个不同的信号 X_1 、 X_2 ，只能收到 X_1 一个信号，自由度退化为 1 了。



$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

最理想的传输矩阵

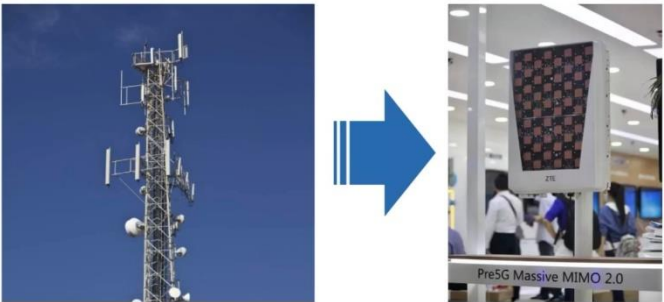
三. Massive MIMO

Massive MIMO 指的就是大规模天线。大家会发现如今的手机没有明显的天线了，我们由前面知道所有设备都需要天线来接收信号，所以并不是没有天线了，只是现在天线非常小，可以做到在手机里看不见。



已知 $C=\lambda f$ ，天线的长度与波长成正比，而 5G 网络的毫米波意味着天线的体积可以更小，天线的数量可以更多。根据天线的这些特点，Massive MIMO 技术广泛用于 5G 建设，基站侧有很多天线，用户设备也有很多天线。因此 5G 时代天线是以阵列的形式出现，Massive MIMO 天线相对于传统基站天线或者传统一体化有源天线，其形态差异为阵列数量非常大、单元具备独立收发能力。相当于更多天线单元实现同时收发数据，高频 Massive MIMO 天线用于热点地区、室内容量和无线回传。

如图中所示，一块块的天线按照一定的规则排列在一起，形成天线阵列。假设我们能够看到信号发射的路径，会发现这样一个阵列发出许多信号，方向四通八达。但虽然信号四通八达，接收端设备手机却只在一处接收，信号资源被严重浪费。



而我们设法将散开的信号束缚起来集中传给用户，就是波束赋形。波束赋形是利用较小间距的天线阵元之间的相关性(天线间距为 $0.5\text{-}0.65\lambda$)，通过阵元发射的波之间形成干涉，集中能量于某个(或某些)特定方向上，形成波束，从而实现更大的覆盖和干扰抑制效果。简单来说就是利用波的干涉原理，两个波在传播过程中，峰峰古古相遇的地方信号会增强，峰谷相遇的地方信号会抵消，所以通过调整天线的角度和发射时间等参数，使得四通八达的信号变成精准指向性，以此极大提高能量效率。

Massive MIMO 与传统 MIMO 比起来，性能方面有较大提升。而导频污染是大规模 MIMO 技术的关键性限制因素，随着基站天线数量的增加，相邻小区的用户在上行道估计中使用同一组(或非正交的)训练序列，导致基站端信道估计结果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。

技术内容	传统 MIMO	大规模 MIMO
天线数	≤ 8	≥ 100
信道角域值	不确定	随着矩阵域的增长形成一个确定函数
信道矩阵	要求低	要求高
信道容量	低	高
分集增益	低	高
链路稳定性	低	高
抵御噪声能力	低	高
阵列分辨率	低	高
天线相关性	低	高
耦合	低	高
SER	高	低

Massive MIMO 潜在应用场景包括宏覆盖、高层建筑、异构网络、室内外热点以及无线回传链路等。此外，以分布式天线的形式构建大规模天线系统也比较热门。在需要广域覆盖的场景，大规模天线技术可以利用现有频段，在热点覆盖或回传链路等场景，则可以考虑使用更高频段。

MOMI 概念最早在 1908 年就被提出过，MIMO 系统是无线通信系统方面人们研究最多的方向之一，未来应用会越来越广泛。