

原 理 篇



第 1 章 LTE 相关技术

1.1 OFDM 技术

1.1.1 OFDM 概述

FDMA (Frequency Division Multiple Access, 即频分多址) 是指将通信系统的总频段划分成若干个等间隔的频道 (也称信道), 然后分配给不同的用户使用。

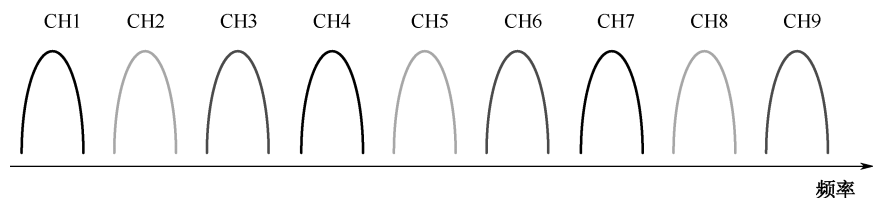
注意: 本书含有大量缩写名词, 为不影响阅读, 大部分缩写单词的全词形式和中文解释都放在附录中。

传统的频分复用 (FDM) 多载波调制技术中各个载波的频谱是互不重叠的, 如图 1-1 (a) 所示, 各载波之间须保留足够的频率间隔。不同载波之间保留了频率间隔, 尽管避免了各载波之间的相互干扰, 但是牺牲了频率利用效率。

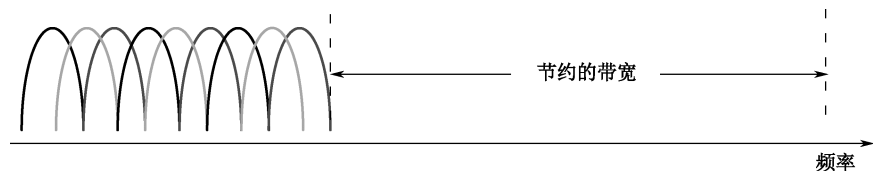
能否采用新的技术, 既可以避免各载波之间的相互干扰, 又可以提升频率利用效率呢? OFDM 就是解决此问题的有效技术。

OFDM (正交频分复用) 是指将信道分成若干正交子信道, 然后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。

OFDM 多载波调制技术中各子载波的频谱是互相重叠的, 并且在整个符号周期内满足正交性, 如图 1-1 (b) 所示, OFDM 不但减小了子载波间的相互干扰, 还大大减少了保护带宽 (即频率间隔), 提高了频谱利用率。OFDM 是一种能够提高频谱利用效率的多载波传输方式。



(a) FDM (频分复用) 示意图



(b) OFDM 示意图

图 1-1 FDM 与 OFDM 的对比

1.1.2 OFDM 系统实现

OFDM 系统实现的主要功能模块有三个：(1) 串/并、并/串转换；(2) 快速傅里叶变换 (FFT)、快速傅里叶逆变换 (IFFT)；(3) 加 CP、去 CP，如图 1-2 所示。

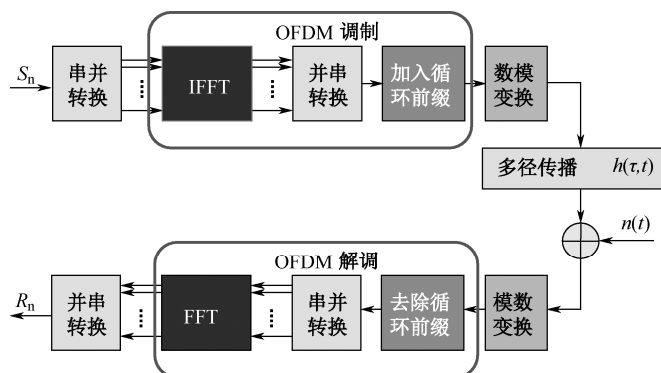


图 1-2 OFDM 系统原理

1. 并行传输

在发射端，用户的高速数据流经过串/并转换后，成为多个低速率码流，每个码流可用一个子载波发送。

在移动通信系统中，由于信号的传输路径不同，造成到达接收端的信号强度也会不同，这称为空间选择性衰落，多径效应导致空间选择性衰落。多径效应是指无线电波经过一点发射出去，经过直射、绕射、反射等不同路径到达接收端，其所需时间和信号强度是不同的。多径效应产生多径时延或时间色散，多径时延容易引起符号间干扰 (ISI)，增大了系统的自干扰。

在宽带传输系统中，不同频率在相同空间的衰落特性也是不一样的，这称为频率选择性衰落。频率选择性衰落易引起较大的信号失真，需要信道均衡操作，以便纠正信道对不同频率的响应差异，尽量恢复信号发送前的样子。带宽越大，信道均衡操作越难。

使用并行传输技术可使每个码元的传输周期大幅增加，降低了系统的自干扰。同时，使用并行传输技术将宽带单载波转换为多个窄带子载波操作，每个子载波的信道响应近似没有失真，即频率选择性衰落不明显，这样，接收端的信道均衡操作非常简单，极大地降低了信号失真。

2. FFT

OFDM 要求各子载波之间相互正交，在理论上已证明，使用快速傅里叶变换 (FFT) 可以较好地实现正交变换。

在发射端，OFDM 系统使用快速傅里叶逆变换 (IFFT) 模块来实现多载波映射叠加过程，经过 IFFT 模块可将大量窄带子载波频域信号转换成时域信号。

在接收端，用快速傅里叶变换模块把重叠在一起的波形分隔出来。

3. 加入 CP

由于多径时延的问题，导致 OFDM 信号到达接收端可能带来信号间干扰 (ISI)；同样，

由于多径时延的问题,使得不同子载波到达接收端后,不能再保持绝对的正交性,从而引入了多载波间干扰(ICI)。

如果在 OFDM 信号发送前,在码元内插入保护间隔,当保护间隔足够大的时候,多径时延造成的影响不会延伸到下一个信号周期内,从而大大减少了信号间干扰(ISI)。

在 OFDM 中,使用的保护间隔是循环前缀 CP (Cyclic Prefix),所谓循环前缀,就是将每个 OFDM 信号的尾部一段复制到信号之前,如图 1-3 所示。

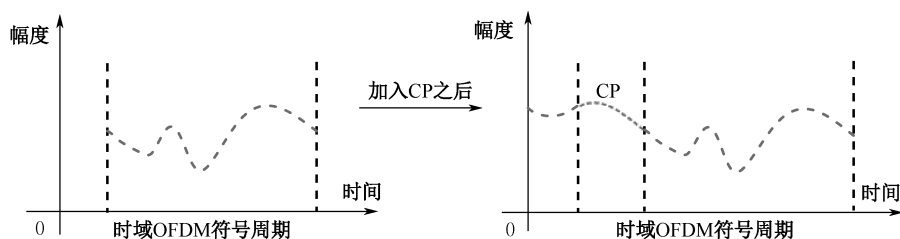


图 1-3 加入 CP 示意图

比起纯粹的加空闲保护时段来说,加入 CP 增加了冗余信号信息,更有利于克服信号间干扰(ISI);同时 OFDM 加入 CP 可以保证信道间的正交性,大大减少了多载波间干扰(ICI)。

1.1.3 OFDM 特点

OFDM 是 LTE 系统关键技术,相比于 3G 系统中的 CDMA,OFDM 具有以下优势。

1) 频谱效率高

传统的 FDM 系统的载波之间必须有保护带宽,频率的利用效率不算高。OFDM 的多个正交的子载波可以相互重叠,不用保护频带来分离信道,从而提高了频率利用效率,提升了系统的容量。

2) 带宽可灵活配置,且可扩展性强

带宽可灵活配置表现在带宽大小可灵活分配,使用的频率可离散分配。

(1) 带宽大小可灵活分配。以往固定带宽的系统(如 WCDMA 系统)中,上行 5MHz 带宽、下行 5MHz 带宽是固定好的,不能变化;但在 LTE 系统中,上下行的带宽可以根据需要灵活分配。

(2) 频率可离散分配。以往固定带宽的系统(如 WCDMA 系统)中,所需的 5MHz 带宽必须是连续的,而在 LTE 系统中,假如需要 5MHz 带宽时,可以将 5MHz 带宽分在不连续的频率上。

目前 LTE 支持的带宽有 6 个等级:1.4MHz、3MHz、5MHz、10MHz、15MHz、20MHz,可扩展性强。

3) 自适应能力强

OFDM 技术持续不断地监控无线环境特性随时随地的变化,通过接通、切断相应的子载波,使 OFDM 系统动态地适应环境,极大地提高了抗频率选择性衰落的能力,确保了无线链路的传输质量。

OFDM 的各个子载波可以根据信道状况的不同选择不同的调制方式,如 BPSK、QPSK、8PSK、16QAM、64QAM 等。当信道条件好的时候,采用高阶的调制方式,而当信道条件

差的时候，则需要采用抗干扰能力强的低阶调制方式。

4) 抗衰落能力和抗干扰能力强

由于 OFDM 将宽带传输转化为很多个窄带子载波的并行传输，信号周期长，能抵抗多径效应引起的信道快衰落。

OFDM 系统加入循环前缀 CP 技术之后，大大降低了 ISI 和 ICI 的影响。

5) MIMO 技术实现简单

OFDM 技术使得每个子载波上的信道可以看成是平坦衰落信道，从而使子载波上 MIMO（多进多出）的检测仅考虑单径信道而不用考虑多径信道的影响，所以大大简化了 MIMO 接收端的设计与实现。

尽管 OFDM 有诸多优点，但该技术也有不可忽略的如下缺点。

1) 峰均比高

OFDM 信号由多个子载波信号组成，各个子载波信号是由不同的调制方式分别完成的。OFDM 信号在时域上表现为 N 个正交子载波信号的叠加，当这 N 个信号恰好同相，功率以峰值相叠加时，OFDM 符号将产生最大峰值功率，该峰值功率最大可以是平均功率的 N 倍。尽管峰值功率出现的概率较低，但峰均比（即峰值功率与系统总平均功率的比值）越大，对放大器的线性范围要求必然越高。过高的峰均比会降低放大器的效率，增加 A/D 转换和 D/A 转换的复杂性，也增加了传送信号失真的可能性。

OFDM 的峰均比比 CDMA 系统高很多，会影响射频功率放大器的效率，增加硬件的成本。

2) 多普勒频移对 OFDM 系统影响大

OFDM 系统严格要求各个子载波之间的正交性，频移和相位噪声会使各个子信道之间正交特性恶化。任何微小的频移都会破坏子载波之间的正交性，仅 1% 的频移就会造成信噪比下降 30dB，引起子载波间干扰（ICI）。

当移动速度较高的时候，会产生多普勒频移。对于宽带载波（数量级为 MHz）来说，多普勒频移相对于整个带宽占比较小，影响不大；而多普勒频移相对于 OFDM 子载波（子载波带宽为 15kHz）来说，占比就比较大了。对抗多普勒频移性能较差，是 OFDM 技术的一个非致命的缺点。

同样，频移会产生相位噪声，易导致高阶调制信号星座点的错位、扭曲，从而形成 ICI。面对宽带单载波系统来说，只有降低接收信噪比（SNR），才不会引起载波间相互干扰。

3) OFDM 对时间和频率同步要求严格

时间偏移误差会导致 OFDM 子载波的相位偏移，会导致信号间干扰（ISI）；而频率偏移误差则会导致子载波间失去正交性，带来子载波间的干扰（ICI），影响接收性能。因此，OFDM 系统对时间和频率的同步误差比较敏感。

OFDM 系统通过设计同步信道、导频和信令交互，以及加入 CP，目前已经能够满足系统对同步的要求。

4) 存在小区间下行干扰

OFDM 系统保证了小区内用户的正交性，在抑制小区内的用户干扰方面，优势比较明显。但是，OFDM 系统本身无法提供小区间的多址能力，无法实现自然的小区间多址，对于小区间的干扰抑制问题，需要依赖 ICIC 技术来进行辅助抑制。

1.2 MIMO 技术

MIMO (多进多出) 技术是指在发射端和接收端分别使用多个发射天线和接收天线, 使信号通过发射端与接收端的多个天线发射和接收, 从而改善通信质量。

LTE 系统的下行 MIMO 技术支持 2×2 的基本天线配置。下行 MIMO 技术主要包括空间分集、空间复用及波束赋形 3 大类。LTE 系统上行 MIMO 技术包括空间分集和空间复用。在 LTE 系统中, 应用 MIMO 技术的上行基本天线配置为 1×2 , 即一根发射天线和两根接收天线。考虑到终端实现复杂度的问题, 目前对于上行并不支持一个终端同时使用两根天线进行信号发送, 即只考虑存在单一上行传输链路的情况。

1.2.1 空间分集

空间分集分为发射分集、接收分集两种。

1. 发射分集

发射分集是在发射端使用多幅发射天线发射信号, 通过对不同的天线发射的信号进行编码达到空间分集的目的, 通过发射分集, 接收端可以获得比单天线更高的信噪比。空间发射分集常用的技术包含空时发射分集 (STTD)、时间切换发射分集 (TSTD)、频率切换发射分集 (FSTD)、空频发射分集 (SFTD) 和循环延迟分集 (CDD) 等。LTE 系统中, 为了确保控制信道可靠传输, 控制信道普遍采用发射分集方式传输。

1) 空时发射分集

空时发射分集 (STTD) 采用将空间分集与时空编码相结合的方案, 它是目前最受关注的分集方案, STBC (空时块码) 的主要思想是在空间和时间两个维度上安排数据流的不同版本, 可以有空间分集和时间分集的效果, 从而降低信道误码率, 提高信道可靠性, 如图 1-4 所示。空时发射分集方法对信道衰落的抑制能力使它能够使用高阶的调制方式减少复用因子, 以提高系统容量。

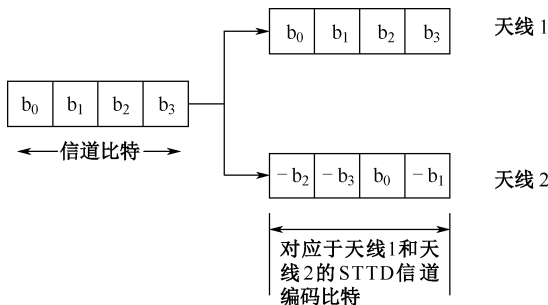


图 1-4 STTD 编码方式

2) 空频发射分集

空频发射分集将同一组数据承载在不同的子载波上面获得频率分集增益。空频块码 (SFBC) 的主要思想是在空间和频率两个维度上安排数据流的不同版本, 可以有空间分集

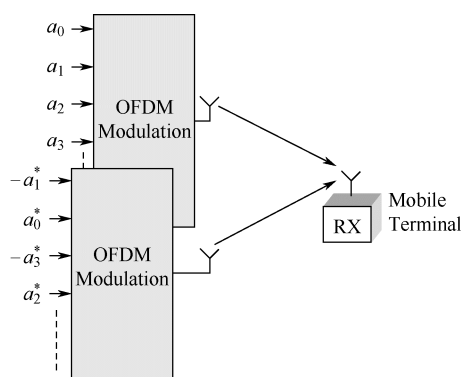


图 1-5 SFBC 原理图

和频率分集的效果。两天线空频发射分集原理图如图 1-5 所示。SFBC 发射分集方式通常要求发射天线尽可能独立，以最大限度地获取分集增益。

3) 时间切换发射分集

时间切换发射分集 (TSTD) 是根据时隙号的奇偶性，在两个天线上交替发射基本同步码和辅助同步码。例如奇数时隙时用第 1 个天线发射，偶数时隙则用第 2 个天线发射。

4) 频率切换发射分集

频率切换发射分集 (FSTD) 可使用在 LTE 中物理广播信道和物理下行控制信道上，是一种多天线发射分集技术。不同的天线支路使用不同的子载波集合进行发射，减少了子载波之间的相关性，使等效信道产生了频率选择性，因而可以利用纠错编码降低差错概率。

5) 循环延时分集

传统延时分集是指在不同天线上传输同一个信号的不同延时版本，从而人为地增加信号所经历信道的时延扩展值，而循环延时分集 (CDD) 技术是针对 OFDM 系统，在插入循环前缀 (CP) 之前，将同一个 OFDM 信号分别循环移位 D_m 个样点 (下标表示天线序号)，然后每个天线根据各自对应的循环移位之后的版本，分别加入各自的 CP。

根据 DFT (离散傅里叶变换) 特性，信号在时域的周期循环移位 (即延时) 相当于频域的线性相位偏移，因此 LTE 的循环延时分集是在频域上进行相位偏移操作的。图 1-6 和图 1-7 分别给出了下行发射端的时域循环移位与频域相位线性偏移的等效示意图。

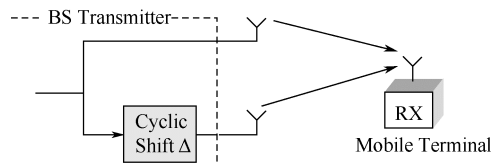


图 1-6 时域循环移位

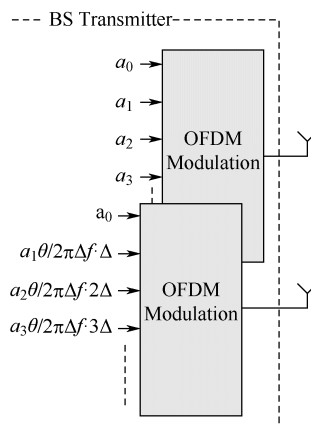


图 1-7 频域相位性偏移

2. 接收分集

接收分集指多个天线接收来自多个信道 (时间、频率或者空间) 承载同一信息的多个独立的信号副本。由于多个信道的传输特性不同，信号多个副本的衰落就不会相同，不可能同时处于深衰落情况，接收分集是利用信号和信道的性质，将接收到的多径信号分离成

互不相关（独立）的多径信号，然后将多径衰落信道分散的能量更有效地接收进来，并在处理之后进行判决，从而达到抗衰落的目的。

如果不采用分集技术，在噪声受限的条件下，发射端必须要采用较高的功率，才能保证信道情况较差时链路正常连接，因此采用分集技术可以降低发射端的发射功率。在移动无线环境中，由于手持终端的电池容量非常有限，所以反向链路中所能获得的功率也非常有限，而采用分集技术可以降低手机的发射功率。

1.2.2 空间复用

空间复用的主要原理是利用空间信道的弱相关性，通过在多个相互独立的空间信道上传输不同的数据流，从而提高数据传输的峰值速率。空间复用适用于信道质量高且空间独立性强的工作场景。LTE 系统中空间复用技术包括开环空间复用和闭环空间复用。**LTE 系统中空间复用只应用于下行业务信道。**

1. 开环空间复用

开环空间复用时接收端和发射端无信息交互，终端不反馈信道信息，发射端根据预定义的信道信息来确定发射信号。LTE 系统支持基于多码字开环的空间复用传输。一个码字就是在一个传输时间间隔（TTI，指在无线链路中的一个独立解码传输的长度）上发送的包含了 CRC（循环冗余校验码）位并经过了编码（Encoding）和速率匹配（Rate Matching）之后的独立传输块（Transport Block）。所谓多码字，即用于空间复用传输的多层数据来自于多个不同的独立进行信道编码的数据流，每个码字可以独立地进行速率控制，如图 1-8 所示。

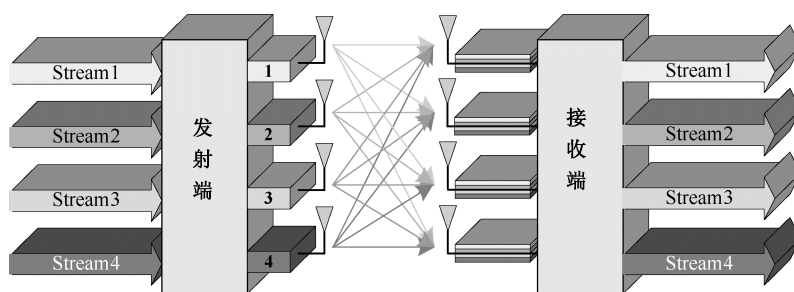


图 1-8 开环空间复用原理图

2. 闭环空间复用

闭环空间复用需要终端反馈信道信息，发射端采用该信息进行信号预处理以产生空间独立性，如图 1-9 所示。LTE 系统中，闭环空间复用包括两种方式，一种是基于非码本的预编码方式，该方式基于终端提供的探测参考信号（SRS）或解调参考信号（DMRS）获得的信道状态信息（CSI），由基站自行计算出预编码矩阵；另外一种是基于码本的预编码方式，该方式基于终端直接反馈的预编码矩阵索引号（PMI）从码本中选择预编码矩阵。

空间复用利用了天线间空间信道的弱相关性，在相互独立的信道上传送不同的数据流，提高数据传输的峰值速率。

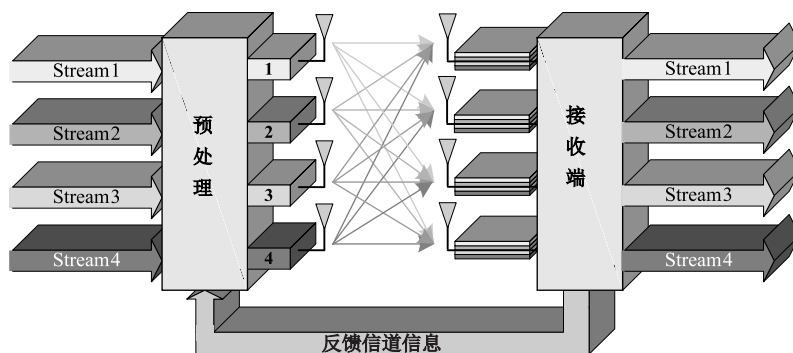


图 1-9 闭环空间复用原理图

1.2.3 波束赋形

MIMO 中的波束赋形方式与智能天线系统中的波束赋形类似，在发射端将待发射数据矢量加权，形成某种方向图后到达接收端，接收端再对收到的信号进行上行波束赋形，抑制噪声和干扰。

与常规智能天线不同的是原来的下行波束赋形只针对一个天线，现在需要针对多个天线。通过下行波束赋形，使得信号在用户方向上得到加强，通过上行波束赋形，使得用户具有更强的抗干扰能力和抗噪能力，如图 1-10 所示。波束赋形和发射分集类似，可以利用额外的波束赋形增益提高通信链路的可靠性，也可在同样可靠性下利用高阶调制提高数据传输速率和频谱利用率。

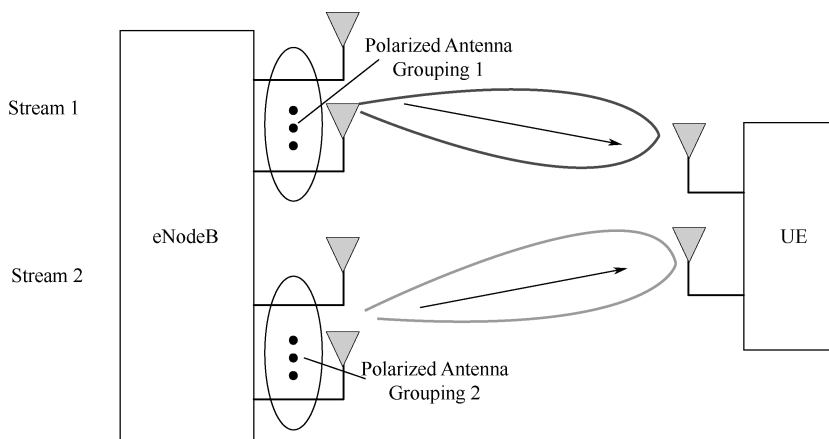


图 1-10 波束赋形原理图

1.2.4 传输模式

在 eNodeB 侧，每个小区可以选择配置 1/2/4/8 根发射天线。不同的多天线传输方案对应不同的传输模式（TM）。到 Rel-10 为止，LTE 针对不同的 RF 环境支持 9 种 TM，它们的区别在于天线映射的特殊结构不同、解调时所使用的参考信号不同（小区特定参考信号或 UE 特定参考信号），以及所依赖的 CSI（信道状态信息）反馈类型不同，如表 1-1 所示。

表 1-1 LTE 多天线传输模式特点及应用场景

传输模式	名称	技术描述	特点	应用场景	MIMO 类型
TM1	单天线	信息通过单天线发送	产生的小区特定参考信号 (CRS) 开销少	无法布放双通道时分系统的室内站	无
TM2	发射分集	同一信息的多个信号副本分别通过多个衰落特性相互独立的信道进行发送	不用反馈 PMI(提高链路传输质量, 提高小区覆盖半径)	信道质量不好时, 如小区边缘 (作为其他 MIMO 模式的回退模式)	分集
TM3	开环空间复用 / 发射分集	终端不反馈信道信息, 通过发射端预定义的信道信息来确定发射信号	不用反馈 PMI(提升小区平均频谱效率和峰值速率)	信道质量高且空间独立性强, 终端静止时性能好(低速移动)	复用
TM4	闭环空间复用	需要终端反馈信道信息, 发射端根据该信息进行信号预处理以保证信号空间独立性	要反馈 PMI(提升小区平均频谱效率和峰值速率)	信道质量高且空间独立性强(高速移动)	复用
TM5	多用户 MIMO	基站使用相同时频资源将多个数据流发送给不同用户, 接收端利用多根天线对干扰数据流进行取消和零陷	(提升小区平均频谱效率和峰值速率)	密集城区	
TM6	单层闭环空间复用	终端反馈 RI 为 1 时, 发射端采用单层预编码, 使其适应当前的信道	要反馈 PMI(提升小区覆盖)	仅支持 rank=1 的传输	
TM7	单流波束赋形 / 发射分集	发射端利用上行信号来估计下行信道的特征, 在下行信号发射时, 每根天线上乘以相应的特征权值, 使其天线阵发射信号具有波束赋形的效果	(提高链路传输质量, 提高小区覆盖半径)	信道质量不好时, 如小区边缘	波束赋形
TM8	双流波束赋形	结合复用和智能天线技术, 进行多路波束赋形发送, 既提高用户信号强度, 又提高用户的峰值和均值速率	提高小区覆盖半径, 提升小区中心用户吞吐量	小区中心吞吐量大的场景	波束赋形
TM9	多流波束赋形	这是 LTE-A 中新增加的一种模式, 可以支持最多 8 层的传输, 主要是为了提升数据的传输速率			波束赋形

LTE 针对物理下行共享信道 (PDSCH) 定义了 9 种传输模式, 每种传输模式内又同时定义了多种 MIMO 方式, 因此多天线模式切换就存在两种切换过程: 模式内切换和模式间切换。

所谓模式内切换是指在同一种传输模式内的不同 MIMO 方式之间的切换, 此时 MIMO 方式的变化是通过物理下行控制信道的下行控制信息 (DCI) 指示的, 切换周期较短, 能被 UE 快速响应。TM3 模式内包含开环空间复用 (SDM) 和发射分集 (SFBC), TM7 模式内包含基于用户的波束赋形 (Port5) 和发射分集 (SFBC), 可进行模式内切换。

模式间切换是指不同传输模式之间的切换，其中传输模式的变化由基站的 RRC 信令通知用户进行切换，属于高层信令进行切换调度，因此切换周期较长。

eNodeB 自行决定某一时刻对某一终端采用什么传输模式，并通过 RRC 信令通知终端。传输模式是针对单个终端的，同小区的不同终端可以有不同的传输模式。

【思考与复习题】

一、填空题

(1) OFDM 将信道分成若干正交子信道，然后将高速数据信号转换成_____的低速子数据流。

(2) 在移动通信系统中，由于信号的传输路径不同，造成到达接收端的信号强度也会不同，这称为空间选择性衰落，_____容易产生空间选择性衰落。

(3) 多径时延容易引起_____和_____。

(4) LTE 中加入_____增加了冗余信号信息，影响了系统的容量，但是有利于克服符号间干扰 (ISI) 和子载波间干扰 (ICI)。

(5) LTE 采用多个窄带子载波并行传输技术，每个子载波的信道响应近似没有失真，即_____衰落不明显。

(6) _____技术是指在发射端和接收端分别使用多个发射天线和接收天线，使信号通过发射端与接收端的多个天线发送和接收，从而改善通信质量。

(7) 下行 MIMO 技术主要包括_____、_____及_____3 大类。

(8) LTE 系统中，为了确保控制信道可靠传输，控制信道普遍采用_____方式传输。

(9) 空间发射分集常用的技术包含_____、_____、_____、_____和_____等。

(10) LTE 中一个 TTI 的时长为_____。

(11) PDSCH 的 TM3 模式在信道质量好的时候为_____，信道质量差的时候回落到_____。

二、判断题

(1) LTE 的物理层上行采用 OFDM 技术。 ()

(2) LTE 上下行均采用 OFDM 多址方式。 ()

(3) 空间复用适用于信道质量高且空间独立性强的工作场景。 ()

(4) LTE 系统中空间复用只应用于下行业务信道。 ()

(5) 发射分集是在发射端使用多个发射天线发射信息，通过对不同的天线发射的信号进行编码达到空间分集的目的，接收端可以获得比单天线高的信噪比。 ()

(6) 目前 LTE 支持的带宽有 6 个等级：1.6MHz、3MHz、5MHz、10MHz、15MHz、20MHz。 ()

三、单项选择题

- (1) 下列哪项属于 OFDM 技术的缺点？()
- A. 抗多径能力差 B. 峰均比高
C. 需要复杂的双工器 D. 与 MIMO 技术结合复杂度高
- (2) LTE 上行采用 SC-FDMA 是为了()
- A. 降低峰均比 B. 增大峰均比 C. 降低峰值 D. 增大均值
- (3) 扩展 CP 的时长为()
- A. 4.7 μ s B. 5.2 μ s C. 33.3 μ s D. 16.7 μ s
- (4) 下述关于 4 $\times$ 2 MIMO 说法正确的是()
- A. 4 发是指 eNodeB 端, 2 收也是指 eNodeB 端
B. 4 发是指 eNodeB 端, 2 收是指 UE 端
C. 4 发是指 UE 端, 2 收也是指 UE 端
D. 4 发是指 UE 端, 2 收是指 eNodeB 端
- (5) 哪个模式为其他 MIMO 模式的回退模式？()
- A. TM1 B. TM2 C. TM3 D. TM4
- (6) TM3 模式在信道条件好的情况下为()
- A. 发送分集 B. 开环空分复用 C. 闭环空分复用 D. 单流波束赋形

四、多项选择题

- (1) MIMO 技术可以起到()作用。
- A. 收发分集 B. 空间复用 C. 赋形抗干扰 D. MU-MIMO
- (2) 下列哪项属于 OFDM 技术的缺点？()
- A. 抗多径能力差 B. 峰均比高
C. 时频同步要求高 D. 同频干扰大

五、问答题

- (1) LTE 中 CP 有何作用？
- (2) OFDM 技术优点有哪些？
- (3) OFDM 技术缺点有哪些？