

# 一种MIMO收发天线联合选择算法

汪 洋, 宋 娇, 葛临东

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)



**摘要:** 在MIMO系统中天线选择可以增加系统容量, 并能有效地降低MIMO系统的复杂度和射频电路成本。仿真实验表明天线在发送接收两端不同的分配方式影响信道容量, 发现了一种信道容量角度的最佳天线分配方式。针对收发天线选择的需求, 设计了一种可获得较大信道容量的简单算法。该算法没有矩阵运算, 计算复杂度低。仿真实验表明该算法和最优算法非常贴近, 优于只有接收天线选择时的最优算法。

**关键词:** MIMO; 联合选择; 相关; 范数; 信道容量

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2008)09-2279-04

## Combined Antenna Selection Algorithm in MIMO System

WANG Yang, SONG Jiao, GE Lin-dong

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

**Abstract:** Antenna selection increases channel capacity in MIMO system, also effectively decreases the system complexity and the Radio frequency circuit cost. Simulation experiments show that various antenna assignments between receiving and transmitting impact on the capacity of channel, so an optimal assignment was found from the point of channel capacity. In term of the requirement of antenna combined selection, a simple combined algorithm obtaining better channel capacity was proposed, which has low complexity without matrix operation. By Simulation analysis, the new algorithm is close to the optimal one and better than the optimal algorithm of receiving antenna selection.

**Key words:** MIMO; combined selection; correlation; norm; channel capacity

## 引言

多入多出(MIMO)是无线移动通信领域智能天线技术的重大突破, 该技术能在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统的容量和无线传输链路的质量<sup>[1-4]</sup>, 极大地改善系统的性能。在典型的MIMO系统中, 发射机和接收机同时使用所有的天线发射和接收, 这就要求使用与天线一样多的射频链路(如A/D转换器、放大器、调制器等), 系统的硬件成本较高。与射频链路相比, 天线具有较低的成本, 可以在系统中采用较少的射频链路搭配较多的天线。在天线组中选择合适的若干天线与射频链路结合形成完整的链路, 可以在系统总功率不变的情况下提高系统容量<sup>[5-6]</sup>。

在天线选择法中, 最优算法采用的是穷举的思想, 可以获得最大的容量, 但是计算量太大, 呈指数形式上增加<sup>[5-6]</sup>。递增和递减天线选择算法<sup>[7]</sup>是关于最大香农容量准则的次最优算法, 这两种算法可以降低天线选择的复杂度, 同时又能获得与最优法相近的容量, 但随着天线规模的增大, 该算法的运算量也是非常可观的。还有基于特征空间的天线选择算法<sup>[8]</sup>。文献[9]提出了基于最大Frobenius范数的一种简单的天线选择算法(NBS), 通过选择使信道矩阵的最小列范数最大的方法对天线进行选择。文献[10]从相关(CBS)、互信息

量的角度对天线选择算法进行了研究。

在空间受限制的场合设置过多的接收天线或者发送天线非常困难, 比如移动通信中的移动台。为了达到减少成本并且保证系统性能的目的, 在发送接收两端都放置多于射频链路的天线。很少见到接收发送天线联合选择的研究。文献[11]中提到收发联合天线选择的问题。其中提出先固定接收天线对发送天线进行选择, 然后固定发送天线选择接收天线。没有给出具体的天线选择方法。并且这种固定一段选择另一端的方法割裂了两端之间的联系。文献[12]中虽然提到接收发送天线选择的问题, 也没有给出具体的联合选择算法。本文针对发送和接收两端都需要进行天线选择的情况, 提出了一种收发天线联合选择算法。该算法充分利用了接收天线和发送天线之间的关系, 大幅度提高信道容量, 具有良好的性能。

## 1 信道模型

假定MIMO系统中有Nt个发射天线, Nr个接收天线, Lt个发送射频链路, Lr个接收射频链路。假设在接收端可以通过信道估计得到完整的信道状态信息(CSI), 在发送端不能得到任何CSI, 发射天线功率均匀分配。假设在每个天线单元上传输的符号不相关并且具有归一化的功率。在频率平坦衰落情况下, 定义信道的输入输出模型为:

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{\rho}{N_t}} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

收稿日期: 2007-01-11 修回日期: 2007-08-16

基金项目: 国防预研究项目资助(6130320)

作者简介: 汪洋(1979-), 男, 安徽宿州人, 博士生, 研究方向为MIMO天线选择和软件无线电; 宋娇(1984-), 女, 辽宁人, 硕士生, 研究方向为MIMO天线选择和调制识别; 葛临东(1946-), 男, 安徽怀远人, 教授, 博导, 研究方向为软件无线电。

这里  $y$  是  $Nr \times 1$  接收信号向量,  $x$  是  $Nt \times 1$  发送信号向量,  $n$  是实部虚部方差均是  $1/2$  的加性复高斯白噪声,  $\rho$  为发射机每一发射天线的平均信噪比。 $H \in C^{Nr \times Nt}$  是一个随机信道矩阵

$$H = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \cdots & a_{1Nt} \\ a_{21} & a_{22} \cdots & a_{2Nt} \\ \cdots & \cdots \cdots & \cdots \\ a_{Nr1} & a_{Nr2} \cdots & a_{NrNt} \end{pmatrix} \quad (2)$$

信道矩阵为  $H$  的信道的信道容量  $C(H)$  如式(3):

$$C(H) = \log[\det(I_{Nr} + \frac{\rho}{Nt} H^H H)] \quad (3)$$

其中  $I_{Nr}$  是  $Nr \times Nr$  的单位阵,  $(\cdot)^H$  是共轭转置,  $\det(\cdot)$  表示取行列式。本文认为信道中衰落足够丰富而包络符合Rayleigh分布, 信道矩阵  $H$  的单元  $a_{ij}$  为发射天线  $i$  到接收天线  $j$  的信道衰落系数, 是独立同分布, 均值为 0, 方差为  $1/2$  的复高斯的随机变量。假定信道带宽为  $1\text{Hz}$ , MIMO 系统容量  $C(H)$  在数值上也就等于 MIMO 系统的带宽效率( $\text{bit}/\text{s}/\text{Hz}$ ), 下文统称为容量。

对随机 MIMO 信道而言, 容量有两种度量, 遍历容量和中断容量。遍历容量是容量的时间平均, 在满足各态历经性的条件下可以对大量信道实现的容量进行统计平均得到。中断容量是指信道瞬时容量值的概率等于某一给定中断概率  $P_{out}$  时所对应的信道容量值  $C_{out,p}$ 。即:  $P(C < C_{out,p}) = P_{out}$ 。比如  $p=10\%$  时, 容量小于中断容量  $C_{out,10\%}$  的瞬时的概率为  $10\%$ 。本文中的信道容量以中断容量表达。

## 2 天线联合选择算法

在系统中有一个从接收天线到发送天线的低速率反馈信道, 把发送天线的选择信息反馈给发送端。天线选择的目的是从信道矩阵  $H_{Nr \times Nr}$  中选择出新的信道矩阵  $H_{Lr \times Lt}$ , 使中断容量  $C(H_w)$  最大, 发挥多天线的效果。在天线数量  $Nt+Nr$  固定的情况下, 收发两端天线的分配方式对信道容量会产生不同的影响, 好的天线分配方法可以在相同的天线选择算法下增大信道容量。

### 2.1 收发两端天线分配的方法

假设系统中天线数量固定, 即  $Nt+Nr=k$ ,  $k$  为常数, 接收和发送端的射频链路数量相同都为  $Lr$ , 则有  $Nt=k-Nr$ ,  $Lr \leq Nr \leq k-Lr$ 。变化  $Nr$  考察信道容量的变化趋势。

取  $k=16$ ,  $Lr=Lt=4$ , 信噪比  $\text{SNR}=20\text{db}$ 。假设信道矩阵  $H$  的元素是独立同分布 0 均值方差为  $1/2$  的复高斯的随机变量。用最优算法计算当  $Nr$  变化时的信道容量。实验 10000 次求  $10\%$  中断容量的平均, 容量随接收天线数的变化见图 1。

图 1 中当  $Nr=4$  或者  $12$  时候表示只有发送天线选择或者接收天线选择, 可以看出在接收和发送端同时进行天线选择的容量大于只在一端进行天线选择的容量。当接收天线和发送天线相等时系统具有最大的中断容量。在仿真的假设条件

下, 虽然总的天线数目不变, 但是最优的天线分配使系统获得比最差天线分配多大约  $1\text{db}$  的容量。在发送接收端都配置冗余的天线不仅能降低成本, 缓解空间的限制, 而且能提高系统的容量。

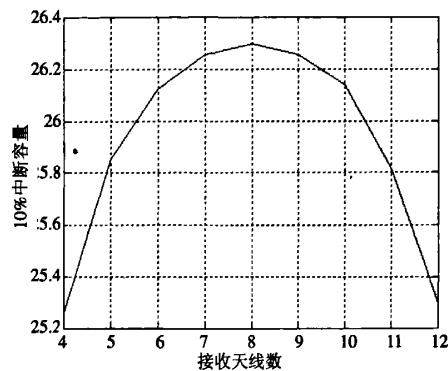


图 1 10% 中断容量随接收天线数的变化

### 2.2 收发天线联合选择算法

在  $Nr$  个接收天线中选择  $Lr$  个天线, 在  $Nt$  个接收天线中选择  $Lt$  个天线, 构成新的信道矩阵  $H_w$ 。在新矩阵中用 0 元素表示被删除的行和列, 对应被删除的接收天线和发送天线。

$H = (h_1, h_2, h_3, \dots, h_{Nr})^H = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_{Nr})$ ,  $h_i$  表示  $H$  中的第  $i$  个行向量,  $v_j$  表示  $H$  中的第  $j$  个列向量。

$w_r = (w_{r,1}, w_{r,2}, w_{r,3} \dots w_{r,Nr})$  中的元素对应着  $H_w$  中的行, 非 0 元素表示选择出的接收天线,  $w_t = (w_{t,1}, w_{t,2}, w_{t,3} \dots w_{t,Nt})$  中的元素对应着  $H_w$  中的列, 非 0 元素表示选择出的发送天线。相应的信道矩阵  $H_w$  由集合  $w_r$  和  $w_t$  中的元素所决定, 例如  $Nt=Nr=4$ ,  $Lr=Lt=2$  时假设天线选择后删除了第 2, 4 根接收天线和第 1, 3 根发送天线, 则有  $w_r=\{1,0,3,0\}$  且  $w_t=\{0,2,0,4\}$ , 相应的产生新的矩阵为

$$H_w = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & 0 & a_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

则天线选择后的信道矩阵  $H_s = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{14} \\ a_{32} & a_{34} \end{pmatrix}$  其中  $a_{ij}$  是  $H$  中的元素。接收天线选择后的信道容量  $C(H_s)$  表示式:

$$\begin{aligned} C(H_s) &= \log[\det(I_{Lr} + \frac{\rho}{Lr} H_s^H H_s)] \\ &= \log[\det(I_{Nr} + \frac{\rho}{Lr} H_w^H H_w)] = C(H_w) \end{aligned} \quad (4)$$

在集合  $w_r$ ,  $w_t$  中分别选择  $Nr-Lr$  和  $Nt-Lt$  个元素置 0, 使  $C(H_w)$  最大。最优的方法是搜索可能的组合, 这样可以得到最大的容量, 但是对每个信道都要计算  $\binom{Nr}{Lr} \binom{Nt}{Lt}$  次(3)式, 运算量太大基本不具有应用价值。

用奇异值表示的等效信道的信道容量见式(5)

$$C(H_w) = \sum_{i=1}^r \log_2 (1 + P_i |\lambda_i|^2 / \sigma_i^2) \quad (5)$$

其中  $P_i$  是在第  $i$  个等效子信道中接收的信号功率,  $\sigma_i^2$  是对应子信道的噪声功率,  $r$  是  $Hw$  的秩,  $\lambda_i$  是  $Hw$  的第  $i$  个奇异值。采用平均功率分配算法给子信道分配功率,  $P_i$  由总功率除  $r$  得到, 和  $\lambda_i$  无关。当  $\lambda_i$  增大, 则信道容量会增大。增大  $r$ , 虽然每个子信道的功率减少了, 但是增加了子信道的个数。子信道功率的减少经过对数运算, 对容量减少的影响会缩小, 所以  $r$  增大仍会使信道容量增加, 通过仿真也可以说明这点。当采用注水算法时, 较多的功率会分配给  $\lambda_i$  大的子信道。当  $\lambda_i$  增大, 信道容量会有一个增大的趋势(说明见附录)。注水算法时  $r$  增加, 虽然每个子信道分配的功率减少, 但是增加了一个子信道, 由于对数运算的特性, 所以信道容量同样具有增大的趋势。

由上可知趋势:  $r$  大, 并且每个奇异值大可以得到较大的信道容量。在  $H$  中选择合适的行元素和列元素组成  $Hw$ , 使  $Hw$  中行向量的Frobenius范数大相关性较小并且列向量的范数大相关性小。

定义行向量  $h_i$ ,  $h_j$  间的相关参数:

$$\eta_{i,j} = 1 - \left( \frac{\|h_i^H h_j\|^2}{\|h_i\| \|h_j\|} \right)^2 \quad (6)$$

列向量  $v_i$ ,  $v_j$  之间相关参数为:

$$\mu_{i,j} = 1 - \left( \frac{\|v_i^H v_j\|^2}{\|v_i\| \|v_j\|} \right)^2 \quad (7)$$

$\eta$  反映了两向量之间的相关性的强弱, 可以看出两向量之间相关性弱则  $\eta$  大。

新的天线选择算法是一种递减算法。初始化  $Hw$  等于信道矩阵  $H$ , 集合  $w_r = \{1, 2, 3, \dots, N_r\}$ ,  $w_t = \{1, 2, 3, \dots, N_t\}$ 。删除接收天线等价于在  $Hw$  中依照判断规则选择一行把该行元素设为 0, 集合  $w_r$  中一个对应的元素设为 0。删除发送天线等价于在  $Hw$  中选择一列把元素设为 0, 同样集合  $w_t$  一个对应的元素设为 0。按照行列交叉选择的顺序循环选择, 不断更新  $Hw$  和  $w_r, w_t$ , 直到矩阵  $Hw$  剩下  $Lr$  行非 0 元素和  $Lt$  列非 0 元素,  $w_r$  有  $Lr$  个非 0 元素,  $w_t$  有  $Lt$  个非 0 元素。设计行列向量的选择规则, 使每次选择后更新矩阵  $Hw$  的行列向量的范数大, 并且向量之间的相关性小。

这里定义矩阵  $Hw$  的范数相关参数:

$$\chi = \sum_{i=1}^{N_r} \left( \|h_i\| \sum_{j=1}^{N_t} \eta_{i,j} \right) + \sum_{i=1}^{N_t} \left( \|v_i\| \sum_{j=1}^{N_r} \mu_{i,j} \right) \quad (8)$$

定义删除第  $m$  条接收天线后的矩阵  $Hw'$  的范数相关参数为  $\chi'_m$ , 则天线选择的规则定义为: 在集  $w_r$  中选择一个非 0 元素  $m$ , 使  $\chi'_m$  最大。

$$m = \arg \max \chi'_m \quad (m \neq 0) \quad (9)$$

同样对于选择发送天线删除时, 有相关参数  $\chi'_m$ , 在集合  $w_t$  中选择非 0 元素  $m$ , 使  $\chi'_m$  最大。

这样新选择出的接收天线使  $Hw$  的各行各列具有较大的范数并且各行各列之间相关性较小, 具有较大的信道容量。

计算过程如下:

(1) 初始化  $Hw = H$ ,  $w_r = \{1, 2, \dots, N_r\}$ ,  $w_t = \{1, 2, \dots, N_t\}$ 。

(2) 在集合  $w_r$  选择非 0 元素  $m$ , 计算  $\chi'_m$ , 得到使  $\chi'_m$  最大的元素  $m$ , 把矩阵  $Hw$  第  $m$  行清 0,  $m=0$ 。

(3) 在集合  $w_t$  选择非 0 元素  $m$ , 计算  $\chi'_m$ , 并把使  $\chi'_m$  最大的元素  $m$ , 把矩阵  $Hw$  第  $m$  列清 0,  $m=0$ 。

(4) 循环 2, 3, 4 步骤, 直到  $w_r$  中有  $Lr$  个非 0 元素且  $w_t$  中有  $Lt$  个非 0 元素。

最后得到向量  $w_r, w_t$  中的非 0 元素就是选择的接收和发送天线的号码。

该算法中把信道容量用范数和相关性去评价, 依照该评价标准的选择是次优选择。但是相比最优选择算法, 新算法不存在矩阵运算, 计算简单。随着被删除天线的增多,  $Hw$  中 0 向量也增多, 出现很多 0 向量求相关和范数的计算, 这些计算都可以忽略, 进一步降低计算量。新算法的算法复杂度低于最优算法。新算法在发送链路数  $Lt$  和接收链路数  $Lr$  不相等时或者发送天线数  $Nt$  和接收天线数  $Nr$  不等时同样适用。如果  $Nt-Lt > Nr-Lr$  则在计算过程中依照先删除接收天线再删除发送天线的顺序逐渐删除, 直到剩下  $Lr$  根接收天线后, 不再删除接收天线, 根据规则删除余下的发送天线。同样当  $Nt-Lt < Nr-Lr$  时先删除发送天线。

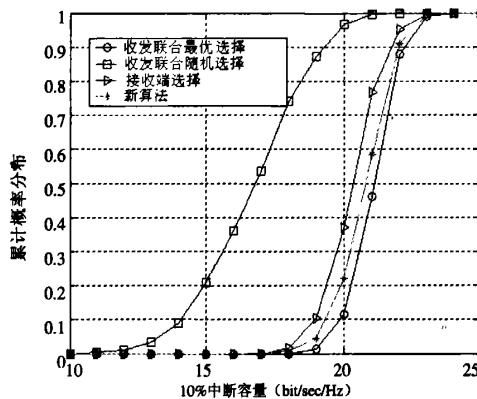
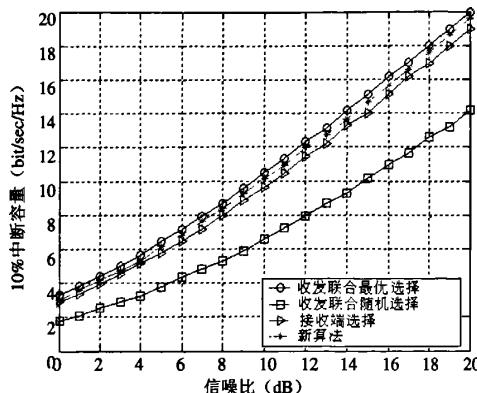
### 3 仿真与分析

在天线总数相同的情况下, 比较冗余天线全部放置在接收端经过最优选择获得的信道容量和天线分配在接收发射两端用新算法获得的信道容量。仿真收发联合最优天线选择, 随机选择, 新算法和接收端最优选择四种情况下的 10% 中断容量。假设信道符合 Rayleigh 衰落, 信道矩阵  $H$  的元素为独立同分布的 0 均值方差  $1/2$  的复高斯的随机变量。

图 2 为  $Nt=6$ ,  $Nr=6$ ,  $Lt=3$ ,  $Lr=3$  时采用蒙特卡罗方法仿真 10% 时的中断容量, 实验 1000 次。接收端最优选择以  $Nt=Lt=3$ ,  $Nr=9$ ,  $Lr=3$  为条件, 与收发联合选择同样有 12 个天线。由图 2 可知新算法的容量与收发联合最优选择的容量非常逼近, 并且大于接收端最优选择算法所获得的容量。冗余的天线在收发两端分配会带来一定的容量增益, 新算法虽然是一种次优选择, 但是容量大于接收端最优选择的容量。新算法随信噪比的增大与收发联合最优选择的容量的差异没有变化, 在 20dB 时仍具有较好的信道增益。而接收端最优选择算法在信噪比增大时, 与收发联合最优算法的差距有增大的趋势。新算法与随机选择算法相比带来了明显的容量增益。

图 3 为  $Nt=6$ ,  $Nr=6$ ,  $Lt=3$ ,  $Lr=3$ ,  $SNR=20$  时, 新算法和收发联合最优选择算法以及收发联合随机选择算法的 10% 中断容量的累积概率分布曲线, 和  $Nt=Lt=3$ ,  $Nr=9$ ,  $Lr=3$ ,  $SNR=20$  时接收端最优选择算法的 10% 中断容量的累积概率分布曲线。它表达了信道容量的概率分布情况。可以看出在同等概率条件下, 新算法获得的容量优于接收端最优选择算法的结果。新算法在容量的分布方面和收发联合最优

选择算法很相似。



## 4 结论

本文在对天线选择算法研究的基础上，首先通过仿真分析说明在总的天线数一定的情况下，把冗余的天线分配到发送和接收两端比分配到一端能获得更大的信道容量。文中针对接收和发送两端都需要进行天线选择的场合，设计了一种天线联合选择算法，该算法基于使选择出的信道矩阵的行向量和列向量具有最大的范数和最小的相关性的思想，设计了新的度量标准和判断标准。仿真分析表明新算法与收发天线选择的最优算法的性能非常接近。并且该算法在保持天线总数目不变的情况下，相比接收端天线选择的最优算法有更高的信道容量。该算法在实现时没有任何矩阵运算，计算复杂度较低，是一种具有优良性能并且实现简单的天线选择算法，适用于发送接收天线联合选择的情况，具有很强的实用价值。

## 参考文献：

- [1] Paulraj A J, Nabar R U, Gore D A. Introduction to Space-Time Wireless Communications [M]. England: Cambridge University Press, 2003.

- [2] Foschini G J. On limits of wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J]. Wireless Personal Communication (S0929-6212), 1998, 6(30): 311-335.
- [3] Paulraj A J, Gore D A, Nabar R U, Bolcskei H. An Overview of MIMO Communications-A key to gigabit wireless [C]// Proceedings of IEEE. USA: IEEE, 2004, 92(2): 198-218.
- [4] Berenguer I, Wang X D. Space-time coding and signal processing for MIMO communications [J]. Journal of Computer Science and Technology (S1000-9000), 2003, 18(6): 689-702.
- [5] Molisch A F, Win M Z. MIMO Systems with antenna selection [J]. IEEE Microwave Magazine (S1527-3342), 2004, 5(1): 46-56.
- [6] Sanaye S, Nosratinia A. Antenna selection in MIMO systems [J]. IEEE Communications Magazine (S0163-6804), 2004, 42(10): 68-73.
- [7] Gorokhov A, Gore D A, Paulraj A J. Receive Antenna Selection for MIMO Spatial Multiplexing: Theory and Algorithms [J]. IEEE Transactions on Signal Processing (S1053-587X), 2003, 51(11): 2796-2807.
- [8] 王子磊, 奚宏生, 盛延敏. 基于特征空间的MIMO天线选择算法[J]. 电波科学学报, 2006, 21(4): 518-524.
- [9] Gore D A, Gorokhov A, Paulraj A J. Joint MMSE versus V-BLAST and Antenna Selection [C]// ACSSC of IEEE. USA: IEEE 2002, 1(11): 505-509.
- [10] Choi Y S, Molisch A F, Win M Z, Jack H W. Fast algorithms for antenna selection in MIMO systems [C]// Vehicular Technology Conference of IEEE, 2003. USA: IEEE, 2003: 1733-1737.
- [11] Gorokhov A, Collados M, Gore D, Paulraj A. Transmit/Receive MIMO Antenna Subset Selection [C]// ICASSP of IEEE. USA: IEEE, 2004: II13-II16.
- [12] Blum R S, Winters J H. On Optimum MIMO with Antenna Selection. [J]. IEEE Communications Letters (S1089-7798), 2002, 6(8): 322-324.

## 附录:

### 信道容量

$$C(Hw) = \sum_{i=1}^r \log_2 (1 + P_i |\lambda_i|^2 / \sigma_i^2) \quad (1)$$

$$P_i + 1 / |\lambda_i|^2 = \kappa \text{ 且 } \sum_{i=1}^r P_i = P \quad (2)$$

$$\text{则 } P_i = \kappa - 1 / |\lambda_i|^2 \quad (3)$$

代入(1)中

$$C(Hw) = \sum_{i=1}^r \log_2 (1 + \frac{\kappa |\lambda_i|^2 - 1}{\sigma_i^2}) \quad (4)$$

由(2)(3)式得

$$P = r\kappa - \sum_{j=1}^r \frac{1}{|\lambda_j|^2} \quad (5)$$

$$\kappa = \frac{P}{r} + \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r \frac{1}{|\lambda_j|^2} \quad (6)$$

(6)代入(4)

$$C(Hw) = \sum_{i=1}^r \log_2 (1 + \frac{P |\lambda_i|^2 + |\lambda_i|^2 \sum_{j=1}^r \frac{1}{|\lambda_j|^2}}{r \sigma_i^2}) \quad (7)$$

当  $\lambda_i > 1$  且增大时,  $C(Hw)$  有增大的趋势。

## 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](http://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](http://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](http://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>