

## 第二课：LTE 关键技术：OFDM

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)即正交频分复用技术，实际上 OFDM 是 MCM Multi-Carrier Modulation，多载波调制的一种。其主要思想是：将信道分成若干正交子信道，将高速数据信号转换成并行的低速子数据流，调制到在每个子信道上进行传输。正交信号可以通过在接收端采用相关技术来分开，这样可以减少子信道之间的相互干扰 ICI。每个子信道上的信号带宽小于信道的相关带宽，因此每个子信道上的可以看成平坦性衰落，从而可以消除符号间干扰。而且由于每个子信道的带宽仅仅是原信道带宽的一小部分，信道均衡变得相对容易。

以下一段节选自 MSCBSC 论坛会员 bbgoal 的《白话 LTE 关键技术》，对 OFDM 的描述非常通俗易懂：

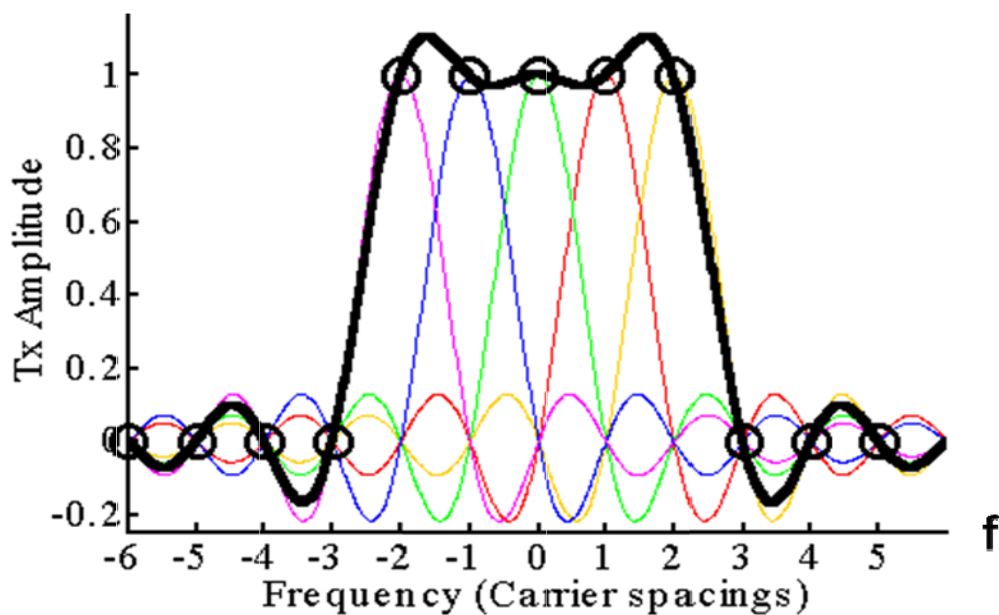
### OFDM

这个技术说的很玄乎，其实在 WIMAX 和 WIFI 里早就利用了，我以前就说过 OFDM 并不比 CDMA 的频谱利用率更高，但是他的优势是大宽带的支持更简单更合理，而且配合 mimo 更好。

举个例子，CDMA 是一个班级，又说中文又说英文，如果大家音量控制的好的话，虽然是一个频率但是可以达到互不干扰，所以 1.25m 的带宽可以实现 4.9m 的速率。而 OFDMA 则可以想象成上海的高架桥，10 米宽的路，上面架设一个 5 米宽的高架，实际上道路的通行面积就是 15 米，这样虽然我水平路面不增加但是可以通行的车辆增加了。而 OFDM 也是利用这个技术，利用傅里叶快速变换导入正交序列，相当于在有限的带宽里架设了 N 个高架桥，目前是一个 ofdm 信号的前半个频率和上一个频点的信号复用，后半频率和后一个频点的信号复用。

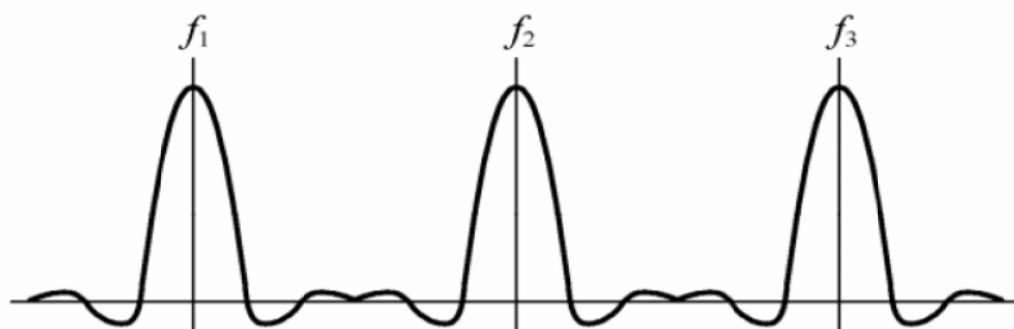
那信号频率重叠了怎么区分，很简单，OFDM，O 就是正交的意思，正交就是能保证唯一性，举例子，A 和 B 重叠，但是  $A*a+B*b$ ，a 和 b 是不同的正交序列，如果我要从同一个频率中只获取 A，那么通过计算， $(A*a+B*b)*a=A*a+B*b*a=A+0=A$ （因为正交， $a*a=1$ ， $a*b=0$ ）。所以 OFDMA 是允许频率重叠的，甚至理论上可以重叠到无限，但是为了增加解调的容易性，目前 LTE 支持 OFDM 重叠波长的一半。

正交频分复用技术，多载波调制的一种。将一个宽频信道分成若干正交子信道，将高速数据信号转换成并行的低速子数据流，调制到每个子信道上进行传输。

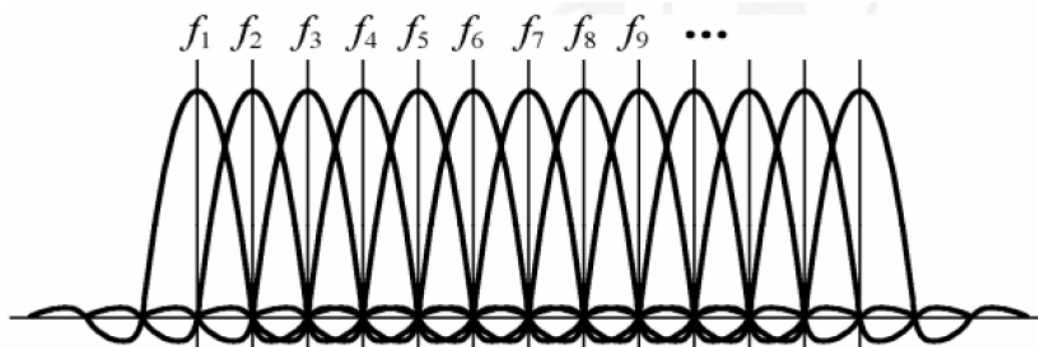


频域波形

在传统 FDM 系统中，为了避免各子载波间的干扰，相邻载波之间需要较大的保护频带，频谱效率较低。OFDM 系统允许各子载波之间紧密相邻，甚至部分重合，通过正交复用方式避免频率间干扰，降低了保护间隔的要求，从而实现很高的频率效率。



(a) 传统 FDMA 频谱



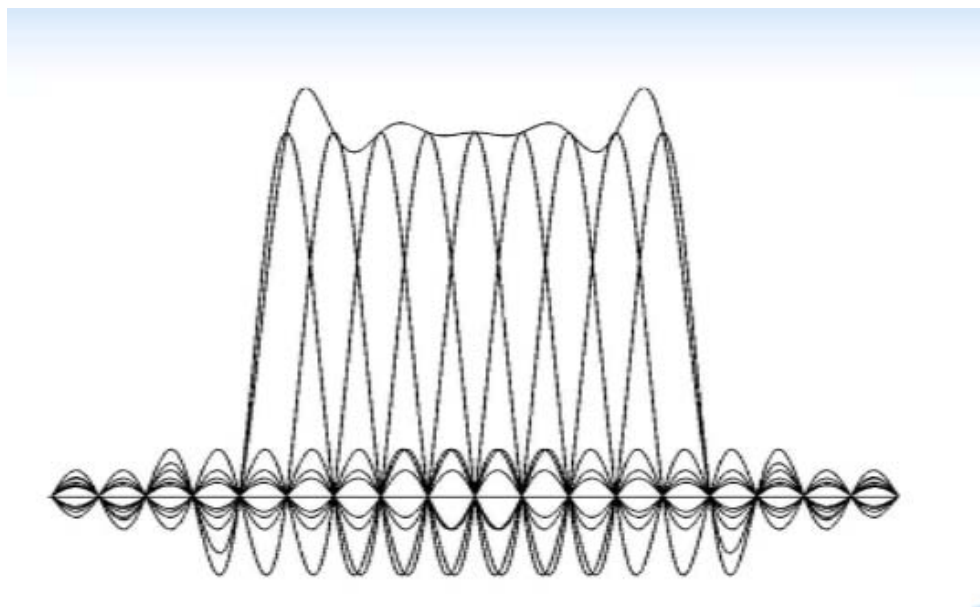
(b) OFDMA 频谱

什么是正交？

正交频分复用技术，频分复用大家都熟悉，但什么是正交呢？以下来自论坛会员 Libin 的投稿：

多载波技术：多载波技术就是在原来的频带上划分更多的子载波，有人会提出载波划得太细会产生干扰，为了避免这种干扰，两个子载波采用正交，每两个子载波是正交关系避免干扰。这就像双绞线一样。这样一是避免了 2 个子载波间的干扰，在下一个子载波间也有了一定的间隔距离。

解释下什么是正交 就是两个波形正好差半个周期。



多个窄带子载波，并使其相互正交，任一个子载波都可以单独或成组地传输独立的信息流；OFDMA 技术则利用有效带宽的细分在多用户间共享子载波。

多载波的有点有以下几个方面

- 1)可以在不改变系统基本参数或设备设计的情况下使用不同的频谱带宽。频谱利用率高。就是一个能当两个用
- 2)可变带宽的传输资源可以在频域内自由调度，分配给不同的用户。
- 3)为软频率复用和小区间的干扰协调提供便利。

## OFDM 技术的发展

OFDM 这种技术是 HPA 联盟 (HomePlug Powerline Alliance) 工业规范的基础，它采用一种不连续的多音调技术，将被称为载波的不同频率中的大量信号合并成单一的信号，从而完成信号传送。由于这种技术具有在杂波干扰下传送信号的能力，因此常常会被利用在容易受外界干扰或者抵抗外界干扰能力较差的传输介质中。

其实，OFDM 并不是如今发展起来的新技术，OFDM 技术的应用已有近 40 年的历史，主要用于军用的无线高频通信系统。但是，一个 OFDM 系统的结构非常复杂，从而限制了其进一步推广。直到上世纪 70 年代，人们采用离散傅立叶变换来实现多个载波的调制，简化了系统结构，使得 OFDM 技术更趋于实用化。80 年代，人们研究如何将 OFDM 技术应用于高速 MODEM。进入 90 年代以来，OFDM 技术的研究深入到无线调频信道上的宽带数据传输。目前 OFDM 技术已经被广泛应用于广播式的音频、视频领域和民用通信系统，主要的应用包括：非对称的数字用户环路 (ADSL)、ETSI 标准的数字音频广播 (DAB)、数字视频广播 (DVB)、高清晰度电视 (HDTV)、无线局域网 (WLAN) 等。

在向 B3G/4G 演进的过程中，OFDM 是关键的技术之一，可以结合分集，时空编码，干扰和信道间干扰抑制以及智能天线技术，最大限度的提高了系统性能。包括以下类型：V-OFDM, W-OFDM, F-OFDM, MIMO-OFDM, 多带-OFDM。OFDM 中的各个载波是相互正交的，每个载波在一个符号时间内有整数个载波周期，每个载波的频谱零点和相邻载波的零点重叠，这样便减小了载波间的干扰。由于载波间有部分重叠，所以它比传统的 FDMA 提高了频带利用率。

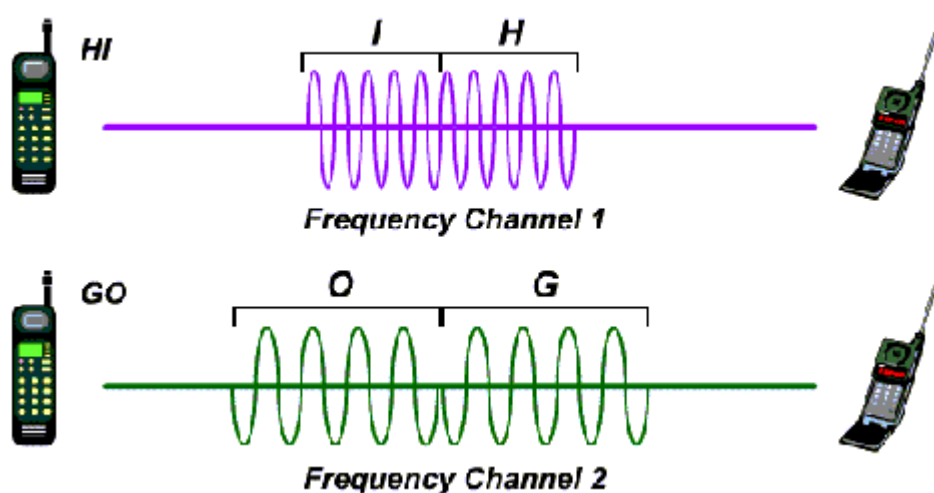
在 OFDM 传播过程中，高速信息数据流通过串并变换，分配到速率相对较低的若干子信道中传输，每个子信道中的符号周期相对增加，这样可减少因无线信道多径时延扩展所产生的时间弥散性对系统造成的码间干扰。另外，由于引入保护间隔，在保护间隔大于最大多径时延扩展的情况下，可以最大限度地消除多径带来的符号间干扰。如果用循环前缀作为保护间隔，还可避免多径带来的信道间干扰。

## CDMA 与 OFDM 等技术比较

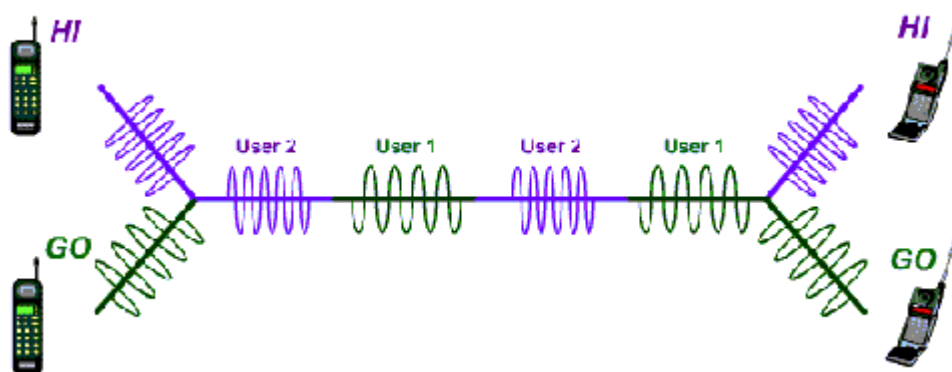
说到 OFDM 技术，一般都会提及到 CDMA 技术做比较。OFDM 技术的出现，其实应该是早于 CDMA 技术的，只是当时受到了硬件的局限，让 OFDM 技术显得有点不合实际，所以才会基于当时的硬件发展状况，发展出 CDMA 技术。

移动通信系统中常见的多址技术包括频分多址（Frequency Division Multiple Access, FDMA）、时分多址（Time Division Multiple Access, TDMA）、码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）、空分多址（Space Division Multiple Access, SDMA）。FDMA 是以不同的频率信道实现通信。TDMA 是以不同的时隙实现通信。CDMA 是以不同的代码序列来实现通信的。SDMA 是以不同方位信息实现多址通信。

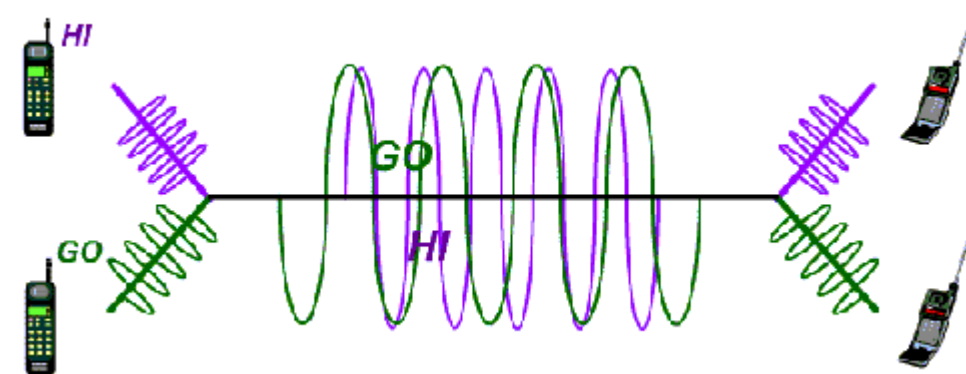
### 频分多址



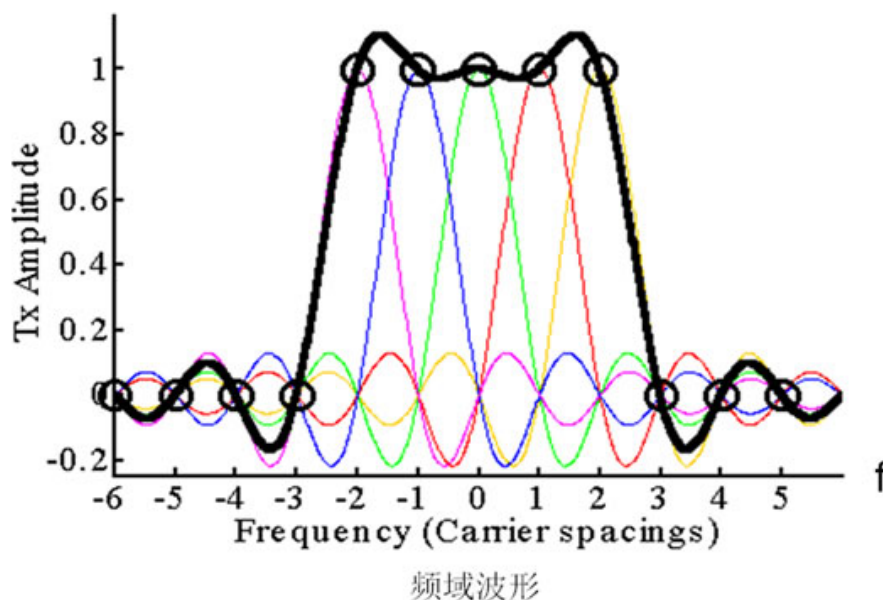
### 时分多址



### 码分多址



#### 正交频分多址



OFDM 将传输频宽分割成多个窄频宽的子通道，同时使用多个载波来载送讯息，由于讯息资料被平均分配于各个子通道同时传送，有效降低每个子通道之实质资料量与传送速率，因而具有良好频谱使用效率及绝佳多重路径损耗(multi path fading)之免疫力。

CDMA 是一种分码多工扩频(Spread Spectrum) 技术，将原始窄频讯息以拟真杂讯乱码(Pseudo random noise code)扩展成宽频讯号，所有使用者资讯在同一频道同时收送资料，因而有效的增进频谱使用效益。更由于将传送讯息隐藏于杂讯中，故具备高隐密性，不易被侦搜之特性。

对于单蜂窝或多蜂窝的环境, OFDM 性能远优于 CDMA。在单蜂窝的环境下，OFDM 可允许同时通话的用户数为 CDMA 的 2 至 10 倍。对于多蜂窝环境，OFDM 可允许同时通话的用户数为 CDMA 的 0.7 至 4 倍。OFDM 和 CDMA 在用户容量上的差异主要在于是否使用了**蜂窝分区**(cell



sectorization) 和语音激活检测技术 (voice activity detection)。如：用 1.25MHz 的带宽和 19.5kbit/s 的用户数据率时，CDMA 在单蜂窝系统中性能较差，在每个蜂窝 (cell) 中仅允许 7~16 个用户同时通话，而对于 OFDM 系统则可以达到 128 个用户。这种 CDMA 的低蜂窝容量是由于在反向传输链接中使用非正交码导致了较高的用户间干扰造成的。

CDMA 技术是基于扩频通信理论的调制和多址连接技术。OFDM 技术属于多载波调制技术，它的基本思想是将信道分成许多正交子信道，在每个子信道上使用一个子载波进行调制，并且各个子载波并行传输。OFDM 和 CDMA 技术各有利弊。CDMA 具有众所周知的优点，而采用多种新技术的 OFDM 也表现出了良好的网络结构可扩展性、更高的频谱利用率、更灵活的调制方式和抗多径干扰能力。下面主要从调制技术、峰均功率比、抗窄带干扰能力等角度分析这两种技术在性能上的具体差异。

——**调制技术**。一般来说，无线系统中频谱效率可以通过采用 16QAM (正交幅度调制)、64QAM 乃至更高阶的调制方式得到提高，而且一个好的通信系统应该在频谱效率和误码率之间获得最佳平衡。

在 CDMA 系统中，下行链路可支持多种调制，但每条链路的符号调制方式必须相同，而上行链路却不支持多种调制，这就使得 CDMA 系统丧失了一定的灵活性。并且，在这种非正交的链路中，采用高阶调制方式的用户必将会对采用低阶调制的用户产生很大的噪声干扰。

在 OFDM 系统中，每条链路都可以独立调制，因而该系统不论在上行还是在下行链路上都可以容易地同时容纳多种混合调制方式。这就可以引入“自适应调制”的概念。它增加了系统的灵活性，例如，在信道好的条件下终端可以采用较高阶的如 64QAM 调制以获得最大频谱效率，而在信道条件变差时可以选择 QPSK (四相移相键控) 调制等低阶调制来确保信噪比。这样，系统就可以在频谱利用率和误码率之间取得最佳平衡。此外，虽然信道间干扰限制了某条特定链路的调制方式，但这一点可以通过网络频率规划和无线资源管理等手段来解决。

——**峰均功率比** (PAPR)。这也是设备商们应该考虑的一个重要因素。因为 PAPR 过高会使得发送端对功率放大器的线性要求很高，这就意味着要提供额外功率、电池备份和扩大设备的尺寸，进而增加基站和用户设备的成本。

CDMA 系统的 PAPR 一般在 5~11dB，并会随着数据速率和使用码数的增加而增加。目前已有很多技术可以降低 CDMA 的 PAPR。

在 OFDM 系统中，由于信号包络的不恒定性，使得该系统对非线性很敏感。如果没有改善非线性敏感性的措施，OFDM 技术将不能用于使用电池的传输系统和手机等。目前有很多技术可以降低 OFDM 的 PAPR。

——**抗窄带干扰能力**。CDMA 的最大优势就表现在其抗窄带干扰能力方面。因为干扰只影响整个扩频信号的一小部分；而 OFDM 中窄带干扰也只影响其频段的一小部分，而且系统可以不使用受到干扰的部分频段，或者采用前向纠错和使用较低阶调制等手段来解决。

——**抗多径干扰能力**。在无线信道中，多径传播效应造成接收信号相互重叠，产生信号波形间的相互干扰，使接收端判断错误。这会严重地影响信号传输的质量。

为了抵消这种信号自干扰，CDMA 接收机采用了 RAKE 分集接收技术来区分和绑定多路信号能量。为了减少干扰源，RAKE 接收机提供一些分集增益。然而由于多路信号能量不相等，试验证明，如果路径数超过 7 或 8 条，这种信号能量的分散将使得信道估计精确度降低，RAKE 的接收性能下降就会很快。

OFDM 技术与 RAKE 接收的思路不同，它是将待发送的信息码元通过串并变换，降低速率，从而增大码元周期，以削弱多径干扰的影响。同时它使用循环前缀（CP）作为保护间隔，大大减少甚至消除了码间干扰，并且保证了各信道间的正交性，从而大大减少了信道间干扰。当然，这样做也付出了带宽的代价，并带来了能量损失：CP 越长，能量损失就越大。

——**功率控制技术**。在 CDMA 系统中，功率控制技术是解决远近效应的重要方法，而且功率控制的有效性决定了网络的容量。相对来说功率控制不是 OFDM 系统的基本需求。OFDM 系统引入功率控制的目的是最小化信道间干扰。

——**网络规划**。由于 CDMA 本身的技术特性，CDMA 系统的频率规划问题不很突出，但却面临着码的设计规划问题。OFDM 系统网络规划的最基本目的是减少信道间的干扰。由于这种规划是基于频率分配的，设计者只要预留些频段就可以解决小区分裂的问题。

——**均衡技术**。均衡技术可以补偿时分信道中由于多径效应而产生的 ISI。在 CDMA 系统中，信道带宽远远大于信道的平坦衰落带宽。由于扩频码自身良好的自相关性，使得在无线信道传输中的时延扩展可以被看作只是被传信号的再次传送。如果这些多径信号相互间的延时超过一个码片的长度，就可被 RAKE 接收端视为非相关的噪声，而不再需要均衡。



对 OFDM 系统，在一般的衰落环境下，均衡不是改善系统性能的有效方法，因为均衡的实质是补偿多径信道特性。而 OFDM 技术本身已经利用了多径信道的分集特性，因此该系统一般不必再作均衡。

《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

2013-06-05



每天一课  
mscb888

第二课：LTE关键技术OFDM

什么是OFDM？基本原理和应用

关键技术  
OFDM

OFDM与CDMA等技术比较

技术比较  
OFDM