

文章编号:1007-5321(2007)03-0050-04

适用于分布式MIMO系统的快速天线选择算法

刘慎发，吴伟陵

(北京邮电大学信息工程学院，北京100876)

摘要:对分布式多输入多输出(MIMO)系统的下行发射天线选择算法进行研究,提出了基于范数和相关性的天线选择算法(NCBA)及其改进算法(NCBA-M),并分别与基于范数的天线选择算法(NBA)以及基于大尺度衰落的天线选择算法(LFBA)进行性能比较。仿真结果表明,当同一端口发送天线没有相关性时,NBA、LFBA、NCBA与最优天线选择算法性能接近。但是,当同一个端口中发送天线存在很强相关性时,NBA、LFBA算法会导致较高的容量损失,而NCBA-M算法仍然具有接近最优选择算法的性能。

关键词:分布式多输入多输出系统;分布式天线系统;天线选择

中图分类号:TN929.5 文献标识码:A

Fast Antenna Selection Algorithms for Distributed MIMO Systems

LIU Shen-fa, WU Wei-ling

(School of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A norm and correlation based antenna selection algorithm (NCBA) and its modified version (NCBA-M) are proposed for the downlink transmit antenna selection in distributed multiple input multiple output(MIMO)systems. The performance of the proposed algorithms is compared with that of norm based antenna selection algorithm (NBA) and large scale fading based antenna selection algorithm (LFBA) respectively. The simulation result shows that when no correlation of the transmit antenna correlation in the same antenna port is considered, NBA, LFBA and NCBA have similar performance to the optimal antenna selection algorithms. However, when transmit antennas in the same port have strong correlations, NBA and LFBA result in a high capacity loss, but NCBA-M can still approach the performance of optimal antenna selection algorithm.

Key words: distributed multiple input multiple output systems; distributed antenna systems; antenna selection

传统的分布式天线系统(DAS, distributed antenna systems)采用光纤或同轴电缆把小区内的分布式天线端口连接到中央处理节点,文献[1-3]针对这种分布式天线下宏分集以及信息理论的容量优势进行了研究。结合分布式天线系统(DAS)与点对点MIMO系统的特点,文献[2]提出了分布式MIMO系统的概念,并验证了该系统的容量优势。然而,MIMO系统随着天线数的增多,实现复杂度和硬件

开销也大大增加^[4]。由于分布式MIMO系统的天线数比集中式系统进一步增多,降低MIMO技术的实现复杂度,是该系统能否实际应用的关键。MIMO天线选择技术能有效解决MIMO系统性能和复杂性的折衷问题,受到广泛的关注,其中点对点MIMO系统中的天线选择算法已有成熟的研究^[4-6]。

本文研究适用于分布式MIMO系统的下行发

收稿日期:2006-09-13

作者简介:刘慎发(1980—),男,博士生, E-mail: happylsf@126.com.

送天线选择算法。首先给出分布式MIMO系统的复合信道模型，并结合天线端口的相关性模型，在对选择后的信道容量公式进行变换的基础上，提出了一种基于范数和相关性的快速天线选择算法(NCBA)及其改进算法(NCBA-M)，最后给出了该算法的与其他算法仿真结果的比较。

1 分布式MIMO系统模型

分布式MIMO系统可以表示为 (M, N, L) ，包括 N 个具有一定距离分布的天线端口，每个端口有 L 个天线，移动用户装备 M 个天线。传统的DAS只是分布式MIMO系统的一个特例，即每个端口只有1根天线，可以表示为 $(M, N, 1)$ 。点对点MIMO系统也是分布式MIMO系统的一个特例，即端口数为1，可以表示为 $(M, 1, L)$ 。图1给出1个 $(4, 4, 4)$ 分布式MIMO系统的实例。

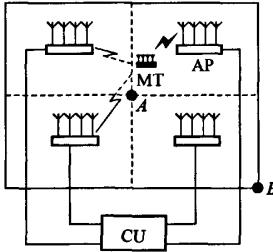


图1 (4, 4, 4)分布式MIMO系统

(M, N, L) 分布式MIMO系统的信号模型为

$$\mathbf{r}(t, \mathbf{d}) = \mathbf{H}(\mathbf{d})\mathbf{s}(t) + \mathbf{z}(t) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{s}(t), \mathbf{z}(t)$ 分别表示 $NL \times 1$ 信号和零均值加性高斯白噪声向量； $\mathbf{r}(t, \mathbf{d})$ 为 $M \times 1$ 接收信号向量； $\mathbf{H}(\mathbf{d})$ 为 $M \times NL$ 的信道矩阵。

$$\mathbf{H}(\mathbf{d}) = [\mathbf{H}_1(d_1) \cdots \mathbf{H}_N(d_N)] \quad (2)$$

其中 $\mathbf{d} = [d_1 \ d_2 \ \cdots \ d_N]'$ 表示与第 N 个端口之间的距离， $\mathbf{H}(\mathbf{d})$ 的元素 $\mathbf{H}_i(d_i)$ 可以表示为

$$\mathbf{H}_i(d_i) = \begin{bmatrix} h_{11}^i(d_i) & h_{12}^i(d_i) & \cdots & h_{1L}^i(d_i) \\ h_{21}^i(d_i) & h_{22}^i(d_i) & \cdots & h_{2L}^i(d_i) \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ h_{M1}^i(d_i) & h_{M2}^i(d_i) & \cdots & h_{ML}^i(d_i) \end{bmatrix}_{M \times L} \quad (3)$$

其中， $i = 1, \dots, N$ ， $h_{lm}^i(d_i)$ 为用户的第 m 根天线与第 i 端口的第 l 根天线之间的信道衰落^[2]，其中包括了路径损耗、阴影衰落和小尺度快衰落，具体表示为

$$h_{ml}^i(d_i) = h_{ml}^i d_i^{-\alpha} 10^{\frac{\xi_n}{20}} \quad (4)$$

其中， $h_{ml}^i \sim CN(0, 1)$ 为快衰落； α 为路损指数； $\xi_n \sim N(0, \sigma_{sh}^2)$ 为零均值高斯变量。接收端已知信道状态信息(CSI)，而发射端在未知信道状态信息(CSI)情况下，下行信道容量公式^[2]可以表示为

$$C_{int, d} = \text{lb} \left(\det \left[\mathbf{I}_M + \frac{P_t}{NL\sigma_n^2} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right] \right) \quad (5)$$

其中， P_t 表示总发射功率； σ_n^2 为噪声方差。

采用了1个简单的单参数空间相关MIMO信道模型^[7]来建模同一端口发射天线的相关性。相同端口天线的发送相关矩阵被定义为 r_{Tx} 的函数。

$$\mathbf{R}_{Tx} = \begin{bmatrix} 1 & r_{Tx} & \cdots & r_{Tx}^{(L-1)^2} \\ r_{Tx} & 1 & \cdots & r_{Tx}^{(L-2)^2} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ r_{Tx}^{(L-1)^2} & r_{Tx}^{(L-2)^2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (6)$$

通过调节参数 r_{Tx} 在 $(0, 1)$ 区间内变化，此模型可以描述端口天线完全不相关到完全相关的情形。本文只考虑同一端口的下行发送天线相关性，相关信道矩阵可表示为

$$\mathbf{H}_i^{cor}(d_i) = \mathbf{R}_{Rx}^{1/2} \mathbf{H}_i(d_i) \mathbf{R}_{Tx}^{1/2} = \mathbf{H}_i(d_i) \mathbf{R}_{Tx}^{1/2} \quad (7)$$

其中， $\mathbf{R}_{Rx}^{1/2} = \mathbf{I}$ ； $\mathbf{H}_i(d_i)$ 表示没有相关性的端口和移动终端之间的信道矩阵。

2 下行发送天线选择算法

文献[4]根据天线选择算法的目标，为改善分集或者提高空间复用(容量)，将选择算法分为2类^[4]。本文提出的算法以提高系统容量为目的，天线选择目标是使选择后信道矩阵的信道容量最大化。

原信道矩阵 \mathbf{H} 尺寸为 $M_r \times M_t$ 。假定发送侧选择 L_t 个天线。用一个 $M_r \times L_t$ 的矩阵 \mathbf{H}_r 表示选择后的信道矩阵，根据信道容量公式^[2]

$$C_{int, d} = \text{lb} \left(\det \left[\mathbf{I}_{M_r} + \frac{P_t}{NL\sigma_n^2} \mathbf{H}_r \mathbf{H}_r^H \right] \right) \quad (8)$$

下行天线选择的目标是式(8)所代表的最大化信道容量。最佳天线选择算法(OPA)是在所有可能的组合中穷举出最佳的天线组合，这种算法具有最高的复杂度。基于范数的天线选择算法(NBA)是根据信道矩阵的列范数(采用2范数)大小来排列天线，而按照范数从大到小的顺序选择天线，它的算法复杂度是最低的。在分布式MIMO系统中，各个端口到用户的大尺度衰落不同，而且复合信道增益中

的大尺度衰落居主导作用。由于大尺度衰落信息比较容易得到, 基于大尺度的衰落的天线选择算法(LFBA)是一种有效的天线选择方法。上述选择算法没有考虑发送天线的相关性, 如NBA算法只考虑各列的范数大小, 没有考虑列之间相关性。因此当同一端口的发送天线具有较强相关性, NBA和LFBA可能选择到同一端口的天线, 这些发送天线之间的强相关性会导致较大的容量损失。所以同一天线端口具有强相关的情况下, NBA和LFBA算法不太适合。

定义所选天线的列下标集合为 $L = \{l_1, \dots, l_{L_t}\}$, 是 $\Omega = [1, \dots, NL]$ 的子集。最佳集合 L^* 表示为

$$\begin{aligned} L^* &= \arg \max_{L \subseteq \Omega} \{C(\mathbf{H}_r)\} = \\ &\arg \max_{L \subseteq \Omega} \left\{ \text{lb det} \left(\mathbf{I}_M + \frac{P_t}{NL\sigma_n^2} \mathbf{H}_r \mathbf{H}_r^H \right) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

在高信噪比下, 可忽略 \mathbf{I}_M , 因此上式近似为

$$\begin{aligned} L^* &= \arg \max_{L \subseteq \Omega} \left\{ \text{lb det} \left(\frac{P_t}{NL\sigma_n^2} \mathbf{H}_r \mathbf{H}_r^H \right) \right\} \Leftrightarrow \\ L^* &= \arg \max_{L \subseteq \Omega} \{ \text{lb det} (\mathbf{H}_r \mathbf{H}_r^H) \} \end{aligned} \quad (10)$$

利用 QR 分解 \mathbf{H}_r^H 得到

$$\mathbf{H}_r^H = \mathbf{Q} \mathbf{R} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)中, 可得

$$\begin{aligned} L^* &= \arg \max_{L \subseteq \Omega} \{ \text{lb det} (\mathbf{R}^H \mathbf{R}) \} \Leftrightarrow \\ L^* &= \arg \max_{L \subseteq \Omega} \left(\left(\prod_{j=1}^M \mathbf{R}_{jj} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (12)$$

根据式(12), 通过贪婪法逐步实现容量最大化目标, 这个过程可以用 QR 分解来解释^[6]。引入 1 个相关度量 $Z_{l_i, l_j} = \mathbf{v}_{l_i}^H \mathbf{q}_{l_j}, i > j$, 式(12)改写为

$$\begin{aligned} L^* &= \arg \max_{L \subseteq \Omega} \left(\left(\prod_{j=1}^M \|\mathbf{h}_{l_j}\|^2 \left(1 - \sum_{i=1}^{j-1} \mathbf{v}_{l_j}^H \mathbf{q}_{l_i} \mathbf{q}_{l_i}^H \mathbf{v}_{l_j} \right)^2 \right) \right) \Leftrightarrow \\ L^* &= \arg \max_{L \subseteq \Omega} \left(\prod_{j=1}^M \left(\|\mathbf{h}_{l_j}\|^2 \left(1 - \sum_{i=1}^{j-1} \|Z_{l_i, l_j}\|^2 \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $\mathbf{Q} = [\mathbf{q}_{l_1}, \dots, \mathbf{q}_{l_{L_t}}]$, $\mathbf{v}_{l_i} = \mathbf{h}_{l_i} / \|\mathbf{h}_{l_i}\|$ 。下标 j 较小时, 可以做如下近似

$$Z_{l_i, l_j} \approx \rho_{l_i, l_j} \quad (14)$$

其中 ρ_{l_i, l_j} 表示信道矩阵第 l_i 列和 l_j 列的相关系数。基于这种近似, 提出了 NCBA 算法。该算法从 1 个空的天线集合开始, 每次往集合中增加 1 根天线。每次选择 1 根能使式(15)的度量最大化的天线。例

如: 在第 j 步时, 已选天线的集合为 $L' = [l_1, l_2, \dots, l_{j-1}]$, 目标是寻找使 \mathbf{R}_{jj} 最大的列指数 l_j^* , 这种选择算法可以表示为

$$l_j^* = \arg \max_{l_j \in \Omega - L'} \left(\|\mathbf{h}_{l_j}\|^2 \left(1 - \sum_{i=1}^{j-1} \|\rho_{l_j, l_i}\|^2 \right) \right) \quad (15)$$

其中 \mathbf{h}_{l_j} 为 \mathbf{H}_r^H 的列向量, 基于范数和相关性的天线选择算法的优势是在第 j 步只需计算 $\|\mathbf{h}_{l_j}\|^2$ 和相关系数 ρ_{l_j, l_i} , 这使得选择过程非常简单和灵活。NCBA 算法步骤描述如下。

- 1) NCBA($M_t, L_t, M_r, \mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_{M_r}, \rho, \Omega$)
- 2) for $j := 1$ to M_t
- 3) $a_j := \mathbf{h}_j^H \mathbf{h}_j = \|\mathbf{h}_j\|^2$
- 4) end
- 5) for $n := 1$ to L_t
- 6) $J = \arg \max_{j \in J} a_j$
- 7) $\Omega = \Omega - \{J\}$
- 8) if $n < L_t$
- 9) for all $j \in \Omega$
- 10) $a_j := a_j - |\mathbf{h}_n^H \mathbf{h}_j|^2 / \|\mathbf{h}_n\|^2$
- 11) end
- 12) end
- 13) end

当选择的天线数目 L_t 不高于接收天线数目 M_r 时, NCBA 能很好地接近最优算法的性能。但是, 由于式(14)的近似效果, 在所选天线数 L_t 比较大时, 特别是当 $L_t > M_r$, NCBA 算法性能下降较快。结合 NBA 以及 NCBA 的优点, 提出了 1 种改进天线选择算法(NCBA-M)。其主要思想是当所选择的天线数目 L_t 多于接收天线数目 M_r 时, 前面 M_r 根天线采用 NCBA 算法进行选择, 最后 $L_t - M_r$ 根天线采用 NBA 算法在剩余的天线集合中选择。因为 $L_t > M_r$, MIMO 系统的自由度受限制为 $\min(L_t, M_r) = M_r$, 所以选择超出的 $L_t - M_r$ 个天线可以看作额外提供的自由度, 对于容量的贡献相对较小。因此对于这部分天线根据 NBA 算法来选择既可以降低复杂度, 也避免了 NCBA 算法的不足。改进的 NCBA-M 算法描述如下。

- 1) NCBA-Mod($M_t, L_t, M_r, \mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_{M_r}, \rho$)
- 2) $\Omega = \{1, 2, \dots, M_r\}$
- 3) if ($L_t \leq M_r$)

- 4) NCBA($M_t, L_t, M_r, h_1, \dots, h_{M_t}, \rho, \Omega$)
- 5) else
- 6) NCBA($M_t, M_r, M_r, h_1, \dots, h_{M_t}, \rho, \Omega$)
- 7) NBA($M_t - M_r, L_t - M_r, M_r, \Omega$)
- 8) end

3 仿真结果

考虑场景为图1(4, 4, 4)分布式MIMO系统, 矩形小区边长为1 000 m。定义小区中心点和小区顶点之间距离为参考距离 $R = 500\sqrt{2}$ 。为了评估不同总发射功率下的性能, 定义实际发射信噪比 γ 与 $P_t = R^\alpha$ 时的发射信噪比

$$\gamma_0 = \frac{P_t}{\sigma_n^2} = \frac{R^\alpha}{\sigma_n^2}$$

的比值 $\gamma_r = \gamma / \gamma_0$ 为参考信噪比, 路径损耗指数 $\alpha = 4$ 。

选择中心位置A以及小区顶部位置B作为考查点。假设 $L_t = 4$, 端口天线没有相关性, 各种算法在不同参考信噪比性能如图2所示。由图2可以看出, 没有相关性时, 各种算法性能相差不大, 小区边界位置的性能差异相对中心位置而言更小。在同一端口天线具有强相关性, 假定 $r_{tx} = 0.9$, $\gamma_r = 10$ dB, 由图3可以看出, 当选择的天线数为4时, 即等于接收天线数 M_r 时, 最优算法OPA和NBA、LFBA有较大的差距, 而提出的NCBA和NCBA-M算法性能接近OPA。随着选择的天线数的增加, NCBA性能下降, 而提出的NCBA-M算法仍然能接近最优选择算法性能。

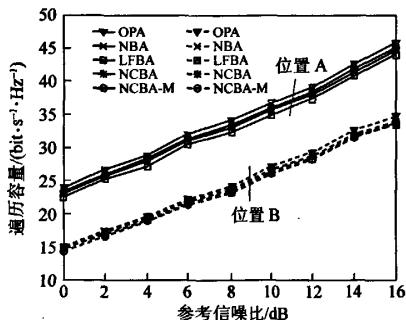


图2 遍历容量与参考信噪比(无相关性)

4 结论

针对分布式MIMO系统的下行发射天线选择

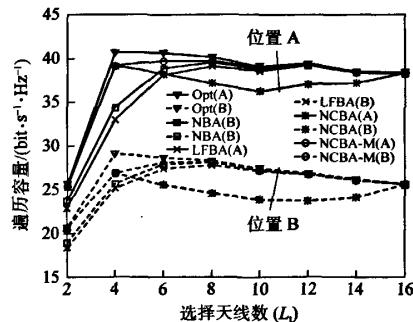


图3 遍历容量与不同天线数 L_t 的比较

$$(r_{tx} = 0.9, \gamma_r = 10 \text{ dB})$$

算法进行研究, 提出了1种基于范数和相关性的快速天线选择算法NCBA及其改进算法NCBA-M。仿真结果表明, 该算法在不同的参考信噪比以及不同选择天线数目下均有较好的性能。

参考文献:

- [1] Roh W, Paulraj A. MIMO channel capacity for the distributed antenna systems [C] // IEEE VTC2002, Vancouver, Canada: IEEE Press, 2002: 706-709.
- [2] Kerpe K J. A radio access system with distributed antennas [J]. IEEE Trans Vehic Technol, 1996, 45: 265-275.
- [3] Zhuang Hairuo, Dai Lin, Yao Yan. A spatial multiplexing technique based on large-scale fading for distributed antenna systems [C] // PIMRC. Beijing: IEEE Press, 2003: 1134-1138.
- [4] Sanaye S, Nosratinia A. Antenna selection in MIMO systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42 (10): 68-73.
- [5] Gorokhov A, Gore D A, Paulraj A J. Receive antenna selection for spatial multiplexing: theory and algorithms [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2003, 51: 2796-2807.
- [6] Gharavi-Alkhansari M, Greshman A. Fast antenna selection in MIMO systems [J]. IEEE Trans Sig Proc, 2004, 52(2): 339-347.
- [7] Zelst A V, Hammerschmidt J S. A single coefficient spatial correlation model for multiple-input multiple-output (MIMO) radio channels [C] // URSI XXVIIth General Assembly. Maastricht, The Netherlands: URSI, 2002.

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>