

第三课：LTE 关键技术 OFDM 和 MIMO

概述：

LTE 是 Long Term Evolution, 大多数资料也都有介绍, 是 3G 伙伴组织 3GPP 牵头制定的第四代移动通信技术。我这里特别要指出的是 LTE 是一个站在巨人肩膀上的技术, 借鉴了很多其它通信技术的优点, 如 OFDM 和 MIMO 都是借鉴的 Wimax, HARQ 是借鉴的 CDMA, 所以通信技术发展到 LTE 算是一个集大成者, 另外随着 3GPP2 没落和高通宣布 CDMA 支持 LTE 的演进, LTE 可以说将来有一统通信技术的趋势。

背景简述：

在讲 LTE 关键技术之前先讲讲影响通信速率的关键点吧, 大家都知道通信技术越发展速率越快, 可是到底是哪些技术促成了速率的提升呢? 下面我写一个公式:

$$\underline{C = B \times V}$$

在这里, C 表示为速率, B 是带宽, V 是每 Hz 的速率, 通过这个公式我们可以发现, 如果想提高网络的速度有 2 个方法, 一个是增加带宽, 一个是增加频带利用率。那么 LTE 是如何在这两方面进行实现的呢?

首先讲讲增加**带宽**，这个技术说起来简单但是实际上是非常复杂的，也是直接导致 CDMA 技术在 4G 被 pass 的原因之一。如果将一个通信技术的频谱从 1.25MHz 扩展到 20MHz，要面临很多的问题，第一个是多载波的聚合，举个例子，你原来只需要管理个单车道，现在突然给你个 100 车道，第一个就是协调问题，要保证不乱，其次调度问题，要保证高效，所以复杂程度大大的增加，其次是频谱特性问题，那有的人会问，干嘛要多载波聚合，直接一个载波不行了么？如果你真的搞一个 20Mhz 的载波，跨度那么大，频率特性就很难兼顾，包括传播特性，扩频效率等，另外包太大的话调度的精度也受影响，因此 LTE 选择了含正交子载波技术的 OFDM 技术来实现多增加带宽。

其次就是增加**频带利用率**，在这里简单说明一下信道编码的方式，信源要最终发射必须要经过编码和调制，编码的作用是将前后的信息位建立联系并最终保证纠错，相当于一种**冗余**，而调制的方式则是通过相位来区别更多的符号，相当于一种**压缩**，那么高效的编码和高阶的调制无疑会增加频谱利用率，在这点上 LTE 并没有多大进步，和 3G 一样，最高速率用的是 turbo 编码和 64QAM 调制技术，但是 LTE 支持 MIMO 也是一种增加频谱利用率的方式。

所以，LTE 速率的提升关键就在于 OFDM 和 MIMO 这两个技术，下面先重点讲解这两个技术。

LTE 关键技术:

一、 OFDM (orthogonal frequently division multiplexing) 正交频分复用。

OFDM 原理很简单,就是将大的频谱分为若干小的子载波,各相邻子载波相互重叠,相邻子载波互相正交(通过傅里叶变实现),从而使其重叠但不干扰。然后将串行数据映射到子载波上传输,实现统一调度。

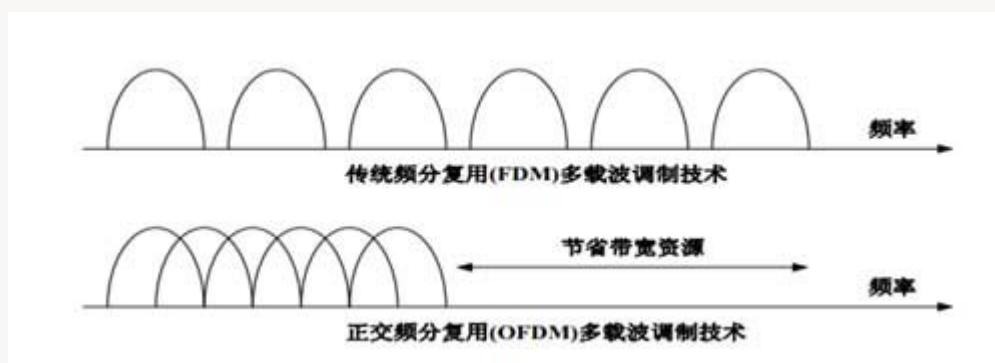


图 1 OFDM

由上图可以看出,OFDM 和传统的 FDM 多载波调制技术的区别,传统的多载波是分开的,载波之间要有保护间隔,而 OFDM 则是重叠在一起的,最大的一个好处就是节省了带宽,同时 OFDM 是统一调度,而传统的 FDM 是子载波分别调度,效率是不一样的。

同时 OFDM 的子载波也不同于传统的载波,他非常小,小于信道相干带宽,这样的好处是可以克服频率选择性衰落,举个例子,1hz 和 1.1hz 之间的无线特性几乎一样,而 1hz 和 101hz 之间的无线特性就差别大了,带宽越小,衰落越一致,同理一个 OFDM 符号的时间也是很小的。

的，小于相干时间可以克服时间选择性衰落，等效为一个线性时不变系统。

而对于 OFDM 来说，最难的还是在于如何保证各个子载波间的正交，其重要的一点就是利用了快速傅里叶变换，还有就是近代芯片运算能力的增加。傅里叶变换本身很复杂（LTE 用的是快速傅里叶变换，简单了很多），下面是个简化版的公式

$$\frac{1}{T} \int_0^T \exp(j\omega_n t) \cdot \exp(j\omega_m t) dt = \begin{cases} 0 & m \neq n \\ 1 & m = n \end{cases}$$

由于是简化版的，所以这个公式的版本还有很多，表明意思即可，看公式只有当 m 和 n 相等时才会得出 1， m 和 n 不等的话就是 0。这就是正交的自相关性，也就是只有自己才能解出自己，别人不行，这点很重要。下面举个例子，例如信息 A 在子载波 m 上传递，信息 B 在 n 上传递，那么当子载波重叠后，我要将 A 取出怎么办？可以计算下。

由于 A 在 m 子载波上，所以我用 $\exp(j\omega_m t)$ 去取 A，都积分 $\exp(j\omega_m t)$

$$\begin{aligned} \frac{A}{T} \int_0^T \exp(j\omega_m t) \cdot \exp(j\omega_m t) dt + \frac{B}{T} \int_0^T \exp(j\omega_n t) \cdot \exp(j\omega_m t) dt \\ = A \times 1 + B \times 0 = A \end{aligned}$$

也就是 A 的 m 载波和 m 载波自相关，所以=1，而 B 的 n 载波和 m 载波完全不想关，所以=0。从而保证了各个子载波虽然重叠但是不会互相干扰。

OFDM 有很多优点，但是也有其不可克服的缺点，如由于一个 OFDM 符号时间和频率都很小所以对频偏比较敏感，还有由于信号重叠厉害就会需要克服较大的峰均比 PAR。

二、 OFDMA 正交频分多址 Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OFDM 是一种频分技术，而 OFDMA 则是利用这种频分技术而实现的多址技术，很多人会搞混，举个例子说，OFDM 像是数字，而 OFDMA 是学号，利用学好可以区分学生，但是实际讲述的时候还是很难分开讲，因为 OFDMA 就是基于 OFDM。

严格的是 OFDMA=OFDM+FDMA+TDMA 从而实现区分用户的目的

OFDMA 要实现主要有 2 点

- 1、将高速串行数据流转化为并行，实现串并转换，必须为并行能进行傅里叶变换。
- 2、将每一路调制到各个子载波上，子载波在经过快速傅里叶变换 FFT（或者 IFFT）实现互相正交。

OFDM发射流程

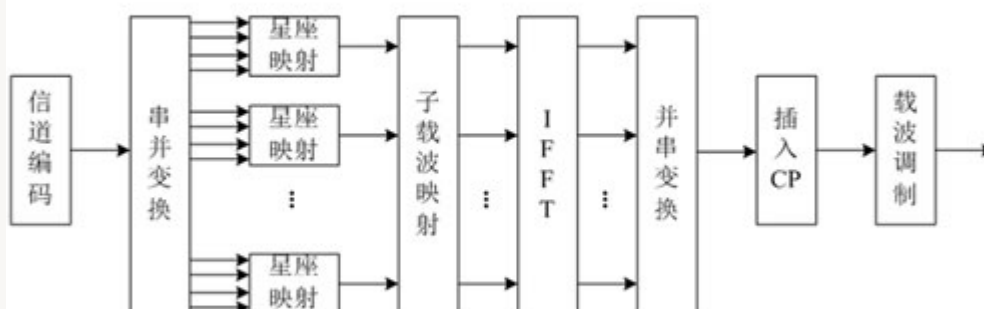


图2 OFDM发射图

OFDMA继承了OFDM的特点，具有随着带宽的增加，OFDMA信号仍能保持正交的特点，而CDMA则会因为多载波多径而失去正交。同时OFDMA可以轻松实现频域调度，避免了传统FDMA技术的调度和协调难题，还有就是更加支持MIMO。尤其是OFDMA对频谱的支持多样，现网是支持6种带宽，如下图，可以根据实际需要灵活使用。

名义带宽 (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
RB数目	6	15	25	50	75	100
实际占用带宽 (MHz)	1.08	2.7	4.5	9	13.5	18

图3 支持带宽

另外，OFDMA在实际应用中分为集中式和分布式，如图4，集中式会将连续的子载波都分给1个用户，而分布式则是交叉分布，各有优缺点，但是现网多用集中式，调度起来简单效率高。

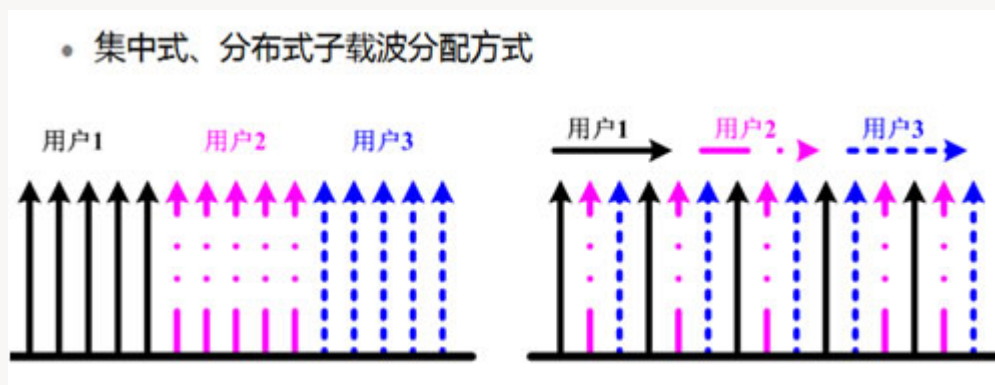


图 4 子载波分配方式

其实 OFDM 还有很多东西要讲，也很复杂，但是我个人认为大家只需要理解精髓就可以了，OFDM 技术在我们 LTE 中重要的一点就是可以快速的实现子载波的正交。

注：LTE 上行的技术是 SC-FDMA，很多人说不是 OFDM，其实就是理解错了，因为 SC-FDMA 字面理解是单载波频分多址，实际上就是在 OFDM 之前增加了一步，DFT 扩频，模拟出一个单载波，由于单载波可以克服 OFDMA 多子载波造成的峰均比问题，所以对于功放能力较差的手机来说也是一种变通的做法。

三、 CP (cyclic prefix) 循环前缀

在上面的图 2，在并串转换后需要插入一个 CP，那么 CP 的作用是干嘛用的呢。众所周知，信号在空间的传递是会经过反射和折射的，那么一路信号到达接收端会变成几路，这几路会存在时延导致互相干扰，如图 5

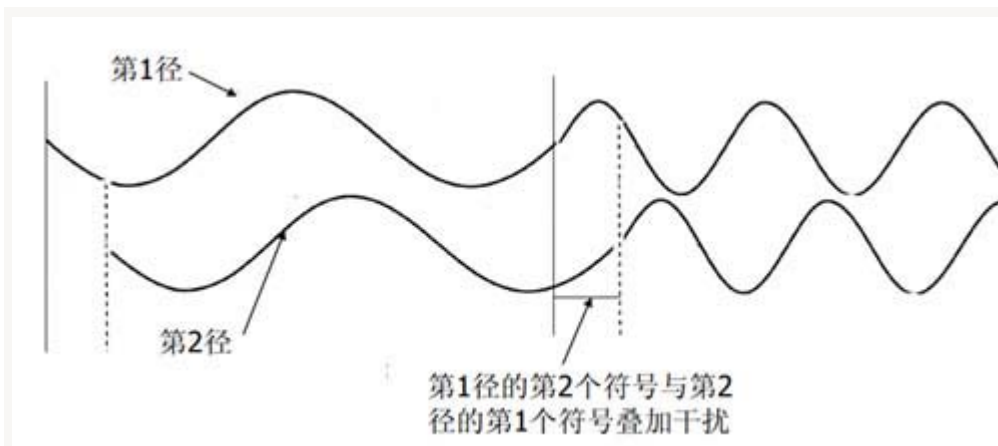


图 5 多径导致符号间干扰

上面就是典型的多径导致符号间干扰，由于第 2 径的第一个信号延迟，一部分落到第 1 径的第二个符号上，导致第二个符号正交性破坏从而失去正交性无法解调出来。为了避免这种状况，就设计了保护间隔出来，在每个信号之前增加一个间隔，只要时延小于间隔就不会互相影响，如图 6

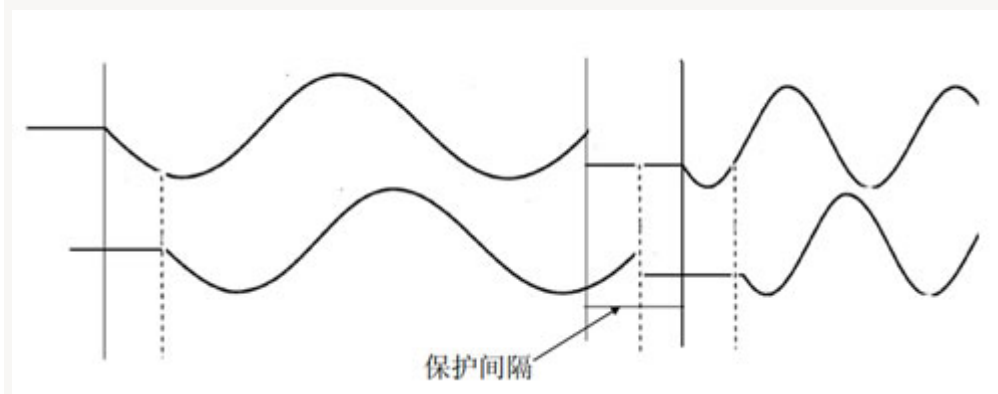


图 6 加入保护间隔

加入了保护间隔后，虽然第 2 径第一个信号延迟了，但是刚好落入第 1 径的第二个符号的保护间隔内，在解调时会随着 CP 一起抛弃，不会干扰到第二个符号，但是上图有个问题，就是第 2 径的第二个符号的保护间隔落入了第 1 径的第二个符号内，会不会产生干扰呢？答案

是肯定的，因为保护间隔本身也不是正交的，那么解决的办法就是采用 CP，循环前缀。

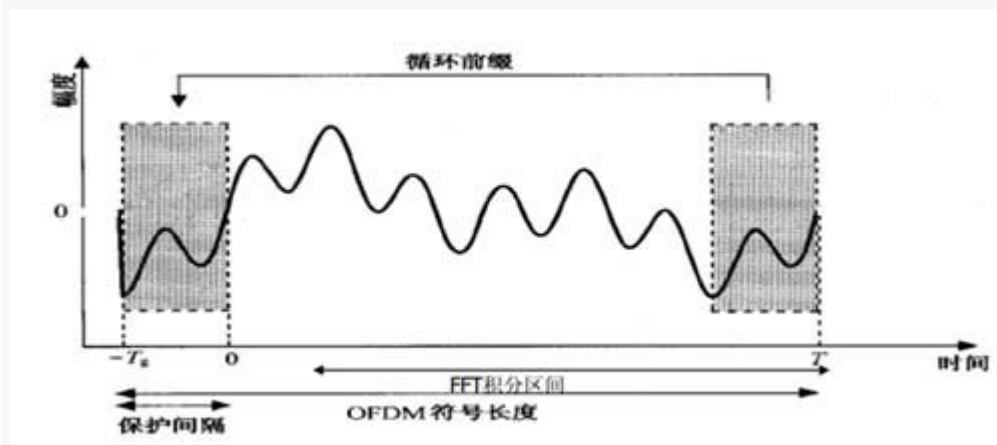


图7 CP

所谓循环前缀 CP 的意思就是我这个保护间隔不用传统的全 0，而是用我自身的一部分，如图 7，将符号的最后一部分拿出来放到前面当保护间隔，就是 CP。由于保护间隔是信号的一部分，所以不会破坏符号本身的正交性，是一种非常聪明的做法。

由于基站覆盖的距离远近不同，多径延迟也不同，所以 CP 也分 3 种。常规，扩展和超长扩展，应用范围也不同。

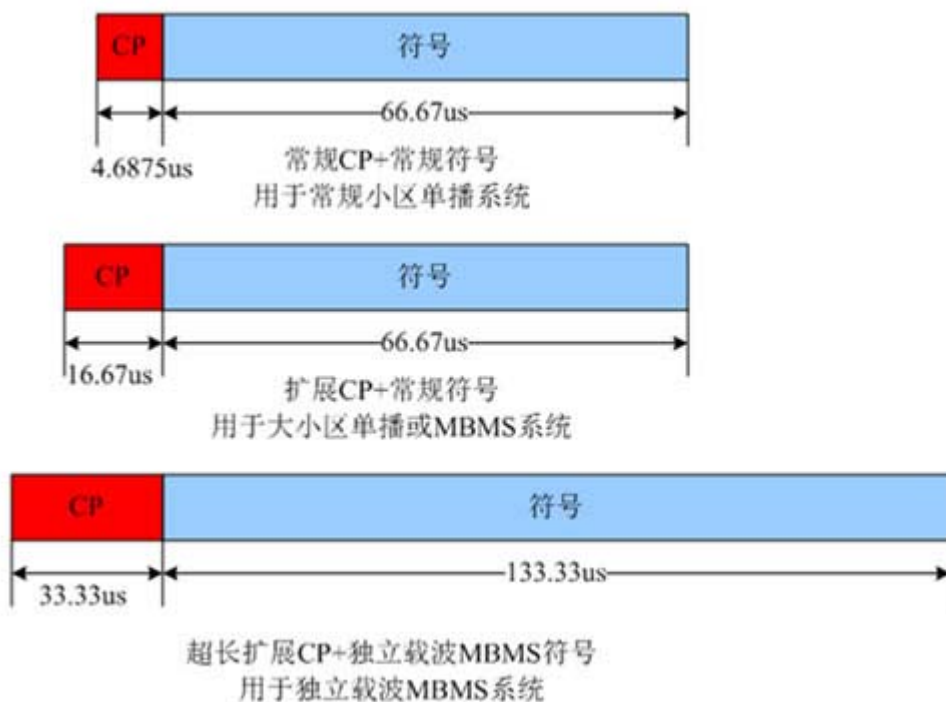


图 8 cp 长度

一般来说超长扩展除非在海边等特殊场景其它地方是用不到的，所以常见的就常规和扩展 2 种，CP 的长度也会影响物理层资源块的大小，间接影响速率。（以目前移动 LTE 实验网的密度，我估计只有常规 CP 就行了）

四、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 系统

MIMO 技术可以说是 4G 必备的技术，无论哪种 4G 制式都会用，原理是通过收发端的多天线技术来实现多路数据的传输，从而增加速率。

MIMO 大致可以分为 3 类，空间分集，空间复用和波束赋形。有的资料加了一个多用户 MIMO，其实就是单用户的一个引申。

1、空间分集（发射分集、传输分集）

利用较大间距的天线阵元之间或赋形波束之间的不相关性，发射或接收一个数据流，避免单个信道衰落对整个链路的影响。其实很简单，看图就明白了。



图 9 空间分集

其实说白了，就是 2 跟天线传输同一个数据，但是 2 个天线上的数据互为共轭，一个数据传 2 遍，有分集增益，保证数据能够准确传输。

2、空间复用（空分复用）

利用较大间距的天线阵元之间或赋形波束之间的不相关性，向一个终端/基站并行发射多个数据流，以提高链路容量（峰值速率）。



图 10 空间复用

如果上一个技术是增加可靠性，这个技术就是增加峰值速率，2 个天线传输 2 个不同的数据流，相当于速率增加了一倍，当然，必须要在无线环境好的情况下才行。

另外注意一点，采用空间复用并不是天线多了就行，还要保证天线之间相关性低才行，否则会导致无法解出 2 路数据，直说大家理解不了，可以通过数学公式来阐明。假设收发双方是 MIMO2*2，如图 11

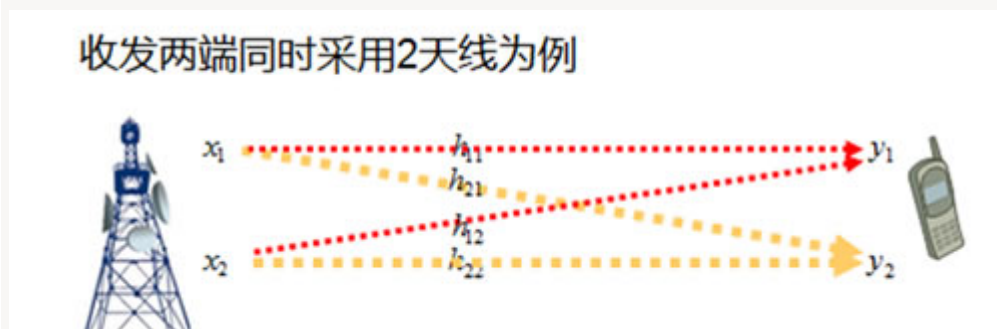


图 11 例子

那么 UE 侧的计算公式是

$$\begin{aligned} y_1 &= h_{11}x_1 + h_{12}x_2 + n_1 \\ y_2 &= h_{21}x_1 + h_{22}x_2 + n_2 \end{aligned}$$

由于是 UE 接收，所以 y_1 和 y_2 都知道， h 和 n 是天线的相关特性也都知道，求 x 。假如天线的相关性较高， h_{11} 和 h_{21} 相等， h_{12} 和 h_{22} 相等，或者等比例，那么这个公式就无解。如

$$\begin{aligned} 3 &= 2x_1 + 5x_2 + 1 \\ 6 &= 4x_1 + 10x_2 + 2 \end{aligned}$$

是一个二元一次方程，由于上下两个方程成比例，所以无法解出 x_1 和 x_2 的。也就无法使用空间复用，因为这两根天线相关性太高了，如果想解决的话，可以增加天线的间隔从而使 h 不成比例，一般建议大于 4 倍波长，具体要看天线说明。

3、波束赋形

利用较小间距的天线阵元之间的相关性，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。

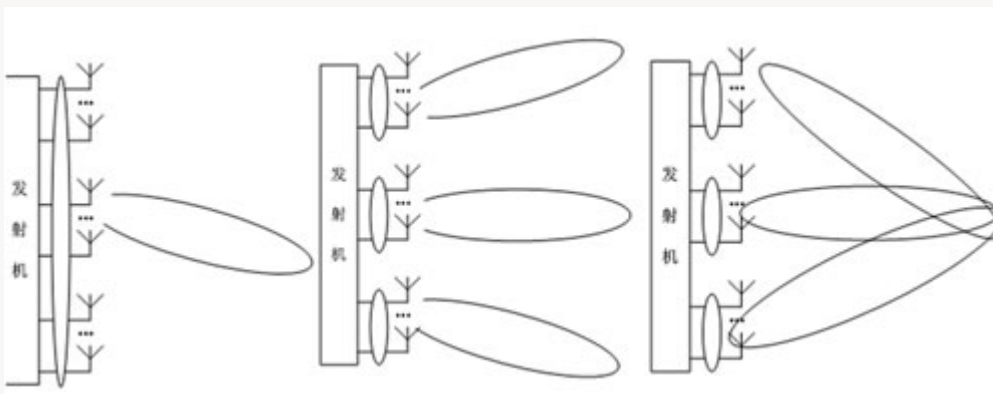


图 12 各种波束赋形

上面是单播波束赋形，波束赋形多址和多播波束赋形，通过判断 UE 位置进行定向发射，提高传输可靠性。这个在 TD-SCDMA 上已经得到了很好的应用。

而至于多用户 MU-MIMO，实际上是将两个 UE 认为是一个逻辑终端的不同天线，其原理和单用户的差不多，但是采用 MU-MIMO 有个很重要的限制条件，就是这 2 个 UE 信道必须正交，否则解不出来。这个在用户较多的场景还行，用户少了的话很难找到。（也有中说法只要相关性弱就行）

4、LTE r8 版本中的 MIMO 分类

目前的 R8 版本主要分了 7 类 MIMO，具体现网中使用哪种需要网优人员结合实际情况去设置相关的门限和条件。下面列出这 7 类分别讲解下原理和适用场景。



- (1) 单天线传输，也是基础模式，兼容单天线 ue。
- (2) 不同模式在不同天线上传输同一个数据，适用于覆盖边缘。
- (3) 开环空分复用，无需用户反馈，不同天线传输不同的数据，相当于速率增加一倍，适用于覆盖较好区域
- (4) 同上，只不过增加了用户反馈，对无线环境的变化更敏感
- (5) 多个天线传输给多个用户，如果用户较多且每个用户数据量不大的话可以采用，增加小区吞吐量。
- (6) 闭环波束赋形一种，基于码本的（预先设置好），预编码矩阵是在接收端终端获得，并反馈 PMI，由于有反馈所以可以形成闭环。

(7) 无需码本的波束赋形，适用于 TDD，由于 TDD 上下行是在同一频点，所以可以根据上行推断出下行，无需码本和反馈，FDD 由于上下行不同频点所以不能使用。

5、上行 MIMO 技术

由于我的资料都是 R8 版本的，所以截止到 R8 版本，上行支持 MU-MIMO, 但是上行天线只支持 1 发，也就是 1x2 和 1x4，可以采用最高阶的 64qam 调制。

小结：

OFDM 和 MIMO 虽然不是 LTE 最先采用但是确是 LTE 精髓所在，如果你能理解的话就有一定编码的知识就会知道为何 LTE 能够实现那么高的速率了，希望看完本文能让你对此有个整体的认识。

本文由论坛会员 bbgoal(hntele)投稿，感谢他的贡献。bbgoal 在论坛有《白话 LTE 关键技术》系列，以及 LTE 群中在线视频讲解 LTE 技术，感兴趣的 C 友可以前往观看。

为什么 OFDM 系统比 CDMA 系统更容易与 MIMO 技术结合？

MIMO 技术的关键是有效避免天线之间的干扰，以区分多个并行数据流。众所周知，在水平衰落信道中可以实现更简单的 MIMO 接收。而在频率选择性信道中，由于天线间干扰和符号间干扰混合在一起，很难将 MIMO 接收和信道均衡分开处理。如果采用将 MIMO 接收和信道均衡混合处理的 MIMO 接收均衡的技术，则接收机会比较复杂。

因此，由于每个 OFDM 子载波内的信道(带宽只有 15KHz)可看作水平衰落信道，MIMO 系统带来的额外复杂度可以控制在较低的水平（随天线数量呈线性增

加)。相对而言，单载波 MIMO 系统的复杂度与天线数量和多径数量的乘积的幂成正比，很不利于 MIMO 技术的应用。

MIMO 系统在一定程度上可以利用传播中多径分量，也就是说 MIMO 可以抗多径衰落，但是对于频率选择性深衰落，MIMO 系统依然是无能为力。目前解决 MIMO 系统中的频率选择性衰落的方案一般是利用均衡技术，还有一种是利用 OFDM。4G 需要极高频谱利用率的技术，而 OFDM 提高频谱利用率的作用毕竟是有限的，在 OFDM 的基础上合理开发空间资源，也就是 MIMO-OFDM，可以提供更高的数据传输速率。另外 OFDM 由于码率低和加入了时间保护间隔而具有极强的抗多径干扰能力。由于多径时延小于保护间隔，所以系统不受码间干扰的困扰，这就允许单频网络（SFN）可以用于宽带 OFDM 系统，依靠多天线来实现，即采用由大量低功率发射机组成的发射机阵列消除阴影效应，来实现完全覆盖。

《LTE 每天一课》 由移动通信网发起，在 2013 年 6 月份每天发送到微信，欢迎添加 MSCBSC 官方微信为好友（微信号：mscb888，或直接扫描下面二维码）



MSCBSC 官方微信账号:mscb888

最新动态，微信通知；
有问题微信反馈，超快捷回复；

关注方法：

打开微信右上角“魔法棒”，选择
“扫一扫”功能，对准左边的二维码即可

2013-06-06



LTE关键技术之OFDM
和MIMO



为什么OFDM系统比
CDMA系统更容易与

技术比较
OFDM