

---

## 第三章 TD-LTE系统关键技术

TD-LTE 是 TDD 版本的 LTE 技术，相比 3GPP 之前制定的技术标准，其在物理层传输技术方面较大的改进。为了便于理解 TD-LTE 系统的核心所在，本章将重点介绍 TD-LTE 系统中使用的关键技术，如多址接入技术、多天线技术、混合自动重传、链路自适应、干扰协调等。希望读者通过本章的阅读，对 TD-LTE 的物理层技术有一个全面的了解。

### 3.1 TDD 双工方式

TDD(Time Division Duplexing)时分双工技术是一种通信系统的双工方式，与 FDD 相对应。在 TDD 模式下，移动通信系统中的发送和接收位于同一载波下的不同时间隙，通过将信号调度到不同时间段传输进行区分。TDD 模式可灵活配置于不对称业务中，以充分利用有限的频谱资源。

在原有的模拟和数字蜂窝系统中，均采用了 FDD 双工/半双工方式。在 3G 的三大国际标准中，WCDMA 和 CDMA2000 系统也采用了 FDD 双工方式，而 TD-SCDMA 系统采用的是 TDD 双工方式。FDD 双工采用成对频谱 (Paired Spectrum) 资源配置，上下行传输信号分布在不同频带内，并设置一定的频率保护间隔，以免产生相互间干扰。由于 TDD 双工方式采用非成对频谱 (Unpaired Spectrum) 资源配置，具有更高的频谱效率，在未来的第四代移动通信系统 IMT-Advanced 中，将得到更广泛的应用，满足更高系统带宽的要求。

基于 TDD 技术的 TD-LTE 系统，与 FDD 方式相比，具有以下优势：

- (1) 频谱效率高，配置灵活。由于 TDD 方式采用非对称频谱，不需要成对的频率，能有效利用各种频率资源，满足 LTE 系统多种带宽灵活部署的需求。
- (2) 灵活地设置上下行转换时刻，实现不对称的上下行业务带宽。TDD 系统可以根据不同类型业务的特点，调整上下行时隙比例，更加灵活地配置信道资源，特别适用于非对称的 IP 型数据业务。但是，这种转换时刻的设置必须与相邻基站协同进行。
- (3) 利用信道对称性特点，提升系统性能。在 TDD 系统中，上下行工作于同一频率，电波传播的对称特性有利于更好地实现信道估计、信道测量和多天线技术，达到提高系统性能的目的。
- (4) 设备成本相对较低。由于 TDD 模式移动通信系统的频谱利用率高，同样带宽可提供更多的移动用户和更大的容量，降低了移动通信系统运营商提供同样业务对基站的投资；另外，TDD 模式的移动通信系统具有上下行信道的互惠性，基站的接收和发送可以共用一些电子设备，从而降低了基站的制造成本。因此，相比与 FDD 模式的基站，TDD 模式的基站设备具有成本优势。

除了这些独特的优势，TDD 双工方式也存在一些明显的不足。主要表现在以下几个方面。

- (1) 终端移动速度受限。在高速移动时，多普勒效应会导致时间选择性衰落，速度越快，衰落深度越深，因此必须要求移动速度不能太高。以 3G 系统为例，在目前芯片处理速度和算法的基础上，使用 TDD 的 TD-SCDMA 系统中，当数据率为 144kbps 时，终端的最大移动速度可达 250km/h，与 FDD 系统相比，还有一定的差距。一般 TDD 终端的移动速度只能达到 FDD 终端的一半甚至更低。

- (2) 干扰问题更加复杂。由于 TDD 系统收发信道同频，无法进行干扰隔离，系统内

和系统间均存在干扰，干扰控制难度更大。

(3) 同步要求高。由于上下行信道占用同一频段的不同时隙，为了保证上下行帧的准确接收，系统对终端和基站的同步要求更高。

未来移动通信系统对带宽的要求越来越高，频谱资源的紧缺会使 TDD 系统的重要性日益凸显，TDD 双工方式将得到更为广泛的应用，可能发展为主流的双工方式。

## 3.2 多址传输方式

多址接入技术 (Multiple Access Techniques) 是用于基站与多个用户之间通过公共传输媒质建立多条无线信道连接的技术。

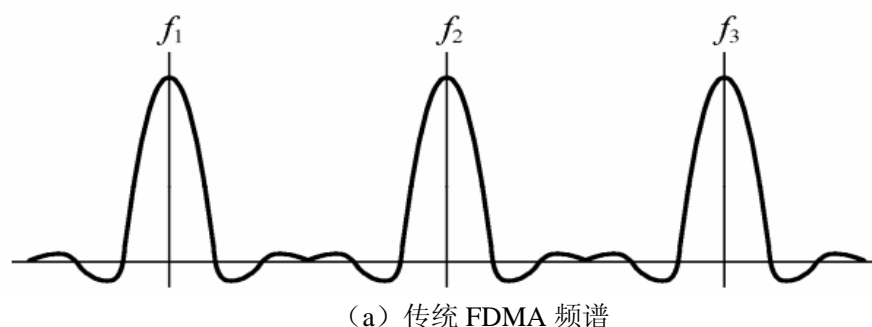
移动通信系统中常见的多址技术包括频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA)、时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA)、码分多址 (Code Division Multiple Access, CDMA)、空分多址 (Space Division Multiple Access, SDMA)。FDMA 是以不同的频率信道实现通信。TDMA 是以不同的时隙实现通信。CDMA 是以不同的代码序列来实现通信的。SDMA 是以不同方位信息实现多址通信。

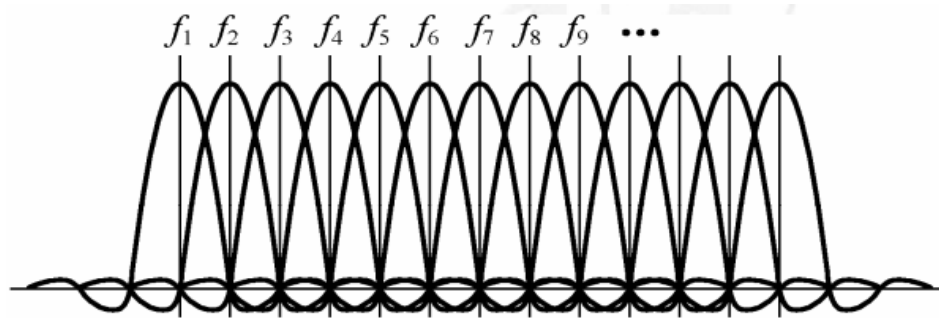
正交频分多址接入技术 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 是后 3G 时代最主要的一种接入技术。其基本思想是把高速数据流分散到多个正交的子载波上传输，从而使单个子载波上的符号速率大大降低，符号持续时间大大加长，对因多径效应产生的时延扩展有较强的抵抗力，减少了符号间干扰 (Inter Symbol Interference, ISI) 的影响。通常在 OFDM 符号前加入保护间隔，只要保护间隔大于信道的时延扩展则可以完全消除符号间干扰。在 TD-LTE 系统中，下行方向上采用了 OFDM 的复用方式，而上行方向，采用了具有单载波峰均比特特征的 DFT-S-OFDMA 多址方式。

### 3.2.1 下行多址传输

#### (一) OFDM 技术基本原理

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。两种复用方式的频谱使用对比如图 3-1 所示。





(b) OFDMA 频谱

图 3-1 传统 FDMA 和 OFDMA 频谱时使用对比

图 3-2 是 TD-LTE 下行多址接入方式 OFDMA 的示意图，发端信号先进行信道编码与交织，然后进行 QAM 调制，将调制后的频域信号进行串/并变换，以及子载波映射，并对所有子载波上的符号进行逆傅里叶变换（IFFT）后生成时域信号，然后在每个 OFDM 符号前插入一个循环前缀（Cyclic Prefix, CP），以在多径衰落环境下保持子载波之间的正交性。插入 CP 就是将 OFDM 符号尾部的一段复制到 OFDMA 符号之前，CP 长度必须长于主要多径分量的时延扩展，才能保证接收端信号的正确解调。

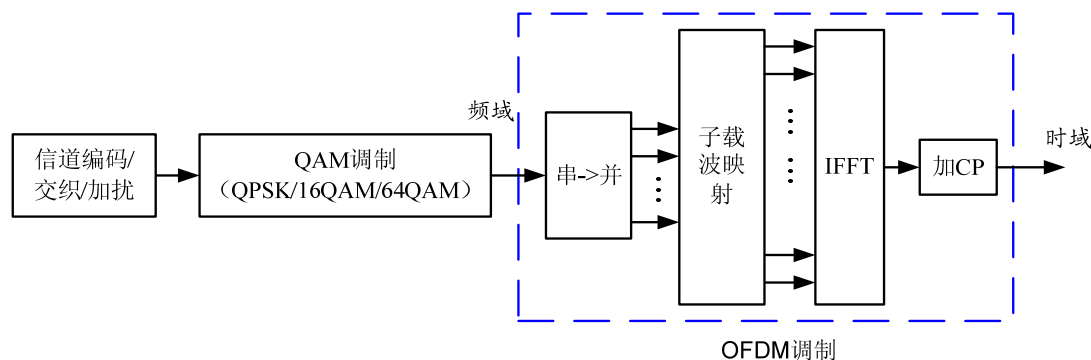


图 3-2 LTE 下行多址方式 OFDMA 的示意图

### 3.2.2 上行多址传输

DFT-S-OFDM 是基于 OFDM 的一项改进技术，在 TD-LTE 中，之所以选择 DFT-S-OFDM，即 SC-FDMA（单载波）作为上行多址方式，是因为与 OFDM 相比，DFT-S-OFDM 具有单载波的特性，因而其发送信号峰均比较低，在上行功放要求相同的情况下，可以提高上行的功率效率，降低系统对终端的功耗要求。LTE 上行多址方式的示意图如图 3-3 所示。

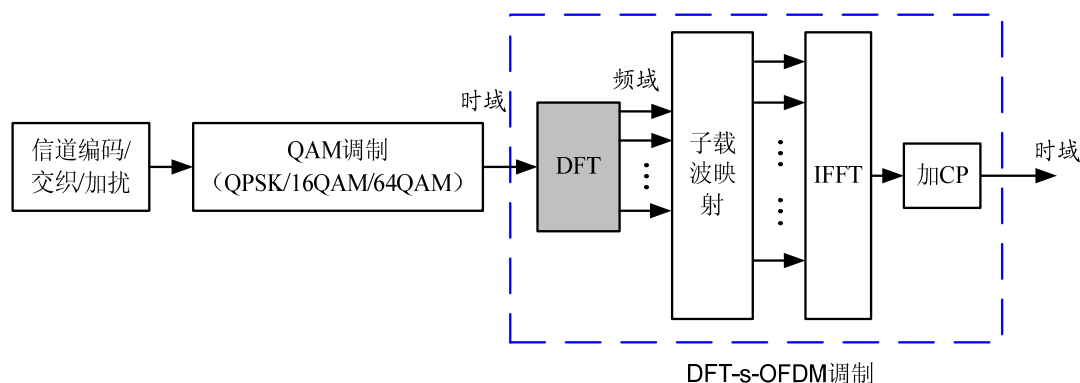


图 3-3 LTE 上行多址方式示意图

上述关于下行与上行的两种多址方式，对于其中的“子载波映射”，都存在两种可能的实现方式。一种是集中式（Localized），即 DFT 产生的频域信号按原有顺序集中映射到 IFFT 的输入；另一种是分布式（Distributed），即均匀地映射到间隔为  $L$  的子载波上，如图 3-4 所示  $L_1 = L_2 = \dots = L_n$ 。在 TD-LTE 系统中，上行 DFT-SOFDM 不支持分布式（Distributed）的传输模式，而采用帧内（时隙间）或帧间的跳频来获得频率分集的增益。

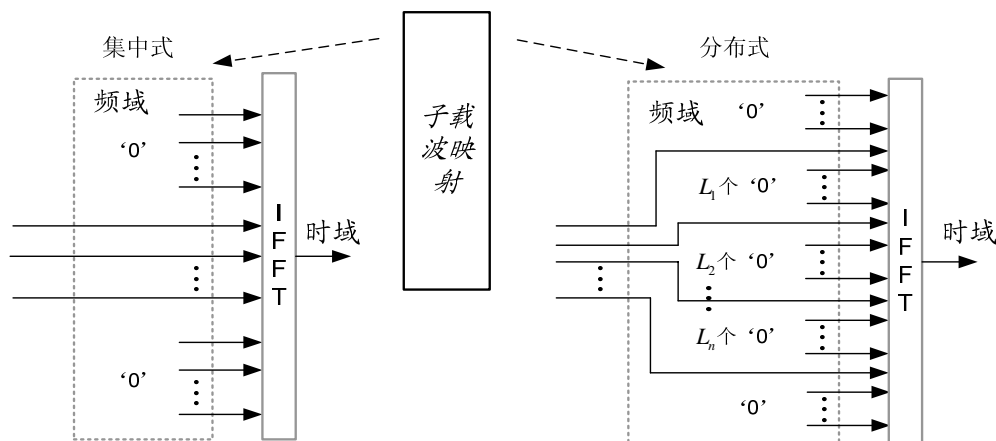


图 3-4 子载波映射方式

OFDM/OFDMA 技术是 TD-LTE 系统的技术基础与主要特点，OFDM/OFDMA 系统参数设定对整个系统的性能会产生决定性的影响，其中载波间隔又是 OFDM 系统的最基本参数，经过理论分析与仿真比较最终确定载波间隔为 15kHz。上下行的最小资源块为 375kHz，也就是 25 个子载波宽度，数据到资源块的映射方式可采用集中（Localized）方式或离散（Distributed）方式。循环前缀 Cyclic Prefix（CP）的长度决定了 OFDM 系统的抗多径能力和覆盖能力。长 CP 利于克服多径干扰，支持大范围覆盖，但系统开销也会相应增加，导致数据传输能力下降。为了达到小区半径 100Km 的覆盖要求，TD-LTE 系统采用长短两套循环前缀方案，根据具体场景进行选择：短 CP 方案为基本选项，长 CP 方案用于支持 TD-LTE 大范围小区覆盖和多小区广播业务。

由于 OFDM 具有频谱效率高、带宽扩展灵活等特性，成为 B3G/4G 演进过程中的关键技术之一，它可以结合分集技术，时空编码技术，干扰和信道间干扰抑制以及智能天线技术，最大限度的提高系统性能。

## 3.3 MIMO 技术

MIMO（Multiple Input Multiple Output）技术是指利用多发射、多接收天线进行空间分集的技术。它采用的是分立式多天线，能够有效的将通信链路分解成为许多并行的子信道，从而大大提高容量。在下行链路，多天线发送方式主要包括发送分集、波束赋形、空时预编码以及多用户 MIMO 等；而在上行链路，多用户组成的虚拟 MIMO 也可以提高系统的上行容量。

### 3.3.1 发射分集

在无线通信系统中，分集技术主要用于对抗衰落、提高链路可靠性。传输分集的主要原理是，利用空间信道的弱相关性，结合时间/频率上的选择性，为信号的传递提供更多的副

本，提高信号传输的可靠性，从而改善接收信号的信噪比。

空间发射分集利用了分集增益的原理，在基站发射端，对发射的信号进行预处理，采用多根天线进行发射，在接收端通过一定的检测算法获得分集信号。

TD-LTE 中发射分集技术的实现方式有：空时/频编码、延迟发射分集、循环延时发射分集、切换发射分集等。

#### （一）空时/频编码

对 2 天线传输来说，最著名的空时/频块码方式是 Alamouti 编码，其编码矩阵为：

$$\begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

Alamouti 编码是一种速率为 1（Rate 1）的正交编码方式，可以获得 2 天线传输情况下的全分集。在发送天线数大于 2 时，不存在满足 Rate 1 的正交空时/频块码。在 LTE 中，当传输天线数为 4 时，主要考虑采用 Alamouti 编码与其他分集方式进行组合的方式进行分集传输，如 SFBC 与 CDD 结合的方式、SFBC 与天线切换分集结合的方式等。

##### 1. 空时块码（Space Time Block Code, STBC）

空时块码技术是 1998 年由 Vahid Tarokh 等人提出的一项基于发射分集的技术。STBC 属于 Alamouti 编码方式，式（3-1）的编码矩阵中，其基本原理就是在时刻  $t$  天线 1 上传输符号  $s_1$ 、天线 2 上传输符号  $s_2$ ，在时刻  $t+1$  天线 1 上传输符号  $-s_2^*$ 、天线 2 上传输符号  $s_1^*$ 。

##### 2. 空频块码（Space Frequency Block Code, SFBC）

STBC 适用于窄带慢衰落无线信道，对于实际的宽带无线信道，直接应用 STBC 并不合适。将空时分组码与 OFDM 结合，便构成了空频块码。在图 3-5 所示 SFBC 系统中，发射端的信息比特经过调制得到信息符号，经 SFBC 编码，然后分流并进行 OFDM 调制，在各个天线中发送出去。接收端先对各天线收到的信号进行 OFDM 解调，然后利用解调后的频域数据进行信道估计，并将由此得到的频域信道信息连同频域接收数据一起送往 SFBC 译码器进行译码，再经解调恢复得到原始信息比特。

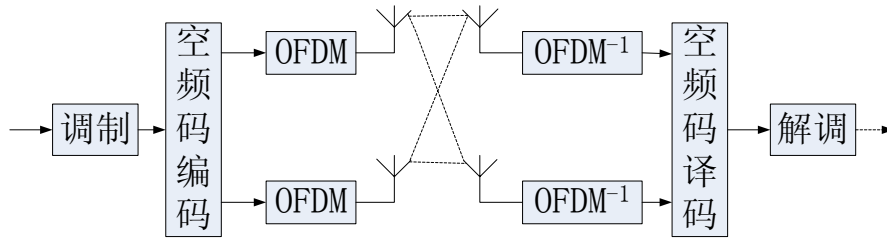


图 3-5 SFBC 系统原理图

此时式(3-1)表示：同一个 SFBC 编码块将占据两根发射天线的相邻两个子载波  $i$ 、 $i+1$ ，发射天线 1 子两个子载波上一次承载信息符号  $s_1$  和  $-s_2^*$ ，发射天线 2 在这两个子载波上依次承载信息符号  $s_2$  和  $s_1^*$ 。

#### （二）延迟发射分集

延时发射分集是一种最基本的发射分集方式，最初应用于单载波系统。在这个方案中，发射端使用多个天线传输信号，相同信号的副本引入不同的时间延迟在不同的天线上发送，各个路径的信号在统计意义上相互独立。该方案将空间分集转化为频率分集，利用频率分集增益，降低系统的差错概率，其原理如图 3-6 所示。

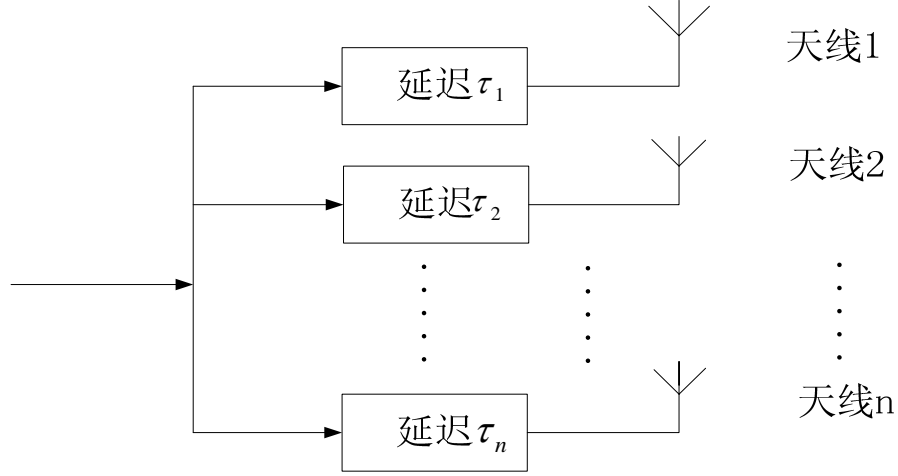


图 3-6 延时发射分集的原理

第  $i$  根天线上的信号为：

$$r_i[n, k] = \frac{1}{\sqrt{2}} (H_{1i}[n, k] + H_{2i}[n, k]e^{-j2\pi k\Delta f T_2} + \dots + H_{ni}[n, k]e^{-j2\pi k\Delta f T_n}) * t[n, k] + w_i[n, k]$$

其中， $T_m$  ( $m=2, \dots, n$ ) 为延迟时间， $\Delta f$  为 OFDM 子载波之间的间隔， $k$  为载波数，

$w_i[n, k]$  为第  $i$  根接收天线上的加性高斯白噪声。

在接收端，系统的接收机结构与单天线接收机完全一致。但是为了避免延迟发射分集造成的码间干扰，接收端需要利用均衡技术消除干扰，如采用最大似然序列估计（MLSE）/ 最小均方误差（MMSE）算法，或用维特比译码法均可获得分集增益。延时发射分集适用于改善平坦衰落信道或时延扩展较小的信道的信道质量。

### （三）循环延时发射分集

延迟发射分集获得了分集增益，但是引入了码间干扰，接收机需要采用均衡器来消除干扰，这增加了接收机的复杂度。为解决这个问题，提出了循环延时发射分集（Cyclic Delay Diversity, CDD）。在循环延迟发射分集系统中，各个天线支路的信号并没有在时间上滞后，而是在信号内部进行了循环移位，既不会产生码间干扰的问题也不用增加循环前缀的长度，此方案可以在不增加接收机的复杂度的前提下获得分集增益。CDD 方案在 OFDM 系统中的实现原理如图 3-7 所示，在插入循环前缀(CP)之前，将同一个 OFDM 符号分别循环移位  $D_m$  个样点，其中  $m$  ( $m=1, \dots, M$ ) 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 并将信号发射出去。

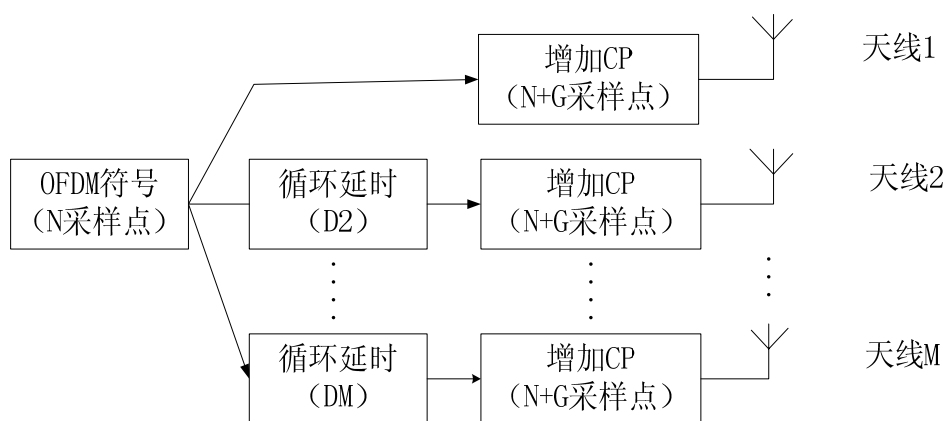


图 3-7 OFDM 系统中 CDD 方案的原理图

#### (四) 切换发射分集

切换发射分集技术是指当发射端存在多根传输天线时,按照预定的模式选择其中的一根天线进行传输,并不断在天线间进行切换,包括时间切换分集 (Time Switched Transmit Diversity, TSTD) 和频率切换发射分集 (Frequency Switched Transmit Diversity, FSTD) 两种。

TSTD 方案中,在不同的时间段上选择不同的天线交替进行信号发送,其原理如图 3-8 所示。TSTD 的时间切换发送过程削弱了同一个码块内符号之间的时间相关性,这样可以通过纠错编码获得分集增益。

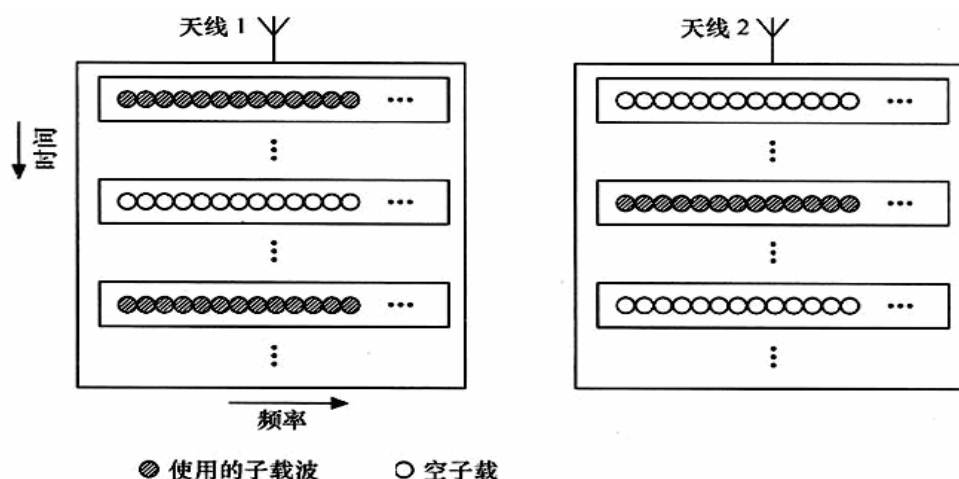


图 3-8 时间切换发射分集原理图

FSTD 方案中,在不同的子载波上选择不同的天线交替进行信号发送,其原理如图 3-9 所示。FSTD 方式中,减小了子载波之间的相关性,使等效信道产生了频率选择性,因而同样可以利用纠错编码提高差错概率性能。

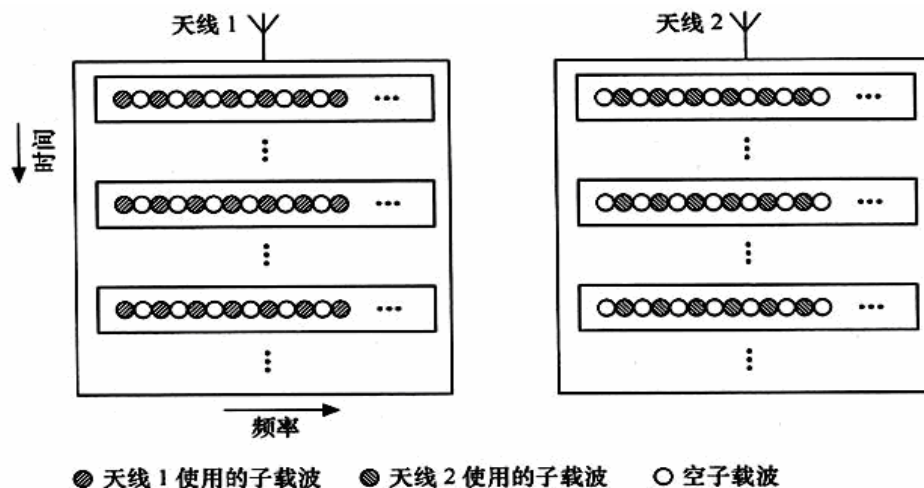


图 3-9 频率切换发射分集原理图

TSTD 和 FSTD 也可以写成编码矩阵的形式，即：

$$\begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix}$$

上式表示在时刻  $t$ （或频率  $f$ ），在天线 1 上传输符号  $S_1$ ，天线 2 上不传输任何信息；在时刻  $t+1$ （或频率  $f+1$ ），在天线 2 上传输符号  $S_2$ ，天线 1 上不传输任何信息。天线切换分集扩展到基站存在多根发射天线的情况，如下所示：

$$\begin{bmatrix} S_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & S_N \end{bmatrix}$$

其中， $N$  为发射天线数。

### 3.3.2 波束赋形（Beamforming）

波束赋形是一种基于天线阵列的信号与预处理技术，其工作原理是利用空间信道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，获得明显的阵列增益，其原理如图 3-10 所示。波束赋形技术在扩大覆盖范围、改善边缘吞吐量以及干扰抑制等方面都有很大的优势。波束赋形的权值仅仅需要匹配信道的慢变化，比如来波方向(Direction Of Arrival, DOA)和平均路损。因此，在进行波束赋形时，可以不利用终端反馈所需信息，而在基站侧通过测量上行接收信号获得来波方向和路损信息。



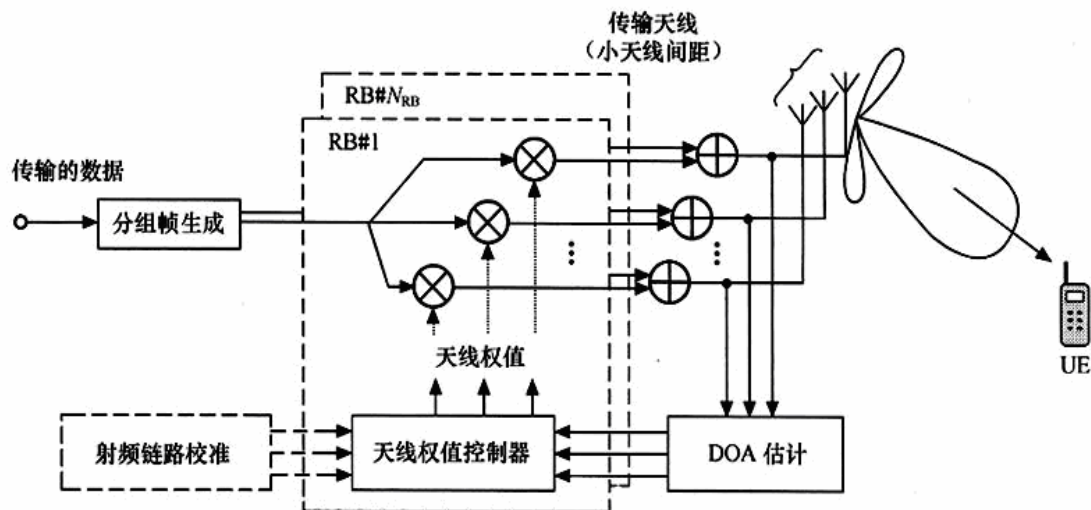


图 3-10 波束赋形技术原理示意图

为了获得波束赋形增益，需要使用较多的天线单元，而目前LTE仅仅考虑最多使用 4 个公共导频，无法支持在超过 4 根天线单元的天线阵列上使用波束赋形，因此波束赋形需要使用专用导频。波束赋形的一般过程为：

(1) 根据系统性能指标（如误码率、误帧率）的要求确定优化准则（代价函数），一般这是权重矢量与一些参数的函数；

(2) 采用一定的方法获得需要的参数；

(3) 选用一定的算法求解该优化准则下的最佳解，得到权重矢量的值。

波束赋形技术已经在 TD-SCDMA 系统中得到了成功的应用，在 TD-LTE R8 中采用了单流波束赋形技术。TD-LTE R9 中则将波束赋形技术扩展到了双流波束赋形。

#### （一）单流波束赋形

LTE R8 中仅支持基于专用导频的单流波束赋形技术。传输过程中，UE 需要通过对专用导频的测量来估计波束赋形后的等效信道，并进行相干检测。为了能够估计波束赋形后传输所经历的信道，基站必须发送一个与数据同时传输的波束赋形参考信号，这个参考信号是用户专用的，对应于用户专用参考信号的传输称作使用天线端口 5 的传输。单流波束赋形的处理流程如图 3-11 所示。

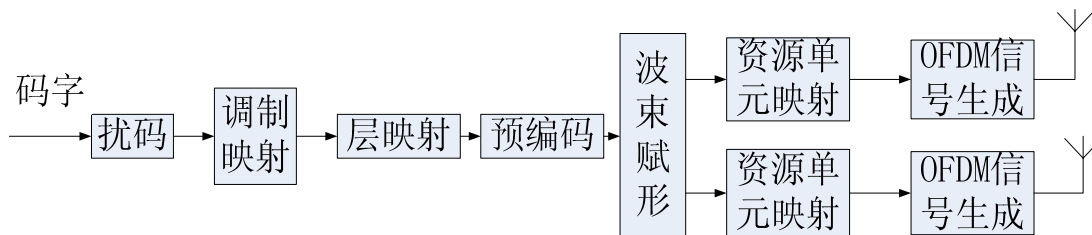


图 3-11 TD-LTE R8 单流波束赋形的处理流程

上图中的层映射与预编码都只是简单的一对一的映射，单流波束赋形示意图如图 3-12 所示。单流波束赋形可根据赋形向量的获得分为长期波束赋形和短期波束赋形两种。短期的波束赋形最常见的是基于奇异值分解（Singular Value Decomposition, SVD）波束赋形，长期的波束赋形通常称为基于来波方向（Direction Of Arrival, DOA）的波束赋形。

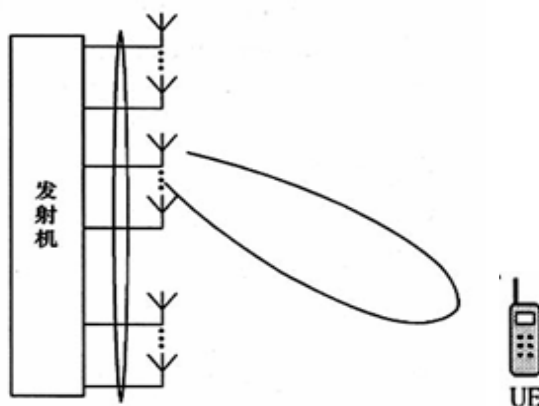


图 3-12 单流波束赋形示意图

SVD 方法中，发送端从上行探测导频（Sounding）估计出信道信息，然后对用户信道进行 SVD 分解计算出对应的预编码酉矩阵。其中 SVD 分解操作如下：假设天线发送数目为  $M$ ，接收天线数目为  $N$ ，那么空间信道矩阵  $H$  的维数为  $N \times M$ ，空间信道矩阵  $H$  的 SVD 分解，即为：

$$H = U\Lambda V^H \quad (3-2)$$

其中， $U$  和  $V$  分别是维数为  $N \times M$  和  $M \times M$  的酉矩阵， $\Lambda$  是一个维数为  $N \times M$  的矩阵，其对角线元素是非负的实数，非对角线元素为 0，并且  $\Lambda$  的对角线元素  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ ，即按照大小排序之后的矩阵  $H$  的奇异值，其中  $n$  是  $M$  和  $N$  中的最小值。经过奇异值分解之后获得的酉矩阵  $V$  即为线性预编码。

DoA 波束赋形是一种长期波束赋形技术，即赋形加权向量是基于远大于信道相干时间的一段时间内对信道的测量。

## （二）双流波束赋形

LTE R9 中将波束赋形扩展到了双流传输，实现了波束赋形与空间复用技术的结合。双流波束赋形技术应用于信号散射体比较充分的条件下，结合了智能天线技术和 MIMO 空间复用技术，利用 TDD 信道的对称性，同时传输多个数据流实现空分复用，并且能够保持传统单流波束赋形技术广覆盖、小区容量大和干扰小的特性，既可以提高边缘用户的可靠性，同时可有效提升小区中心用户的吞吐量。LTE R9 中定义了新的双端口专用导频，并引入了新的控制信令，天线推荐配置是  $8 \times 2$  的。

在双流赋形中，UE 基于对专用导频的测量估计波束赋形后的等效信道。对于 TDD 系统，更适合利用信道的互易性并采用非反馈预编码矩阵的码本号（Pre-coding Matrix Index, PMI）的方式实现双流波束赋形。eNode B 通过对 SRS 的测量获得 CSI 并计算每个流的波束赋形向量。双流波束赋形又可分为单用户波束赋形和多用户波束赋形两种。

### 1. 单用户波束赋形

单用户双流波束赋形技术，由基站测量上行信道，得到上行信道状态信息后，基站根据上行信道信息计算两个赋形矢量，利用该赋形矢量对要发射的两个数据流进行下行赋形，其原理如图 3-13 所示。

采用单用户双流波束赋形技术，使得单个用户在某一时刻可以进行两个数据流传输，同时获得赋形增益和空间复用增益，可以获得比单流波束赋形技术更大的传输速率，进而提高系统容量。

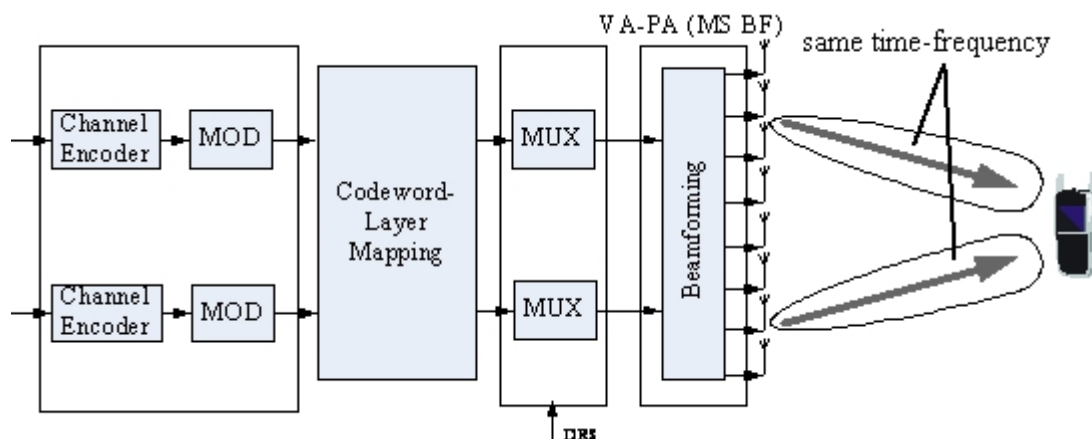


图 3-13 单用户波束赋形原理

## 2.多用户波束赋形

多用户双流波束赋形技术，基站将两个或多个 UE 调度在同样的时-频资源上，根据上行信道信息或者 UE 反馈的结果进行多用户匹配，完成后按照一定的准则生成波束赋形矢量，利用得到的波束赋形矢量为每一个 UE、每一个流进行赋形，其原理如图 3-14 所示。多用户双流波束赋形技术，利用了智能天线的波束定向原理，实现多用户的空分多址。

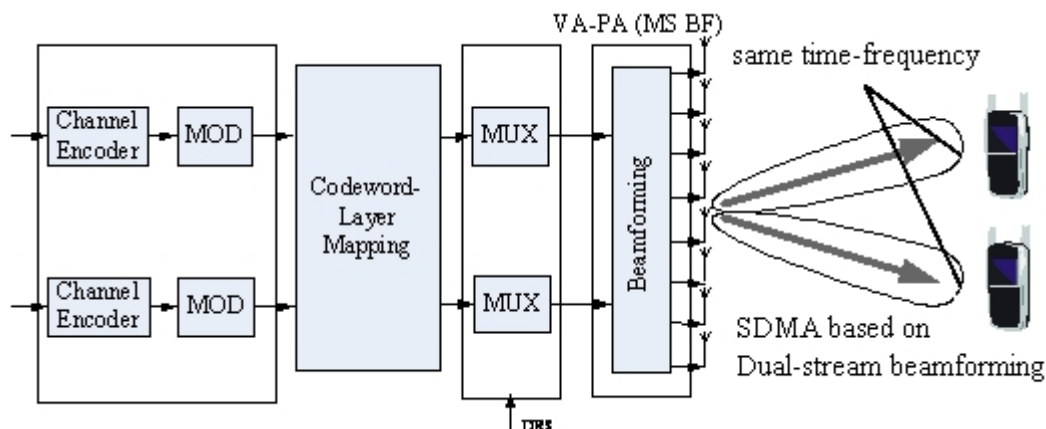


图 3-14 多用户波束赋形原理

## 3.3.3 空时预编码

LTE 既支持开环方式的空间复用，也支持闭环方式的空间复用。开环方式的空间复用系统中，接收端不能获得任何信道状态信息（Channel State Information, CSI），各个并行的数据流均等的分配功率与传输速率，并采用全向天线进行发射。在这种开环的方式中，接收机需要通过均衡算法匹配信道进行信号接收，而发送信号并未与信道相匹配。闭环方式的空间复用（即预编码技术）系统中，接收端将信道状态信息反馈给发送端，发送端对发射信号的空间特性进行优化，使发送信号的空间分布特性和信道条件相匹配，因而可以有效降低接收机均衡算法的复杂度获得更好的性能。

预编码技术可以分为线性或非线性方法，目前考虑到非线性方法的复杂度，无线通信系统中一般只考虑线性预编码。线性预编码的作用就是将天线域的处理转换为波束域的处理，在发射端利用已知的空间信道信息进行预处理操作，进一步提高用户和系统的吞吐量。在

LTE 中，来自不同层的经过编码、调制后的数据组成向量  $c = [c_1, c_2, \dots, c_M]^T$ ，在发射前与预编码矩阵相乘得到新的发射向量：

$$b = Wc \quad (3-3)$$

经过 MOMI 信道后，接收端收到的信号为：

$$r = Hb + n = HWc + n = H_E c + n \quad (3-4)$$

其中， $r$  是接收向量， $H$  是空间信道矩阵， $n$  为噪声， $H_E$  为经过预编码后的等效空间信道矩阵。线性预编码按预编码矩阵的获得位置分为两大类：非码本的预编码 (non-codebook based pre-coding) 和基于码本的预编码 (codebook based pre-coding)。所谓码本，是指有限个预编码矩阵所构成的集合。基于码本的预编码方式中，可用的预编码矩阵只能从特定的码本中选取。而非码本方式的预编码中，并不对可选用的预编码的个数进行限制，预编码矩阵可以是任何符号设计规则与应用条件限制的矩阵。

#### (一) 非码本的预编码方式

在非码本的预编码方式中，预编码矩阵在发射端获得。发射端利用预测的 CSI 信息进行预编码矩阵的计算。在 TD-LTE 系统中，CSI 信息可以利用信道对称性获得。常见的预编码矩阵的计算方法有奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD)、均匀信道分解 (Uniform Channel Decomposition, UCD) 等。其操作流程如图 3-15 所示。

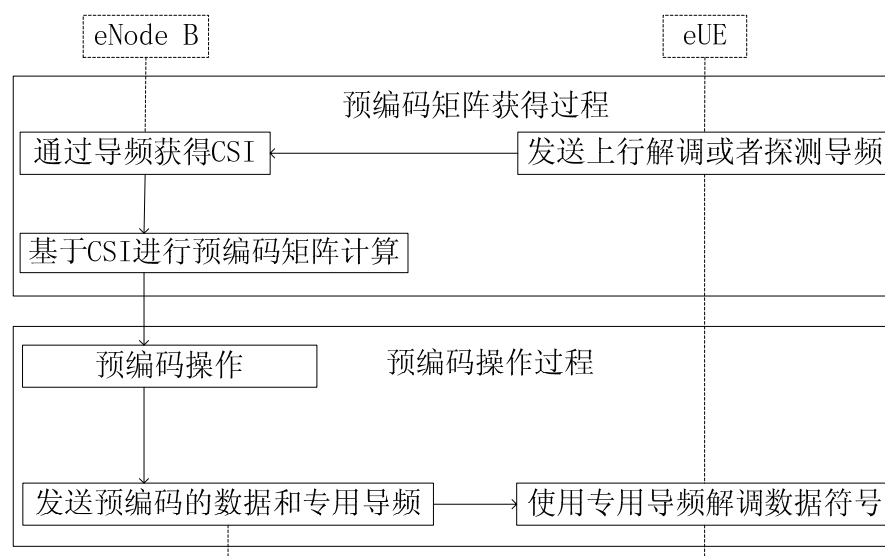


图 3-15 非码本的预编码操作流程

为了使 UE 能够进行相干解调，非码本的预编码方式要求使用专用导频，即数据符号和导频符号一起进行预编码操作。这样接收端只需通过信道估计就可以获得预编码后的等效信道。

#### (二) 基于码本的预编码

实际通信系统中，反馈信息会占用很多的资源，尤其在快衰落信道中，对反馈信息的效率和准确度要求较高，这时采用基于码本的预编码。由于只需要反馈预编码矩阵的码本号 (Pre-coding Matrix Index, PMI)，能够节省反馈信道资源并快速跟踪信道的变化。基于码本的预编码方式中，预编码矩阵在接收端获得。UE 根据公共导频 (CRS) 测量下行信道，利用预测的信道状态信息，在预定的预编码矩阵码本中进行预编码矩阵的选择，并将选定的预编码矩阵的序号反馈给发射端，其操作流程如图 3-16 所示。

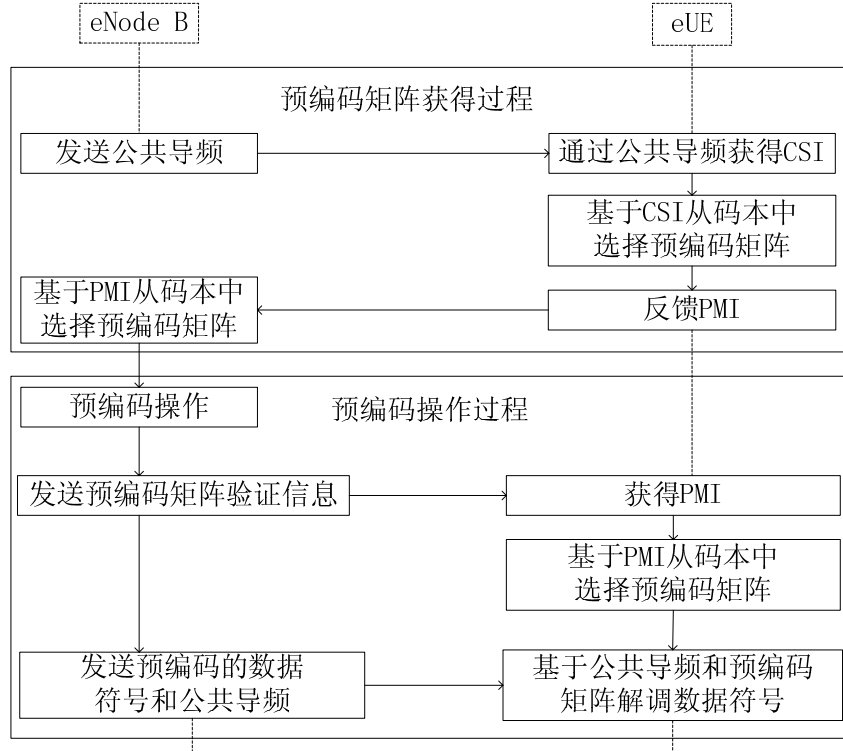


图 3-16 基于码本的预编码操作流程

构建预编码码本的方式有多种，典型的码本构造包括 Grassmannian 法和正交码字构造法。前者是根据决定 Grassmannian 流形来使得任意两个码字之间的欧式距离最大，后者是利用正交矩阵进行构造，如 DFT、DCT 和 Harmard 矩阵等。基于 DFT 的码本的构造如下：

当发送天线数目为  $M$  时，DFT 预编码矩阵  $P$  可定义为：

$$P(m,n) = \frac{1}{\sqrt{M}} \exp(j \frac{2\pi}{M} mn), m = 0,1,\dots,M-1; n = 0,1,\dots,M-1 \quad (3-5)$$

其中  $P(m,n)$  表示矩阵  $P$  的第  $m$  行第  $n$  列元素。例如当  $M=2$  时， $P = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ ；

当  $M=4$  时， $P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & j & -1 & -j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -j & -1 & j \end{bmatrix}$ 。基于上述 DFT 预编码矩阵  $P$ ，以及秩的自适应可

以构造出基于 DFT 的码本。

eNode B 在下行传输过程中，将以 UE 上报的预编码矩阵标号（PMI）为参考对数据进行预编码。考虑到 eNode B 在下行使用的预编码矩阵可能与 UE 上报的 PMI 不一致，为了保证 UE 能获知预编码后的等效信道并对下行数据进行相干解调，eNode B 需要下行控制信令中明确指示其所用的预编码矩阵。基于码本的 CQI 计算过程能够反映 UE 的处理算法，因而相对比较准确。但是，基于码本的预编码方法存在量化精度损失的问题，因此预编码矩阵不能与信道精确地匹配。

### 3.3.4 下行多用户 MIMO

MIMO 技术利用多径衰落,在不增加带宽和天线发送功率的情况下,达到提高信道容量、频谱利用率及下行数据的传输质量。LTE 已确定 MIMO 天线个数的基本配置是下行 2×2、上行 1×2,但也在考虑 4×4 的高阶天线配置。

当基站将占用相同时频资源的多个数据流发送给同一个用户时,即为单用户 MIMO (Single-User MIMO, SU-MIMO),或者叫空分复用 (Space Division Multiplexing, SDM);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 (Multiple-User MIMO, MU-MIMO),或者叫做空分多址 (SDMA),其原理如图 3-17 所示。

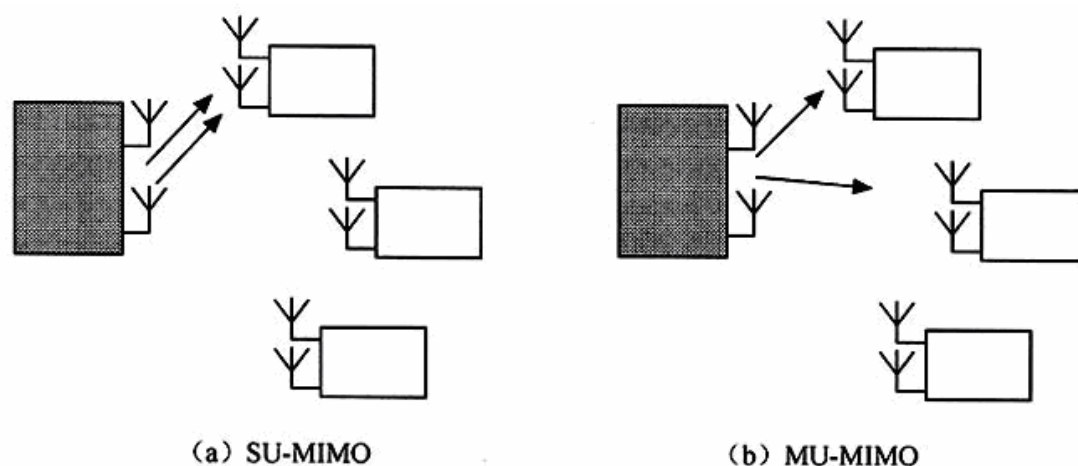


图 3-17 SU-MIMO 和 MU-MIMO 原理示意图

下行方向 MIMO 方案相对较多,根据 2006 年 3 月雅典会议报告, LTE MIMO 下行方案可分为两大类:发射分集和空间复用两大类。目前,考虑采用的发射分集方案包括块状编码传送分集 (STBC, SFBC), 时间 (频率) 转换发射分集 (TSTD, FSTD), 包括循环延迟分集 (CDD) 在内的延迟分集 (作为广播信道的基本方案), 基于预编码向量选择的预编码技术。其中预编码技术已被确定为多用户 MIMO 场景的传送方案。

多用户 MIMO 技术利用多天线提供的空间自由度分离用户,各个用户可以占用相同的时频资源,信号依赖发射端的信号处理算法抑制多用户之间的干扰,通过时频资源复用的方式有效地提高小区平均吞吐量。在小区负载较重时,通过简单的多用户调度算法就可以获得显著的多用户分集增益,是获得高系统容量的有效手段。由于小间距天线能够形成有明确指向性的波束,因此多用户 MIMO 适用于小间距高相关性天线系统。小间距天线形成的较宽的波束也保证了在信道变化比较快时,分离各个用户的有效性。基本上有两种实现 MU-MIMO 的方式,其主要差别是如何进行空间数据流的分离。一种是采用每用户酉速率控制 (Per-User Unitary Rate Control,  $PU^2RC$ ) 方案,另一种是采用迫零 (Zero Forcing, ZF) 波束赋形方案。

#### (一) $PU^2RC$ 方案

$PU^2RC$  方案是由 Samsung 公司提出来的,其发射端结构如图 3-18 所示。此系统中,

假设其使用的预编码矩阵集合为  $E = \{E^{(0)} \cdots E^{(G-1)}\}$ , 其中  $E^{(g)} = [e_0^{(g)} \cdots e_{M-1}^{(g)}]$  是集合中的

第  $g$  个预编码矩阵,  $\mathbf{e}_m^{(g)}$  是该预编码矩阵中的第  $m$  个预编码向量。每一个终端计算这个集合中的每一个矩阵的每一个向量的 CQI 值, 系统设计者需要在反馈开销大小与基站调度灵活性之间进行折中, 从而选择合适的  $G$  值, 决定终端需要反馈给基站的信息数量。具体的处理流程为:

- 1.接收端估计信道: 各用户通过信道估计, 估计出其与基站之间的信道矩阵。
- 2.接收端反馈: 接收端依次计算码本中每个预编码矢量对应的 SINR 值, 然后反馈最大 SINR 值对应的码本索引值给基站。
- 3.发送端用户匹配: 基站收集各用户反馈的码本索引值, 将预编码矢量为酉矩阵的不同列矢量的多个用户归为一组。

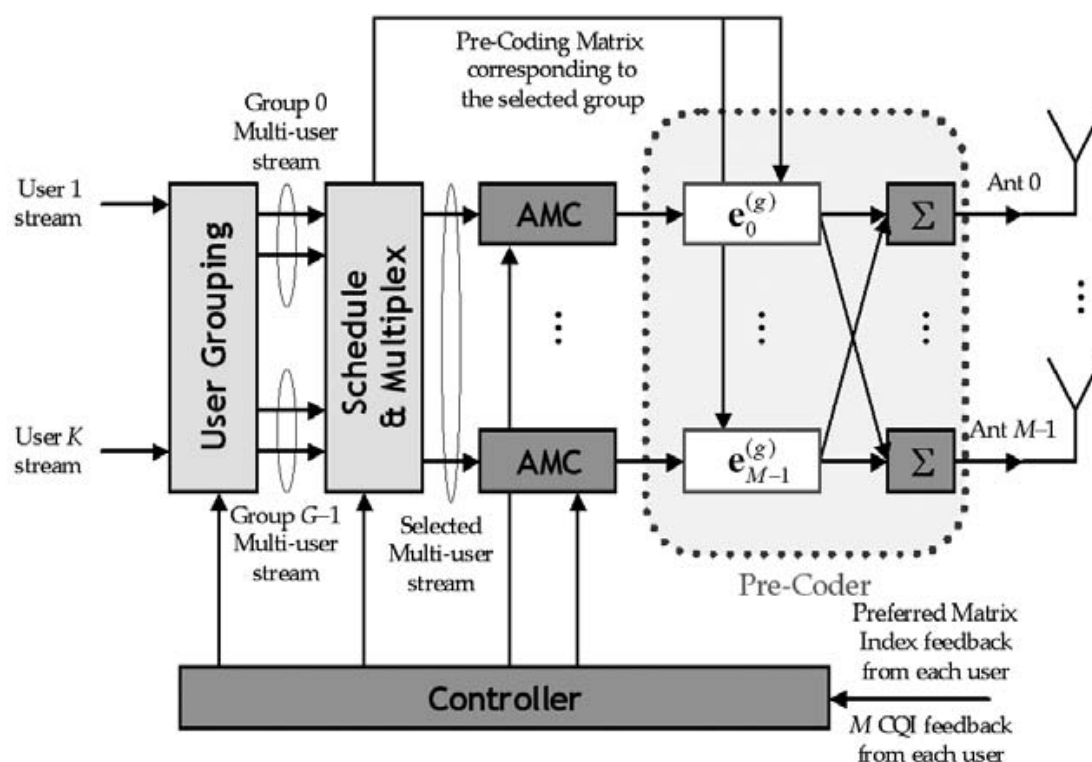


图 3-18  $PU^2RC$  发射端系统框图

4.发送端为已经配对的用户分别选择编码调制方式 (AMC) 并进行预编码操作, 然后发送出去。

5.接收端利用 MMSE 准则消除其他用户的干扰, 恢复出自己的数据。

$PU^2RC$  方案中, 数据流的分离是在接收端进行的, 它利用接收端的多根天线对干扰数据流进行取消 (Canceling) 和零陷 (Nulling) 达到分离数据流的目的。

## (二) ZF 波束赋形

ZF 波束赋形方案是由 Freescale Semiconductor 公司提出的, 其结构如图 3-19 所示。与  $PU^2RC$  方案不同, ZF 波束赋形方案中空间数据流的分离是在基站进行的。基站利用反馈的信道状态信息, 为给定的用户进行波束赋形, 并保证对其他用户不会造成干扰或者只有很小的干扰, 即传输给给定用户的波束对其他用户形成了零陷。具体流程是: 各 UE 通过信道估计, 估计出其与基站之间的信道矩阵之后, 通过 SVD 分解得到信道的右奇异矩阵, 然后

从码本中选择预编码矢量  $\mathbf{u}$ ，接着，各 UE 将该预编码矢量的索引值及对应的 CQI 值反馈给 eNode B。eNode B 收集到各个 UE 反馈的信息，使用终端请求的预编码矢量重新计算一次预编码并进行波束赋形，以降低波束之间的干扰，提高系统性能。

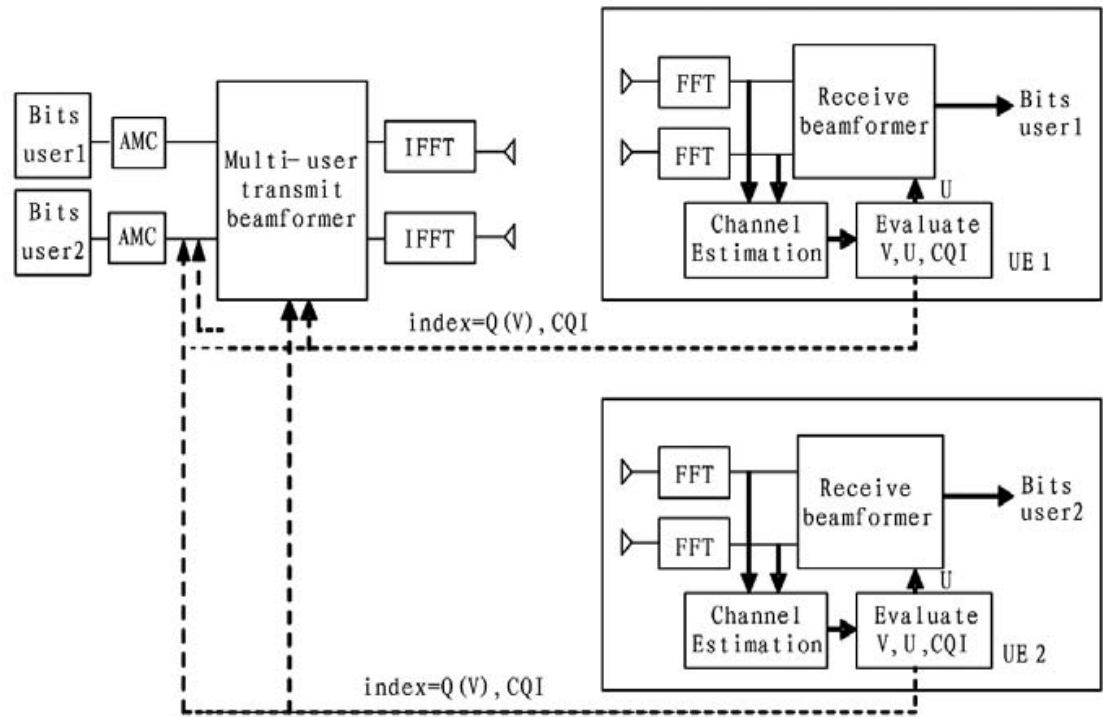


图 3-19 ZF 方案结构框图

ZF 方案在用户调度时对用户组中的用户没有严格的要求，任意两个用户都可以配对。ZF 算法虽然能使其他天线的干扰为零，但却存在着放大背景噪声的缺点，在低信噪比时性能较差，但它易于实现，在高信噪比情况下是渐进最优的。ZF 方案的性能略优于  $PU^2RC$  方案。

### 3.3.5 上行多用户 MIMO

在 LTE 中应用 MIMO 技术的上行基本天线配置为  $1 \times 2$ ，即一根发送天线和两根接收天线。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，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看做来自同一终端不同天线上的数据流，从而构成一个 MIMO 系统，其原理示意图如图 3-20 所示。



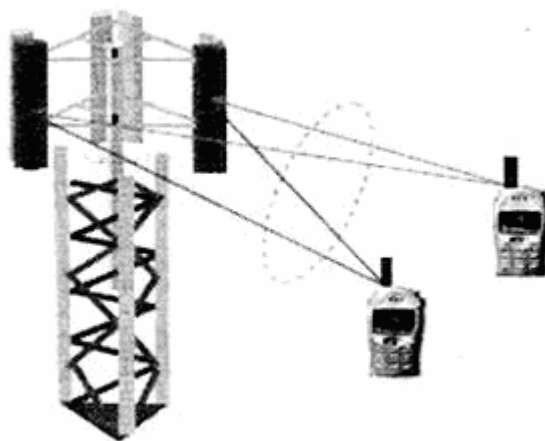


图 3-20 上行多用户 MIMO 原理示意图

虚拟 MIMO 的本质是利用了来自不同终端的多个天线提高了空间的自由度，充分利用了潜在的信道容量。由于上行虚拟 MIMO 是多用户 MIMO 传输方式，每个终端的导频信号需要采用不同的正交导频序列以利于估计上行信道信息。对单个终端而言，并不需要知道其他终端是否采用 MIMO 方式，只要根据下行控制信令的指示，在所分配的时频资源里发送导频和数据信号，在基站侧，由于知道所有终端的资源分配和导频信号序列，因此可以检测出多个终端发送的信号。上行 MIMO 技术并不会增加终端发送的复杂度。

## 3.4 AMC 链路自适应技术

由于移动通信的无线传输信道是一个多径衰落、随机时变的信道，使得通信过程存在不确定性。AMC 链路自适应技术能够根据信道状态信息确定当前信道的容量，根据容量确定合适的编码调制方式，以便最大限度的发送信息，提高系统资源的利用率。

### 3.4.1 信道调制和编码技术

相对于在多址方式上的重大修改，TD-LTE 在调制方面基本沿用了原来的技术，没有增加新的选项。基本调制技术就不在这里一一叙述，请读者参考相关文献。TD-LTE 制定了多种调制方案，其下行主要采用 QPSK、16QAM 和 64QAM 三种调制方式，上行主要采用位移 BPSK、QPSK、16QAM 和 64QAM 四种调制方式。各物理信道所选用的调制方式列于表 3-1 中。

表 3-1 LTE 各物理信道的调制方式

上行链路		下行链路	
信道类型	调制方式	信道类型	调制方式
PUSCH	QPSK、16QAM、64QAM	PDSCH	QPSK、16QAM、64QAM
PUCH	BPSK、QPSK	PBCH,PCFICH,PDCCH	QPSK

与以往通信系统一样，由于各种信道编码具有不同的特性，TD-LTE 根据数据类型的不同而采用了不同的信道编码方式。广播信道和控制信道这些较低数据率的信道采用的编码技术比较明确，即用咬尾卷积码进行编码。对于数据信道，采用 R6 Turbo 码作为母码，在此基础上进行了一系列的改进，包括使用无冲突（Contention-free）的内交织器，对较大的码

块进行分段译码。具体的编码原理请读者阅读参考文献[12]。

### 3.4.2 AMC 基本过程

自适应调制和编码（Adaptive Modulation and Coding，AMC）技术的基本原理是在发送功率恒定的情况下，动态地选择适当的调制和编码方式（Modulation and Coding Scheme，MCS），确保链路的传输质量。当信道条件较差时，降低调制等级以及信道编码速率；当信道条件较好时，提高调制等级以及编码速率。AMC 技术实质上是一种变速率传输控制方法，能适应无线信道衰落的变化，具有抗多径传播能力强、频率利用率高等优点，但其对测量误差和测量时延敏感。

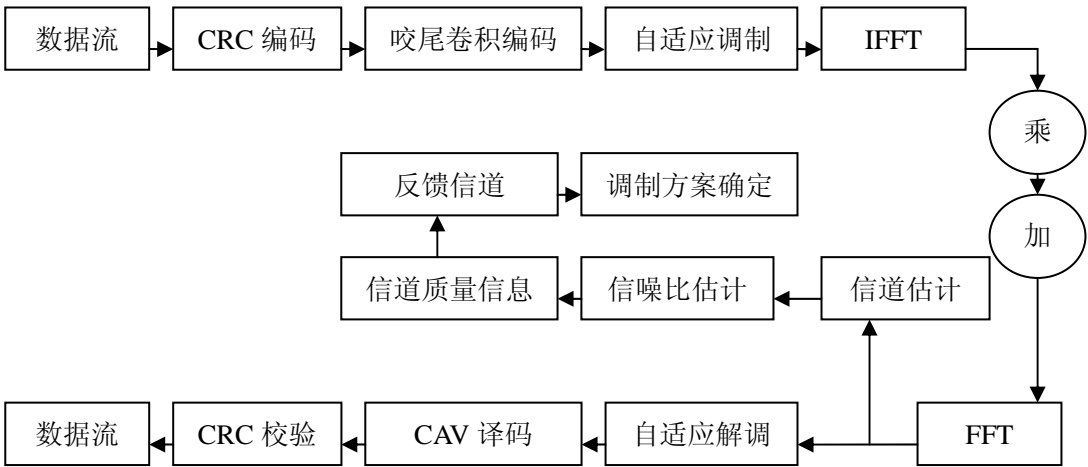


图 3-21 LTE 系统的 AMC 系统框图

LTE 系统中自适应调制编码系统框图如图 3-21 所示。在发送端，经编码后的数据根据所选定的调制方式调制后，经成形滤波器后进行上变频处理，将信号发射出去。在接收端，接收信号经过前端接收后，所得到的基带信号需要进行信道估计。信道估计的结果一方面送入均衡器，对接收信号进行均衡，以补偿信道对信号幅度、相位、时延等的影响；另一方面信道估计的结果将作为调制方式选择的依据，根据估计出的信道特性，按照一定的算法选择适当的调制方式。在 TD-LTE 系统中定义了 29 中调制编码方案（MCS），其调制方式分别是 QPSK、16QAM 和 64QAM。

TD-LTE 系统在进行 AMC 的控制过程中，对于上下行有着不同的是实现方法，具体如下：

（1）下行 AMC 过程：通过反馈的方式获得信道状态信息，终端检测下行公共参考信号，进行下行信道质量测量并将测量的信息通过反馈信道反馈到基站侧，基站侧根据反馈的信息进行相应的下行传输 MCS 格式的调整。

（2）上行 AMC 过程：与下行 AMC 过程不同，上行过程不再采用反馈方式获得信道质量信息。基站侧通过对终端发送的上行参考信号的测量，进行上行信道质量测量；基站根据所测得信息进行上行传输格式的调整并通过控制信令通知 UE。

## 3.5 HARQ 混合自动重传

在移动通信系统中，由于无线信道时变特性和多径衰落对信号传输带来的影响以及一些

不可预测的干扰导致信号传输失败，需要在接收端检测并纠正错误，即差错控制技术。随着通信系统飞速发展，对数据传输的可靠性要求也就越来越高。差错控制技术，即对所传输的信息附加一些保护数据，使信号的内部结构具有更强的规律性和相互关联性，这样，当信号受到信道干扰导致某些信息结构发生差错，仍然可以根据这些规律发现错误、纠正错误，从而恢复原有的信息。

### 3.5.1 HARQ 类型

在数字通信系统中，差错控制机制基本分为两种：前向纠错（Forward Error Correction，FEC）方式和自动重复请求（Automatic Repeat-reQuest，ARQ）方式。

前向纠错（FEC）方式是指在信号传输之前，预先对其进行一定的格式处理，接收端接收到这些码字后，按照规定的算法进行解码以达到找出错误并纠正错误的目的，其通信系统如图 3-22 所示。

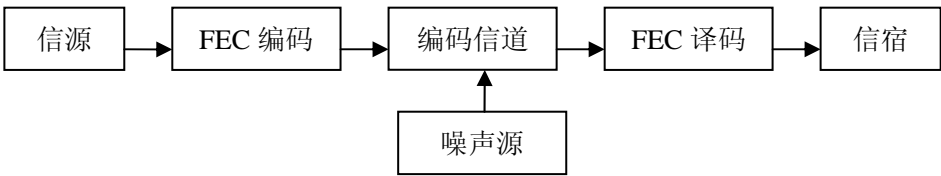


图 3-22 FEC 通信系统

FEC 系统只有一个信道，能自动纠错，不需要重发，因此时延小、实时性好。但不同码率、码长和类型的纠错码的纠错能力不同，当 FEC 单独使用时，为了获得比较低的误码率，往往必须以最坏的信道条件来设计纠错码，因此所用纠错码的冗余度较大，这就降低了编码效率，且实现的复杂度较大。FEC 技术只适用于没有反向信道的系统中。

自动请求重传（ARQ）技术，是指接收端通过 CRC 校验信息来判断接收到的数据包的正确性，如果接收数据不正确，则将否定应答（Negative Acknowledgement，NACK）信息反馈给发送端，发送端重新发送数据块；直到接收端接收到正确数据反馈确认信号（Acknowledgement，ACK）则停止重发数据。ARQ 方式纠错的通信系统如图 3-23 所示。

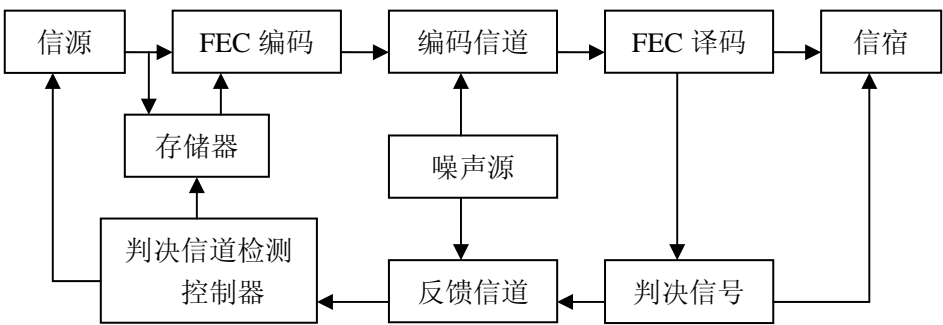


图 3-23 ARQ 通信系统

在 ARQ 技术中，数据包重传的次数与信道的干扰情况有关，若信道干扰较强，质量较差，则数据包可能经常处于重传状态，信息传输的连贯性和实时性较差，但编译码设备简单，较容易实现。ARQ 技术以吞吐量为代价换取可靠性的提高。

结合 FEC、ARQ 两种差错控制技术各自的特点，将 ARQ 和 FEC 两种差错控制方式结合起来使用，即混合自动重传请求（Hybrid Automatic Repeat reQuest，HARQ）机制。在 HARQ 中采用 FEC 减少重传的次数，降低误码率，使用 ARQ 的重传和 CRC 校验来保证分组数据传输等要求误码率极低的场合。该机制结合了 ARQ 方式的高可靠性和 FEC 方式的高通过效

---

率，在纠错能力范围内自动纠正错误，超出纠错范围则要求发送端重新发送。

根据重传内容的不同，HARQ 主要分为三种类型：TYPE-I 型、TYPE-II 型和 TYPE-III 型。

#### (1)TYPE-I 型

TYPE-I 是一种简单的 ARQ 和 FEC 的结合。它仅在 ARQ 的基础上引入了纠错编码，发送数据块进行 CRC 编码后再进行 FEC 编码。接收端对接收的数据进行 FEC 译码和 CRC 校验，如果有错则放弃错误分组的数据，并向发送端反馈 NACK 信息请求重传与上一帧相同的数据包。一般来说，物理层设有最大重发次数的限制，防止由于信道长期处于恶劣的慢衰落状态而导致某个用户的数据包不断地重发，从而浪费信道资源。TYPE-I 方式的控制信令开销小，对错误数据包采取了简单的丢弃，而没有充分利用错误数据包中存在的有用信息。TYPE-I 型的性能主要依赖于 FEC 的纠错能力，吞吐量不如 TYPE-II 型和 TYPE-III 型高。

#### (2)TYPE-II 型

TYPE-II 属于完全增量冗余 (Incremental Redundancy, IR) 方案，被称作 Full IR HARQ (FIR)。在这种方案下，第一次发送分组包含了全部的信息位 (也可能含冗余校验位)，当接收端 CRC 校验发现有错误时，接收端对已传的错误分组并不丢弃，而是将其寄存在接收端的寄存器中，并向发送端发送重传控制消息；其中重传数据并不是已传数据的简单复制，而是附加了不同的冗余信息，接收端每次都进行组合译码。由于增加了新的冗余信息帮助译码，因此纠错能力增强，提高了系统性能。TYPE-II 型在低信噪比的信道环境中具有很好的性能，缺点是接收端需要寄存器存储冗余数据。

#### (3)TYPE-III 型

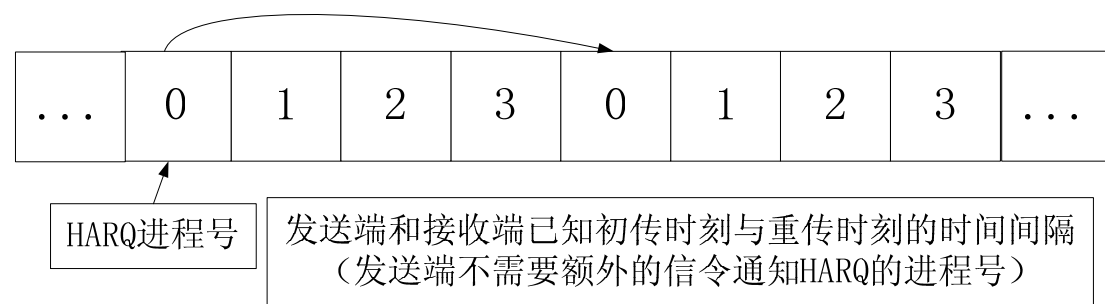
TYPE-III 型是完全递增冗余重传机制的改进。接收错误的数据包同样不会被丢弃，接收机将其存储起来与后续的重传数据合并后进行解码。根据重传的冗余版本不同，TYPE-III 又可进一步分为两种：一种被称为 Chase Combining (CC) 方式，其特点是各次重传冗余版本均与第一次传输相同，只具有一个冗余版本，接收端的解码器根据接收到的信噪比 (SIR) 加权组合这些发送分组的拷贝，这样可以获得时间分集增益；另一种是具有多个冗余版本的 TYPE-III，称为 Partial IR HARQ (PIR) 方式，其每次重传包含了相同的信息位和不同的增量冗余校验位，接收端对重传的信息位进行软合并，并将新的校验位合并到码字后再进行译码，合并后的码字能够覆盖 FEC 编码中的比特位，使译码信息变得更全面，更利于正确译码。这两种方式有着共同的特点，重传的数据包具有自解码的能力，重传的数据包与初传的数据包采用软合并的方式获得最大的译码增益。

### 3.5.2 HARQ 基本过程

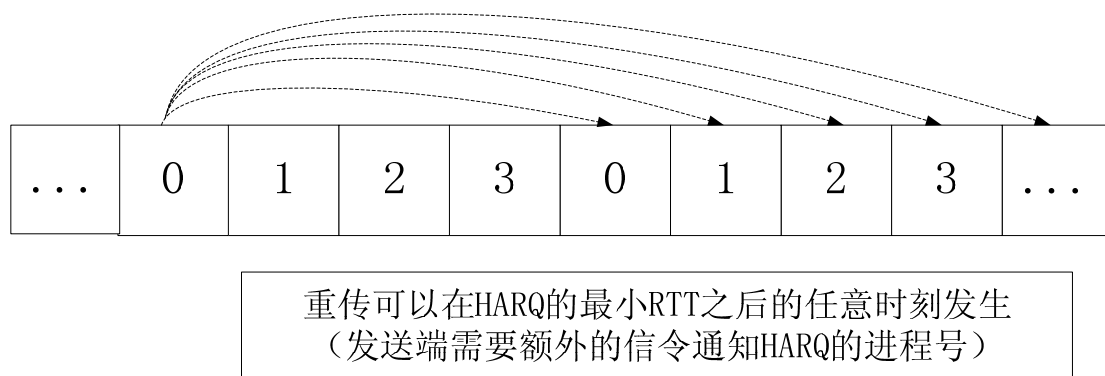
TD-LTE 系统采用 N 通道的停等式 HARQ 协议，系统中配置相应的 HARQ 进程数。在等待某个 HARQ 进程的反馈信息过程中，可以继续使用其他的空闲进程传输数据包。从重传的时序安排角度，可将 HARQ 分成同步 HARQ 和异步 HARQ：

(1) 同步 HARQ：每个 HARQ 进程的时域位置被限制在预定义的位置，接收端预先已知重传发生的时刻，因此不需要额外的信令开销来指示 HARQ 进程的序号，亦不需要额外的重传控制信令，此时 HARQ 进程的序号可以从子帧号获得。但是，如果同时发送多个同步 HARQ 进程，就需要额外的信令指示。

(2) 异步 HARQ：不限制 HARQ 进程的时域位置，一个 HARQ 进程可以发生在任何时刻，接收端预先不知道传输发生的时刻，此时需要通过额外的重传控制信令来指示 HARQ 进程的位置。这种方式在调度方面的灵活性更高，但是增大了系统的信令开销。



(a) 同步 HARQ 的操作



(b) 异步 HARQ 的操作

图 3-24 同步和异步 HARQ 示意图

除重传的位置外，根据重传时的数据特征是否发生变化，又可以将 HARQ 的工作方式分为自适应 HARQ 和非自适应 HARQ 两种。

(1) 自适应 HARQ: 在每次重传的过程中，发送端可以根据无线信道条件，自适应的调整每次重传采用的资源块 (Resource Block, RB)、调制方式、传输块大小、重传周期等参数。这种方法可看作 HARQ 和自适应调度、自适应调制和编码的结合，可以提高系统在时变信道中的频谱效率。但是，每次传输的过程中，包含传输参数的控制信令信息要一并发送，HARQ 流程的复杂度也相应提高了。

(2) 非自适应 HARQ: 各次重传均采用预定义好的传输格式，这样发送端和接受端均预先知道各次重传的资源数量、位置、调制方式等参数，因此包含传输参数的控制信令信息在非自适应系统中不需要被传送。

在 TD-LTE 系统中，为了获得更好的合并增益，其上行或者下行链路中采用的是 TYPE-III 型的 HARQ。其中，下行采用异步自适应的 HARQ 技术，上行采用同步非自适应 HARQ 技术。

#### (1) 下行 HARQ 流程

下行采用异步自适应的 HARQ 技术，因为相对于同步非自适应 HARQ 技术而言，异步 HARQ 更能充分利用信道的状态信息，从而提高系统的吞吐量，另一方面异步 HARQ 可以避免重传时资源分配发生冲突而造成性能损失。

下行异步 HARQ 操作是通过上行 ACK/NACK 信令传输、新数据指示 (New Data Indicator, NDI)、下行资源分配信令传输和下行数据的重传完成的。UE 首先通过物理上行控制信道 (Physical Uplink Control Channel, PUCCH) 向 eNode B 反馈上次传输的 ACK/NACK 信息，eNode B 对此信息进行调制和处理，并根据 ACK/NACK 信息和下行资源分配情况对重传数据进行调度。然后物理下行共享信道 (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH) 按照下行调度的时域位置发送重传数据，经一定的延迟，UE 接收到重传数据并进行处理，

---

处理完成后通过 PUCCH 再次反馈对此次重传的 ACK/NACK 信息，至此，一次下行 HARQ 数据包传送完成。

### (2) 上行同步 HARQ 流程

虽然异步自适应 HARQ 技术相比同步非自适应技术而言，在调度方面的灵活性更高，但是后者所需的信令开销更少。由于上行链路的复杂性，来自其他小区用户的干扰是不确定的，因此基站无法精确估测出各个用户实际的信噪比(SINR)值，上行链路的平均传输次数会高于下行链路。所以，考虑到控制信令的开销问题，在上行链路确定使用同步非自适应 HARQ 技术。

上行同步 HARQ 操作是通过上行 ACK/NACK 信令传输、新数据指示符 (New Data Indicator, NDI) 和上下行数据的重传来完成的。每次重传的信道编码冗余版本 (Redundancy Version, RV) 和传输格式都是预定义好的，不需要额外的信令支持。只需要 1bit 的 NDI 指示此次传输是新数据的首次传输，还是旧数据的重传。eNode B 首先通过物理 HARQ 指示信道 (Physical HARQ Indicator Channel, PHICH) 向 UE 反馈上次传输的 ACK/NACK 信息。经一定延迟，UE 接收到此信息并进行解调和处理，根据 ACK/NACK 信息在预定义的时域位置通过物理上行共享信道 (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH) 发送重传数据，并经过一定延迟到达 eNode B 端，eNode B 对上行重传数据进行处理，并通过 PHICH 再次反馈对此次重传的 ACK/NACK 信息。至此，一次上行 HARQ 数据包传送完成。

## 3.6 小区干扰抑制和协调

现有的蜂窝移动通信系统提供的数据率在小区中心和小区边缘有很大的差异，不仅影响了整个系统的容量，而且使用户在不同的位置的服务质量有很大的波动。小区间干扰 (Inter-Cell Interference, ICI) 是蜂窝移动通信系统中的一个固有问题。LTE 采用正交频分多址接入技术 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)，依靠频率之间的正交性作为区分用户的方式，比 CDMA 技术更好的解决了小区内干扰的问题。但是作为代价，OFDM 系统带来的 ICI 问题可能比 CDMA 系统更严重。对于小区中心用户来说，其本身离基站的距离就比较近，而外小区的干扰信号距离较远，则其信干噪比相对较大；但是对于小区边缘的用户，由于相邻小区占用同样载波资源的用户对其干扰比较大，加之本身距离基站较远，其信噪比相对就较小，导致虽然小区整体的吞吐量较高，但是小区边缘的用户服务质量较差，吞吐量较低。因此，在 LTE 中，小区间干扰抑制技术非常重要。

3GPP 提出了多种解决干扰的方案，包括干扰随机化、干扰消除和干扰协调技术。其中，干扰随机化利用干扰的统计特性对干扰进行抑制，误差较大。干扰消除技术可以明显改善小区边缘的系统性能，获得较高的频谱效率。但是它对带宽较小的业务不太适用，系统实现比较复杂。干扰协调技术最为简单，能很好的抑制干扰，可以应用于各种带宽的业务。

### 3.6.1 小区间干扰随机化

干扰随机化就是要将干扰随机化，使窄带的有色干扰等效为白噪声干扰，这种方式不能降低干扰的能量。常用的干扰随机化方法有两种：序列加扰和交织。

(1) 小区特定的加扰：序列加扰通过在时域加入伪随机序列的方法获得干扰白化效果。如果没有加扰，接收端 (UE) 的解码器不能区分接收到的信号是来自本小区还是来自其他的小区，它既可能对本小区信号进行解码，也可能对其他小区信号进行解码，使得性能降低。在这种方案中，通过不同的扰码区分不同的小区信息，接收端只对特定小区的信号进行解码，

---

达到了抑制干扰的目的。

(2) 小区特定的交织：通过对各小区的信号采用不同的交织图案进行信道交织，获得干扰白化效果。采用伪随机交织器产生大量的随机种子 (Seed) 为不同的小区产生不同的交织图案，交织图案的数量取决于交织器的长度。对每种交织图案进行编号 (Interleaver Pattern ID)，接收端通过检查交织模式的编号决定使用何种交织模式。在空间距离较远的地方，可以复用相同的交织图案。

### 3.6.2 小区间干扰消除

干扰消除技术最初是在 CDMA 系统中提出的，是对干扰小区的信号解调、解码，然后利用接收端的处理增益从接收信号中消除干扰信号分量，存在两种小区干扰消除的方法。

1. 利用接收端的多天线空间抑制方法来进行干扰消除：利用从两个相邻小区到 UE 的空间信道差异区分服务小区和干扰小区的信号，理论上说，配置双接收天线的 UE 应可以分辨两个空间信道。这项技术不依赖任何额外的信号区分手段（如频分、码分、交织器分），而仅依靠空分手段，很难取得满意的干扰消除效果。

2. 基于检测/删除的方法：这种技术是通过将干扰信号解调/解码后，对该干扰信号进行重构 (Reconstruction)，然后从接收信号中减去。最典型的是基于 IDMA 的迭代干扰消除技术。该方案通过伪随机交织器产生不同的交织图案，并分配给不同的小区，接收机采用不同的交织图案解交织，即可将目标信号和干扰信号分别解出，然后总的接受信号中减去干扰信号，进而有效地提高接收信号的信噪比。

### 3.6.3 小区间干扰协调/回避

干扰协调的基本思想是为小区间按照一定的规则和方法，协调资源的调度和分配，以减少本小区对相邻小区的干扰，提高相邻小区在这些资源上的信噪比以及小区边缘的数据速率和覆盖。按照协调的方式，干扰协调可以分为静态干扰协调、半静态干扰协调和动态干扰协调。

#### (一) 静态干扰协调

在这种方式中，资源限制的协商和实施在部署网络时完成，在网络运营的时期可以调整，限定各个小区的资源调度和分配策略，避免小区间的干扰。在这种情况下，eNode B 之间的信息交互量非常有限，信息交互的周期也在数天量级。比较典型的静态干扰协调方式是华为、西门子等公司提出的部分频率复用方案。

部分频率复用技术，即频率复用因子是可变的。由于 TD-LTE 系统同频干扰主要影响小区边缘用户的质量，因此小区中心用户可以使用相同的频率资源，频率复用因子为 1，小区边缘用户、相邻的小区的频率复用因子为 3，如图 3-25 所示。

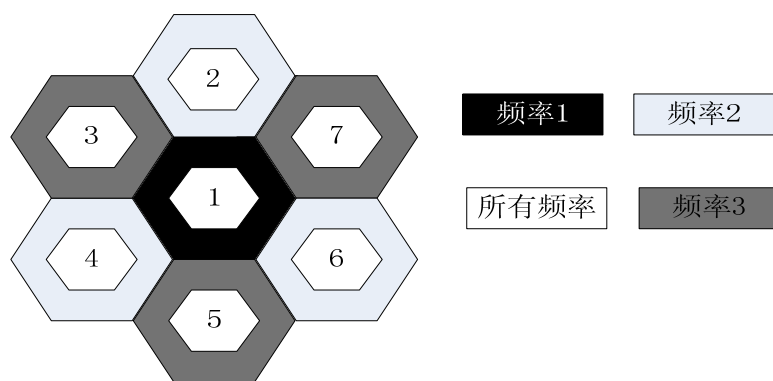


图 3-25 部分频率切换示意图

将整个频率子载波分成三个不同的部分，允许小区中心的用户使用所有频率资源，并使用较小的发射功率，因此可以认为在这些频带上的信号能量能够较好地被限制在小区内部，而不会对相邻小区造成明显的干扰。小区 1 的边缘使用第一段频率，小区 2、4、6 的边缘只使用第二频段，小区 3、5、7 的边缘只使用第三频段，即边缘用户只能按照一定的频率规则使用部分频率且 eNode B 需要采用较高的功率发射。

部分频率复用技术不需要在 X2 接口交互资源利用信息，但不能根据小区中心和边缘用户的比例以及系统符合情况对资源集合进行调整，系统的频谱利用率低。

#### （二）半静态干扰协调

小区间慢速地交互小区内用户功率信息、小区负载信息、资源分配信息、干扰信息等，小区利用这些信息，调整中心和边缘用户的频率资源分配，以及功率大小来协调干扰，提高边缘用户性能。在这种情况下，信息交互的周期在数十秒至数分钟量级。半静态干扰协调的主要功能模块包括中心、边缘用户判断，上行和下行负载信息的提示，负载信息的收发管理，以及负载信息处理及其对资源调度，功率控制的影响。具体的步骤和功能如下：

##### （1）区分小区中心、边缘用户

通过测量控制消息配置 UE 进行参考信号接收功率（Reference Signal Receiving Power, RSRP）测量，测量控制消息中配置合理的门限和上报方法，基站通过终端上报的 RSRP 信息判断用户位置；

##### （2）负载信息产生

预测边缘用户需要的频率或功率资源数量以及位置，根据预测结果设置相应的 PRB 上的高干扰协调指示(High Interference Indicator, HII)和 RNTP(Relative Narrowband TX Power)指示；预测时需要考虑邻区的负载信息。上行过载指示（Overload Indicator, OI）根据实际测量结果来设置，通常基于上行干扰功率相对于 IoT 目标值来判断干扰级别，其中 IoT 目标值为系统配置的上行总干扰相对于热噪声功率的目标。

##### （3）负载信息收发管理

负责根据负载信息的变化，触发性能或者周期性地通过 X2 接口向邻区报告负载信息。

##### （4）负载处理信息

根据接收到的邻区的负载信息设置 PRB 的调度优先级、干扰等级和功控参数等。主要影响调度和功率控制模块。

#### （三）动态干扰协调

小区间实时动态地进行协调调度，降低小区间干扰的方法。动态干扰协调的周期为毫秒量级，要求小区间实时的信息交互，资源协调的时间通常以 TTI 为单位。由于 E-UTRA 系统基站间的 X2 接口的典型时延为 10~20ms，不同基站间小区无法实现完全实时的动态干扰协调，因此 TD-LTE 系统中不采用此技术。动态干扰协调更多地用于同一基站的不同扇区间的干扰协调。



---

## 参考文献:

- [1] 沈嘉、索世强、全海洋等; 3GPP 长期演进 (LTE) 技术原理与系统设计[M]; 北京: 人民邮电出版社, 2008
- [2] 王映民, 孙韶辉等; TD-LTE 技术原理与系统设计[M]; 北京: 人民邮电出版社, 2010.6
- [3] 王文博, 郑侃; 宽带无线通信 OFDM 技术[M].第二版; 北京: 人民邮电出版社, 2007
- [4] 何桂龙; TD-LTE 系统下行多用户波束赋形技术[D]; 北京: 北京邮电大学信息与通信工程学院, 2010
- [5] 李三江; LTE 物理层下行关键技术研究[D]; 成都: 电子科技大学, 2009
- [6] 武岳, 鲜永菊; LTE 系统中的混合自动重传请求技术研究[J]; 数字通信, 2010,37
- [7] 陶根林, 陈发堂; LTE 系统中自适应调制编码技术的研究[J]; 现代电信科技, 2009.9
- [8] 黄宗治, 郑建宏; 多用户 MIMO 技术及其在 LTE 系统中的应用[J]; 现代电信科技, 2009.2
- [9] 李青云; 多用户 MIMO 上行关键技术研究[D]; 成都: 电子科技大学, 2009
- [10] 董宇, 张健飞等; 大唐移动 TD-LTE 创新技术——双流波束赋形[Z]; C114 中国通信网, 2010.4
- [11] 吴承承, 白炜, 桑林; LTE 小区间干扰抑制技术介绍及比较[J]; 无线通信, 2008.6
- [12] 胡宏林, 徐景; 3GPP LTE 无线链路关键技术[M]; 北京: 电子工业出版社, 2008.5