

一种用于 MIMO 系统的快速天线选择算法

盛延敏 奚宏生 王子磊 赵宇

(中国科学技术大学自动化系网络传播系统与控制实验室 合肥 230027)

摘要 在多径衰落环境中, MIMO 系统的信道容量随天线数的增加呈线性增加, 发射/接收天线选择方法能以很小的性能损失换取射频成本的大幅度降低, 使 MIMO 系统不完全受射频成本的限制。为快速选择出使系统容量最优的发射/接收天线子集, 该文提出一种快速天线选择算法的改进算法。该算法通过实时更新优化参数, 大大降低计算复杂度。仿真结果表明, 该算法在不影响系统容量的情况下大大减少了计算时间。

关键词 MIMO 系统, 多天线阵列, 天线选择算法, 信道容量

中图分类号: TN820, TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1703-03

A Fast Antenna Selection Algorithm in MIMO System

Sheng Yan-min Xi Hong-sheng Wang Zi-lei Zhao Yu

(Lab. of Network Communication System and Control, Dept. of Automation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract The capacity of MIMO system is increased linearly with the number of the antennas in multi-path fading environments, and transmit/receive antenna selection barter little lost of system performance for great decreasing of RF cost, making MIMO system not fully limited by RF cost. To quickly select transmit/receiver antenna subset making the system capacity best, this paper proposes an adapted algorithm for the fast antenna selection algorithm, which reduces the computation complexity by updating the quantities in real time. Simulation results indicate that the algorithm decreases computation time a lot without any system capacity lost.

Key words MIMO system, Multiple element array, Antenna selection algorithm, Channel capacity

1 引言

近年来, 随着人们对无线通信服务质量的要求不断提高, 研究可以提供更大系统容量和更高传输速率的无线通信系统成为通信领域研究的重要目标。在发送端和接收端同时使用多天线阵列(Multiple Element Array, MEA)的多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术成为研究的热点。研究表明: 在多径衰落环境中, MIMO 系统的信道容量随天线数(发射天线和接收天线数目中之少者)的增加呈线性增加^[1-3]。

典型的MIMO 系统, 发射机和接收机同时使用所有天线发射或接收, 这就要求使用与天线同样多的射频链路, 大大增加了系统的硬件成本。与射频部分相比, 天线振子成本相对较低, 可以采用发射/接收天线选择的方法, 用相对较少的射频链路支持较多的天线, 使MIMO 系统不完全受射频成本的限制。文献[3]分析了不相关衰落信道发射/接收天线选择对信道容量以及误码率的影响, 结果表明: 选择发射/接收方法能以很小的性能损失换取射频成本的大幅度降低。文献[4]将天线选择技术扩展到发射机和接收机, 并与空时分组码相结合, 进一步提高多天线MIMO系统的信噪比和容量。

用 N_s , N_r 分别表示发送端和接收端的天线数, L_s , L_r 分

别表示发送端和接收端的射频链路数。接收天线选择研究的目标之一是使系统的容量最大。一个最优的方法就是采用全搜索方式, 这需从 $C_{N_s}^{L_s}$ 种可能组成的选择集合中选取一个“最好”的使系统容量最大。这种方法计算的复杂度太大。为了快速选择出天线子集, Gorokhov提出了一种称为“逐减算法”的快速天线选择算法^[5], 该算法计算结果与全搜索方法结果相当, 但计算复杂度大。Gharavi-Alkhansari提出了另一种称为“逐增算法”的快速天线选择算法^[6], 该算法计算复杂度大大降低, 但是获得的最大容量和全搜索方法获得的结果还是有些差异。本文在“逐减算法”基础上, 通过实时更新优化参数, 克服了原算法计算复杂度过大的缺点, 同时可以获得优异的性能。仿真结果表明: 采用该算法, 计算时间大大减少, 且结果与全搜索方法相当。

2 系统模型

MIMO系统模型如下^[7, 8]:

$$\mathbf{r}(t) = \sqrt{\frac{\rho}{N_s}} \mathbf{H} \mathbf{s}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{r}(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_{N_r}(t)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_{N_s}(t)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{w}(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_{N_r}(t)]^T \quad (4)$$

分别表示接收端信号, 发送端信号和白噪声, ρ 为平均信噪比,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_s} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r1} & h_{N_r2} & \cdots & h_{N_rN_s} \end{bmatrix} \quad (5)$$

表示 $N_r \times N_s$ 信道矩阵, N_s, N_r 意义同上。 h_{ij} 为第 j 根发送天线到第 i 根接收天线的衰落系数。

假设接收端已知信道矩阵 \mathbf{H} [3], 发送端不知道信道矩阵 \mathbf{H} , 且 $\mathbf{R}_{ss} = \mathbf{I}_{N_s \times N_s}$ 。这样, 对于信道矩阵 \mathbf{H} , 系统容量为[1]

$$\begin{aligned} C(\mathbf{H}) &= \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) \\ &= \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \end{aligned} \quad (6)$$

优化目标是求一个 $\mathbf{H}_{L_r \times N_s}$ 使系统容量 C 最大, $\mathbf{H}_{L_r \times N_s}$ 是由原 \mathbf{H} 的任意 L_r 行组成的新信道矩阵。

3 算法推导及分析

为了从全部 N_r 根天线中选取 L_r 根使系统容量最大, 首先选取 N_r 根, 利用贪心算法思想, 随后的每步中, 除去对系统容量贡献最小的天线元素。

以 \mathbf{H}_k 表示第 k 步通过逐减法选择得到的信道矩阵, 则在第 $k+1$ 步时, 在第 k 步的基础上去除某个天线元素, 即在原信道矩阵上去除某行, 记该行为 $\mathbf{r}_{k,j}$, 其中 k 表示第 k 步, j 表示第 j 行, 则第 $k+1$ 步得到的系统容量为

$$C(\mathbf{H}_{k+1}) = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H}_{k+1}^H \mathbf{H}_{k+1} \right) \quad (7)$$

注意到

$$\mathbf{H}_{k+1}^H \mathbf{H}_{k+1} + \mathbf{r}_{k,j}^H \mathbf{r}_{k,j} = \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \quad (8)$$

代入式(7)得到

$$C(\mathbf{H}_{k+1}) = C(\mathbf{H}_k) + \log_2 \left(1 - \frac{\rho}{N_s} \mathbf{r}_{k,j} \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \right)^{-1} \mathbf{r}_{k,j}^H \right) \quad (9)$$

令

$$\mathbf{B}_k = \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \right)^{-1} \quad (10)$$

$$\mu_{k,j} = \mathbf{r}_{k,j} \mathbf{B}_k \mathbf{r}_{k,j}^H \quad (11)$$

从式(9)可以看出: 在第 $k+1$ 步, 要求最大 $C(\mathbf{H}_{k+1})$, 等价于在可以选择的集合中选取使 $\mu_{k,j}$ 最小的天线元素, 即

$$J = \arg \min_j \mu_{k,j} \quad (12)$$

去除第 J 根天线元素作用以后, 利用矩阵求逆引理[9]更新 \mathbf{B}_{k+1} 得到

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \frac{1}{\frac{N_s}{\rho} - \mathbf{r}_{k,j} \mathbf{B}_k \mathbf{r}_{k,j}^H} \mathbf{B}_k \mathbf{r}_{k,j}^H \mathbf{r}_{k,j} \mathbf{B}_k \quad (13)$$

$$= \mathbf{B}_k + \mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^H \quad (14)$$

$$\mathbf{a}_k \triangleq \frac{1}{\sqrt{\frac{N_s}{\rho} - \mu_{k,j}}} \mathbf{B}_k \mathbf{r}_{k,j}^H \quad (15)$$

利用以下递推方法, 将 $\mu_{k,j}$ 由每次计算变为实时更新。

$$\begin{aligned} \mu_{k+1,j} &= \mathbf{r}_{k+1,j} \mathbf{B}_{k+1} \mathbf{r}_{k+1,j}^H \\ &= \mathbf{r}_{k+1,j} (\mathbf{B}_k + \mathbf{a}_k \mathbf{a}_k^H) \mathbf{r}_{k+1,j}^H \\ &= \mu_{k,j} + |\mathbf{r}_{k,j} \mathbf{a}_k|^2 \end{aligned} \quad (16)$$

原算法与改进算法的比较见表 1 (考虑 $N_r \gg L_r$ 的情况)。由表 1 可见, 由于在更新 \mathbf{B} 的同时同步更新 μ_j , 计算复杂度由 $O(N_s^2 N_r^2)$ 降为 $O(N_s^3 + N_s^2 N_r)$, 在 N_s 固定, N_r 很大时, 复杂度的降低相当可观。在随后的仿真中可以看到随着 N_r 的增大, 采用改进算法后计算时间大大减少。

4 仿真结果

为了比较改进算法与全搜索方法, 逐增算法以及不采用天线选择方法(这种情况随机选取 L_r 行)的性能差异, 用 Monte-Carlo 仿真方法经过多次信道实现后, 得到相应的结果。假设信道为准静态、平坦衰落信道且发射和接收均不相关, 此时 \mathbf{H} 为独立同分布的复高斯矩阵, 且均值为 0, 方差为 1。

图 1 显示了信噪比 10dB ($N_r=16, N_s=4$) 下, 分别采用全搜索方法, 改进算法, 逐增算法以及不采用天线选择方法获得的 10% 系统中断容量。由图可见, 随着已选择天线数 L_r 的不断增大, 系统容量也不断增加, 当 $L_r=N_r=16$ 时达到最大值。改进算法得到的结果非常接近全搜索得到的最优解。

图 2 显示了信噪比 30dB 的情况。由图可见当 $L_r < 4=N_s$ 时, 全搜索方法得到的系统容量几乎和 L_r 的增长成线性变化。另外, 改进算法得到的结果与全搜索得到的最优解非常吻合, 与 10dB 情况相比, 可以获得更高的容量。比较“逐减法”和“逐增算法”两种算法可以看出: 在相同的迭代次数

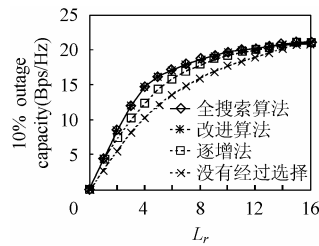


图 1 10% 中断容量 vs 选择天线 (SNR=10dB)
Fig.1 10% Outage Capacity versus L_r (SNR=10dB)

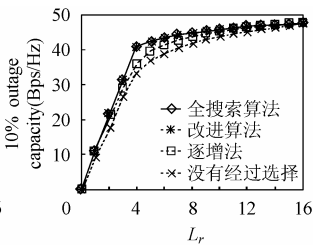


图 2 10% 中断容量 vs 选个数 (SNR=30dB)
Fig.2 10% Outage Capacity versus L_r (SNR=30dB)

下,“逐减算法”由于需要矩阵求逆在计算复杂度上要略大于“逐增算法”,然而在获得的系统容量上,“逐减算法”要略优于“逐增算法”。

图3和图4显示了改进算法与原算法在计算时间上的差异。仿真中,假设SNR=10dB,图3显示的是 $N_s=4, L_r=4$,随

N_r 变化的情形,由图可见,改进算法在计算时间上要小于原算法,当 N_r 逐渐增长时更加明显。图4显示的是 $N_s=4, N_r=240$,随 L_r 变化的情形。由图可见,当 $L_r \ll N_r$ 时,改进算法在计算时间上大大小于原算法。

表1 原算法与改进算法比较

Tab.1 Comparison of original algorithm and adapted algorithm

原算法		改进算法	
FastAntSele($N_r, L_r, \rho, N_s, \mathbf{H}$)		AdaptFastAntSele($N_r, L_r, \rho, N_s, \mathbf{H}$)	
$\Sigma = \{1, 2, \dots, N_r\}$		$\Sigma = \{1, 2, \dots, N_r\}$	$O(N_s^3 + N_s^2 N_r)$
$\mathbf{B} = \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right)^{-1}$	$O(N_s^3 + N_s^2 N_r)$	$\mathbf{B} = \left(\mathbf{I}_{N_s} + \frac{\rho}{N_s} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right)^{-1}$	$O(N_s^2 N_r)$
for $i=1$ to $N_r - L_r$		for $i=1$ to N_r	
for all $j \in \Sigma$		$\mu_j = \mathbf{H}(j, :)\mathbf{B}\mathbf{H}(j, :)^H$	$O(N_r^2)$
$\mu_j = \mathbf{H}(j, :)\mathbf{B}\mathbf{H}(j, :)^H$		end	
end		for $i=1$ to $N_r - L_r$	
$J = \arg \min_j \mu_j$	$O(N_s^2 N_r^2)$	$J = \arg \min_j \mu_j$	$O(N_s^2 N_r)$
$\Sigma = \Sigma - \{J\}$		$\Sigma = \Sigma - \{J\}$	
$\mathbf{B} = \mathbf{B} + \frac{1}{\frac{N_s}{\rho} - \mu_J} \mathbf{B}\mathbf{H}(J, :)^H \mathbf{H}(J, :)\mathbf{B}$	$O(N_r^2)$	$\mathbf{a} = \frac{1}{\sqrt{\frac{N_s}{\rho} - \mu_J}} \mathbf{B}\mathbf{H}(J, :)^H$	$O(N_s^2 N_r)$
end		$\mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{a}\mathbf{a}^H$	
return Σ	$O(N_s^2 N_r)$	for all $j \in \Sigma$	$O(N_s^2 N_r)$
		$\mu_j = \mu_j + \mathbf{H}(j, :)\mathbf{a} ^2$	
		end	
		end	
		return Σ	

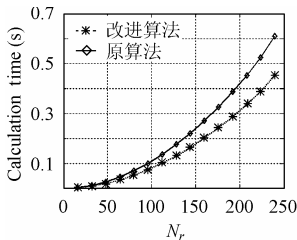


图3 计算时间 vs 待选择的天线数 N_r
Fig.3 Calculation time versus N_r

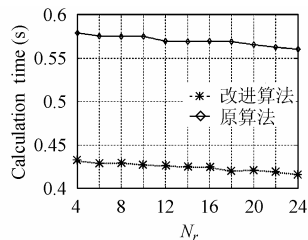


图4 计算时间 vs 选择天线数 L_r
Fig.4 Calculation time versus L_r

5 结束语

本文提出了一种快速天线选择算法的改进算法。该算法基于贪心算法思想,每次从天线集合中去掉对系统容量贡献最小的元素,可以快速选择出使系统容量最优的天线子集。算法通过实时更新优化参数,大大降低计算复杂度,提高了计算速度。仿真表明,该算法简单易于实现,计算速度快,性能优良,获得的结果非常接近全搜索方法得到的结果。

参考文献

[1] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *Eur. Trans. Telecommun.*, 1999, 10(6): 585–595.
[2] Marzetta T L, Hochwald B M. Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat fading.

IEEE Trans. on Inform. Theory, 1999, 45(1): 139–157.
[3] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Commun.*, 1998, 6(3): 311–335.
[4] Paulraj A, Gore D. Optimal antenna selection in MIMO systems with space-time block coding. *IEICE Trans. Commun*, 2001, E84-B(7): 1713–1719.
[5] Gorokhov A. Antenna selection algorithms for MEA transmission systems. Proc. IEEE ICASSP, Orlando, Florida, USA, May 2002, 3: 2857–2860.
[6] Gharavi-Alkhansari M, Greshman A. Fast antenna selection in MIMO systems. *IEEE Trans. on Sig. Proc.*, 2004, 52(2): 339–347.
[7] Hochwald B M, Marzetta T L. Unitary space-time modulation for multiple-antenna communications in Rayleigh flat fading. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2000, 46(2): 543–564.
[8] Hochwald B M, Marzetta T L, Richardson T J, et al. Systematic design of unitary space-time constellations. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2000, 46(6): 1962–1973.
[9] 张贤达. 信号处理中的线性代数. 北京: 科学出版社, 1997: 13–16.

盛延敏: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为 MIMO 中的盲信号处理以及智能天线中的自适应算法。
奚宏生: 男, 1950年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为离散动态系统、自适应滤波理论、通讯网络流量控制和管理、网络入侵检测技术及其应用。