

一种基于 SLNR 预编码的天线与用户联合选择算法 *

陈 磊, 王大鸣, 王 盛, 崔维嘉

(信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

摘要: 针对在多用户 MIMO 系统中天线与用户联合选择算法复杂度高的问题, 依据 SLNR 预编码算法特点, 提出了一种基于 SLNR 预编码的天线与用户联合选择算法。分析了天线与用户选择顺序对基于 SLNR 预编码算法的多用户 MIMO 系统性能影响, 给出了先天线后用户的次最优选择策略。所提算法首先为每个用户选取最优的单天线, 再利用贪婪思想进行用户选择。仿真结果表明, 所提算法与穷举算法相比和容量性能在 0~20 dB 的信噪比范围内损失均保持在 1.6 dB 左右; 而误比性能与穷举法相比在 10^{-3} 有 2 dB 左右损失, 但是所提算法复杂度与穷举法相比下降明显。

关键词: 多用户 MIMO; 信噪比; 天线与用户联合选择; 预编码

中图分类号: TN929.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2011)10-3887-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.10.078

Joint antennas and users selection with SLNR precoding

CHEN Lei, WANG Da-ming, WANG Sheng, CUI Wei-jia

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of algorithm complexity was high with the joint antennas and users selection in multi user MIMO system, according to the characteristic of SLNR precoding algorithm, this paper proposed a SLNR precoding based joint antennas and users selection algorithm. By analyzing the influence of the order in antenna and user selection to the performance of SLNR precoding algorithm, gave the selection policy first antenna then user. The proposed algorithm firstly provided the best single antenna for each user, secondly selected users by using greedy policy. The simulation result shows that the loss of total capacity is about 1.6 dB in the SNR range of 0 to 20 dB, compare with the force searching algorithm, while the BER has a loss of 2 dB at 10^{-3} . But the complexity of this algorithm is obviously decreased.

Key words: multi-user MIMO; SLNR; joint antennas and users selection; precoding

0 引言

多用户多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 系统不仅可以提供分集增益和空间复用增益, 并且可以用户选择方法实现多用户分集增益, 这引起了人们广泛的研究兴趣。而共信道干扰问题是影响多用户 MIMO 系统的主要问题之一, 虽然采用预编码的多用户 MIMO 系统能够很好地解决该问题, 但由于收发天线数目的限制, 多用户 MIMO 系统能够同时服务的用户数是有限的, 必须在某一时刻对某一用户子集或者某一用户的天线进行特定准则的选择与调度。在多用户 MIMO 系统的用户和天线选择的研究中, 由于全搜索计算复杂度过高, 次优算法成为研究的热点。

针对 SLNR 预编码算法结合天线与用户联合选择问题的研究还处于起步阶段。对于 SLNR 预编码算法而言, 虽然理论上不受收发天线数目影响, 但是随着干扰用户天线总数的增加, 系统性能下降^[1]。文献[1]给出了一种基于 SLNR 的天线

选择算法, 但是文中没有涉及用户选择问题。文献[2]基于准正交空时分组码对 SLNR 预编码算法进行了改进, 使其对用户数鲁棒性有所改善, 但是对于热点区域用户数量的增多, 其算法性能将下降。文献[3]重点讨论了联合用户与天线功率分配算法, 同样没有考虑用户选择问题。文献[4]针对不采用预编码的多用户 MIMO 系统的下行广播信道的基本性能进行了分析, 指出用户接收天线对和容量性能贡献是有限的, 而多用户分集增益随着用户数量的增多将逐步增大, 但是对于采用预编码技术的广播系统没有进行分析。

本文针对多用户 MIMO 系统中用户和天线选择问题, 提出了一种基于 SLNR 天线与用户联合选择算法。根据 SLNR 预编码算法的特点, 分析了天线与用户选择顺序对基于 SLNR 预编码的多用户 MIMO 系统性能的影响, 给出了先天线后用户选择顺序, 进一步分析了用户选择天线个数问题, 指出在 $M \geq n_r$ 系统配置时, 每个用户选择单天线时系统性能最佳, 给出了一种用户信道中最大奇异值对应的天线作为保留天线的次优选择策略。

收稿日期: 2011-03-13; 修回日期: 2011-04-18 基金项目: 国家“863”计划重点资助项目(2009AA011504)

作者简介: 陈磊(1983-), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要研究方向为 MIMO 系统预编码技术、用户选择技术(chenlc@126.com); 王大鸣(1971-), 男, 硕导, 主要研究方向为无线通信; 王盛(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 MIMO 系统资源分配技术; 崔维嘉(1976-), 男, 讲师, 主要研究方向为自组织网、蜂窝网络融合技术。

1 系统模型

1.1 多用户多输入多输出(MIMO)模型

假定系统中共有 M 名用户, 并假设基站端配置 n_T 根天线, 用户端配置 n_{R_i} ($i=1, 2, \dots, M$) 根天线, 并且有 $n_{R_i} \leq n_T$ 。基站端到用户 i 的信道矩阵为 H_i , H_i 为 $n_{R_i} \times n_T$ 维平坦衰落信道。 F_i 为用户 i 的预编码矩阵, 维度为 $n_T \times B$, 其中 B 为用户 i 的传输数据维数。 G_i 为用户 i 的解码矩阵, 维度为 $B \times n_{R_i}$ 。

$$\hat{D} = GHFD + N \quad (1)$$

其中: $H = [H_1^T, H_2^T, \dots, H_M^T]^T$ 为系统的信道矩阵; $F = [F_1^T, F_2^T, \dots, F_M^T]^T$ 为所有用户的预编码矩阵; $G = [G_1^T, G_2^T, \dots, G_M^T]^T$ 为各用户的解码矩阵; 各用户信道的噪声为 $N = [n_1^T, n_2^T, \dots, n_M^T]^T$ 。

定义 $S \in \{1, 2, \dots, K\}$ 表示同时与发射端进行通信的用户集合, $|S|$ 表示该集合的大小, 即同时与发射端进行通信的用户数, 并规定 $|S| \leq M$ 。

在本文中, A^T 、 A^H 、 $\|A\|$ 、 $|A|$ 分别表示矩阵 A 的转置、共轭转置、向量范数以及向量的模值。

1.2 SLNR 预编码原理

文献[1]提出了信漏噪比(SLNR)算法。将用户的泄露(leakage)定义为传送给目标用户的信号对其他用户造成的干扰。图 1 以用户 1 为例给出了信号泄露示意图。

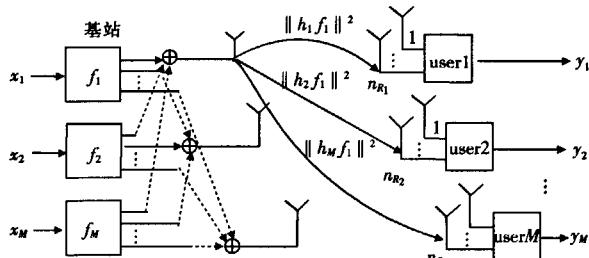


图 1 用户 1 的泄露示意图

信漏噪比则是指发送给目标用户的信号功率与目标用户的泄漏和噪声功率之和的比。将优化目标改为选择合适的预编码矩阵使得接收信漏噪比最大化, 即

$$\begin{aligned} \max_{F_j} \text{SLNR}_j &= \frac{\|H_j F_j\|^2}{\sum_{i=1, i \neq j}^M \|H_i F_j\|^2 + n_{R_j} \sigma^2} \quad j = 1, \dots, M \\ \text{s. t.} \quad \text{trace}(F_j^H F_j) &= 1 \quad j = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (2)$$

通过式(2)可以看出, 每个用户的 SLNR 只与用户本身的预编码矩阵有关, 可以独立求解。

SLNR 预编码算法基本步骤如下:

- 求 $\{H_j^H H_j, (n_{R_j} \sigma^2 + H_j^H H_j)\}$ 的广义特征值和特征向量。
- 特征值按降序排列, 以与特征值对应的特征向量为列组成的矩阵为 T_j 。

c) 求解预编码矩阵 $F_j = \frac{T_j}{\|T_j\|}$ 。

其中: H_j 为除 H_j 以外其他用户组成的联合信道矩阵。

$$H_j = [H_1^T \cdots H_{j-1}^T H_{j+1}^T \cdots H_M^T]^T$$

2 基于 SLNR 的天线与用户联合选择策略

对于用户与天线联合选择算法, 可以概括为以下三种处理

思路:a) 考虑所有用户天线的所有组合选出性能最好的一组; b) 首先选出条件好的一组用户, 在此基础上选出符合条件的天线组;c) 首先为每个用户选出一定数量的天线, 在此基础上再选择一组用户。不难看出, 思路 a) 可以达到最优的系统性能, 但是其较高的算法复杂度将制约其应用场合; 思路 b) 与 c) 在满足一定的系统性能的同时, 降低了算法复杂度。

为了给出一种基于 SLNR 预编码的低复杂度天线与用户联合选择算法, 需要在思路 b) 与 c) 中找出一种更适合 SLNR 预编码的联合选择策略。

不失一般性, 假设基站端配置 4 根天线, 待服务用户数为 10, 每个用户配置 2 根天线, 并假设选择目标是选择 4 个用户, 每个用户采用单数据流通信。思路 b) 先选出 4 个用户, 每个用户此时有 2 根天线, 对于其中的用户 j 来讲, 其对应的联合信道矩阵天线个数为 6 根。此时对于思路 b) 的天线选择又有两种处理方法: 一是对选取的用户进行天线选择, 构造新的信道矩阵; 二是利用 SLNR 预编码方法进行子流选择。本章重点分析第二种方法, 对于第一种方法在第 4 章中给出了仿真分析。而对于思路 c) 先为每个用户选择一个天线, 再从 10 个用户中选出 4 个用户, 此时对于其中的用户 j 来讲其对应的联合信道矩阵天线个数为 3 根。

为了更加清楚地分析联合信道天线数目的变化对用户特征值的影响, 给出了联合信道天线数对特征值概率密度以及均值的影响仿真分析, 如图 2、3 所示。从图中可以看出, 对于用户 j 而言, 随着其联合信道天线数的增加, 用户 j 对应的 $\{H_j^H H_j, (n_{R_j} \sigma^2 + H_j^H H_j)\}$ 最大特征值的均值将减小, 即减少其他用户的天线数有助于提高用户 j 的性能。对于思路 b) 而言, 用户 j 对应的联合信道矩阵天线数为 6, 由图 3 给出的仿真结果可得 $\lambda_{\max}^j \approx 0.74$ 。又因为用户信道之间满足独立同分布, 因此可得 $\lambda_{\max}^1 \approx \dots \approx \lambda_{\max}^4 \approx 0.74$ 。同理思路 c) 可得 $\lambda_{\max}^1 \approx \dots \approx \lambda_{\max}^4 \approx 2.13$ 。因此, 对于 SLNR 预编码算法而言, 思路 c) 比思路 b) 更能发挥其算法优势。

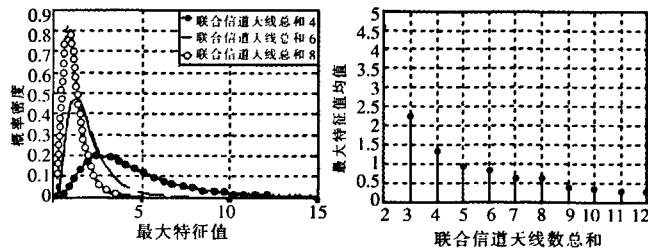


图 2 联合信道天线数对特征值概率密度的影响

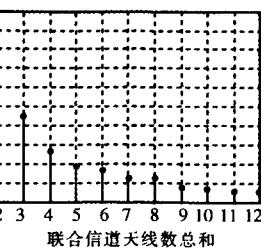


图 3 联合信道天线数对特征值均值的影响

需要进一步分析为用户选择多少根天线是合理的。根据上面分析的结论, 减少其他用户的天线数有助于提高用户 j 的性能, 因此联合信道天线数越少, 对于单用户而言其性能越好, 但是对于系统性能而言, 将严重损失空间复用增益, 而且算法应保证每个用户都有被服务的机会。因此, 本文所提算法为每个用户选取最优的天线用于通信。

下面给出一种次最优的天线选择方法。在文献[2]中给出了 $\text{SLNR}_{\max} = \lambda_{\max}$ 。其中: λ_{\max} 是 $\{H_j^H H_j, (n_{R_j} \sigma^2 + H_j^H H_j)\}$ 最大特征值。为了更清楚地看到不同特征值的变化规律, 给出其仿真图。图 4、5 分别给出了基站端配置 8 根天线、系统中的两个用户配置 4 根天线时, 各特征值的概率密度分布以及特征值的均值。

从图 4、5 中可以看出, 各特征值均值近似满足两倍关系,

特征值越大提供的误比性能以及和容量性能越好。由于 $\{\mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j, (n_{R_j} \sigma^2 + \mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j)\}$ 最大特征值对应的子信道涉及到系统中其他用户信道信息, 对于需要用户选择的系统而言, 联合信道信息时刻在变化, 因此最大特征值对应的子信道也不固定。本文针对此问题给出一种次最优选择方法, 即选择每个用户最大的奇异值对应的子信道作为保留信道, 这样保证了单用户条件下是最优的信道选择, 但是对于多用户而言存在一定的差异。

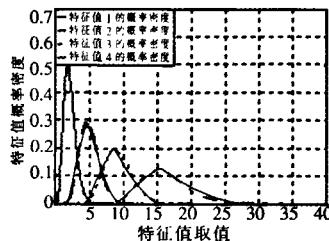


图 4 用户 1 的特征值概率密度

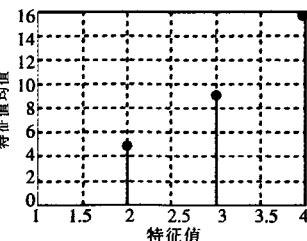


图 5 用户 1 的特征值均值

另外, 在求解 $\{\mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j, (n_{R_j} \sigma^2 + \mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j)\}$ 特征值时, 需要联合信道矩阵 \mathbf{H}_j , 但是对于存在用户选择的系统而言, 联合信道矩阵 \mathbf{H}_j 并不固定, 如何处理是值得研究的。目前, 对于该问题存在两种处理方法:

a) 考虑漏给系统中所有待服务用户数, 此时 SLNR_j 表达式为

$$\text{SLNR}_j = \frac{\|\mathbf{H}_j \mathbf{F}_j\|^2}{\sum_{i=1, i \neq j}^M \|\mathbf{H}_i \mathbf{F}_j\|^2 + n_{R_j} \sigma^2} \quad (3)$$

b) 只考虑漏给中的已选用户数^[5,6], 此时 SLNR_j 表达式为

$$\text{SLNR}_j = \frac{\|\mathbf{H}_j \mathbf{F}_j\|^2}{\sum_{i=1, i \neq j}^{|S|} \|\mathbf{H}_i \mathbf{F}_j\|^2 + n_{R_j} \sigma^2} \quad (4)$$

3 基于 SLNR 的天线与用户联合选择算法设计

通过上述分析, 基于 SLNR 预编码的天线与用户联合选择算法将分为两个步骤进行:

a) 天线选择。对用户信道进行奇异值分解, 选出其中奇异值最大的子信道对应的天线作为该用户的通信天线。通过天线选择将用户变为配置单天线的情况, 用户的信道矩阵变成 $\check{\mathbf{h}}$ 。

b) 用户选择。对于第一个用户而言, 由于不存在用户之间的干扰, 因此选择信道范数最大的用户可以获得良好的系统性能。在此后的选择过程中, 借鉴贪婪思想每次选取 $(\sigma^2 + \mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j)^{-1} \check{\mathbf{h}}_j^H \check{\mathbf{h}}_j$ 特征值最大的用户进入已选用户组, 此时联合信道采用 $\check{\mathbf{H}}_j^0 = [\check{\mathbf{h}}_1^T \dots \check{\mathbf{h}}_{|S|}^T]^T$ 进行处理。

基于 SLNR 天线与用户联合选择算法步骤如下:

a) 初始化, 用户空间 $\Omega = \{1, 2, \dots, M\}$, 已选用户空间 $S = \varnothing$ 。

b) 计算每个用户 j 的奇异值, 选出其中奇异值最大的子信道对应的天线作为该用户通信天线, 此时用户的信道变成 $\check{\mathbf{h}}$ 。

c) 选取第一个用户, 计算每个用户的 $\|\check{\mathbf{h}}\|$, 选取其中最大的用户 u_1 , $S \leftarrow u_1$, $\Omega \setminus u_1$ 。

d) for $t = 1 : K - 1$

构造 $\check{\mathbf{H}}_t = [\check{\mathbf{h}}_1^T \dots \check{\mathbf{h}}_{|S|}^T]^T$

$$f_j \propto \text{maxeigenvector}((\sigma^2 + \mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j)^{-1} \check{\mathbf{h}}_j^H \check{\mathbf{h}}_j)$$

$$u_t = \arg \max_{j \in \Omega} (\lambda_j), \text{ 其中 } \lambda_j \text{ 为 } (\sigma^2 + \mathbf{H}_j^H \mathbf{H}_j)^{-1} \check{\mathbf{h}}_j^H \check{\mathbf{h}}_j \text{ 特征值}$$

```

S ← u1
Ω ← u1
end
e) 选择结束。

```

4 性能分析

为了考察所提算法的性能, 本章分别从不同选择策略、用户不同天线配置、系统中用户总数以及与经典算法性能比较四个方面对算法的和容量与误比性能进行了分析。仿真条件为: 假设在功率受限系统中采用等功率分配; 信道为复高斯环境; 信号采用 QPSK 调制, 长度设置为 1 200 bit; 进行 1 000 次独立的信道实验。

仿真 1 不同选择策略对于 SLNR 性能的影响

假设基站端配置 4 根天线, 待服务用户数为 10, 每个用户配置 2 根天线, 并假设选择目标为 4 个用户, 每个用户采用单数据流通信。图 6、7 分别给出了不同选择策略对于系统误比性能以及和容量的影响。

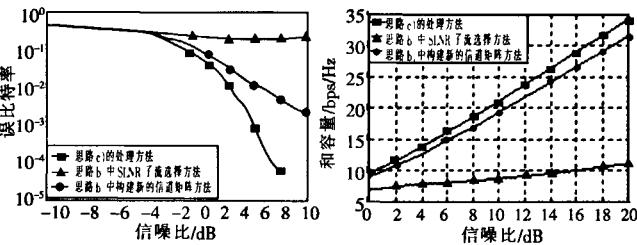


图 6 误比性能差异

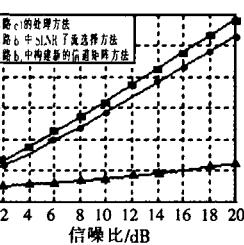


图 7 信道和容差异

从图中可以看出思路 b) 的两种处理方法与思路 c) 相比具有一定的性能差异。对于思路 b) 中构造新的信道矩阵方法, 对于单用户而言虽然选择的是最优的用户和最优的信道, 但是多用户联合处理之后, 不能保证其最优性, 因此随着信噪比的增大, 使得用户之间的干扰逐步增大。对于思路 b) 中 SLNR 子流选择方法, 虽然保证了天线选择的最优性, 但是受联合信道天线数目的影响, 使得用户子信道的特征值变小, 影响了系统性能。因此, 基于 SLNR 预编码的多用户 MIMO 系统, 先天线后用户选择策略可以获得更好的系统性能。

仿真 2 用户端配置不同天线数的性能比较

在基站端配置 4 根天线, 待服务用户数为 50, 并假设选择目标为 4 个用户, 每个用户选择 1 根天线条件下, 给出算法对用户端配置不同天线系统性能的变化, 如图 8、9 所示。其中 $n_R = 1, 2, 3, 4$ 。

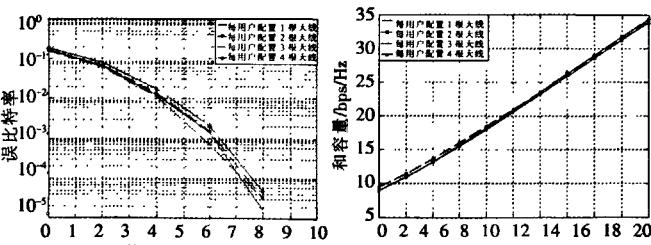


图 8 误比性能差异

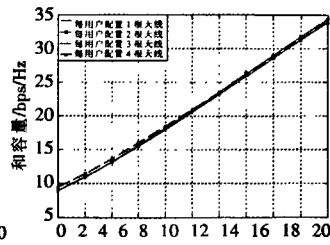


图 9 信道和容差异

从图 8、9 中可以看出, 用户端天线数目的变化对系统性能影响不大, 这是因为在本文所提算法的第二步中只选择了单用户条件下最好的 1 根天线, 对于多用户而言并不是最优的选择, 因此损失了接收端的天线分集增益。

仿真 3 不同用户数性能比较

用户数的变化也是影响本算法的另一个主要因素。假设基站端配置 4 根天线, 用户端配置 2 根天线, 并假设选择目标为 4 个用户, 每个用户选择 1 根天线, 待服务用户数分别为 $M = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ 。图 10、11 分别给出了不同用户数性能比较结果。

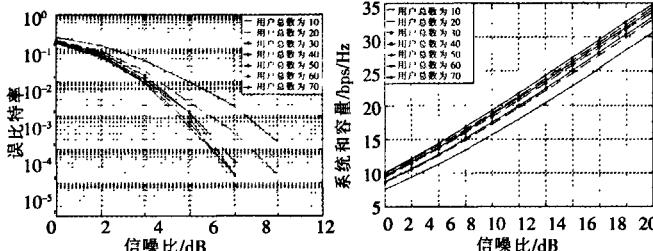


图 10 误比性能差异

图 11 信道和容差异

从图 10、11 中可以看出, 随着用户数的增加, 系统的误比性能与和容量都随之改善, 但是改善的幅度随着用户的增加将逐步减小, 这与多用户分集增益的变化是一致的, 说明所提算法可以获得较好的多用户分集增益。

仿真 4 与经典算法的性能比较

假设基站端配置 4 根天线, 待服务用户数为 10, 用户端配置 2 根天线, 并假设选择目标是 4 个用户, 每个用户选择 1 根天线。

图 12、13 给出了本文所提算法与经典算法的比较结果。

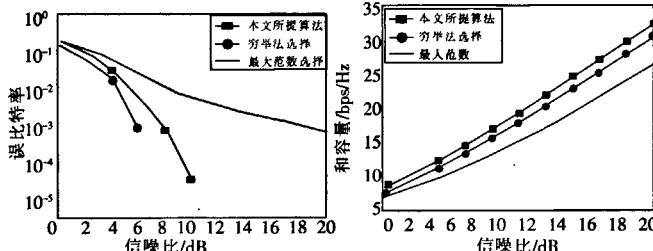


图 12 误比性能差异

图 13 信道和容差异

对于和容量而言, 本文所提算法与穷举法相比有 1.6 dB 左右的差距, 而与最大范数选择法相比可以获得 2.1 dB 左右的增益; 对于误比性能而言, 本文所提算法在信噪比为 10 dB 时已达 10^{-4} , 与穷举法相比在 10^{-3} 有 2 dB 左右的差距, 而与

最大范数相比性能优越得多, 在 10^{-3} 时有近 12 dB 增益。

此时穷举算法进行的迭代次数为 $C_{10 \times 2}^4 = 4845$ 次, 而所提算法需要进行的迭代次数为 $10 \times C_2^1 + 10 + 9 + 8 + 7 = 54$ 次, 所提算法在性能下降不多的情况下, 复杂度大大降低。

5 结束语

针对采用 SLNR 预编码技术的多用户 MIMO 系统, 给出了一种基于 SLNR 的天线与用户联合选择算法。该算法首先对用户的天线进行选择, 选出最好的子信道对应的天线作为用户的通信天线, 将多用户 MIMO 系统变成多用户 MISO 系统, 借鉴贪婪思想利用 SLNR 预编码技术进行多用户选择。仿真结果表明, 本文所提算法可以获得良好的多用户分集增益, 但是无法兼顾接收分集增益, 这也是进一步的研究方向。

参考文献:

- SADEK M, TARIGHAT A, SAYED A H. Active antenna selection in multiuser MIMO communications [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2007, 55(4):1498-1509.
- 曹颖鸿, 殷福亮, 陈喆. 多用户准正交空时分组码 MIMO 系统的下行链路预编码 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1560-1564.
- 李膺东, 朱光喜. 多用户 MIMO 下行链路中基于 SLNR 的联合用户一天线功率分配算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(9): 1757-1759.
- HASSIBI B, SHARIF M. Fundamental limits in MIMO broadcast channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(7):1333-1344.
- SADEK M, TARIGHAT A, SAYED A H. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(5):1711-1721.
- XIA Xin, WU Gang, FANG Shu. SINR or SLNR: in successive user scheduling in MU-MIMO broadcast channel with finite rate feedback [C]//Proc of International Conference on Communication and Mobile Computing. 2010:383-387.
- YANG Rui-zhe, SI Peng-bo, ZHANG Ran, et al. Transmission with linear precoding and limited feedback in multiuser MIMO systems [C]//Proc of International Conference on Advances in Energy Engineering. 2010:290-294.
- KRISHNA D D, GOPIKRISHNA M, ANANDAN C K, et al. CPW-fed koch fractal slot antenna for WLAN/WiMAX applications [J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2008, 7:389-392.
- LIN Y F, CHEN H M, WONG K L. Parametric study of dual-band operation in a microstrip-fed uniplanar monopole antenna [J]. IEE Proceedings Microwaves, Antennas and Propagation, 2003, 150(6):411-414.
- LI Y S, YANG X D, LIU C Y, et al. A sleeve monopole antenna with wide impedance bandwidth for indoor base station applications [J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2010, 16:223-232.
- WU Chao-ming. Dual band CPW-fed cross-slot monopole antenna for WLAN operation [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2007, 1(2):542-546.
- CHEN Kang-kang, ZHAO Ji-xiang. Band-notched design of the planar monopole antenna for WLAN/WiMAX applications [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(12):2782-2786.
- 李迎松, 杨晓冬, 刘乘源, 等. 共面波导馈电的超宽带天线研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(9):819-823.
- CHANG Kai. Encyclopedia of RF and microwave engineering, vol 1-6 [M]. New York: Wiley. 2005:821-833.

(上接第 3883 页)

参考文献:

- KUO Y L, WONG K L. Printed double-T monopole antenna for 2.4/5.2 GHz dual-band WLAN operations [J]. IEEE Trans on Antennas Propagation, 2003, 51(9):2187-2192.
- BEHERA S, VINOY K J. Microstrip square ring antenna for dual-band operation [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2009, 93:41-56.
- 李迎松, 刘乘源, 杨晓冬, 等. 一种小型化双频天线的设计与分析 [J]. 无线通信技术, 2010, 36(4):33-35.
- KIM M J, CHO C S, KIM J. A dual band printed dipole antenna with spiral structure for WLAN application [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, 15(2):910-912.
- THOMAS K G, SREENIVASAN M. Compact triple band antenna for WLAN/WiMAX applications [J]. Electronics Letters, 2009, 45(16):811-813.
- YANG C, KIM H, JUNG C. Compact broad dual-band antenna using inverted-L and loop for DVB-H applications [J]. Electronics Letters, 2010, 46(21):1418-1419.

- CHEN Kang-kang, ZHAO Ji-xiang. Band-notched design of the planar monopole antenna for WLAN/WiMAX applications [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(12):2782-2786.
- 李迎松, 杨晓冬, 刘乘源, 等. 共面波导馈电的超宽带天线研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(9):819-823.
- CHANG Kai. Encyclopedia of RF and microwave engineering, vol 1-6 [M]. New York: Wiley. 2005:821-833.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>