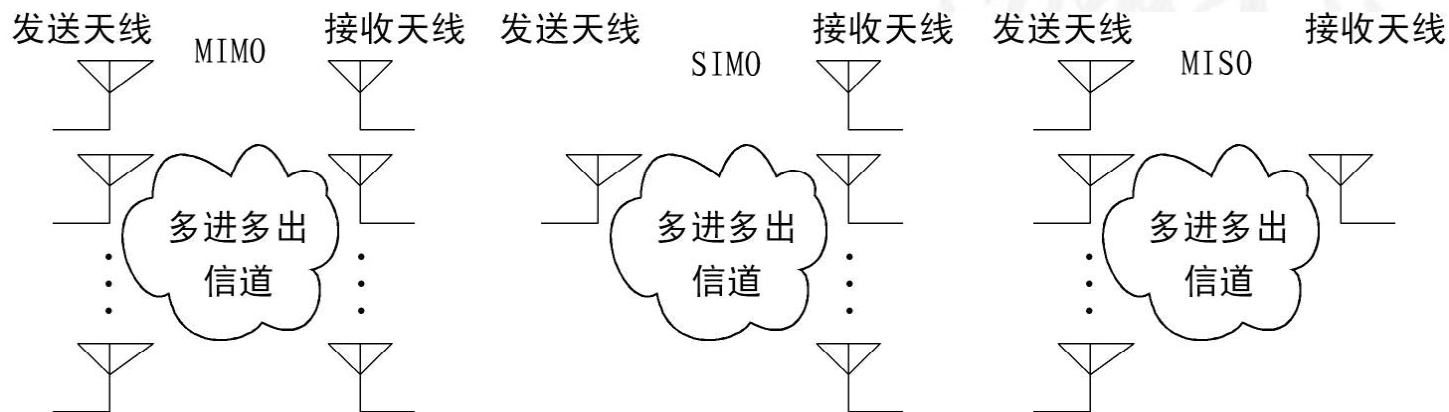


---

# MIMO与波束赋型

# MIMO的定义

- 广义定义：多进多出（Multiple-Input Multiple-Output）
  - ✦ 多个输入和多个输出既可以来自于多个数据流，也可以来自于一个数据流的多个版本。
  - ✦ 按照这个定义，各种多天线技术都可以算作MIMO技术



- 狭义定义：多流MIMO——提高峰值速率
  - ✦ 多个信号流在空中并行传输
  - ✦ 按照这个定义，只有空间复用和空分多址可以算作MIMO
- 特例：SIMO（单进多出）和MISO（多进单出）

# MIMO技术的发展历史



利用有限的频谱资源，在空间上开发，提高频谱利用率

**Marconi**利用多天线来抑制信道衰落，从而实现无线电波大容量的传输

1908

贝尔实验室的**Foschini**提出分层空时结构**BLAST**，完成**MIMO**信道容量的理论分析

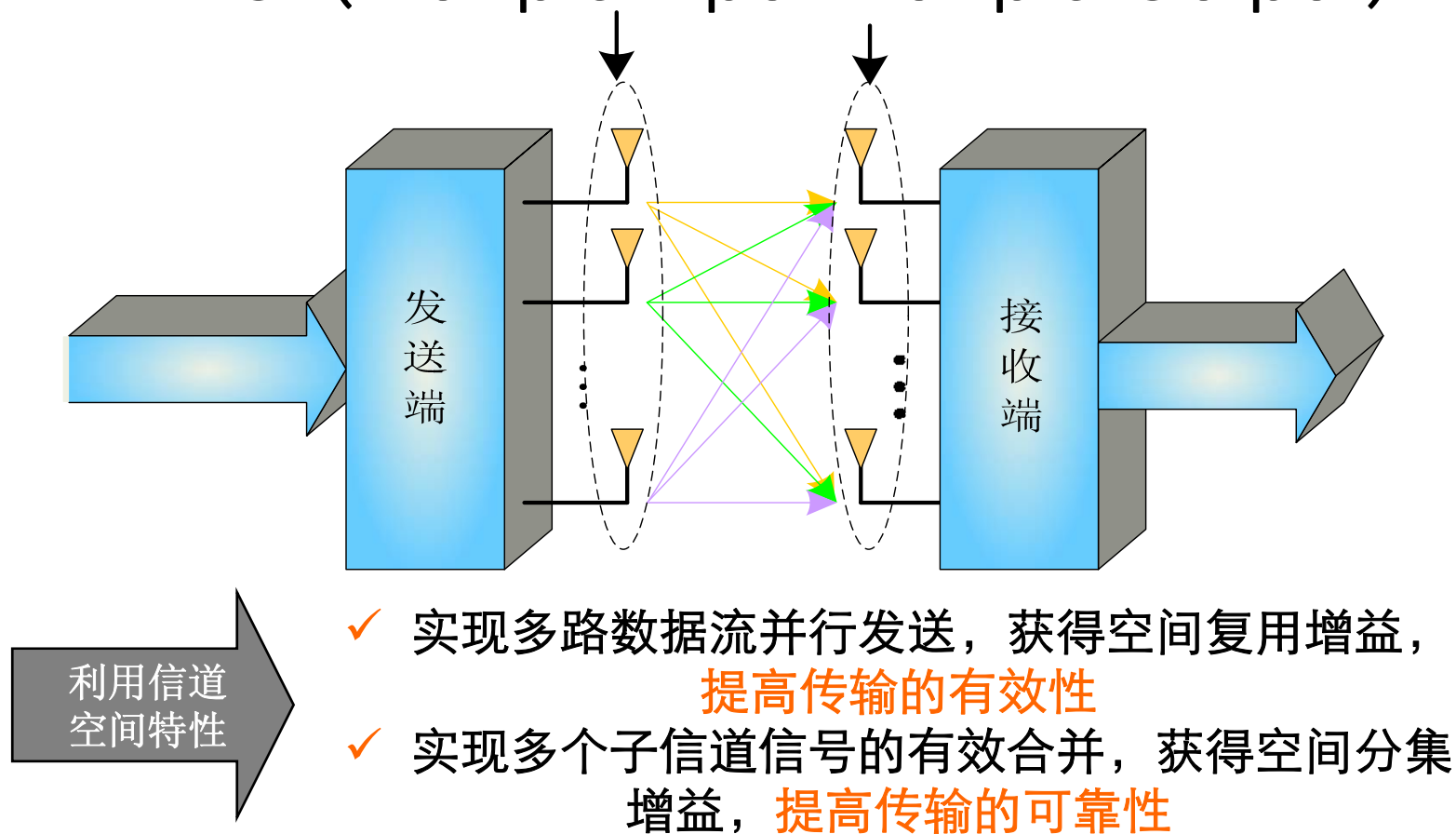
1996

**S. M. Alamouti**提出了一种简单的发送分集技术-**STBC**

1998

# MIMO系统收发端结构

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

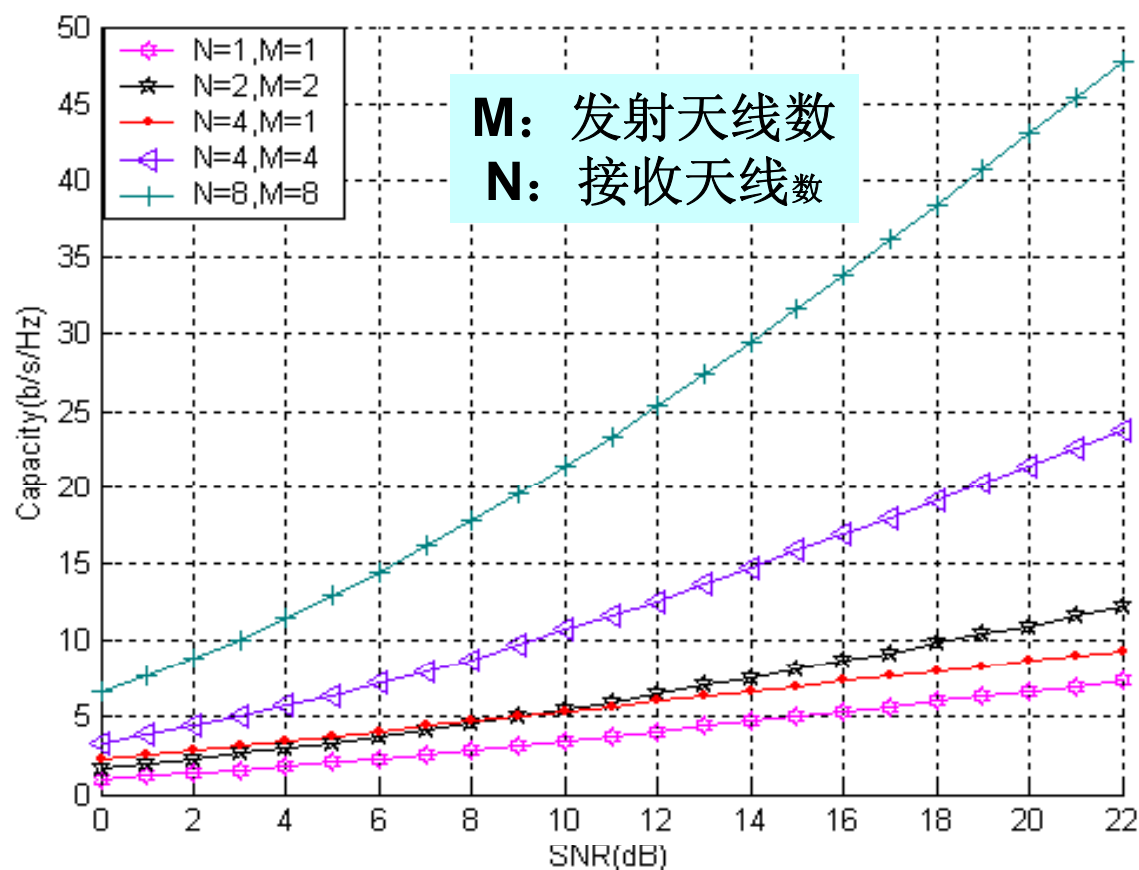


# MIMO信道容量分析

信息论已经证明：

- 当不同的接收天线和不同的发射天线之间互不相关时
- MIMO系统能够很好的提高系统的抗衰落和抗噪声性能，从而获得巨大的容量

不同天线数目下，Shannon容量与SNR曲线



# 系统模型

信道矩阵

发送信号矢量

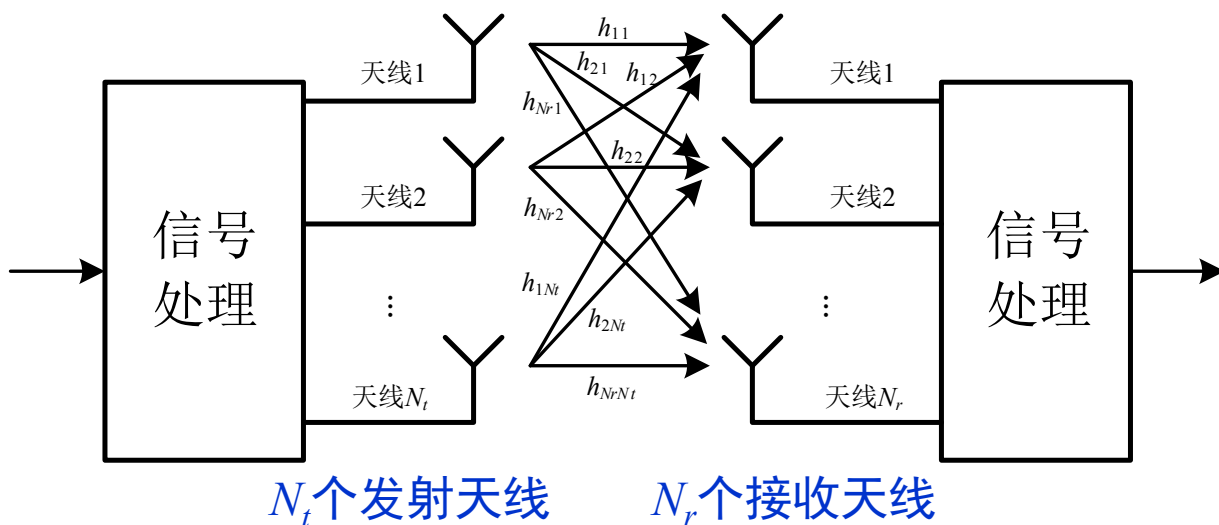
噪声

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$$

接收信号矢量

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & \cdots \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & \cdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & h_{N_r 2} & \cdots & \cdots \end{bmatrix}$$

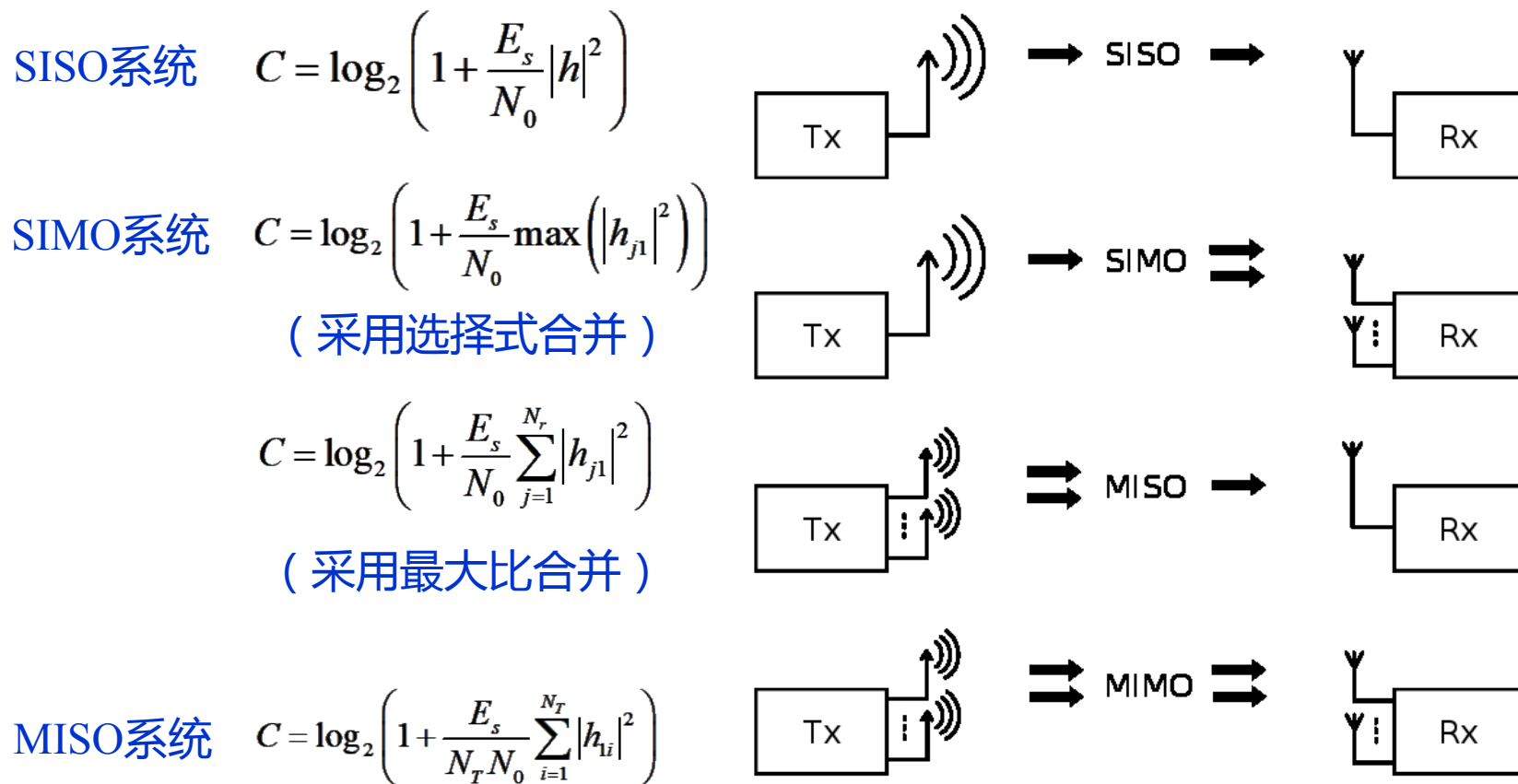
如果不考虑噪声，而 $\mathbf{H}$ 已知且满秩，就能由 $\mathbf{r}$ 解出 $\mathbf{s}$



事实上形成多路  
并行传输，而不  
造成同频干扰

# 信道容量

- Shannon信道容量是衡量信道传输能力的重要指标



# 非衰落MIMO信道容量

$\mathbf{H}$ 矩阵非零特征值个数    分配给第 $k$ 特征模式的功率    第 $k$ 个特征值

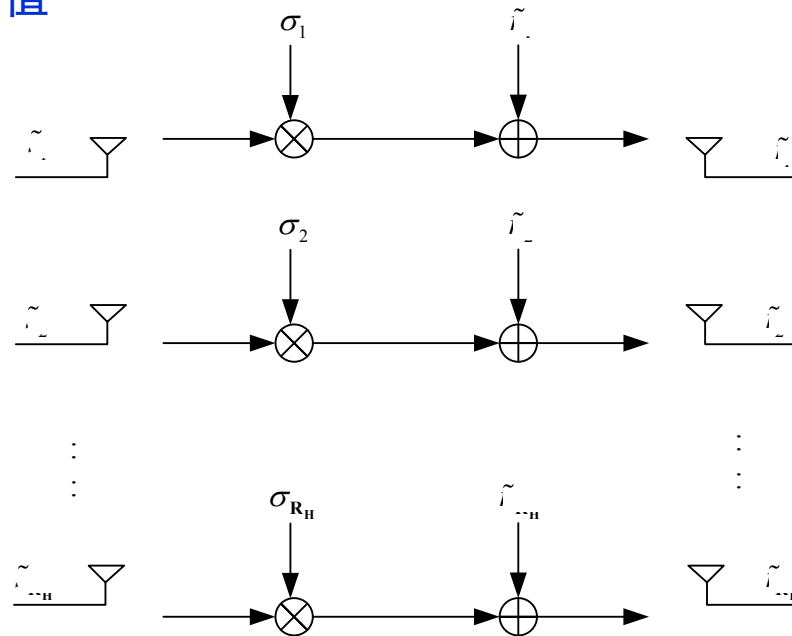
$$C = \sum_{k=1}^{R_H} \log_2 \left[ 1 + \frac{P_k}{\sigma_n^2} \sigma_k^2 \right] \quad \text{bits / s / Hz}$$

噪声方差

等价

$$C = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I}_{N_r} + \frac{\bar{\gamma}}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{H}^H \right) \right]$$

MIMO系统等价为 $R_H$ 个SISO信道的叠加



如果不同天线元的数据不相关，那么发射数据相关矩阵 $\mathbf{R}_{ss}$ 的值反映各天线功率分布的**对角矩阵**



# 非衰落信道的容量

- 发射机无信道状态信息 (CSI)，而接收机有完全CSI

- 所有天线分配相同的功率  $P_k = P/N_t$
- 发送数据不相关

$$C = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I}_{N_r} + \frac{E_s}{N_0 N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right]$$

收发天线越多，容量越大

- 当  $N_t = N_r = N$

- 传输函数都相同，秩为1
- $\mathbf{H}$  矩阵满秩，且特征值相等
- 并行传输信道（如并行电缆）

信噪比增加  $N$  倍

$$C = \log_2 \left( 1 + N \frac{E_s}{N_0} \right)$$

容量最大  $\rightarrow C = N \log_2 \left( 1 + \frac{E_s}{N_0} \right)$  容量增加  $N$  倍

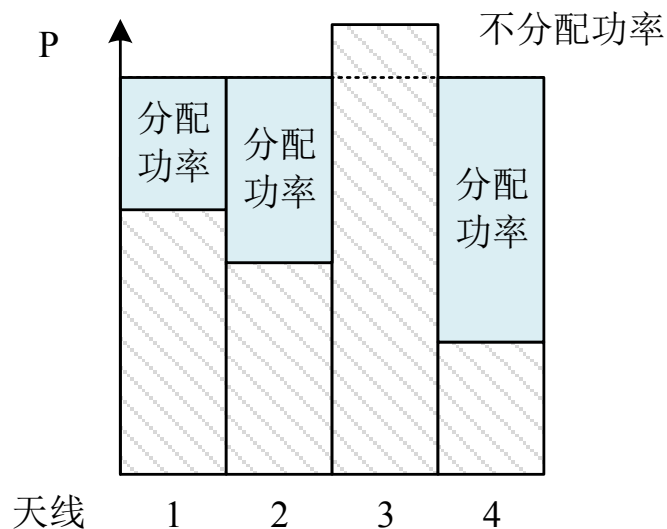
$$C = N \log_2 \left( 1 + \frac{E_s}{N N_0} \right)$$

信噪比只有原来的  $1/N$

# 非衰落信道的容量

- 当发射机和接收机都有**完全**的信道状态信息
- 按信道状态给不同天线分配功率P（信道条件好的天线，即**特征值较大的，分配较多能量**）
- 容量（**注水容量**）

$$C = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I}_{N_r} + \frac{E_s}{N_t N_0} \mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{H}^H \right) \right]$$



- 注水容量大于等于功率平均分配时的容量
- 当 $\mathbf{H}$ 矩阵满秩，且各特征值相等时，注水容量取得最大

# 平坦衰落信道的容量

- 信道矩阵 $\mathbf{H}$ 中各元素  $h_{ij}$  均为**随机变量**
  - 若信道是瑞利衰落且各天线相互独立，则各元素是均值为0，方差为1的独立同分布复高斯变量
  - 信道满秩，容量随天线数线性增长
- 不同时刻信道矩阵 $\mathbf{H}$ （**信道实现**）不同，因此瞬时信道容量也不同
  - 遍历容量：信道容量的期望值
  - 中断容量：以一定概率（例如95%）所能实现的最小容量
  - **遍历容量大于中断容量**

# 影响容量的因素

---

## □ 天线相关性

- 天线阵元相关性会极大地降低容量
- 在多径丰富环境，天线阵元相关性较低，容量较大
- 散射体越丰富，容量越大
- 视距分量越强，容量越小
- MIMO将多径变害为利

# MIMO技术的分类

## ■ 从MIMO的效果分类:

### ✦ 空间分集 (Spatial Diversity)

- 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。

### ✦ 波束赋形 (Beamforming)

- 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。

### ✦ 空分复用 (Spatial Multiplexing)

- 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）。

### ✦ 空分多址 (SDMA)

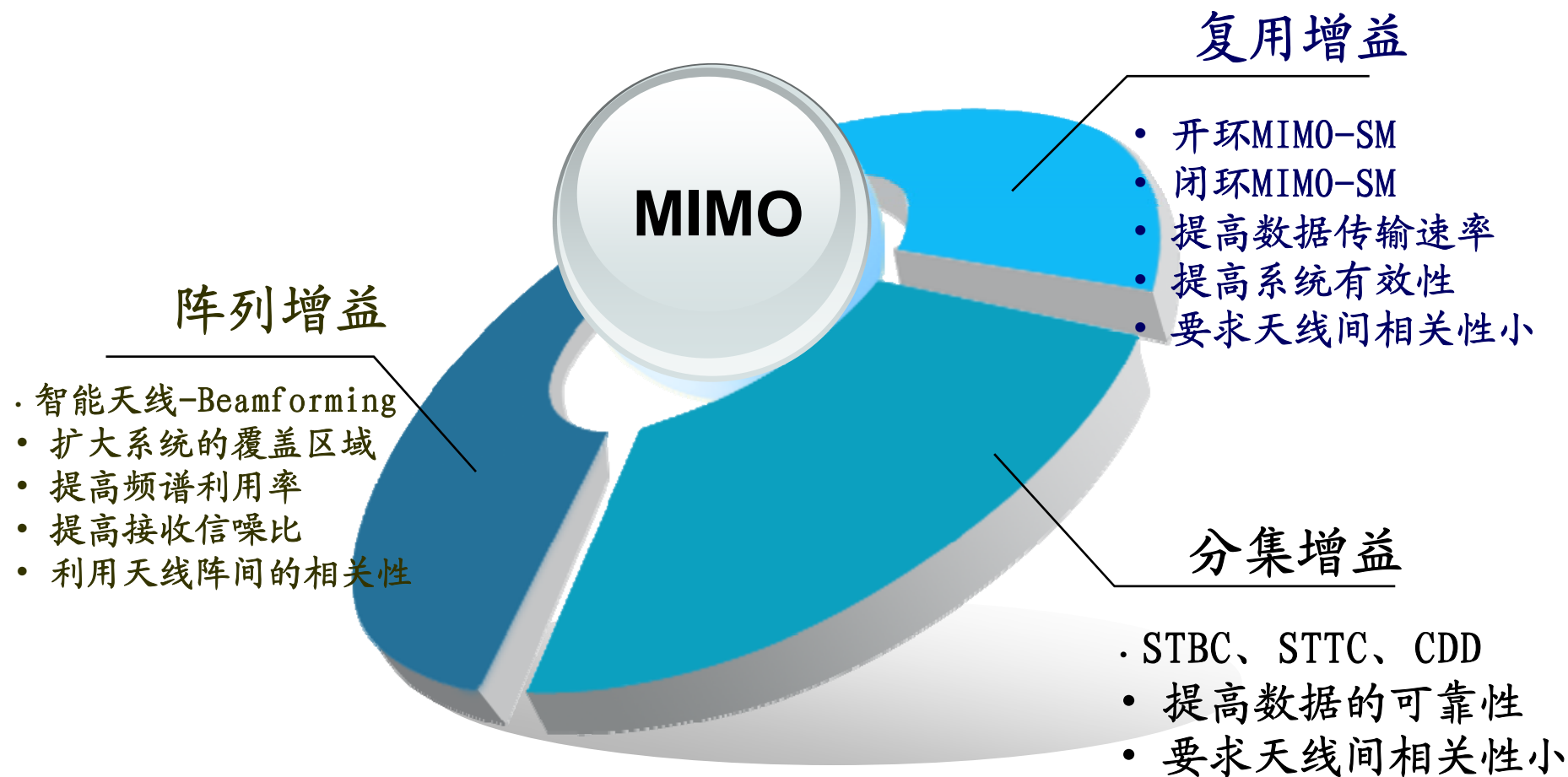
- 利用较大间距的天线阵元之间或赋形波束之间的不相关性，向多个终端并向发射数据流，或从多个终端并行接收数据流，以提高用户容量。

## ■ 从是否在发射端有信道先验信息分 (CQI不算):

### ✦ 闭环 (Close-Loop) MIMO: 通过反馈或信道互异性得到信道先验信息

### ✦ 开环 (Open-Loop) MIMO: 没有信道先验信息

# MIMO增益的分类



# 空分复用与空间分集

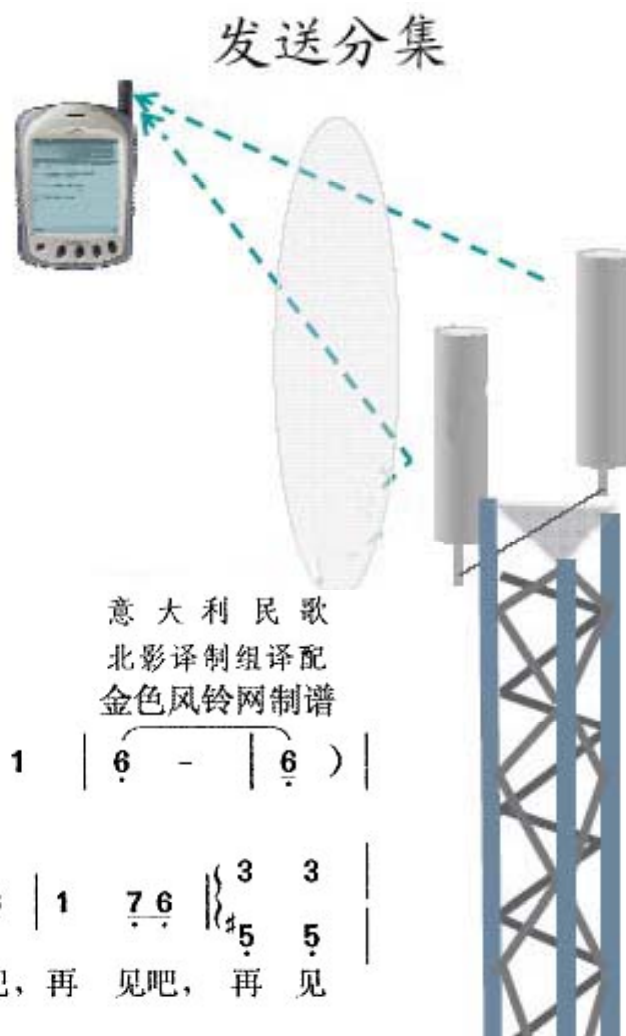
## □ 空分复用（提高传输速率）

- 将高速数据流分为几个低速数据流，分别进行编码和调制，然后在不同的天线发送
- 接收机将不同天线上的接收信号进行分离，然后解调和译码，将几个数据流合并，恢复出原始数据流

## □ 空间分集（提高传输可靠性）

- 将同一个数据流的不同版本，分别进行编码调制，然后在不同的天线发送
- 接收机将不同天线上的接收到的同一数据流的不同版本进行合并，恢复出原始数据流

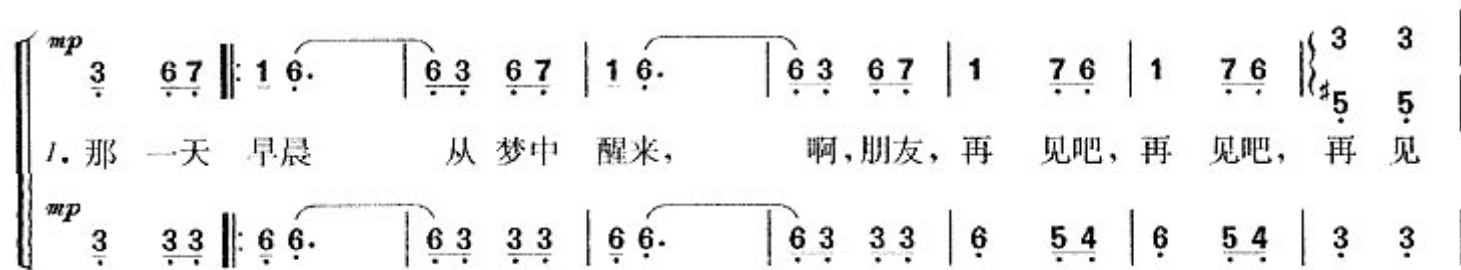
# 空间分集基本原理



1= $\flat$ A  $\frac{2}{4}$   
中速稍快

啊，朋友再见

意大利民歌  
北影译制组译配  
金色风铃网制谱





# 空间分集的分类

- 通过天线之间的不相关性（天线间距通常 $10\lambda$ 以上），采用多个天线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。
- 分集的目的是提高链路质量（BLER），而非提高链路容量，但可以通过改进链路预算，增大小区覆盖。
- 接收分集：采用多个天线接收一个信号流，避免单个天线陷入深度衰落。——最广泛采用的MIMO技术
- 发射分集：采用多个天线发送一个信号流，避免单个天线陷入深度衰落。
  - ✦ 简单分集：多个天线发送完全相同的样本（不需要标准化）
  - ✦ 编码分集：多个天线发送一个数据流的不同版本（如不同相位）
  - ✦ 选择分集：在同一时间只选择一个信道较好的天线发送（经常用于终端侧，适于只有一个发射功放的终端）
  - ✦ 波束分集：由预编码赋形波束，而非实体天线进行分集操作
- 发射分集一般采用开环方式，所以非常适合在广播信道/控制信道中及高速移动场景中采用（此时尚无法获得信道反馈）。

# 空间分集算法

- 最常用的发射分集技术包括：

- ✦ 空时块码（STBC, Space-Time Block Codes）

$$\begin{array}{c} \text{时间1} \quad \text{时间2} \\ \text{天线1} \\ \text{天线2} \end{array} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}$$

- ✦ 空频块码（SFBC, Space-Frequency Block Codes）

$$\begin{array}{c} \text{频率1} \quad \text{频率2} \\ \text{天线1} \\ \text{天线2} \end{array} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}$$

- ✦ 循环延迟分集（CDD, Cyclic Delay Diversity）

- 天线阵元之间采用不同的发射延迟，加强信道的频率选择性，以获得更大的频域调度增益和频率选择性增益。

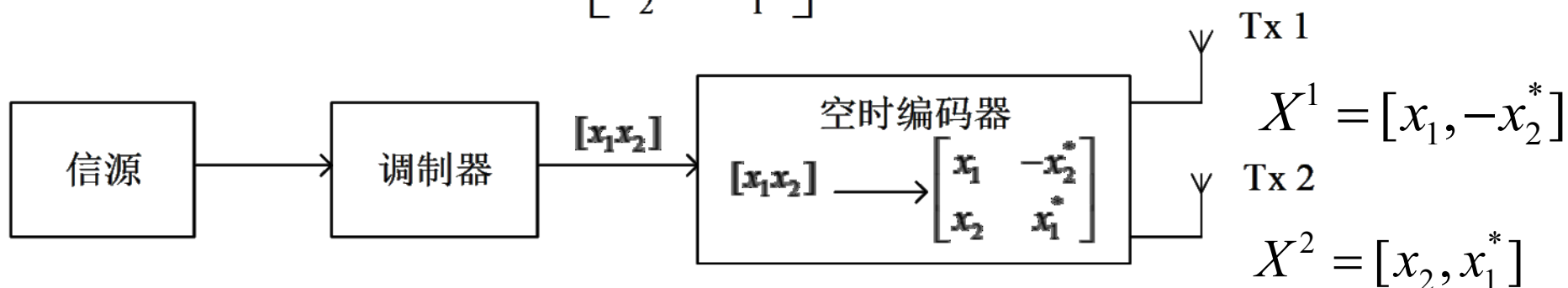
# 正交-空时分组码 ( STBC )

- STBC是空间分集的一种实现方式，能够获得分集增益，最早由Alamouti提出
- 设计原则：各发射天线上的码字满足正交性
- 由于码字间正交，在接收端只需做简单的线性处理
- 优缺点
  - 结构简单，译码复杂度是线性的，能够实现完全分集，但没有引入编码增益，故应考虑与其他编码方式结合

# 正交-空时分组码（发射机）

- 采用2个发射天线，复正交编码矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}$$



# Alamouti空时分组码 ( STBC )

## □ 接收机

- 在接收端每个天线的接收信号为2路发送信号与噪声的线性叠加

符号周期1接收  $r_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1$

符号周期2接收  $r_2 = -h_1 x_2^* + h_2 x_1^* + n_2$

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2^* \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \mathbf{n} = \mathbf{H}\mathbf{c} + \mathbf{n}$$

- H的列是正交的

## □ 解相关检测

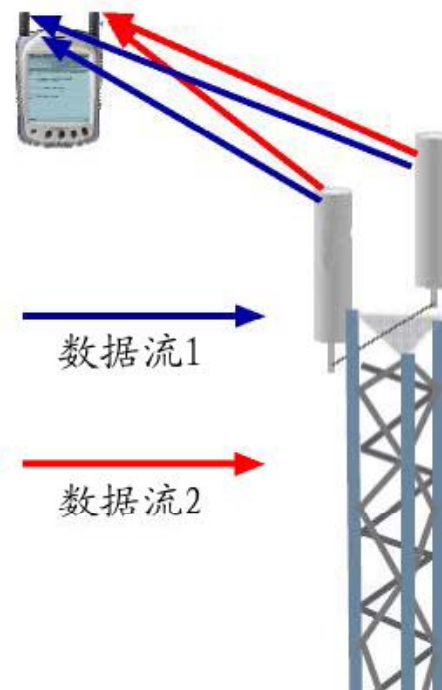
$$\hat{x}_1 = h_1^* r_1 + h_2 r_2^* = (|h_1|^2 + |h_2|^2) x_1 + h_1^* n_1 + h_2 n_2^*$$

$$\hat{x}_2 = h_2^* r_1 - h_1 r_2^* = (|h_1|^2 + |h_2|^2) x_2 - h_1 n_2^* + h_2^* n_1$$

# 空间复用基本原理



铁血丹心



(女)

0 3 2 3 — 3 2 7 6 7 — 0 5 6 7 — 0 7 6 5 3 —

冷 风 吹， 天 苍 茫， 藤 树 相 连。

(男)

6 . 5 6 5 3 5 2 — — 1 . 6 2 3 5 4 3 — — 3 5

草 四 方 沙 漠 苍 茫， 那 恨 雪 霜 扑 面， 射

# 空间复用要求的天线类型

- 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）。

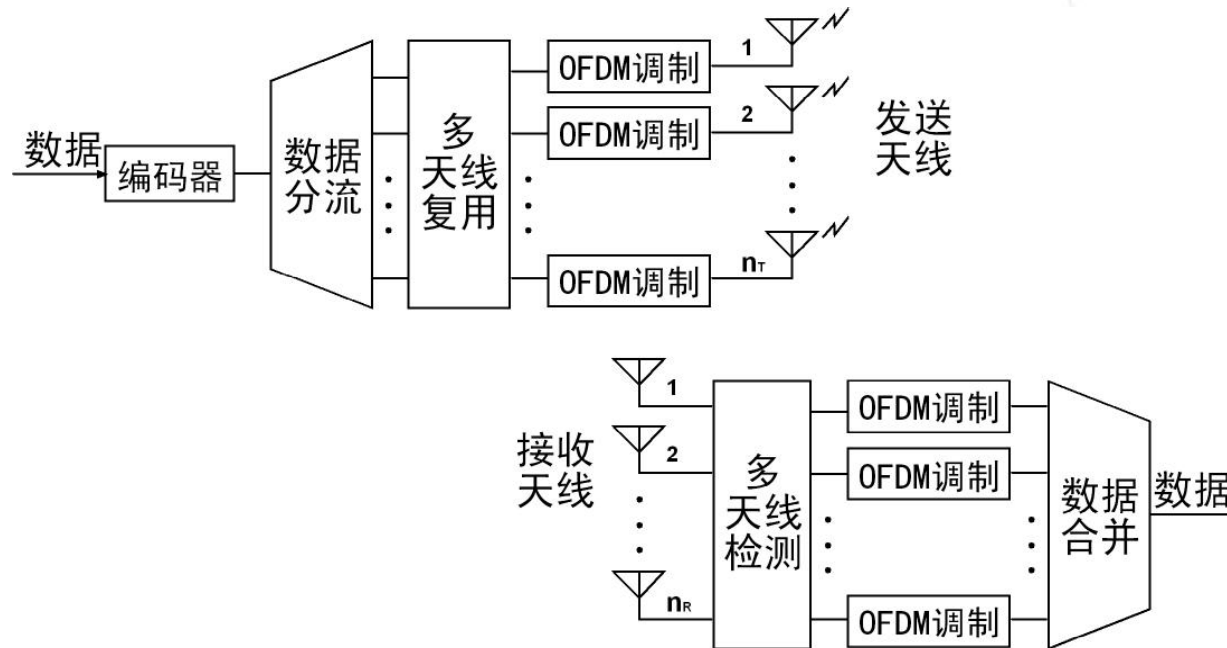


大天线间距阵列 ( $10\lambda$  以上)：用于空间复用和空间分集



小天线间距阵列 ( $\lambda/2$ )：用于波束赋形或基于波束赋形的空间复用

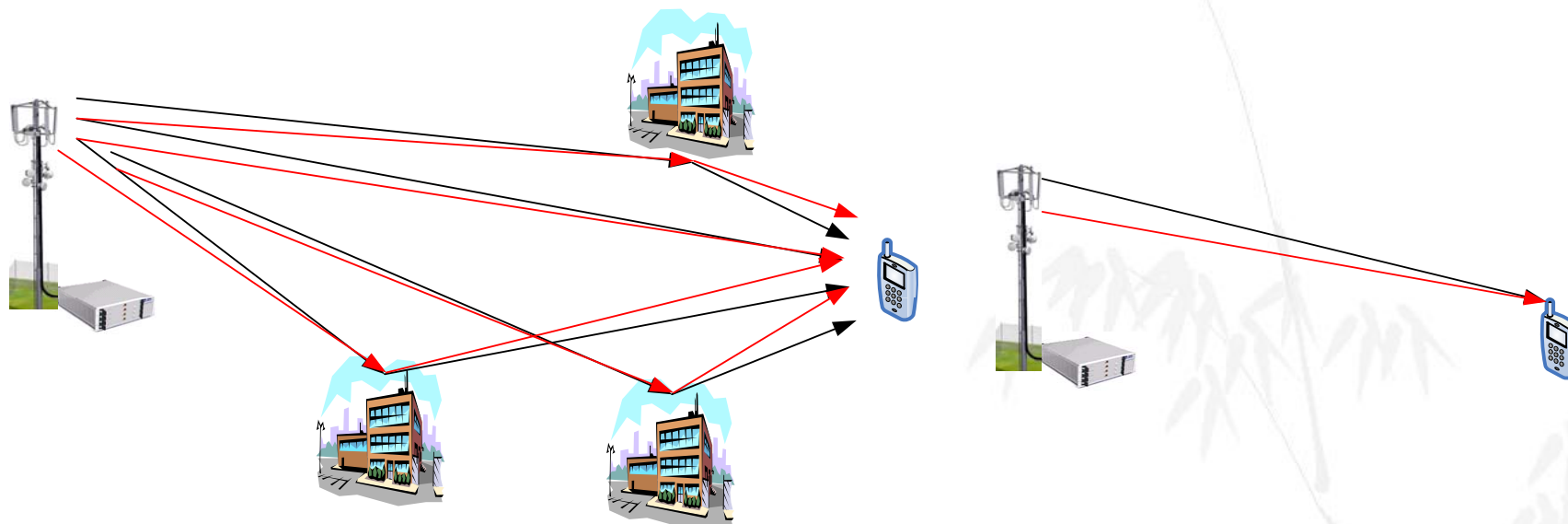
# 空间复用的干扰问题



- 可以看到：空间复用的应用效果取决于是否能有效区分多个天线，如果天线间干扰过大，甚至性能差于单天线发送。解决方法：
  - ⊕ 事后处理：干扰消除（性能好的算法复杂度较高，如迭代干扰消除）
  - ⊕ 事前处理：自适应MIMO（在天线相关性较高的场景，降低复用流数，甚至退化到单流，此时多余的天线还可以用来进行空间分集或波束赋形）



# 空间复用的应用场景



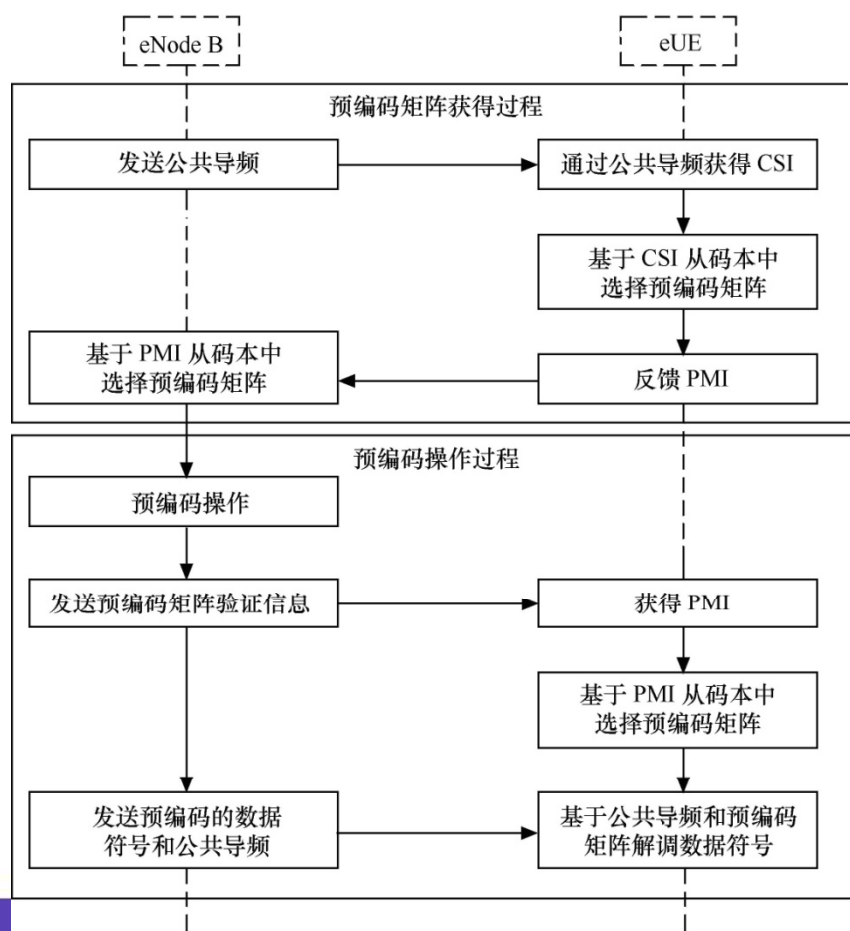
- 拉大天线间距也不能保证天线信道之间的低相关性，还取决于是否有足够的散射体为多个天线提供足够的信道差异：
  - ✦ 富散射环境：基站或/和终端周围的散射体很多，存在相当数量的NLOS径，角度扩展较大，比较容易生成信道差异。
  - ✦ 非富散射环境：基站和终端周围的缺乏足够的散射体，NLOS径很少，角度扩展较小，很难生成信道差异。
- 观点：MIMO只能用于室内？MIMO只能用于微小区？
- 对传统网规的挑战：选址的原则可能改变。

# 空间复用技术分类

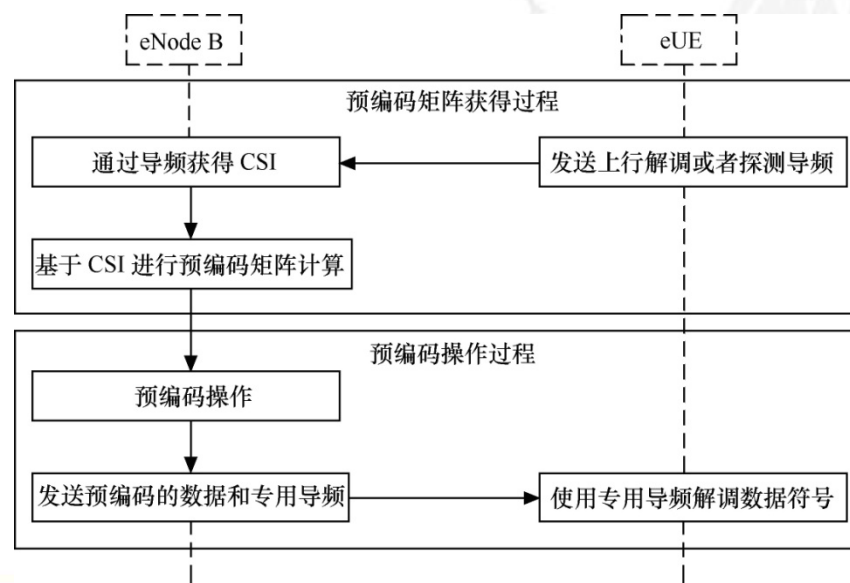
- 解决空间复用适用性，灵活实现空间复用和空间分集/波束赋形的切换和整合，需采用闭环自适应MIMO方法：
  - ✦ 开环（Open-Loop）空间复用
    - 不管信道条件，采用固定的复用流数。
    - 由于MIMO信道的相关性有各种差异，能够支持的复用层数也不同。所以开环空间复用的流间串扰有时很难消除，性能很难保证，可能造成多流并行传输的性能比单天线传输还差。
  - ✦ 闭环（Close-Loop）空间复用
    - 发射端事先掌握信道的先验信息（通常通过基于Sounding RS的信道探测获得），采用适合无线信道现实条件的复用流数。
    - 可以灵活支持各种MIMO信道相关性，实现各种流数，保证空间复用的传输性能，简化接收端的干扰消除操作。
- 最常用的闭环空间复用技术：预编码（Precoding）技术
  - ✦ 通过预编码矩阵动态配置各发射天线的发射权值和相位，形成和信道条件相匹配的流数（通常用信道相关矩阵的秩指示）的“波束”（和“波束赋形”的波束生成方法相似，但内在原理不同）。

# 预编码空间复用

- 码本预编码：主要用于FDD系统，系统将可能会使用的典型预编码向量变成一个“码本”（codebook），终端根据基站发送的RS对信道进行探测，在码本中选择最适合的预编码向量，将其编号（PMI）反馈给基站，基站根据PMI从码本中选择对应的预编码向量进行传输。

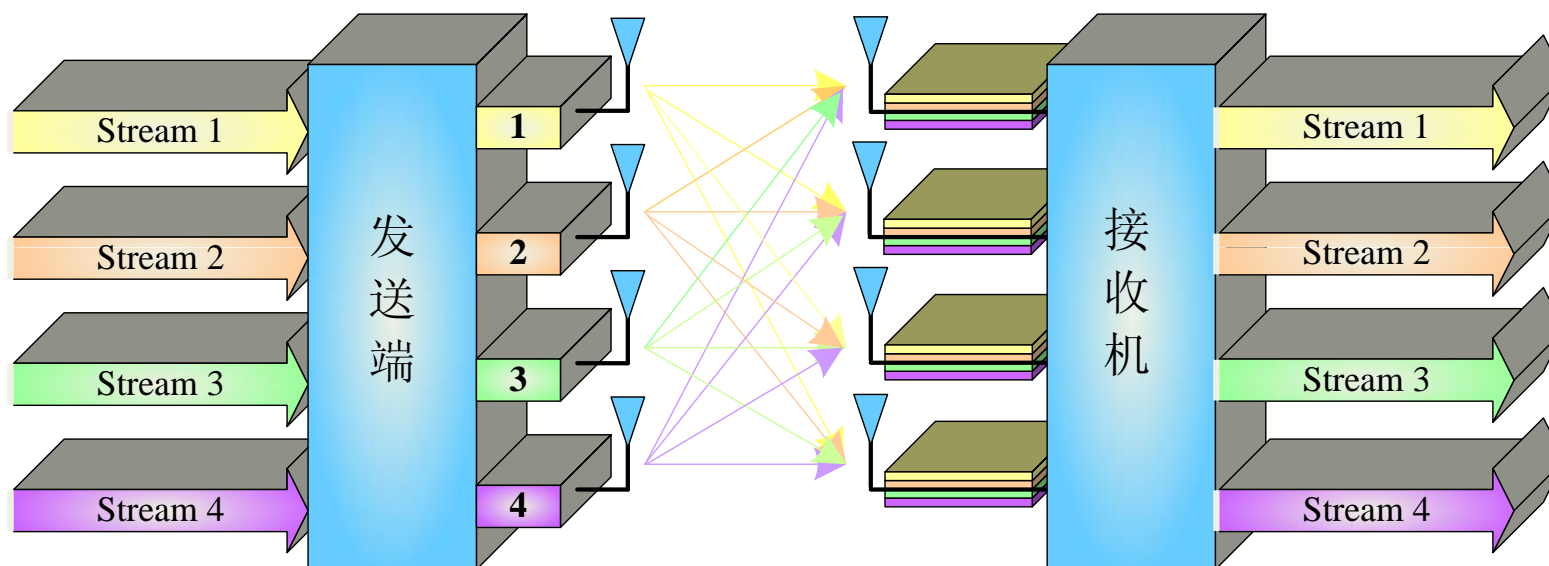


- 非码本预编码：主要用于TDD系统，由于上下行信道具有互异性，基站可以通过终端的探测RS对上行信道进行探测，直接生成适合的预编码矩阵（不受码本容量的限制），用于下行预编码传输。



# 开环空间复用

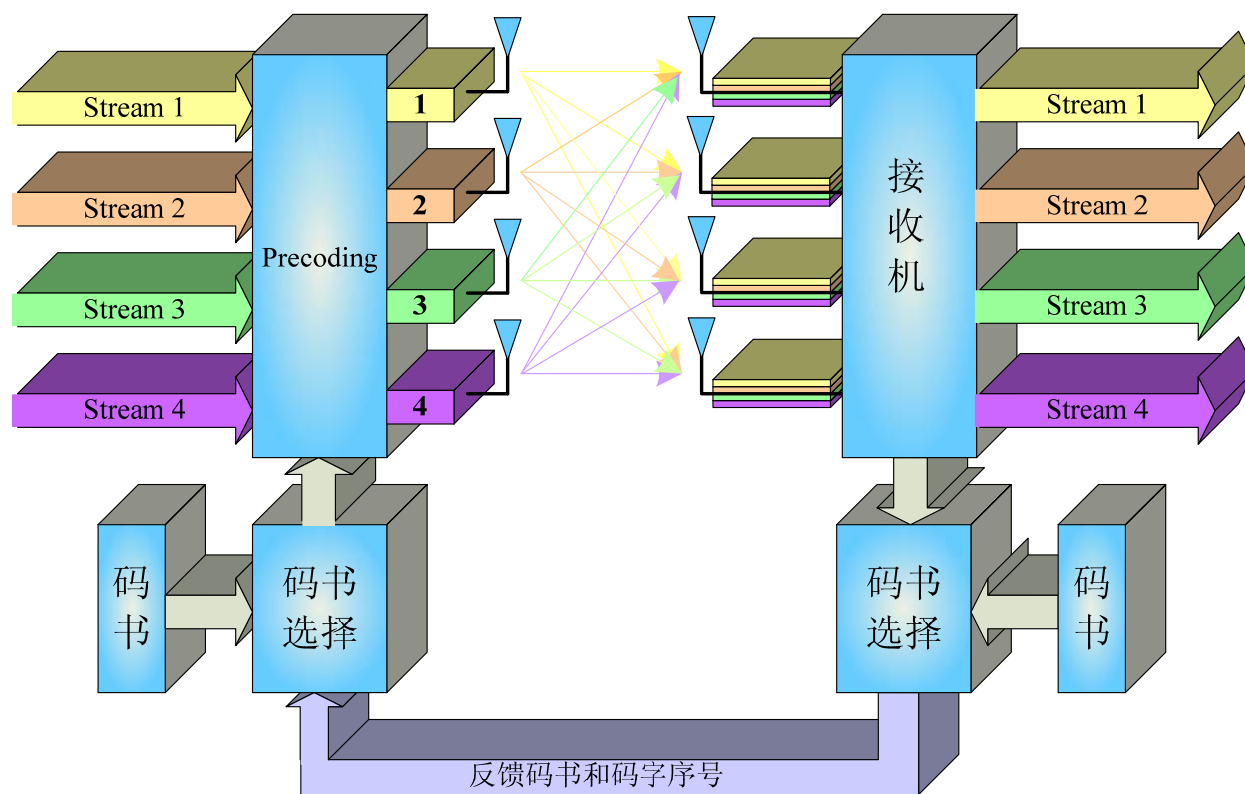
## MIMO-Spatial Multiplexing



- 普通的空间复用，接收端和发送端无信息交互
- 利用多天线间的独立信道衰落，增加系统容量

# 闭环空间复用

## 线性预编码 (Precoding) 系统



- ✓ 接收端根据信道估计得到信道信息；
- ✓ 按照某种准则从码本中选取最优的预编码码字；
- ✓ 然后将该码字的序号反馈给发射端；
- ✓ 发射端根据反馈的序号从码本中选取相应的预编码码字进行预编码操作

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{N_r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1N_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r 1} & \cdots & h_{N_r N_t} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{N_t} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{N_r} \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \underline{y} = H \cdot \underline{x} + \underline{n}$$

*Singular value decomposition (SVD)*

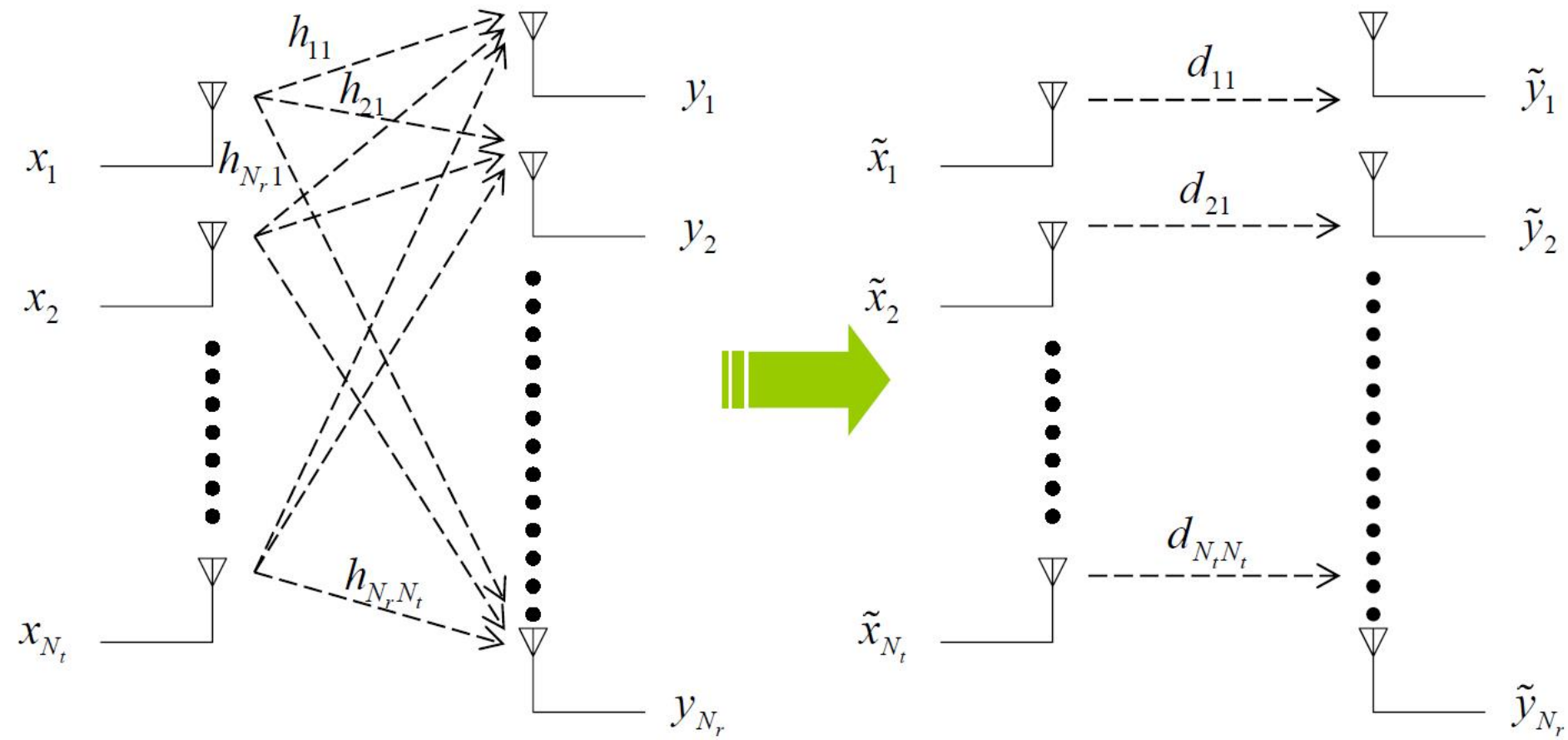
$$H = UDV^H \Rightarrow \underline{y} = UDV^H \underline{x} + \underline{n}$$

$$U^H \underline{y} = \underset{=I}{U^H U} D V^H \underline{x} + U^H \underline{n}$$

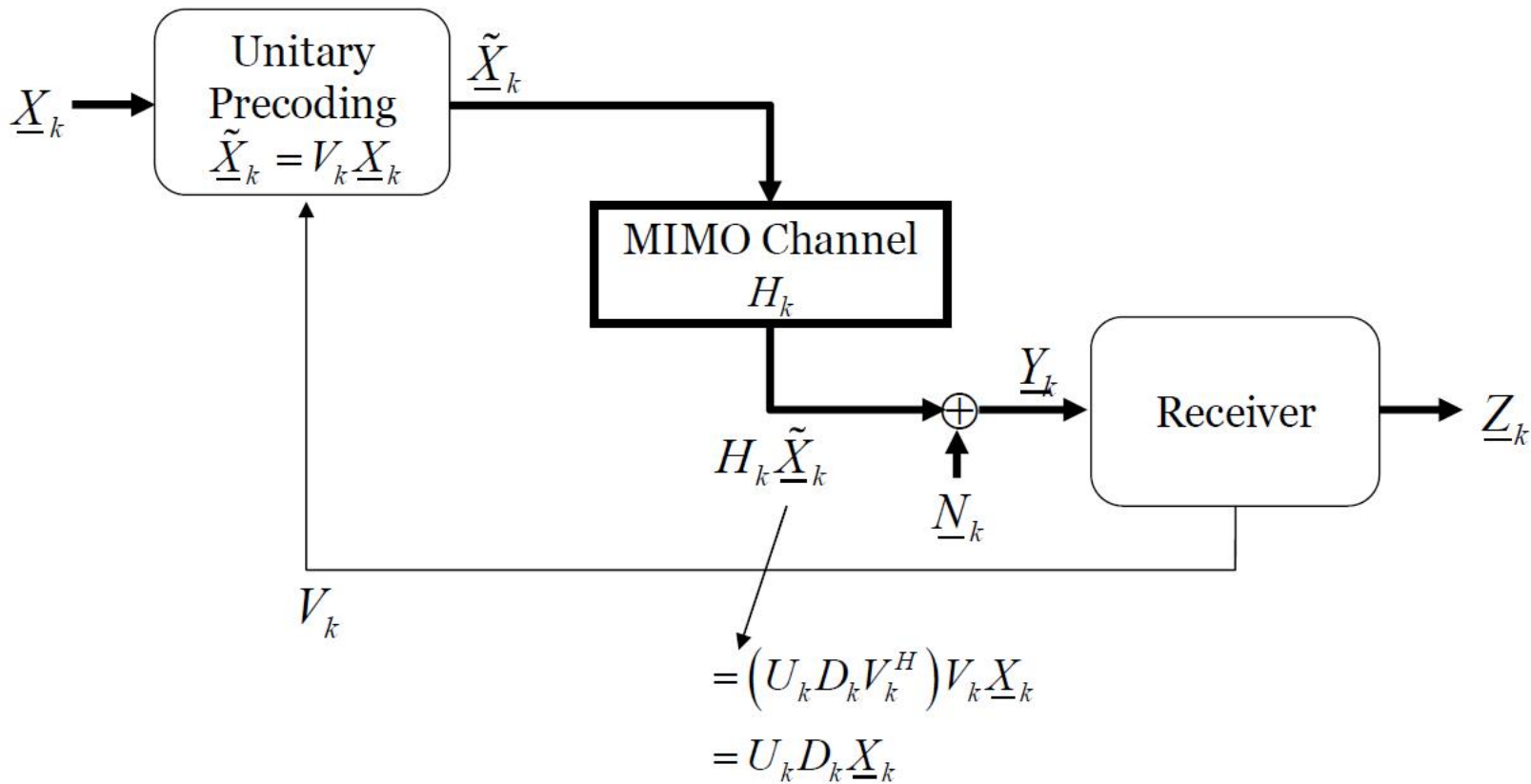
$$\underset{\tilde{y}}{U^H \underline{y}} = D \underset{\tilde{x}}{V^H \underline{x}} + \underset{\tilde{n}}{U^H \underline{n}}$$

$$\underline{\tilde{y}} = D \underline{\tilde{x}} + \underline{\tilde{n}}$$

*Diagonal matrix*



$* N_t < N_r$





# 分层空时码

---

## □ 分层空时码

- 由贝尔实验室研究员Gerard J. Foschini于1996年提出的，称为Bell实验室分层结构(BLAST)，是最早提出的空时编码

## □ 优点

- 速率随发送天线数线性增加，比较灵活

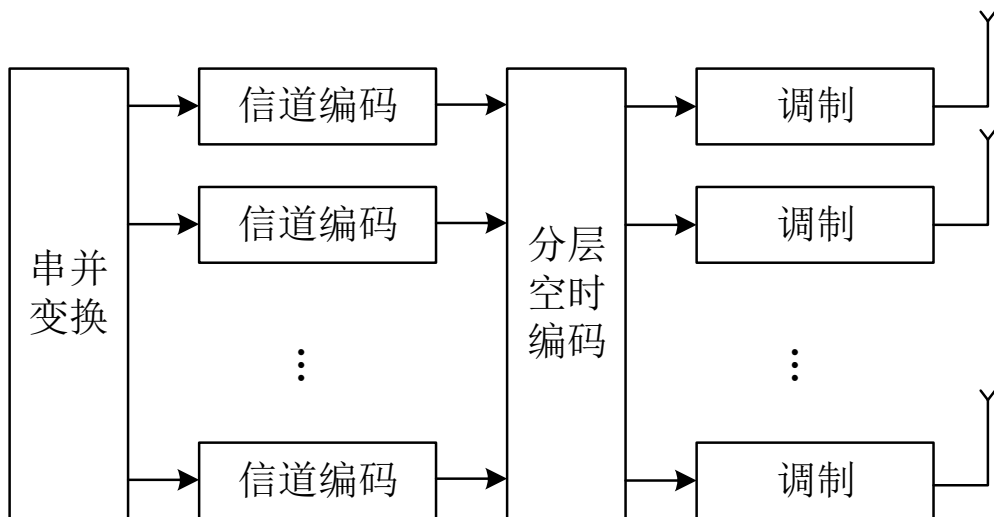
## □ 分类

- 水平BLAST(H-BLAST)，最早叫垂直BLAST (V-BLAST)
- 对角BLAST(D-BLAST)

# H-BLAST(发射机)

- 将数据流分离成 $N_t$ 个并行数据流，每个数据流单独进行信道编码
- 每个信道编码器编码后的码元直接由对应的天线(信道编码器与天线是一一对应的)发送出去

无法获得分集增益

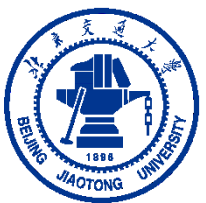


$$S_{\text{H-BLAST}} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} s_1 & s_5 & s_9 & s_{13} \end{matrix} \\ \begin{matrix} s_2 & s_6 & s_{10} & s_{14} \end{matrix} \\ \begin{matrix} s_3 & s_7 & s_{11} & s_{15} \end{matrix} \\ \begin{matrix} s_4 & s_8 & s_{12} & s_{16} \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix}$$

# H-BLAST(接收机)

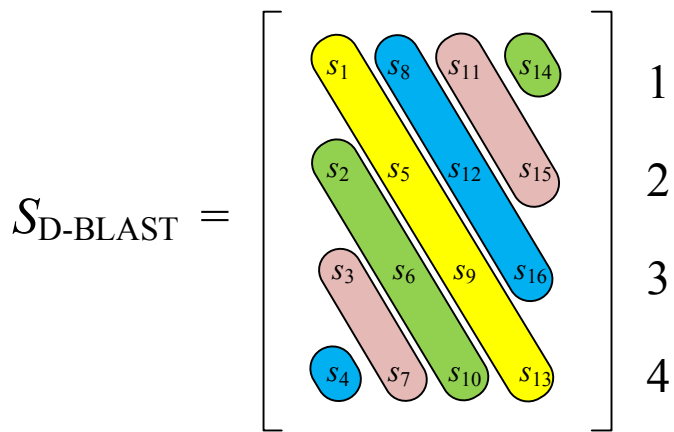
---

- 对数据流1进行解调译码
- 对数据流1的输出重新编码调制，与信道传输函数相乘，得到数据流1对其他天线的影响
- 从其他天线减去数据流1的影响
- 对数据流2解调译码
- 重复以上过程，直到全部数据流都完成解调译码
- 数据流1的错误会影响数据流2
- 一般先解信干比最大的数据流



# D-BLAST(发射机)

- 在H-BLAST中，每个子数据流对应一个固定的发射天线
- 而对于D-BLAST，每个子数据流中的数据轮流在各个发射天线上发送
- D-BLAST具有空间分集增益，比H-BLAST性能更好

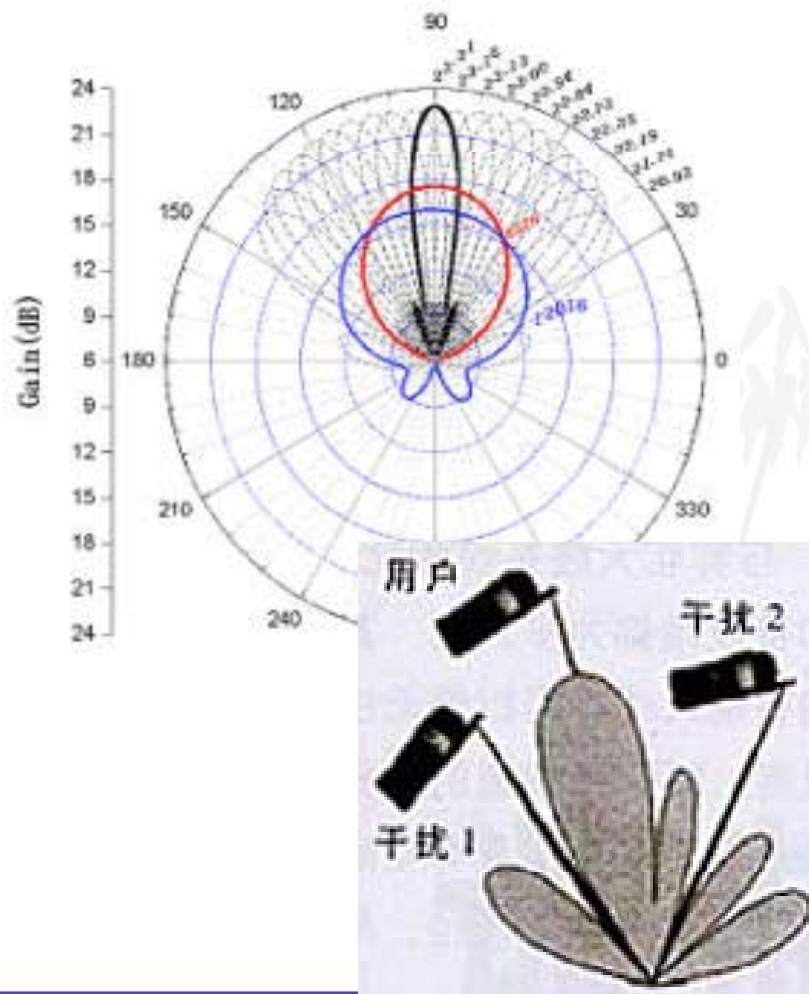


# D-BLAST(接收机)

- 在H-BLAST中，每个子数据流是由固定的天线发射的，在译码时也只能有一个固定的译码顺序，所能达到的信道容量将受到其中具有较大SINR的子数据流的影响
- 在D-BLAST中，由于每个子数据流轮流由不同天线发送，则每个子数据流的SINR将平均分配到各个天线上，在译码的时候就受到平均SINR的影响

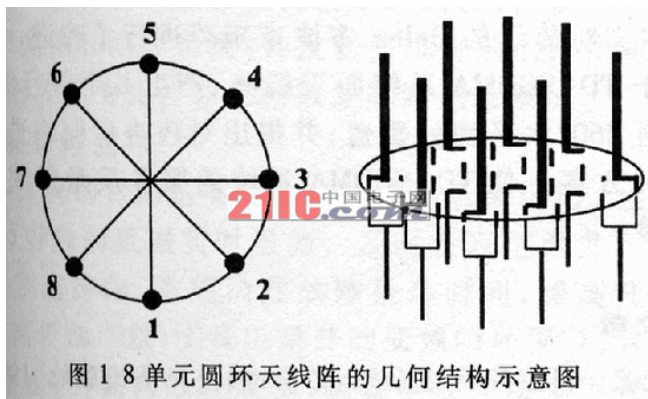
# 波束赋形基本原理

- 利用较小间距的天线阵元之间的相关性（天线间距通常为  $\lambda/2$ ），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。

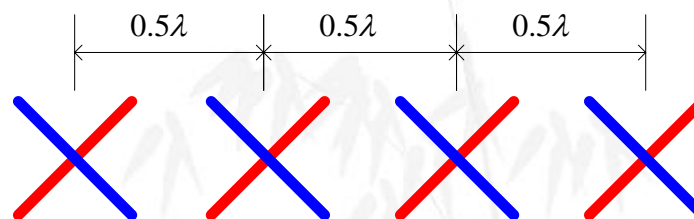


# 其他类型的波束赋形天线

圆阵智能天线阵列  
(用于全向小区)



双极化智能天线阵列  
(可使阵列宽度减半,  
或用于双流空间复用)



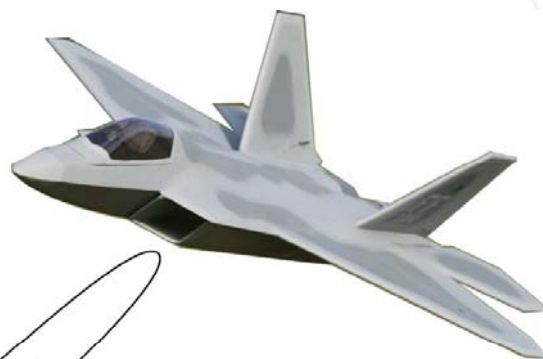
WiFi用智能天线





# 防务技术中的波束赋形

赴索马里护航舰队中，  
负责舰队防空的驱逐舰“海口号”  
(中国的神盾级)  
的相控阵雷达，可引导



红旗9 (中国的“爱国者”)  
的相控阵雷达

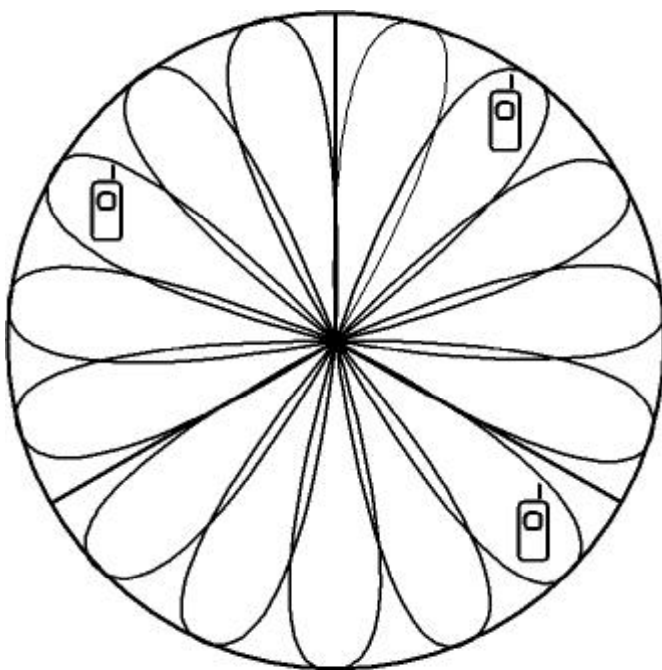




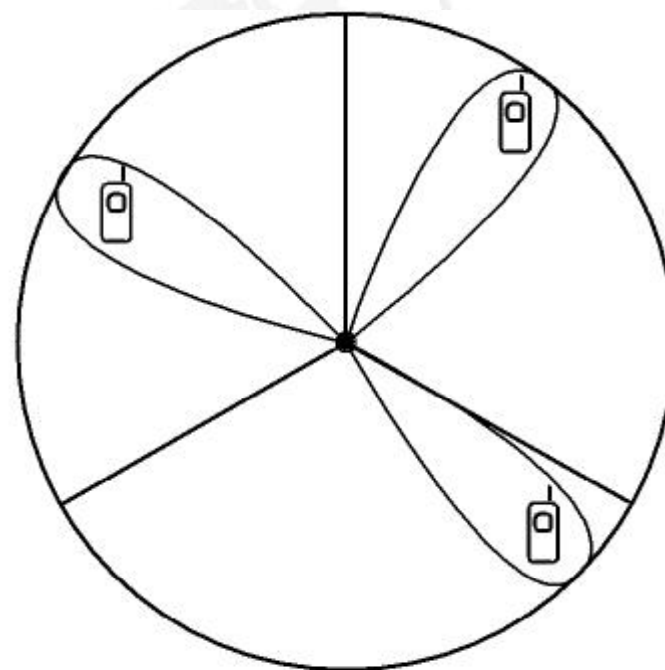
# 波束赋形的分类

## ■ 波束赋形包括:

- ✦ 动态波束赋形（俗称智能天线）
- ✦ 固定波束赋形（又称高阶扇区化）



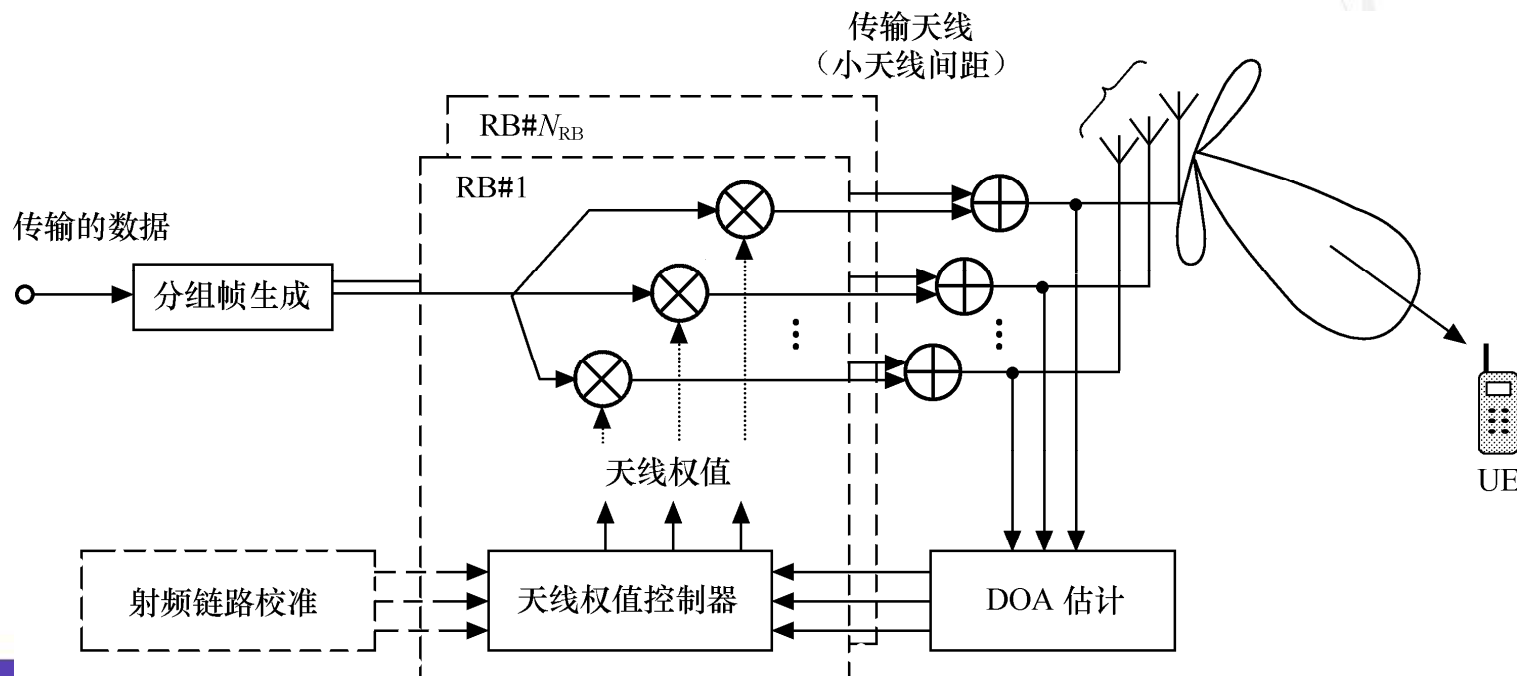
固定波束赋形  
(又称波束轮或高阶扇区化)



动态波束赋形  
(又称智能天线)

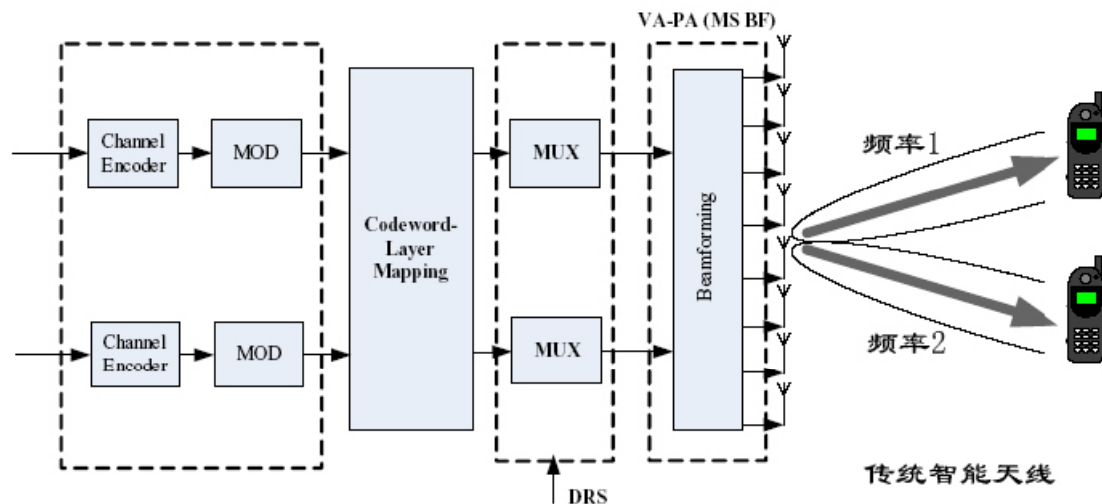
# 波束赋形算法

- 和预编码技术相似，波束赋形系统的波束也是通过预编码方法生成的，但和码本预编码MIMO不同，动态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。因此生成的是实际波束，而预编码技术生成的是虚拟的波束。
- 在TDD系统中，可以不依赖终端来反馈所需信息，来波方向和路损信息可以在基站侧通过测量上行接收信号获得，比FDD系统更有利于波束赋形的使用。



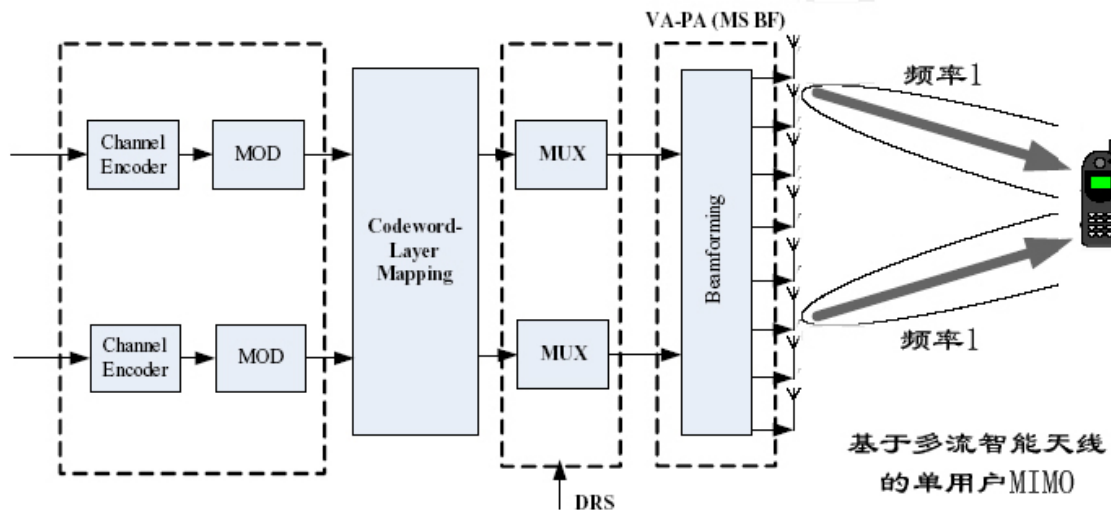
# 多流波束赋形

## ■ 基于波束赋形的空间复用



每个波束占用专用的时频资源，1个用户占用1个波束。

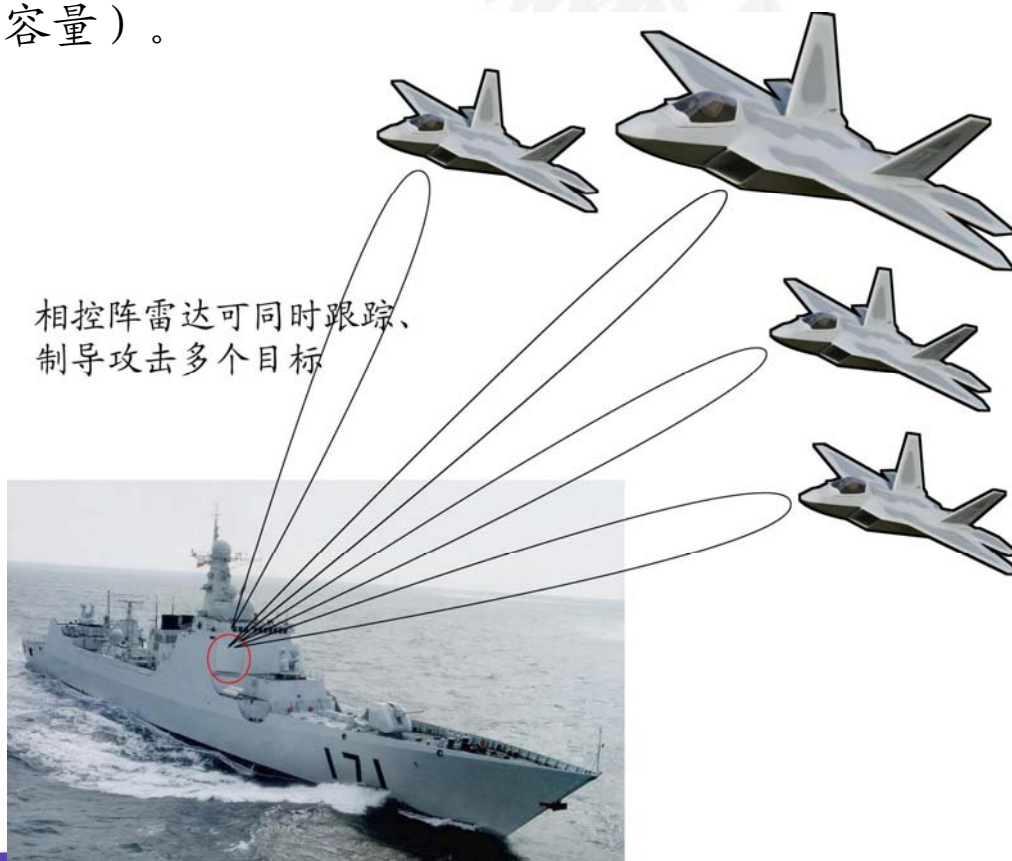
1个终端占用多个波束，  
这些波束共享相同的  
的时频资源。



基于多流智能天线的  
单用户MIMO

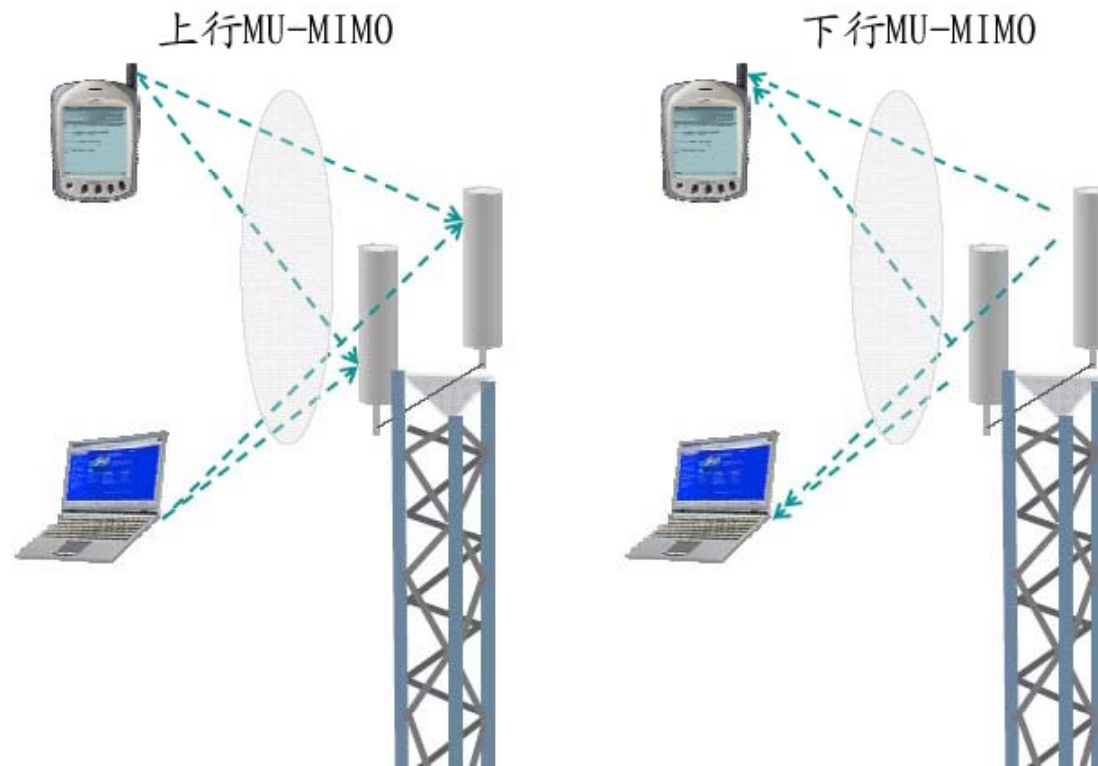
# 空分多址的原理

- 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，向多个终端并向发射数据流，或从多个终端并行接收数据流，以提高用户容量。
- 又可以称为多用户MIMO（MU-MIMO），相对单用户MIMO（SU-MIMO），空分多址可以获得更大的多用户分集增益，也更适合于用户数量较多，数据率较低的情况（如提高VoIP用户容量）。



# 上行和下行空分多址

- 下行空分多址：基站将多个空间复用流分给多个终端，使其可以共享相同的时频资源。
- 上行空分多址：多个终端共享相同的时频资源向基站发送。



# 空分多址的实现

## ■ 基于预编码的空分多址:

- ✦ 下行空分多址: 如果2个终端反馈的PMI现实他们的预编码向量具有较好的正交性（如两个预编码向量处于码本的1个预编码矩阵中），则可以将这2个用户“配成一对”，进行空间多址传输。

- 基站也可以根据需要，对选中不完全正交的PMI的用户进行强制配对（overriding）。虽然配对的效果会受到影响，但仍可能提高用户容量。

- ✦ 上行空分多址: 通常采用较简单的方法，

## ■ 上行空分多址: 多个终端共享相同的时频资源向基站发送。

- ✦ 当每个用户只采用单天线发送时，也可称为“虚拟MIMO”（Virtual MIMO）。

- ✦ 可以采用各种技术实现:

- 预编码配对
- 虚拟发射分集
- 虚拟天线选择

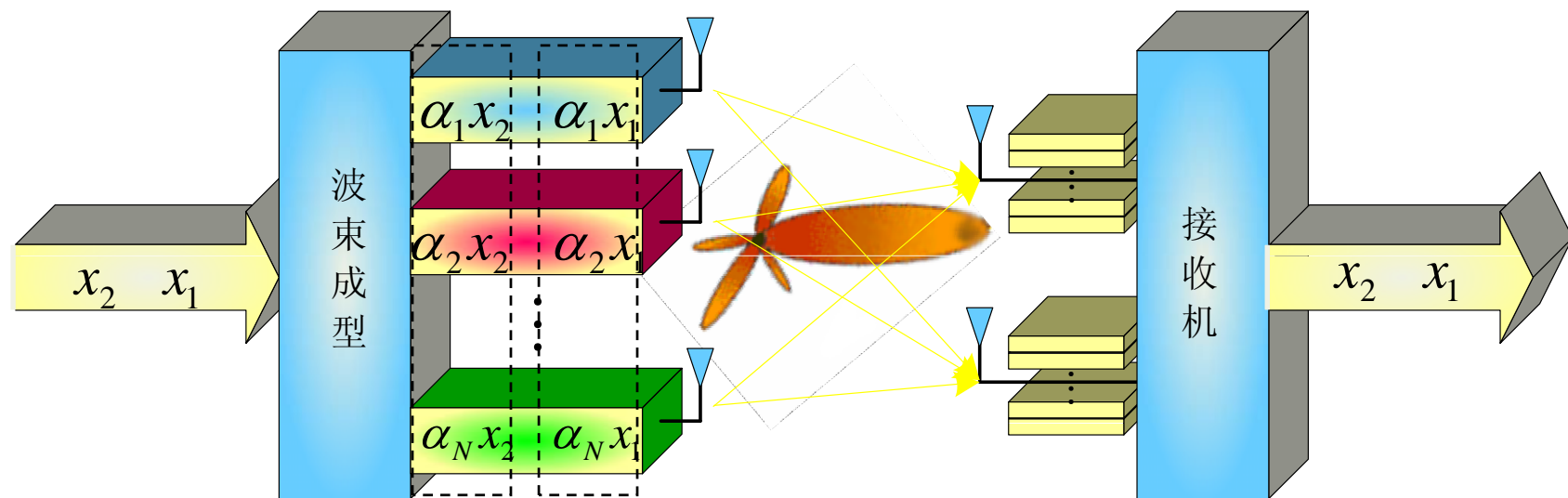


# LTE系统对MIMO技术的使用

- 映射关系（Mapping）：
  - ✦ 天线端口（Antenna Port）
  - ✦ 层（Layer）
  - ✦ 码字（Code Word）
- 4种技术
  - ✦ 发射分集（下行）：
    - 2天线：SFBC
    - 4天线：SFBC+FSTD
  - ✦ 空间复用（下行）：单用户MIMO（SU-MIMO）
    - 开环空间复用：大延迟CDD
    - 闭环空间复用：自适应预编码（码本）
      - 最多4个层，2个码字
  - ✦ 波束赋形（下行）：非码本预编码
    - 主要用于TD-LTE
    - 单层（R9会扩展到2层，R10（LTE-Advanced）会扩展到多层）
  - ✦ 空间多址（上行、下行）：多用户MIMO（MU-MIMO）
- 7种传输模式（Transmission Mode）
- 3种反馈：CQI、RI、PMI

# Beamforming (1/2)

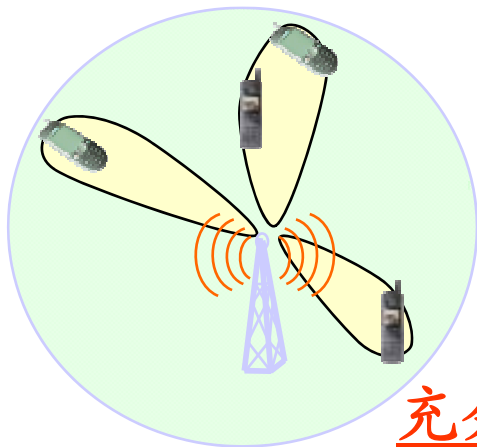
## 智能天线-Beamforming



- 利用数字信号处理技术和信号传输的空间特性
- 通过调整各天线阵元上发送信号的权值，产生空间定向波束，使无线信号的波束具有方向性



## Beamforming (2/2)



### ■ 智能天线:

- 主波束自适应地跟踪用户主信号到达方向
- 旁瓣或零陷对准干扰信号到达方向

充分高效利用移动用户信号并删除或抑制干扰信号

### • 智能天线在未来移动通信系统的应用:

- ✓ 扩大系统的覆盖区域;
- ✓ 提高系统容量;
- ✓ 提高频谱利用效率;
- ✓ 降低基站发射功率, 节省系统成本
- ✓ 减少信号间干扰与电磁环境污染

