

LTE关键技术OFDM与MIMO 基本原理

第一部分 LTE关键技术之OFDM



■ 第一章 OFDM技术基本原理

- ◆ 第一节 OFDM的起源与发展
- ◆ 第二节 OFDM系统原理与实现

■ 第二章 LTE上下行传输技术

- ◆ 第一节 LTE下行多址技术方案
- ◆ 第二节 LTE上行多址技术方案



OFDM的起源与发展

为了解决低效利用频谱资源问题，在20世纪60年代提出一种思想，即使用子信道频谱相互覆盖的并行数据传输和FDM，要求每个子信道内承载的信号传输速率为 b ，而且各子信道在频域的距离也是 b ，这样可以避免使用高速均衡，并且可以对抗窄带脉冲噪声和多径衰落，而且还可以充分的利用可用的频谱资源。（OFDM的雏形）

随即，这种技术就被应用到多种高频军事系统中，其中包括KINEPLEX，ANDEFT以及KNTHRYN等。

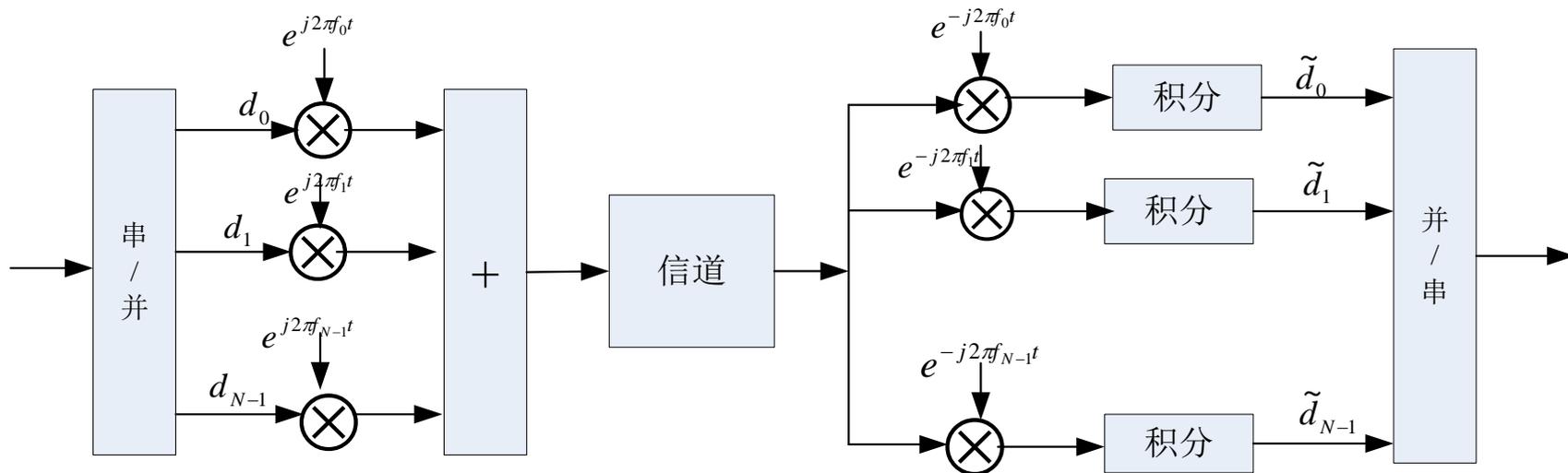
OFDM的起源与发展

- 1971年，Weinstein和Ebert把离散傅里叶变换（DFT）应用到并行传输系统中，作为调制和解调的一部分，这样就不再利用带通滤波器而是经过基带处理就可以实现FDM。（OFDM形成）
- 20世纪80年代中期，欧洲在数字音频广播（DAB）方案中采用了这种并行传输方法，使得OFDM开始受到关注并且得到广泛应用。
- 20世纪80年代后，OFDM渐渐在数据音频广播（DAB）、数字视频广播（DVB）、基于IEEE802.11标准的无限本例局域网（WLAN）以及有线电话网上基于现有铜双绞线的非对称高比特率数字用户线技术（如ADSL）中得到了广泛应用。
- Wi-Fi和WiMAX技术的兴起更是使得OFDM成为一种“时髦”的技术。
- 3GPP LTE也采用了OFDM技术，预计未来的B3G技术也将基于OFDM。

OFDM的起源与发展——什么是OFDM

- OFDM（正交频分复用：Orthogonal Frequency Division Multiplexing）是一种特殊的多载波传输方案，它可以被看作一种调制技术，也可以被当作一种复用技术。OFDM结合了多载波调制（MCM）和频移键控（FSK），把高速的数据流分成多个平行的低速数据流，把每个低速的数据流分到每个单子载波上，在每个子载波上进行FSK。
- 选择OFDM的一个主要原因在于该系统能够很好地对抗频率选择性衰落或窄带干扰。
- LTE系统下行多址方式为正交频分多址（OFDMA），上行为基于正交频分复用（OFDM）传输技术的单载波频分多址（SC-FDMA）。

OFDM系统原理与实现——多载波技术



多载波传输是相对于单载波传输而来的：使用多个载波并行传输数据。

- 1: 把一串高速数据流分解为若干个低速的子数据流——每个子数据流将具有低得多的速率；
- 2: 将子数据流放置在对应的子载波上；
- 3: 将多个子载波合成，一起进行传输；

OFDM系统原理与实现——基本思想

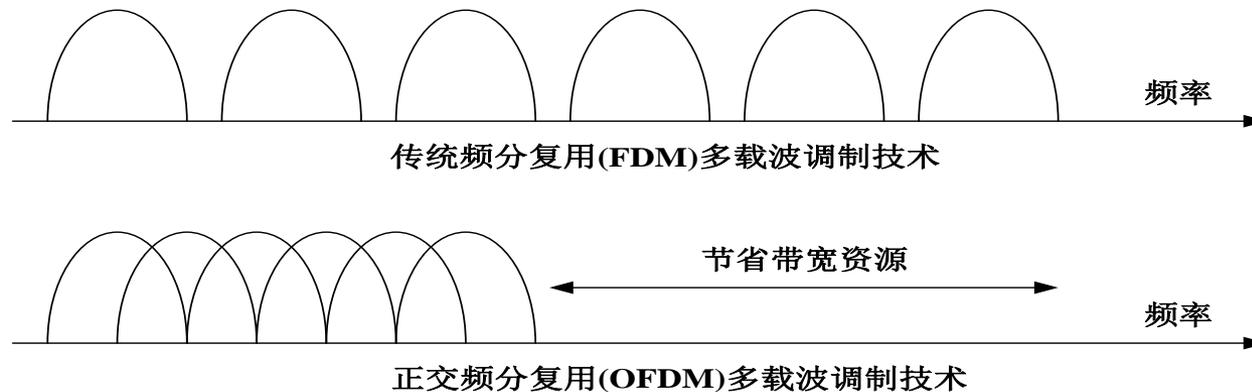


图 FDM和OFDM带宽利用率的比较

- OFDM将频域划分为多个子信道，各相邻子信道相互重叠，但不同子信道相互正交。将高速的串行数据流分解成若干并行的子数据流同时传输
- OFDM子载波的带宽 $<$ 信道“相干带宽”时，可以认为该信道是“非频率选择性信道”，所经历的衰落是“平坦衰落”
- OFDM符号持续时间 $<$ 信道“相干时间”时，信道可以等效为“线性时不变”系统，降低信道时间选择性衰落对传输系统的影响

OFDM系统原理与实现——正交性

■ 对OFDM正交性的理解

对于任意两个函数 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ ，如果有 $\int_0^T S_1(t)S_2(t)dt = 0$,

则函数 $S_1(t)$ 和 $S_2(t)$ 在区间 $(0, T)$ 上正交。

对于OFDM，设相邻子载波的频率间隔 $\Delta f = \frac{1}{T}$ ， T 是符号的持续时间。

那么，任意一对子载波可以分别表示为 $e^{j2\pi\frac{k_1}{T}t}$ 和 $e^{j2\pi\frac{k_2}{T}t}$ ，其中 k_1 和 k_2 是

正整数。可以得到，两个子载波的内积，满足：

$$\frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi\frac{k_1}{T}t} \cdot e^{-j2\pi\frac{k_2}{T}t} dt = \begin{cases} 1 & k_1 = k_2 \\ 0 & k_1 \neq k_2 \end{cases}$$

即，子载波 $e^{j2\pi\frac{k_1}{T}t}$ 和 $e^{j2\pi\frac{k_2}{T}t}$ 正交。

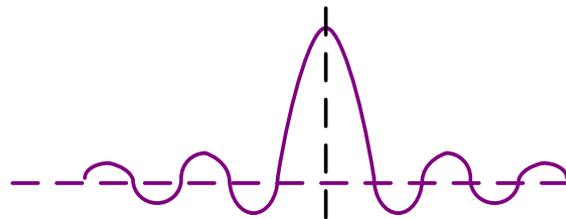
OFDM系统原理与实现——正交性

■ 一个OFDM符号周期内4个子载波的实例

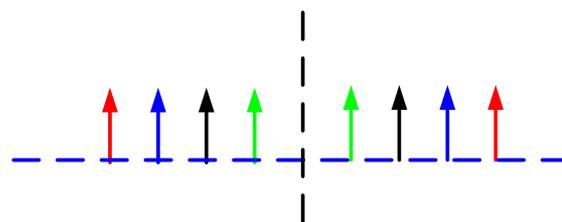
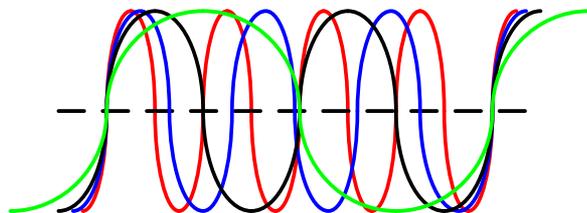
时域

频域

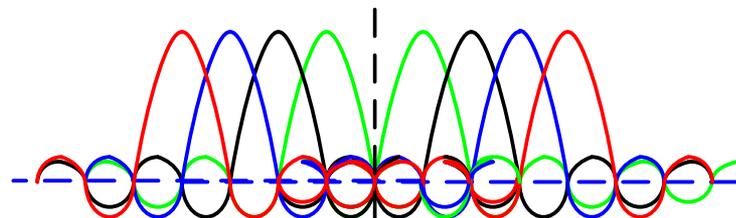
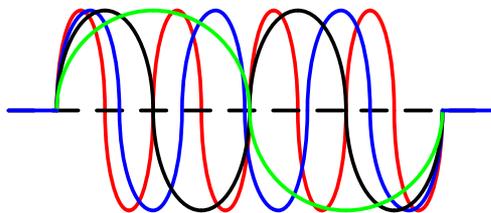
矩形函数



4个子载波



OFDM符号周期内
4个子载波



OFDM系统原理与实现——基本特点

1. 发射机在发射数据时，将高速串行数据转为低速并行，利用正交的多个子载波进行数据传输；
2. 各个子载波使用独立的调制器和解调器；
3. 各个子载波之间要求完全正交、各个子载波收发完全同步；
4. 发射机和接收机要精确同频、同步，准确进行位采样；
5. 接收机在解调器后端进行同步采样，获得数据，然后转为高速串行；
6. OFDM多载波传输，载波间相互重叠，具有很高的频谱利用率。

受限于上述第2、3条，传统的模拟技术很难实现正交的子载波，因此早期没有得到广泛的应用。随着数字信号处理技术的发展，FFT技术的引入，为OFDM的广泛应用奠定了基础。

OFDM系统原理与实现——DFT和IDFT介绍

■ DFT和IDFT定义

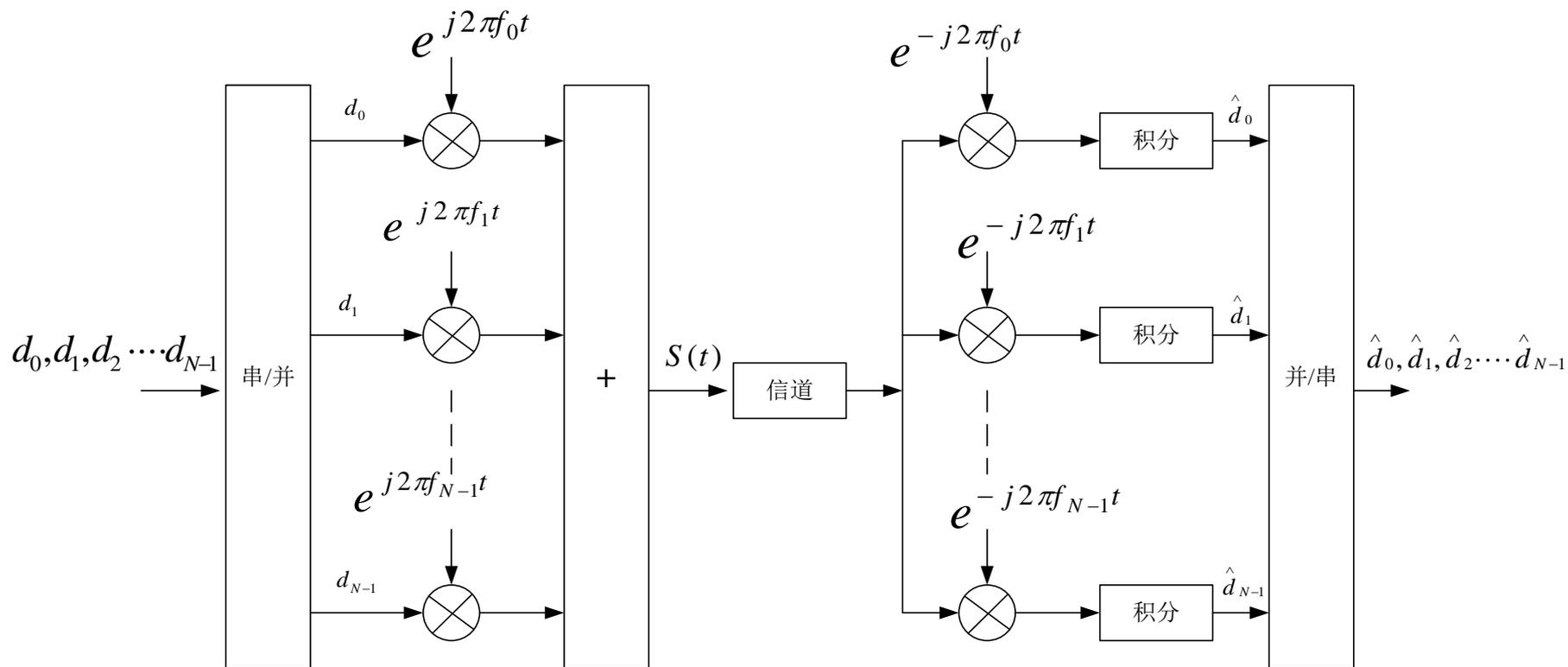
N样本序列的N点离散Fourier变换(DFT)，以及变换为的离散Fourier逆变换(IDFT)，定义如下：

$$DFT: \quad X_{DFT}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi \cdot n \cdot k / N}$$

$$IDFT: \quad x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{DFT}[k] \cdot e^{j2\pi \cdot n \cdot k / N}$$

频域内每个采样点 $X_{DFT}[k]$ ，都是时域内所有采样点 $x[n]$ 的线性叠加；同样，时域内每个采样点 $x[n]$ 都是频域内所有采样点 $X_{DFT}[k]$ 的线性叠加。

OFDM系统原理与实现——系统原理



OFDM系统基本模型图

OFDM系统原理与实现——系统原理

OFDM 发送端 N 点序列 $d = (d_0, d_1, \dots, d_n, \dots, d_{N-1})$, $d_n = a_n + jb_n$ 。OFDM 基带信号

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k \cdot e^{j2\pi f_k (t-t_s)}$$

$$S(t) = 0 \quad t < t_s \text{ 或 } t > t_s + T$$

其中, T 是 OFDM 符号持续时间, 子载波频率 $f_k = k/T$ 。令 $t_s = 0$, 在 T 区间内对 $S(t)$

做 N 次采样, 采样时刻 $t_n = \frac{nT}{N}$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N-1$)。

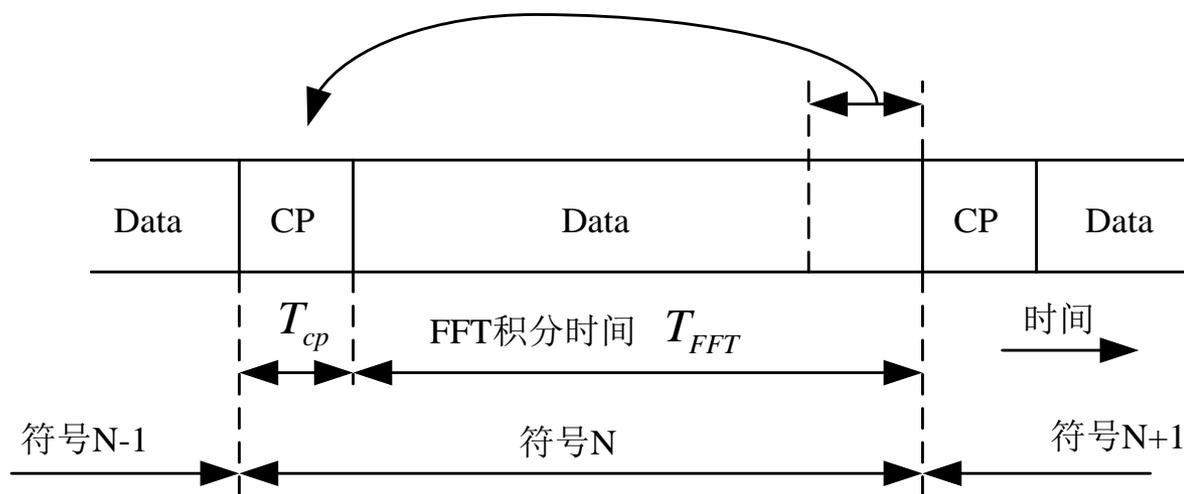
$$S[n] = S(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k \cdot e^{j2\pi f_k t_n} = \sum_{k=0}^{N-1} d_k \cdot e^{j2\pi kn/N}$$

结论: OFDM 调制(从发送序列到 OFDM 时域采样信号的转换), 可以采用 IDFT 实现。

OFDM系统原理与实现——系统原理

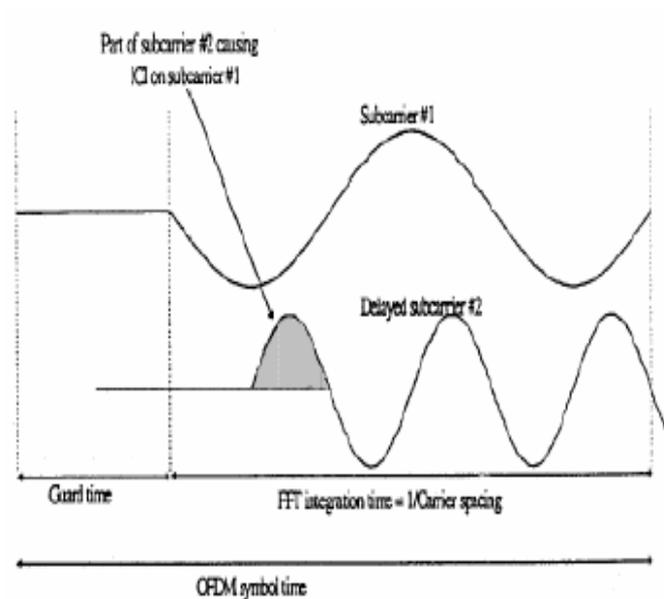
■ 保护间隔 (Guard Interval) 和循环前缀 (cyclic prefix)

- 为了最大限度地消除符号间干扰，在 OFDM 符号之间插入保护间隔，保护间隔长度大于无线信道的最大时延扩展，这样一个符号的多径分量不会对下一个符号造成干扰。
- 为了避免空闲保护间隔，由于多径传播造成子载波间的正交性破坏，将每个 OFDM 符号的后 T_{cp} 时间中的样点复制到 OFDM 符号的前面，形成循环前缀 (cyclic prefix)。

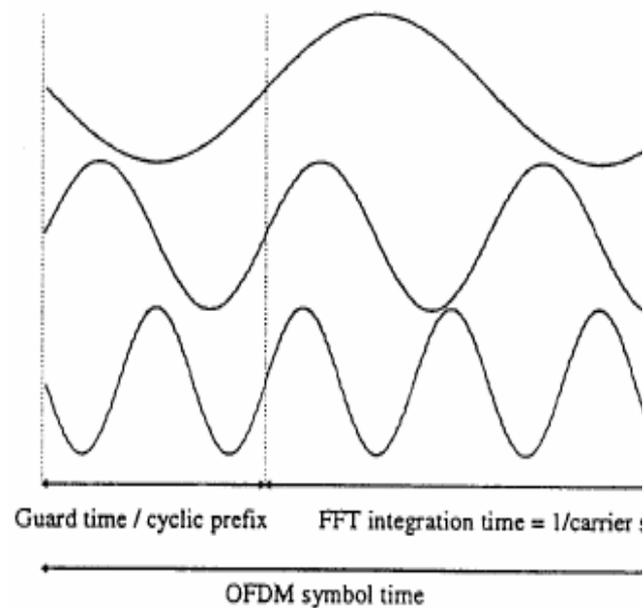


OFDM系统原理与实现——系统原理

- 保护间隔 (Guard Interval) 和循环前缀 (cyclic prefix)



多径情况下空闲保护间隔在子载波间造成的干扰

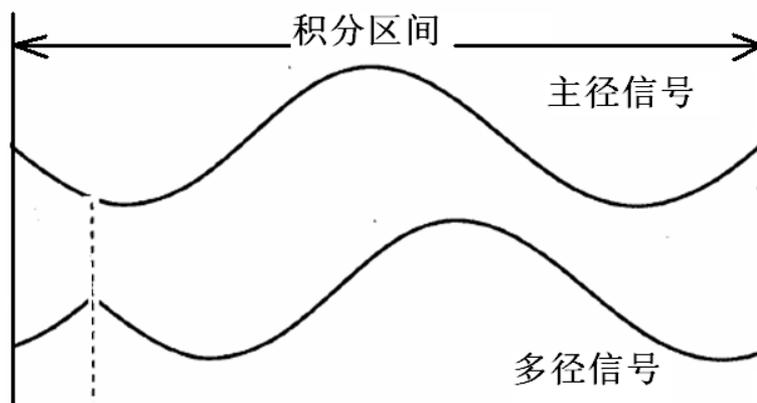


带循环前缀的 OFDM 符号

OFDM系统原理与实现——系统原理

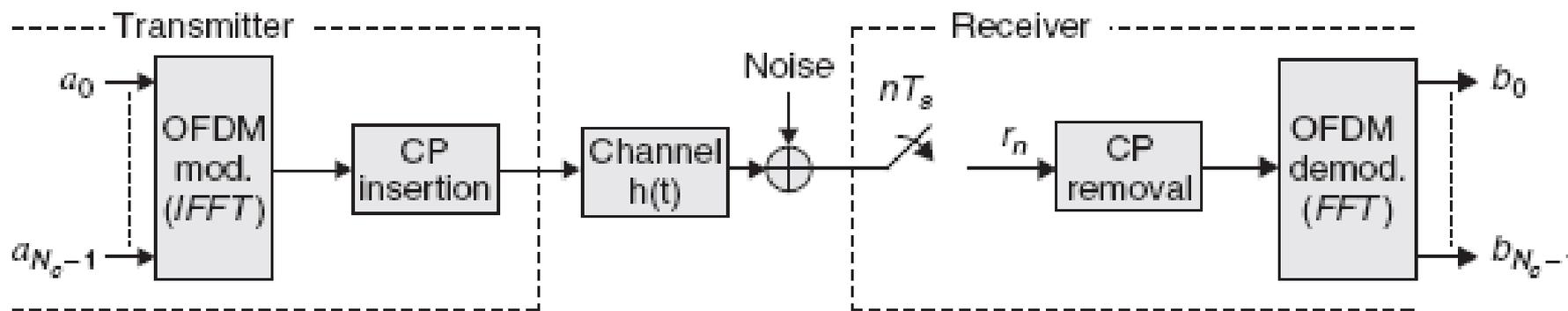
■ OFDM的调制解调原理

- 各个子载波之间要求完全正交，各个子载波收发完全同步
- 发射机和接收机要精确同频、同步
- 多径效应会引起符号间干扰以及载波间干扰——积分区间内信号不具有整数个周期



OFDM系统原理与实现——系统原理

■ OFDM调制基本过程



OFDM系统原理与实现——优缺点

OFDM系统的优点：

- 各子信道上的正交调制和解调可以采用IDFT和DFT实现，运算量小，实现简单。
- OFDM系统可以通过使用不同数量的子信道，实现上下行链路的非对称传输。
- 所有的子信道不会同时处于频率选择性深衰落，可以通过动态子信道分配充分利用信噪比高的子信道，提升系统性能。

OFDM系统的缺点：

- 对频率偏差敏感：传输过程中出现的频率偏移，如多普勒频移，或者发射机载波频率与接收机本地振荡器之间的频率偏差，会造成子载波之间正交性破坏。
- 存在较高的峰均比(PARA)：OFDM调制的输出是多个子信道的叠加，如果多个信号相位一致，叠加信号的瞬间功率会远远大于信号的平均功率，导致较大的峰均比，这对发射机PA的线性提出了更高的要求。

第一部分 LTE关键技术之OFDM

■ 第一章 OFDM技术基本原理

- ◆ 第一节 OFDM的起源与发展
- ◆ 第二节 OFDM系统原理与实现



■ 第二章 LTE上下行传输技术

- ◆ 第一节 LTE下行多址技术方案
- ◆ 第二节 LTE上行多址技术方案



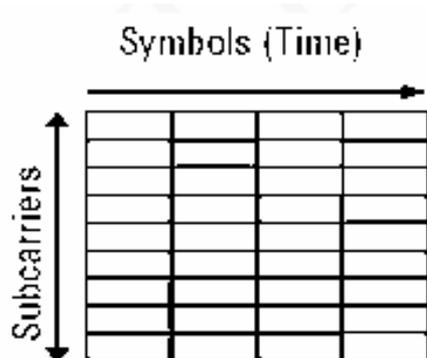
LTE下行多址技术方案

3GPP在**LTE**标准的制定过程中，曾讨论过以下备选技术方案：

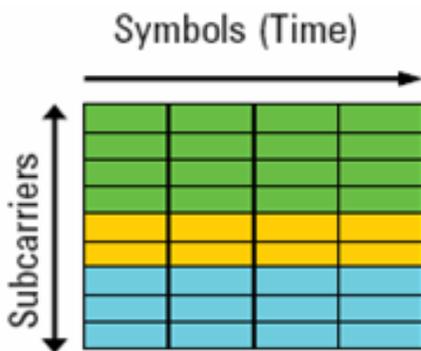
- ◆ 传统基于**CP**的**OFDM**：**OFDMA**
- ◆ 可变扩频系数**OFDM**：**VSF-OFDM**
- ◆ 滤波**OFDM**：**OFDM/OQAM**
- ◆ 多载波**WCDMA**：**MC-WCDMA**
- ◆ 多载波**TD-SCDMA**：**MC-TD-SCDMA**

LTE下行多址技术方案——OFDMA

- 传统的基于CP的OFDM技术。
- OFDMA多址接入方式：将传输带宽划分成相互正交的子载波集，通过将不同的子载波集分配给不同的用户，可用资源被灵活的在不同移动终端之间共享。
- 这可以看成是一种OFDM+FDMA+TDMA技术相结合的多址接入方式。如图所示：

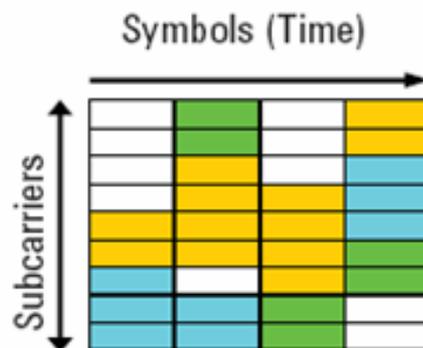


(a) OFDM 调制



(b) OFDM+FDMA

基于 OFDM 的多址方式



(c) OFDM+FDMA+TDMA

LTE下行多址技术方案——可变扩频系数OFDM(VSF-OFDM)

- OFDMA的改进技术。
- 以OFDM作为基本调制技术，采用OFDM与CDMA结合的方法进行时频资源分配，以适应不同场景下的应用。
- OFDM系统提高了小区内部用户间的正交性，可以获得更高的频谱效率，但同时也失去了CDMA系统在一直小区间干扰方面的优点。
- 在OFDM调制之前，采用CDMA或低码率信道编码进行码域扩频，加入小区特定扰码，以抑制小区间干扰。
- 根据信道环境变化，调整信道码率和扩频系数，灵活对不同的应用场景进行优化。

LTE下行多址技术方案——滤波OFDM（OFDM/OQAM）

- OFDM系统为了避免正交子载波间的干扰，引入了循环前缀CP，CP不能传送有用信息，是系统开销。
- OFDM/OQAM技术避免使用CP，从而能够实现最优的频谱效率。
- 在调制过程中，采用等方性正交变换算法，将子载波在频域上很好的“集中”，以限制多普勒效应和相位噪声等引起的载波间干扰ICI。

LTE下行多址技术方案——多载波WCDMA（MC-WCDMA）

- 基于3GPP系统长期沿用的CDMA传输技术及多址方式。
- 沿用WCDMA/HSPA的信道结构和控制信道机制，采用一系列改进和增强技术，提高各种信道的性能。
- 支持MIMO技术和高阶调制。
- 采用多载波HSPA技术，对MAC/RLC层进行增强，以支持LTE系统最大20MHz的系统带宽。
- 采用增强型均衡器，消除用户间干扰MUI。

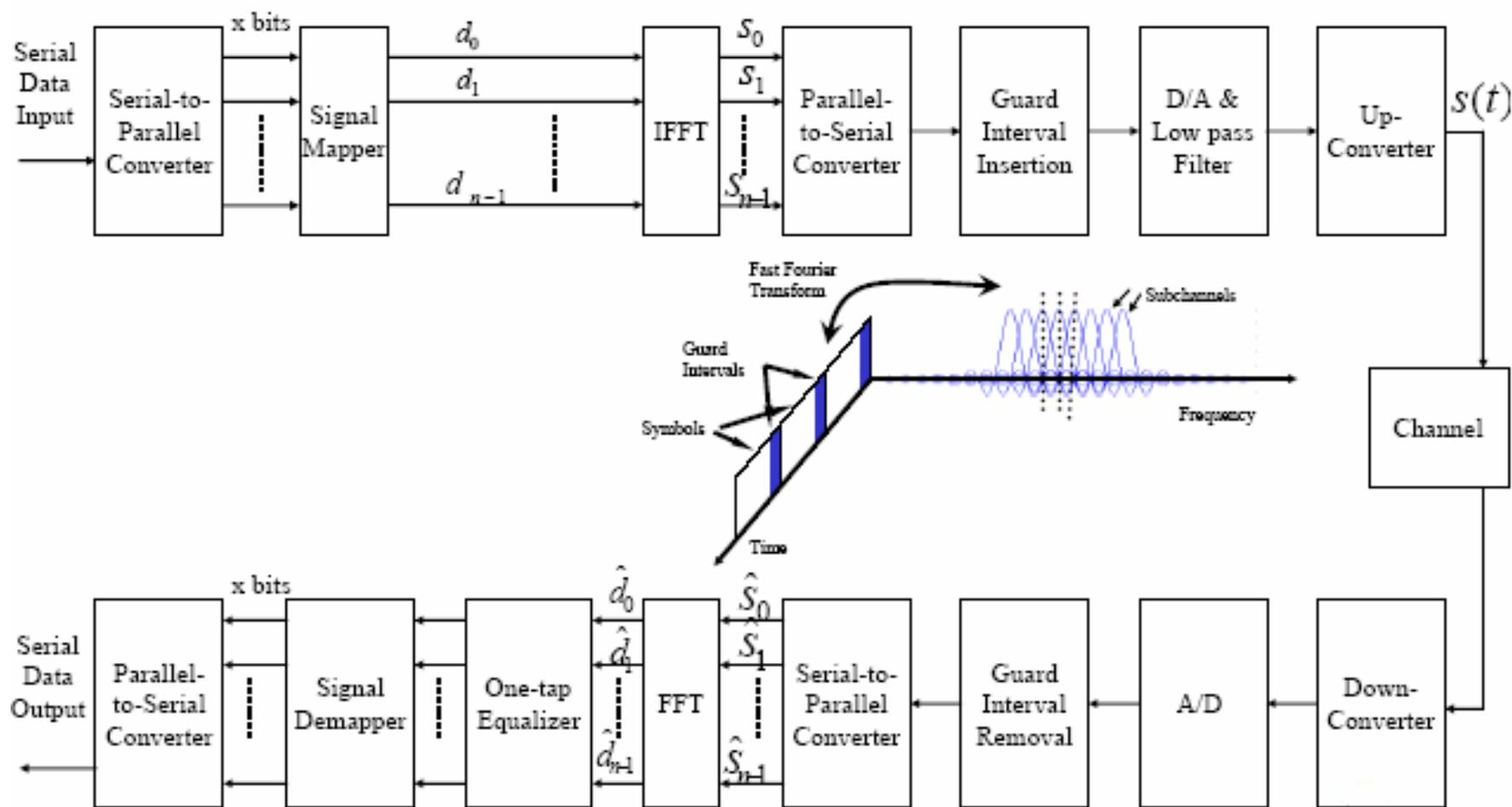
LTE下行多址技术方案——多载波TD-SCDMA（MC-TD-SCDMA）

- 与MC-WCDMA方案相似，在TD-SCDMA基础上进行多载波增强。

下行多址技术方案的确定

- LTE最终选择传统基于CP的OFDMA技术作为下行多址技术方案。
- 对于CDMA技术，在较小的带宽内，可以和OFDM取得相近的性能；在带宽增大时，其复杂度会急剧增大，考虑到LTE及未来的IMT-Advanced技术较大的系统带宽，故没有采用CDMA技术，包括MC-WCDMA、MC-TD-SCDMA。
- 针对OFDMA的各种改进技术（VSF-OFDM、OFDM/OQAM），较传统的CP-OFDMA技术相比，并没有确认其能够带来显著的性能提升，并且复杂度有一定的提高，故未予采用。

下行多址技术方案——OFDMA处理



下行多址技术方案——OFDMA技术的优势

- 频谱效率高：子载波重叠、正交、支持非对称。
- 带宽扩展性强：带宽取决于子载波的数量。
- 抗多径衰落：子信道可以看做水平衰落信道、CP的引入。
- 频域调度和自适应：
 - ◆ 集中式/分布式子载波分配：

子载波连续分配给一个用户，频域调度选择较优子信道，获得多用户分集增益；（高速移动或SINR较低时）将分配给子信道的子载波分散到整个带宽，交替排列，获得频率分集增益。
 - ◆ 频率选择性：SINR、调制编码方式MSC。
- 实现MIMO技术较简单：水平衰落信道，避免天线间干扰。

上行多址技术方案——需求

上行多址技术的要求和下行不同，OFDM等多载波系统的输出是多个子信道号的叠加，因此，如果多个信号的相位一致，所得到的叠加信号的瞬时功率就会远远高于信号的平均功率，存在较高的峰均比PAPR，对发射机的线性度提出了很高的要求，会增加数模转换的复杂度，降低RF功放的效率，使发射机功放的成本和耗电量增加。而终端的能力有限，尤其是发射功率受限，所以在上行链路，基于OFDM的多址接入技术并不适合用在UE侧使用。

LTE上行多址方案

- PAPR降低的OFDMA技术
- 单载波频分多址技术（SC-FDMA）
- 可变扩频和码片重复系数CDMA技术（VSFCR-CDMA）
- 广义多载波技术（GMC）

上行多址技术方案—— PAPR降低的OFDMA

- 以OFDMA技术为基础
- 基于循环削峰和滤波的PAPR降低技术

削峰是降低PAPR最简单直接的方法，却会产生额外的带内功率降低和带外泄露。为了解决干扰问题，在削峰之后，对削峰后的信号进行滤波，再进行重复削峰，降低由于滤波造成的PAPR反弹，如此循环。

- 基于预留子载波的PAPR降低技术

对于 N 个可用的子载波，一定数量 L 的子载波不用来传输信号，而被预留用来降低峰均波。

上行多址技术方案——可变扩频和码片重复系数CDMA技术

- 与VSF-OFDM技术相似
- 通过引入CDMA的思想，以便更好地抑制小区干扰。

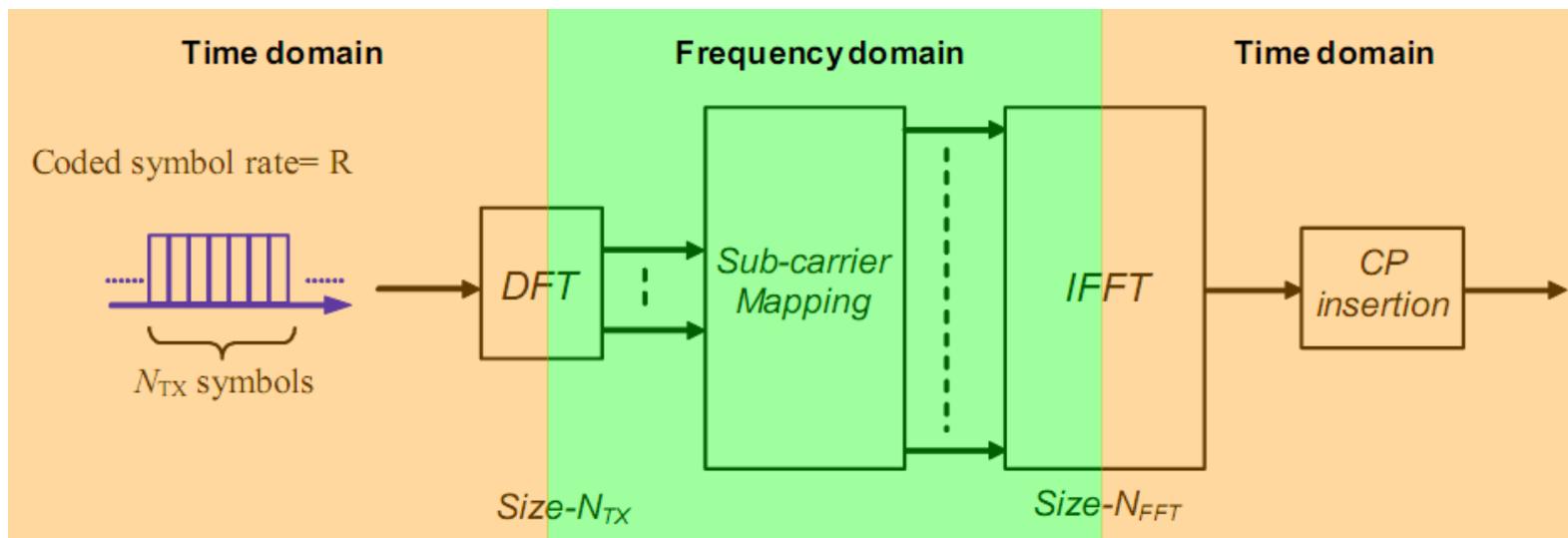
上行多址技术方案——广义多载波技术GMC

- 利用传统的滤波器生成的单载波技术在低PAPR方面的优势，采用滤波器组获得LTE要求的频谱扩展性。
- 采用少量较宽的子载波，且相邻子载波之间保留一定的保护带，消除相关性，也能取得较低的PAPR。
- GMC可以实现上行异步传输。

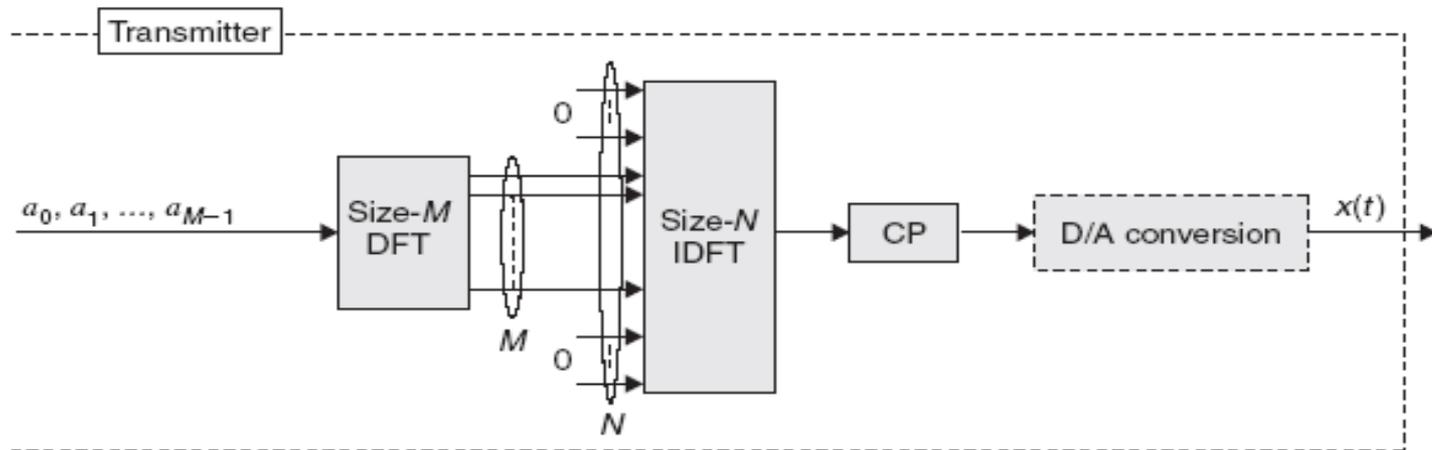
- 保留保护带，会损失一些频谱效率。
- 子载波过宽，频域资源分配粒度过大。

上行多址技术方案——单载波频分多址技术（SC-FDMA）

- LTE中采用基于DFT扩展OFDM（DFT-S-OFDM）技术的SC-FDMA多址方式。
- 与OFDM的区别在与子载波映射之前加入了一个DFT环节，能够有效降低峰均比。



DFT-S-OFDM调制



DFT-S-OFDM调制

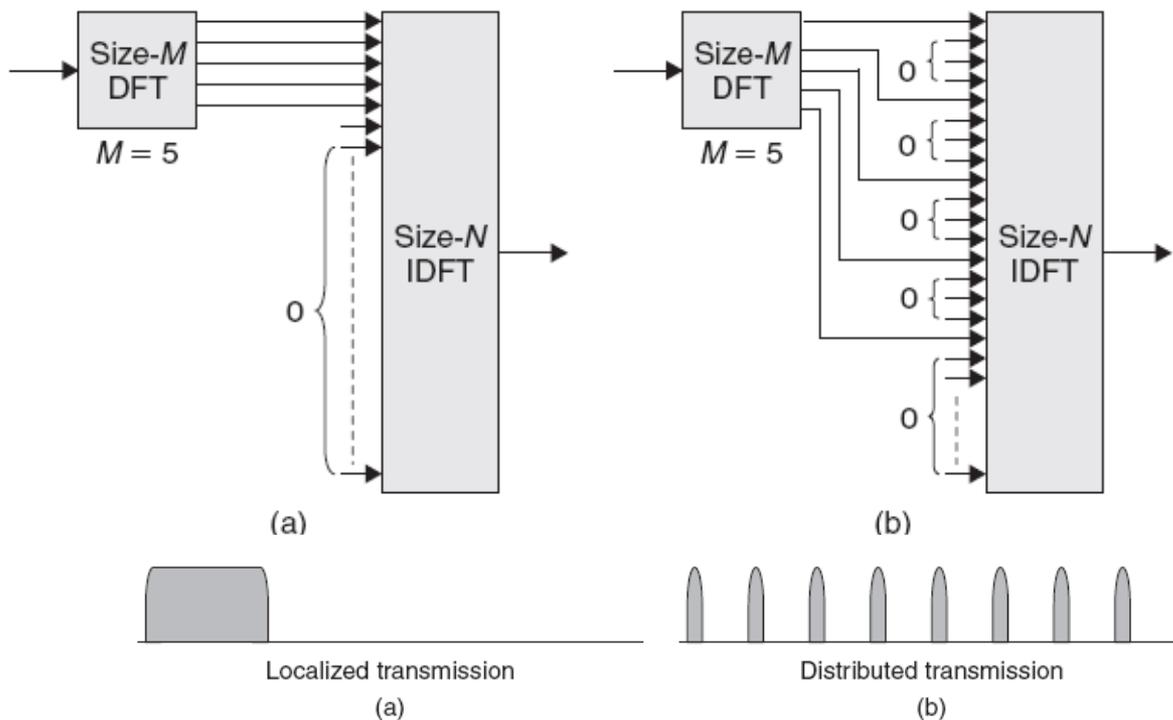
- 以长度为M的数据符号块为单位完成DFT-S-OFDM的调制过程；
- 首先通过DFT离散傅里叶变换，获取与这个长度为M的离散序列相对应的长度为M的频域序列；
- DFT的输出信号送入N点的离散傅里叶反变换IDFT中去，其中 $N > M$ 。IDFT的长度比DFT的长度长，IDFT多出的那一部分输入为用0补齐；
- 在IDFT之后，为避免符号干扰同样为这一组数据添加循环前缀。

上行多址技术方案—— DFT-S-OFDM调制

- DFTS-OFDM的实现过程同OFDM的实现过程有相同的过程，即都有一个采用IDFT的过程，所以DFTS-OFDM可以看成是一个加入了预编码的OFDM过程。
- 如果DFT的长度M等于IDFT的长度N，那么两者级联，DFT和IDFT的效果就互相抵消了，输出的信号就是一个普通的单载波调制信号。当 $N > M$ 并且采用零输入来补齐IDFT。
- IDFT输出的信号的PAPR较之于OFDM信号较小；
- 通过改变DFT输出的数据到IDFT输入端的映射情况，可以改变输出信号占用的频域位置。

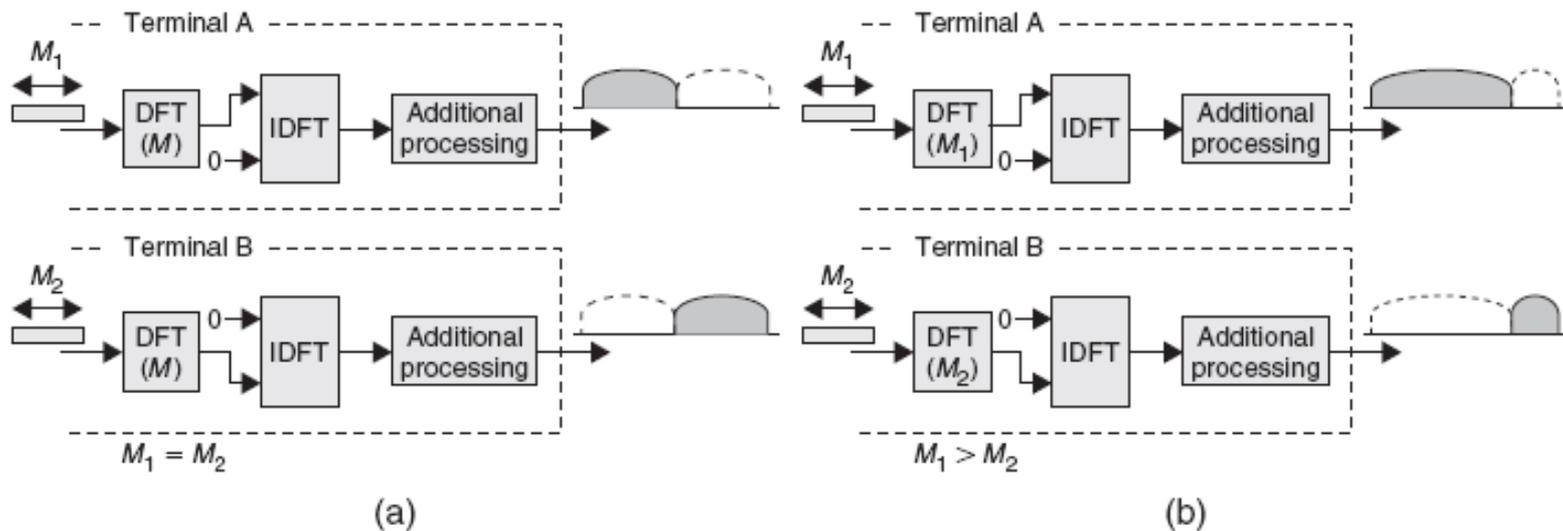
上行多址技术方案——DFT-S-OFDM调制

- 通过改变DFT的输出到IDFT输入端的对应关系，输入数据符号的频谱可以被搬移至不同的位置，分为集中式和分布式两种映射方式



上行多址技术方案—— SC-FDMA多址方式

- 利用DFTS-OFDM的以上特点可以方便的实现SC-FDMA多址接入方式，多用户复用频谱资源时只需要改变不同用户DFT的输出到IDFT输入的关系就可以实现多址接入，同时子载波之间具有良好的正交性，避免了多址干扰。
- 通过改变DFT到IDFT的映射关系，实现多址；改变输入信号的数据符号块M的大小，实现频率资源的灵活配置。

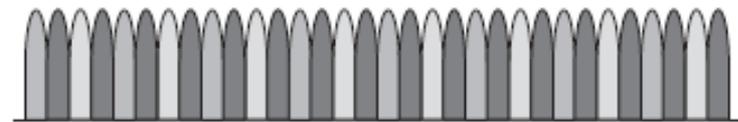


上行多址技术方案—— SC-FDMA多址方式

- SC-FDMA的两种资源分配方式：集中式资源分配、分布式资源分配是3GPP讨论过的两种上行接入方式，最终为了获得低的峰均比，降低UE的负担选择了集中式的分配方式。



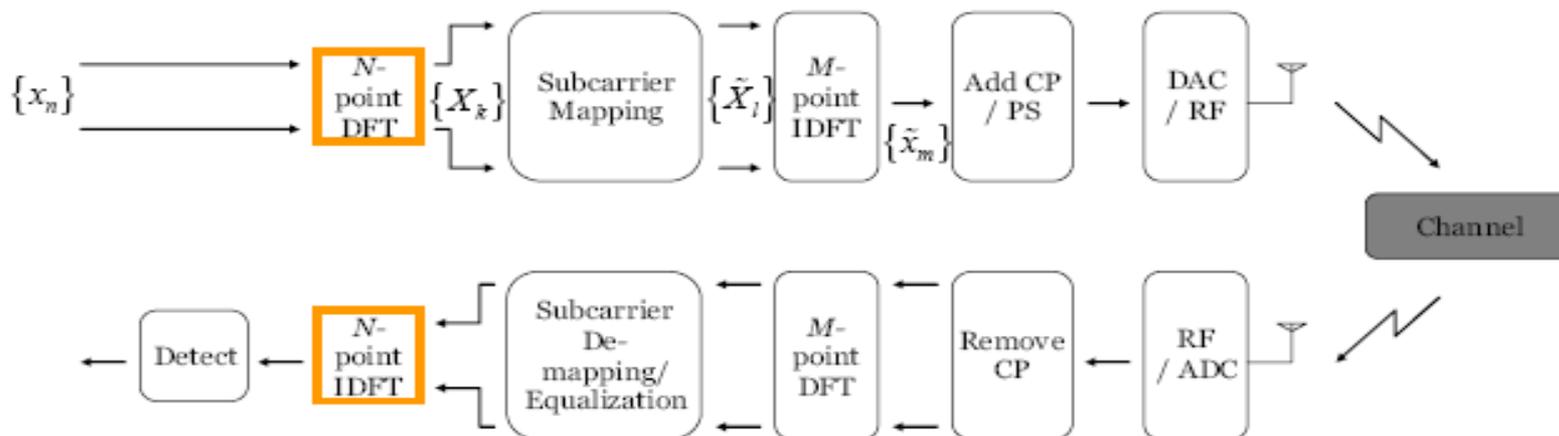
Localized transmission



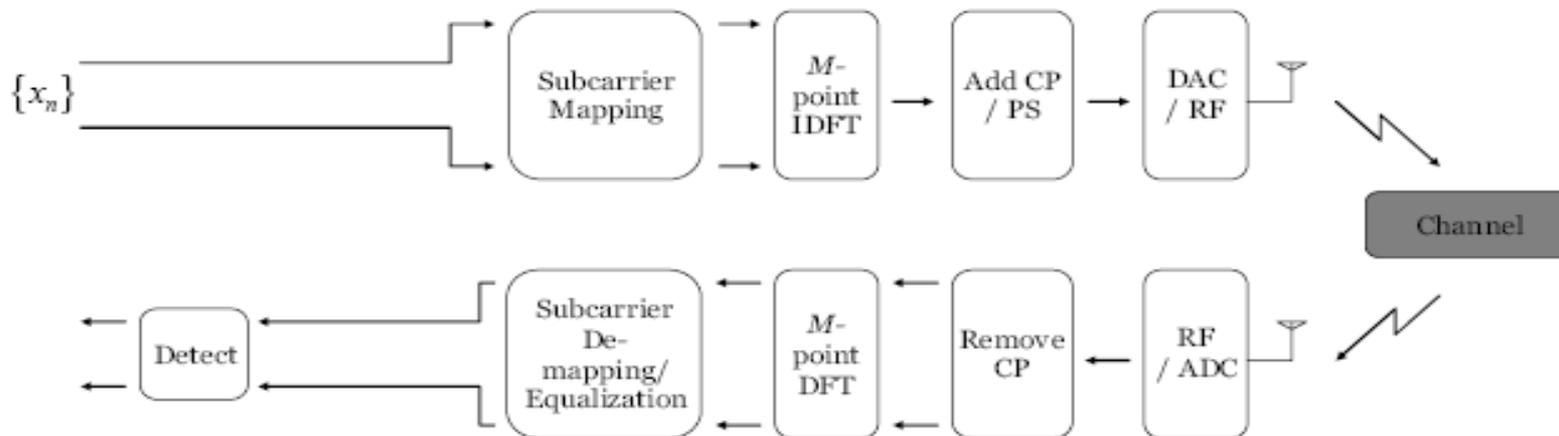
Distributed transmission

SC-FDMA与OFDMA处理流程

SC-FDMA



OFDMA



第二部分 LTE关键技术之MIMO



- 第一章 MIMO技术简介
- 第二章 下行MIMO技术
- 第三章 上行MIMO技术



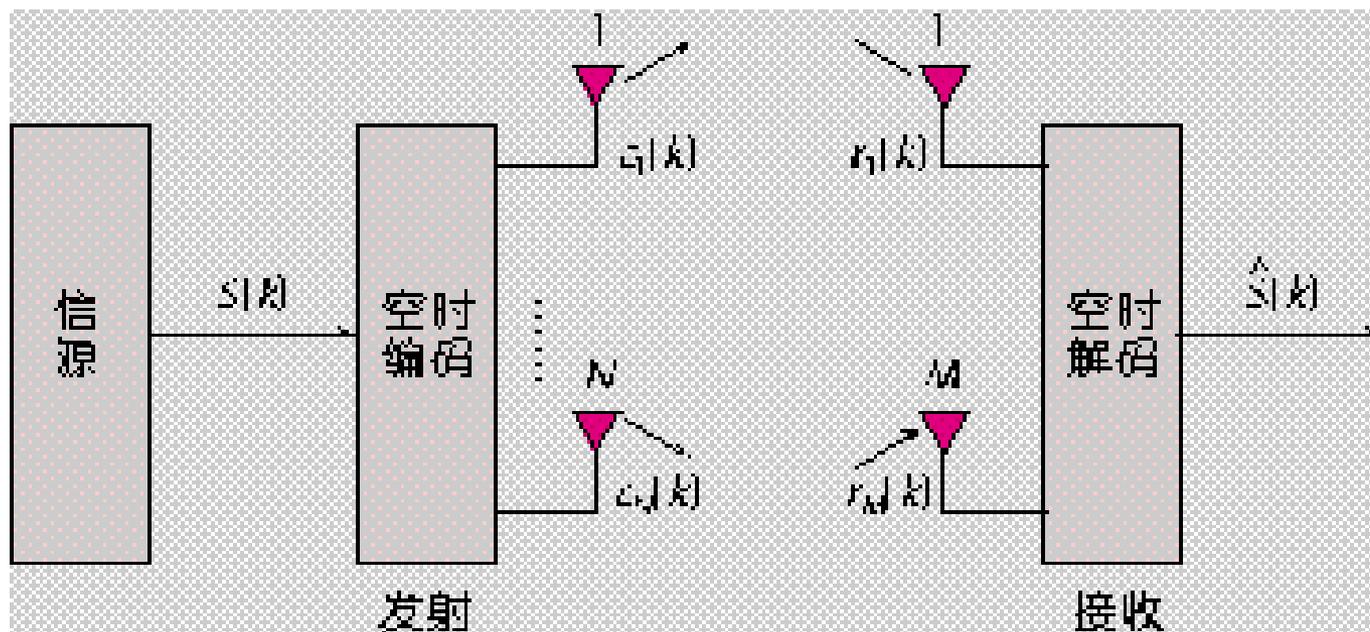
MIMO技术简介——MIMO引入

- 无线通信系统可以利用的资源包括：空间、时间、频率和功率。在B3G/4G系统中，空间资源和频率资源被重新开发使用，从而大大提高了系统的性能。
- 多天线技术通告在发送端和接收端同时使用多根天线，扩展了空间域，充分利用了空间扩展所提供的特征，从而带来了系统容量的提高。目前多天线技术一成为了B3G/4G系统的关键技术之一。
- 多天线构成的信道称为MIMO(Multiple Input Multiple Output)信道，使用多天线技术的系统称为 MIMO无线通信系统。

MIMO技术简介

- 为了满足LTE在高数据率和高容量方面的需求，LTE系统支持应用MIMO技术。
- 下行MIMO技术包括空间复用、波束赋形和传输分集，目前MIMO技术下行基本天线配置为 2×2 ，即2天线发送和2天线接收，最大支持4天线进行下行方向四层传输。
- 上行MIMO技术包括空间复用和传输分集，目前MIMO技术上行基本天线配置为 1×2 ，即1天线发送和2天线接收。MIMO天线数据为虚拟天线数目。

MIMO技术简介——系统结构



在无线链路两端均采用多根天线，分别同时接收与发射，能够充分利用空间资源，在无需增加频谱资源和发射功率的情况下，成倍地提升通信系统的容量与可靠性。

第二部分 LTE关键技术之MIMO

■ 第一章 MIMO技术简介

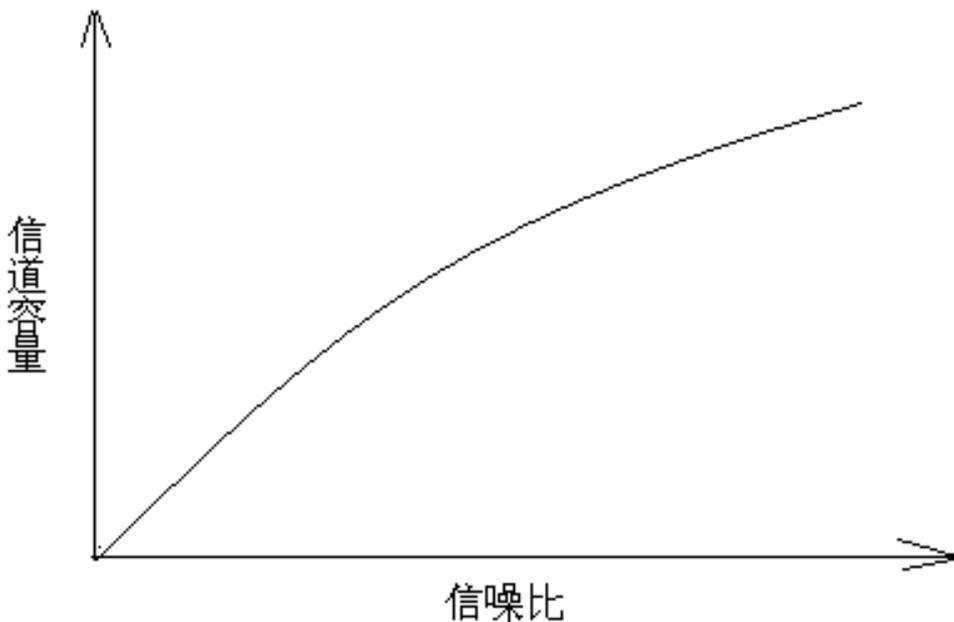
■ 第二章 下行MIMO技术

■ 第三章 上行MIMO技术



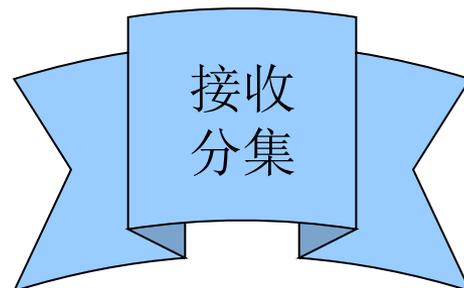
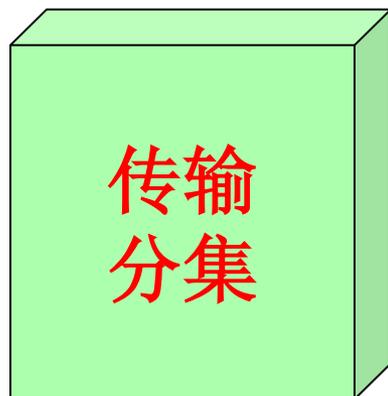
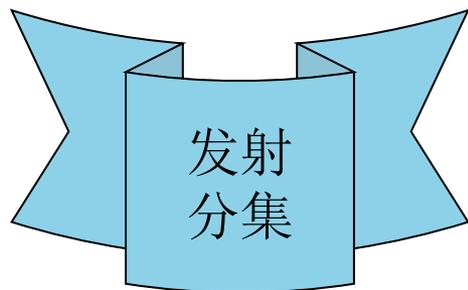
下行MIMO技术

- 传输分集
- 波束赋形
- 空间复用



在典型的信道容量曲线中，在低信噪比区域的斜率比较大，应用传输分集技术和波束赋形技术可以有效提高接收信号的信噪比，从而提高传输速率或者覆盖范围；而在高信噪比区域，容量曲线接近平坦，再提高信噪比也无法明显改善传输速率，此时即可以应用空间复用技术来提高传输速率。

下行MIMO技术——传输分集技术



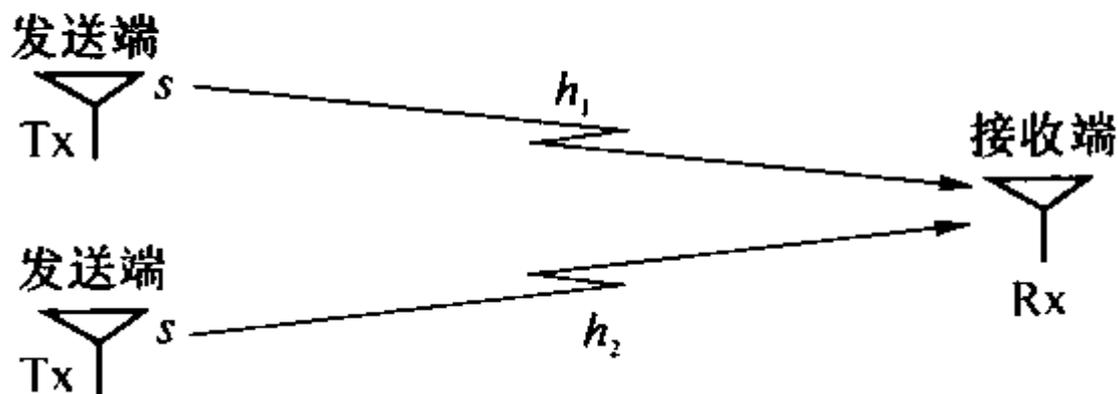
传输分集包括发射分集和接受分集
优点

易获得相对稳定的信号

提高信噪比

可获得分集处理增益

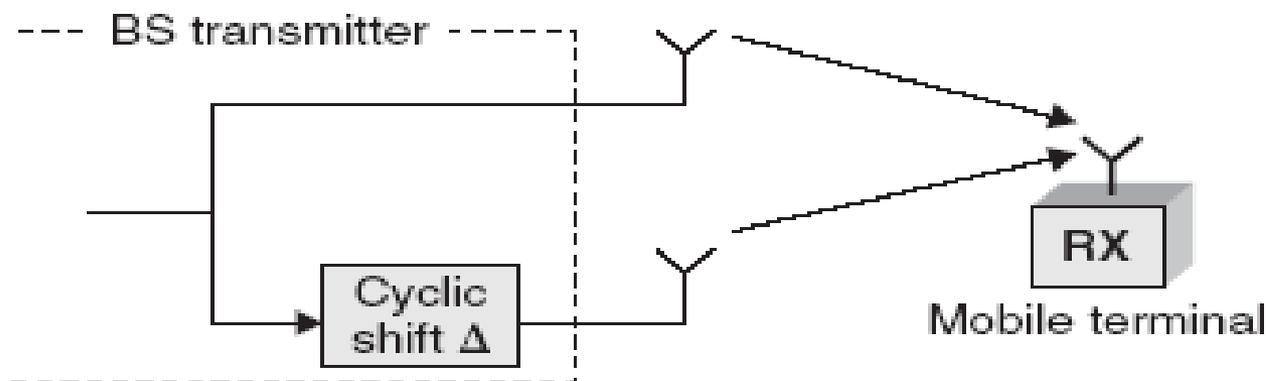
下行MIMO技术——发射分集



- 发射分集就是在发射端使用多幅发射天线发射相同的信息，接收端获得比单天线高的信噪比
- 开环发射分集，闭环发射分集
- 循环延迟分集CDD，空时发射分集STTD，空频发射分集SFTD

下行MIMO技术——发射分集

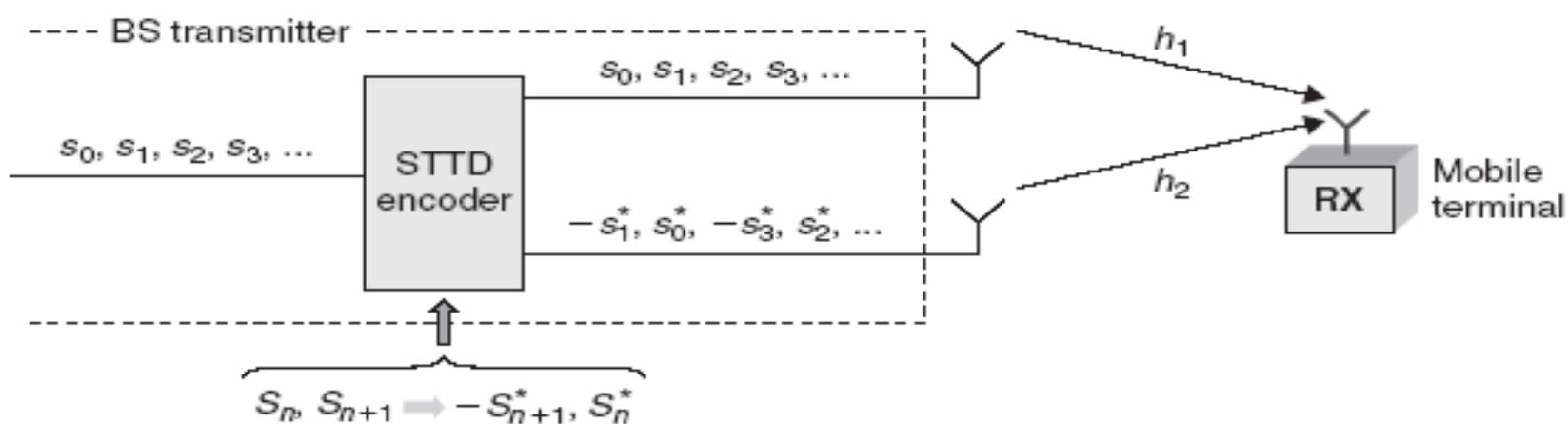
循环延迟发射分集（CDD）



在不同的发射天线上发送具有不同相对延时的同一个信号，人为地制造时间弥散，能够获得分集增益。且循环延时分集采用的是循环延时而不是线性延时，延迟是通过固定步长的移相（Cyclic Shift，循环移相）来等效实现延迟。

下行MIMO技术——发射分集

空时发射分集

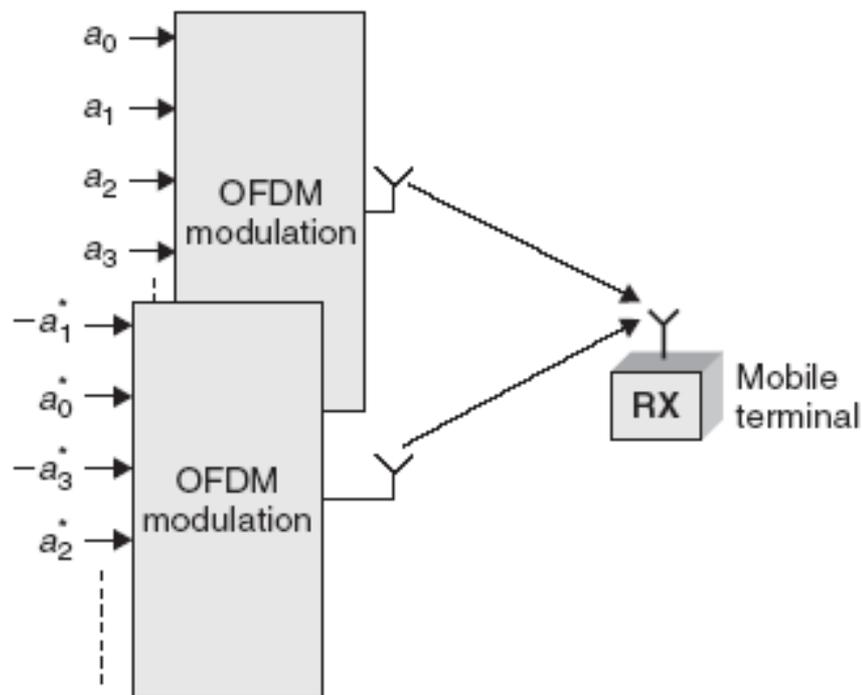


- 将调制符号映射到时域(不同的时刻)和空域(不同的发射天线)以获得分集增益
- 恢复发射信号是需要通过信道估计获得信道矩阵H

$$\bar{r} = \begin{bmatrix} r_{2n} \\ r_{2n+1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & -h_2 \\ h_2^* & h_1^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{2n} \\ s_{2n+1}^* \end{bmatrix} + \bar{n} = H \cdot \bar{s} + \bar{n}$$

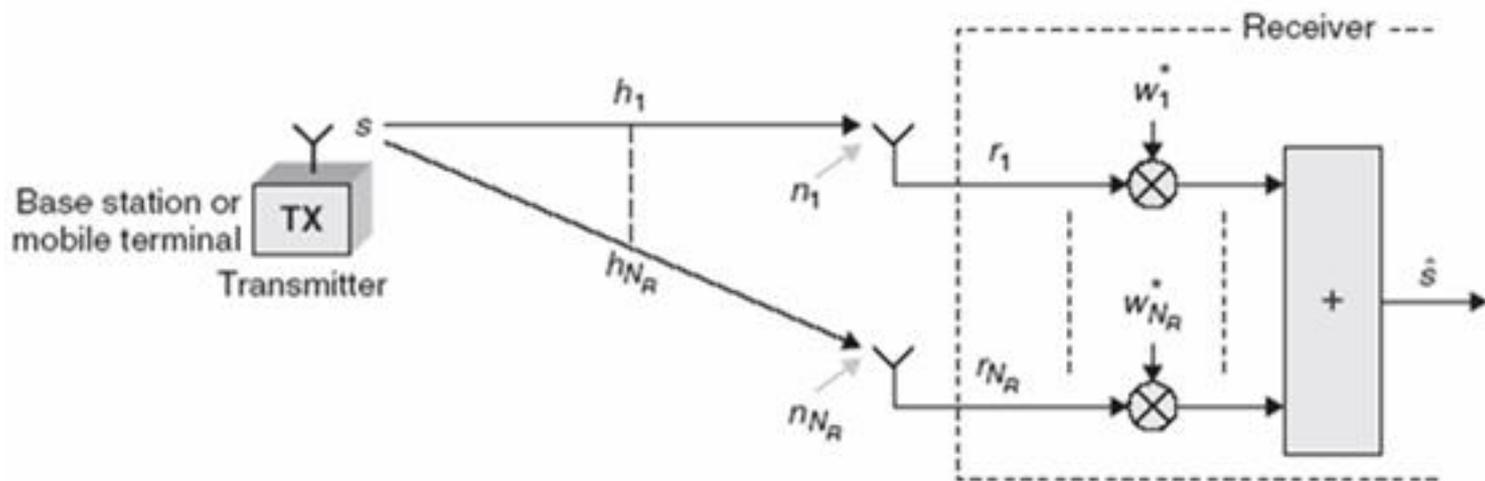
下行MIMO技术——发射分集

空频发射分集（LTE使用）



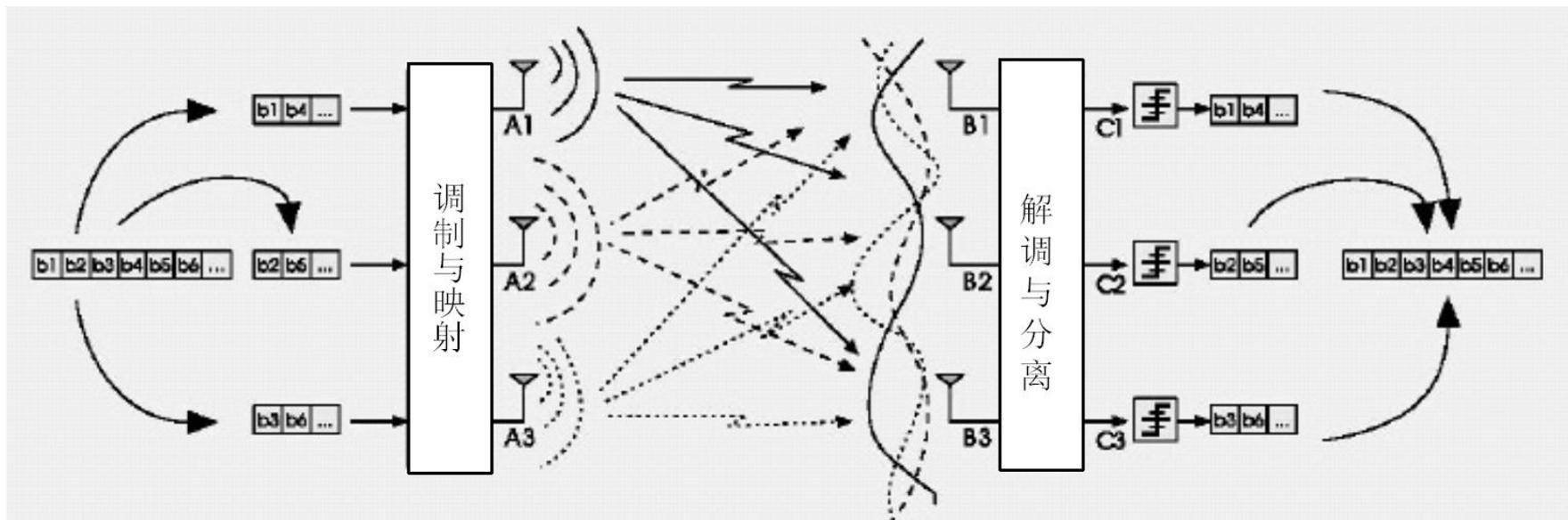
- 空频发射分集与空时发射分集类似，不同的是SFTD是对发送的符号进行频域和空域编码
- 将同一组数据承载在不同的子载波上面获得频率分集增益

下行MIMO技术——接收分集



多个天线接收来自多个信道的承载同一信息的多个独立的信号副本，由于信号不可能同时处于深衰落情况中，因此在任一给定的时刻至少可以保证有一个强度足够大的信号副本提供给接收机使用，从而提高了接收信号的信噪比。

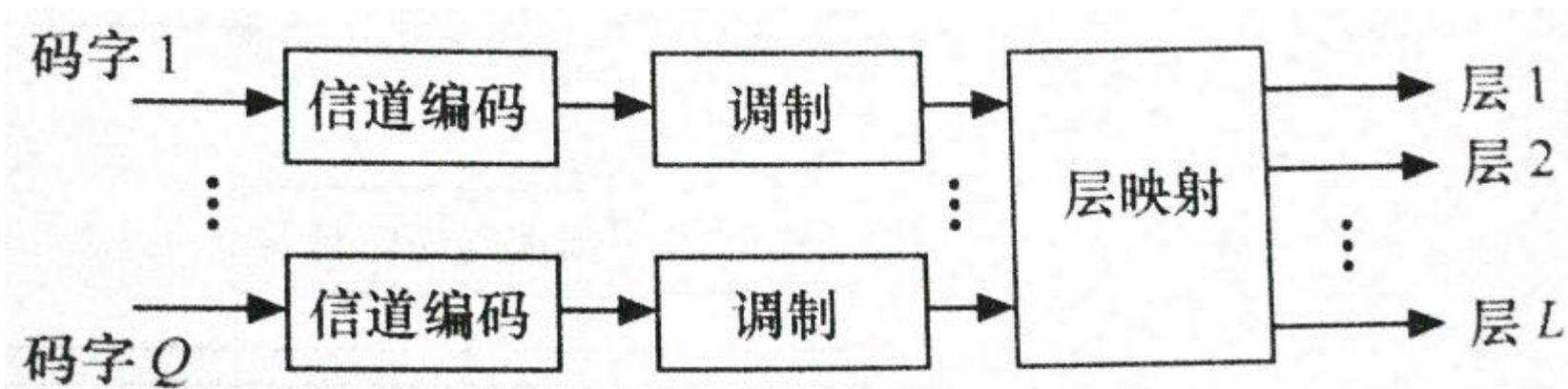
下行MIMO技术——空间复用技术



发射的高速数据被分成几个平行的低速数据流，在同一频带从多个天线同时发射出去。由于多径传播，每个发射天线对于接收机产生不同的空间签名，接收机利用这些不同的签名分离出独立的数据流，最后再复用成原始数据流。因此空间复用可以成倍提高数据传输速率。

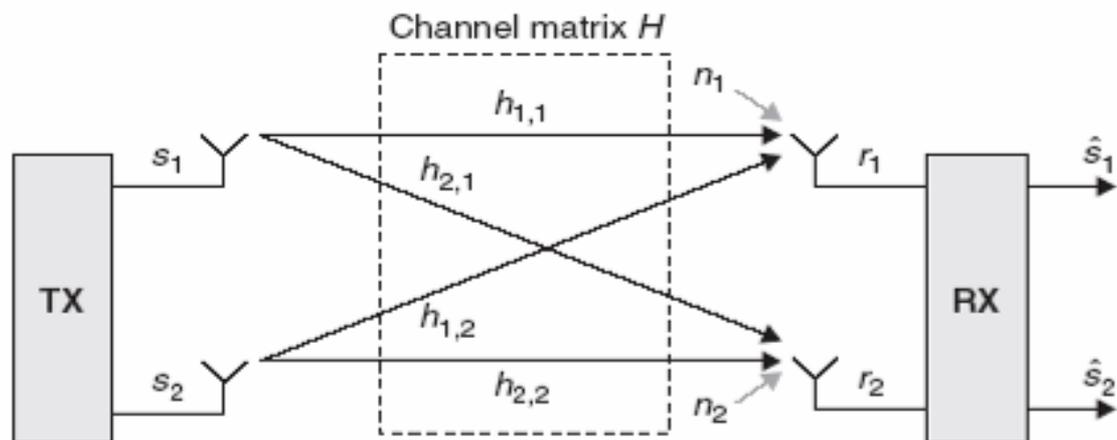
下行MIMO技术——空间复用技术

- LTE系统支持基于多码字（Multiple CodeWord, MCW）的空间复用传输。
- MCW指的是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，每一个码字可以独立地进行速率控制，分配独立的混合自动重传请求（Hybrid Automatic Repeat-request, HARQ）。



多码字空间复用传输示意图

下行MIMO技术——复用信号处理



接收端的信号可以表示为：↵

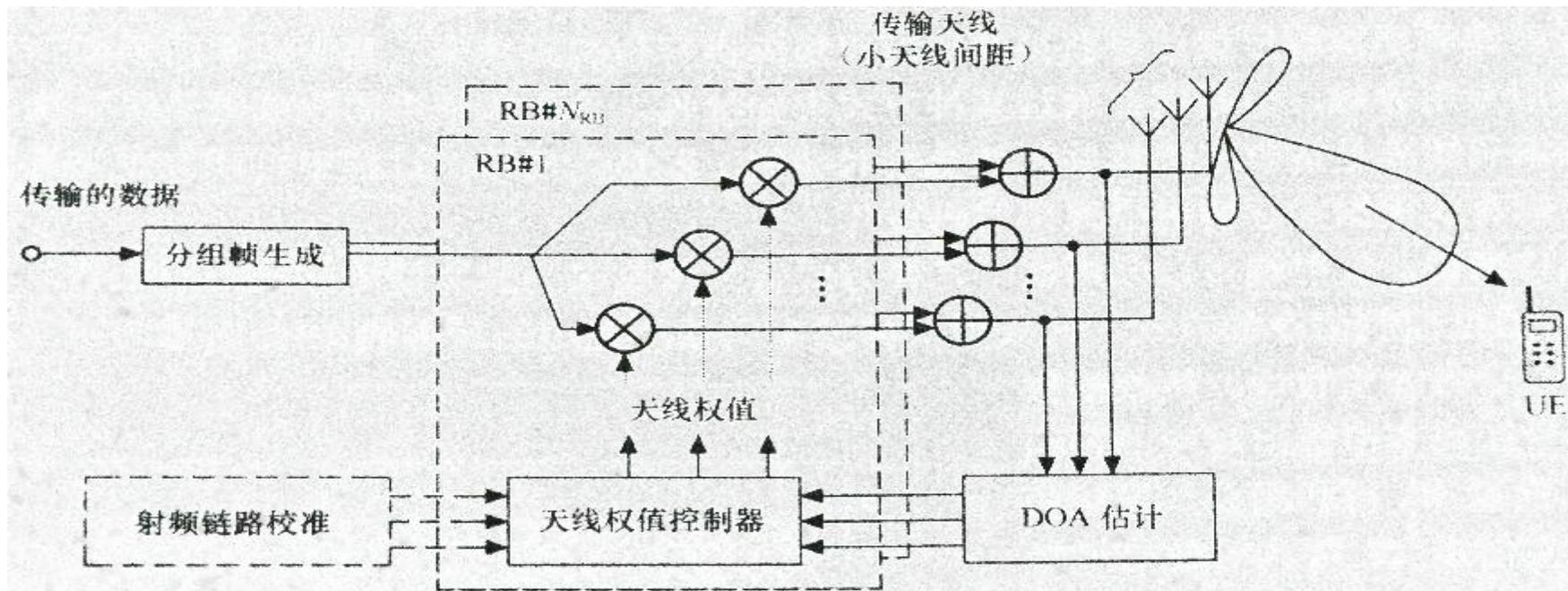
$$\bar{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} = H \cdot \bar{s} + \bar{n} \quad \leftarrow$$

信道矩阵 H 通过合适的信道估计算法估算出来，那么接收端的信号就可以通过矩阵 $W = H^{-1}$ 获得。↵

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_1 \\ \hat{s}_2 \end{bmatrix} = W \cdot \bar{r} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + H^{-1} \cdot \bar{n} \quad \leftarrow$$

下行MIMO技术——波束赋形技术

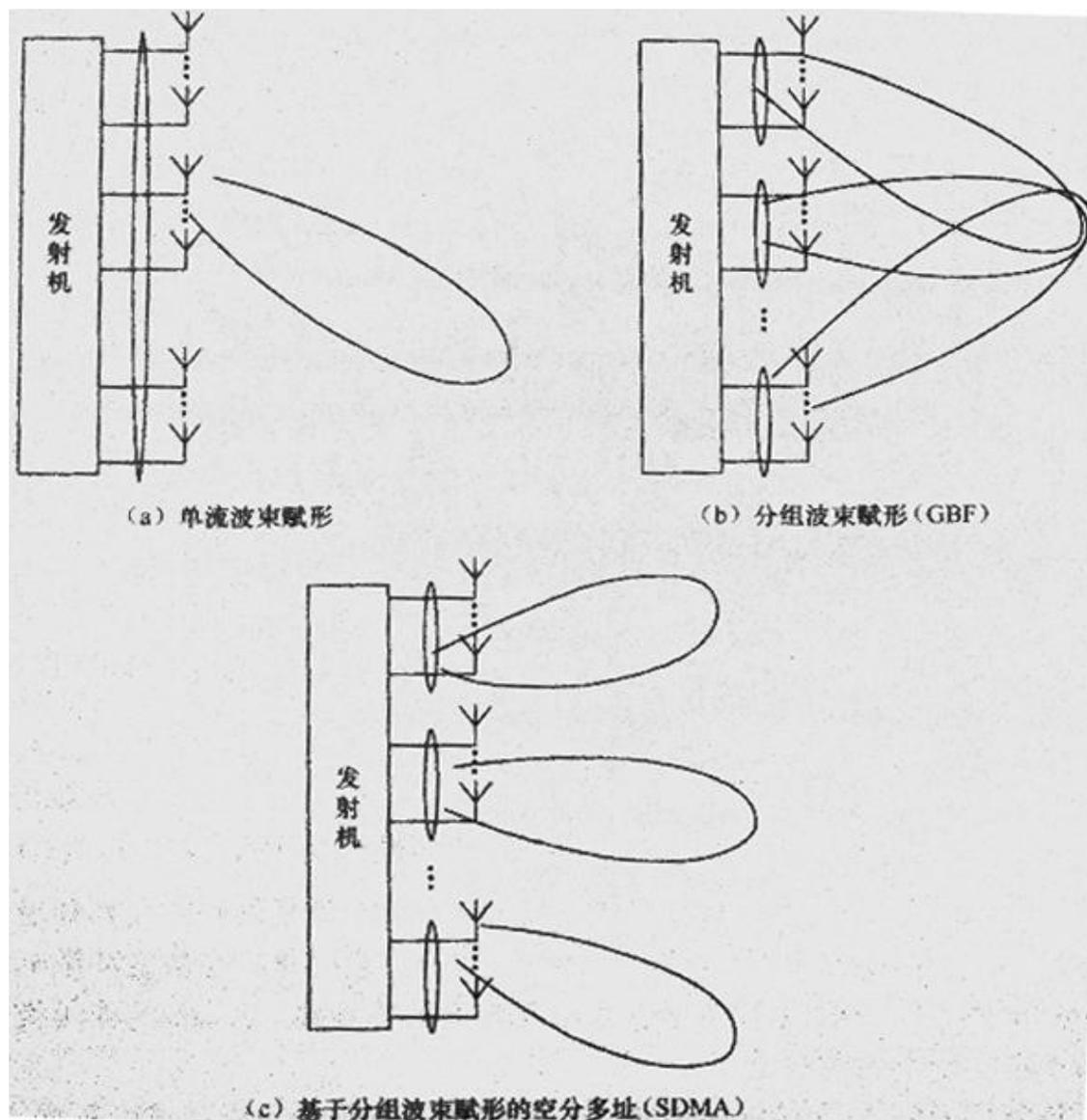
波束赋形是一种应用于小间距的天线阵列多天线传输技术，其主要原理是利用空间的强相关性及波的干涉原理产生强方向性的辐射方向图，使辐射方向图的主瓣自适应的指向用户来波方向，从而提高信噪比，提高系统容量或者覆盖范围。



波束赋形示意图

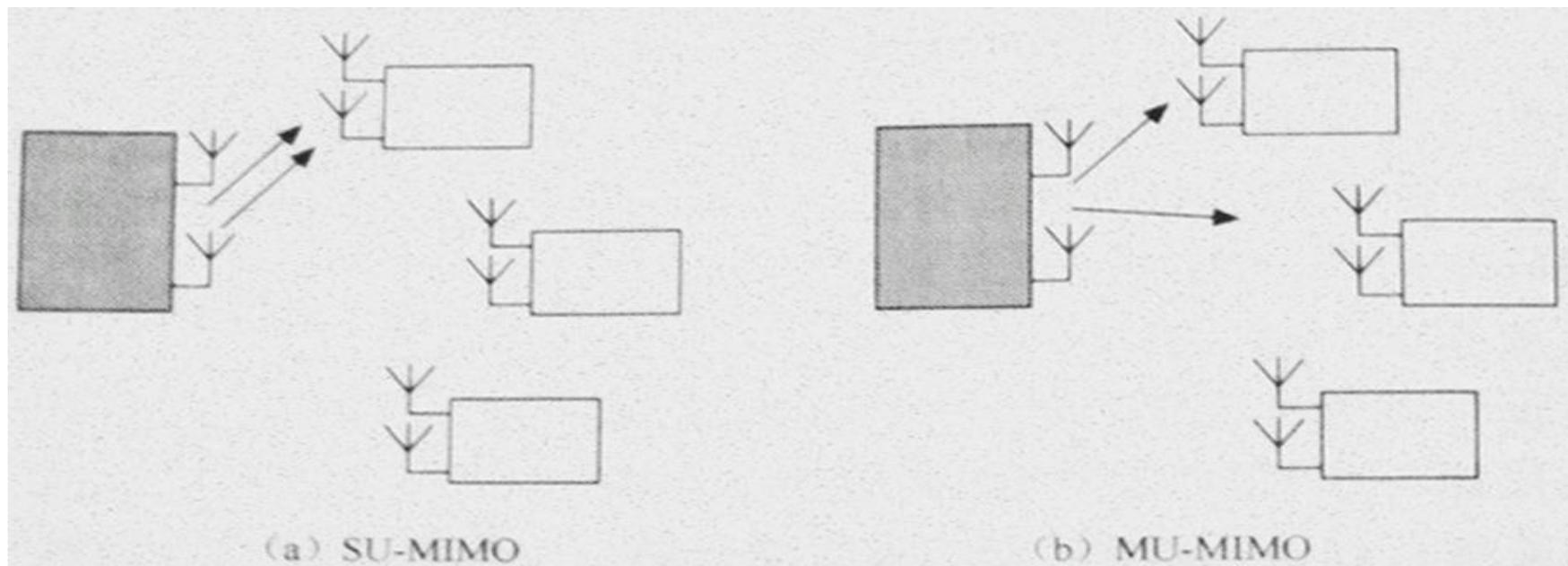
下行MIMO技术——波束赋形技术

单流和多流波束赋形



下行MIMO技术——多用户MIMO

当基站将占用相同时频资源的多个数据流发送给不同的用户时，即为多用户MIMO（MU-MIMO），或者叫做空分多址（SDMA）。MU-MIMO有两种实现方式：每用户酉速率控制（Per-User Unitary Rate Control, PU2RC）和迫零（Zero Forcing, ZF）波束赋形。



下行SU-MIMO和MU-MIMO

第二部分 LTE关键技术之MIMO

■ 第一章 MIMO技术简介

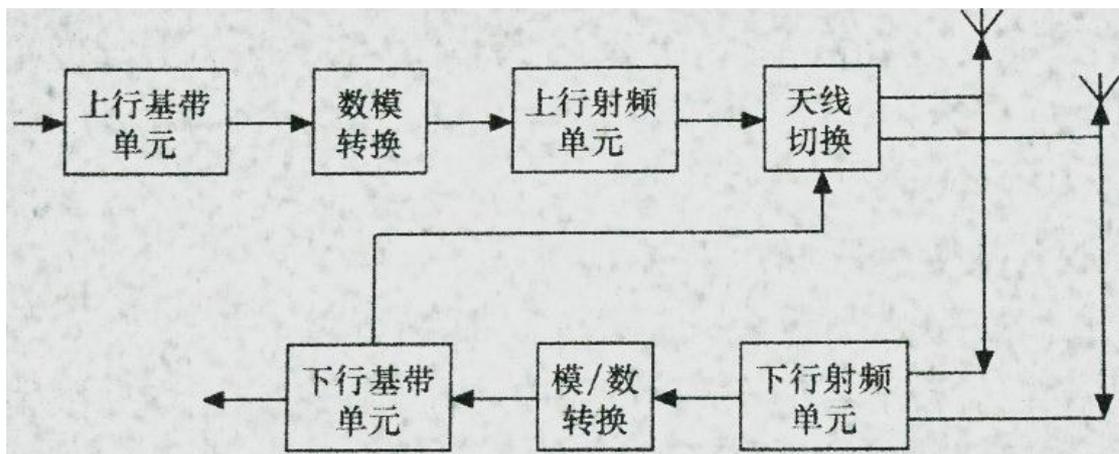
■ 第二章 下行MIMO技术

■ 第三章 上行MIMO技术



上行MIMO技术——天线选择

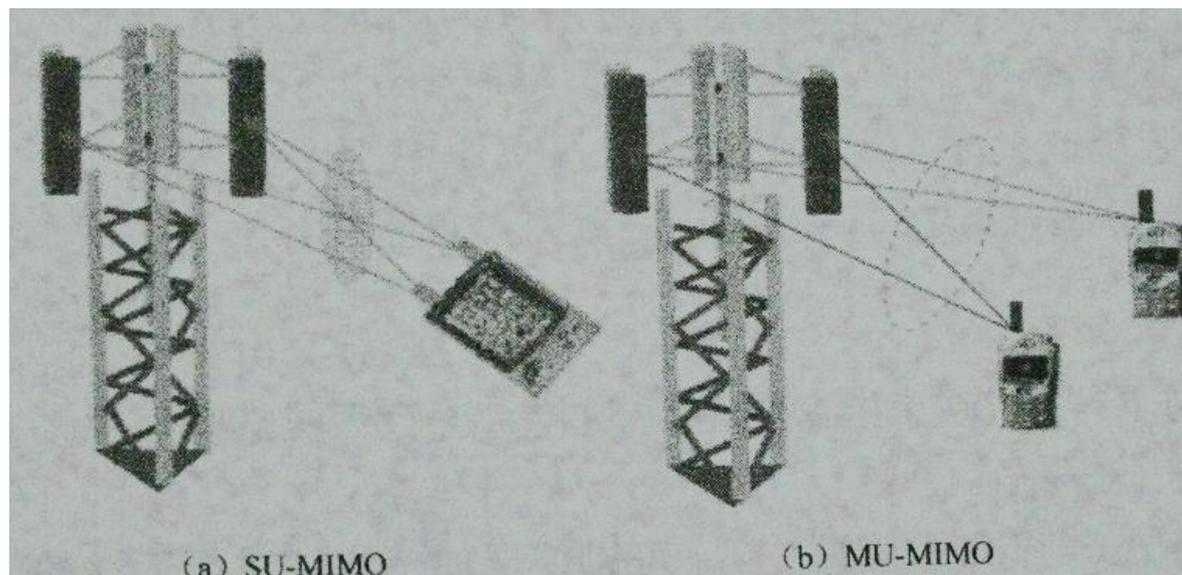
- 与下行相同，为了满足E-UTRA的需求，LTE系统支持上行应用MIMO技术，包括空间复用和传输分集，两种技术与下行技术相同。
- 上行MIMO对终端天线的要求较高。为了节省功率和降低射频开销，在终端侧期望使用更小数目的功放，另一方面为了改善应用可达到的数据速率和提供更大范围的覆盖，上行MIMO引入天线选择技术。
- 上行传输天线选择技术前提：终端存在两个或者更多天线。



天线选择方案框图

上行MIMO技术——多用户MIMO

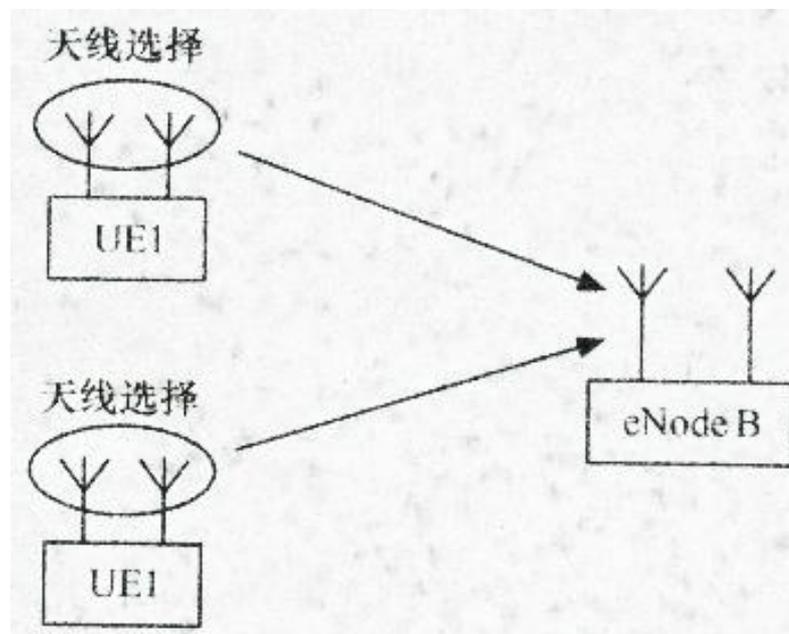
- 与下行多用户MIMO不同，上行多用户MIMO是一个虚拟的MIMO系统，即每一个终端均发送一个数据流，但是两个或者更多的数据流占用相同的时频资源，这样从接收机来看，这些来自不同终端的数据流可以被看做来自同一个终端上不同天线的数据流，从而构成一个MIMO系统。



上行SU-MIMO和MU-MIMO

上行MIMO技术——多用户MIMO

- 与SU-MIMO相比，MU-MIMO可以获得多用户分集增益，MU-MIMO信号来自于不同终端，更容易获得信道之间的独立性。
- 当终端存在两个或者更多天线时，可以讲MU-MIMO与传输天线选择技术结合起来使用。



上行MU-MIMO与传输天线选择技术结合方案