

文章编号: 2095-4980(2022)06-0601-07

大规模 MIMO 系统中收发联合阈值天线选择算法

苏佳, 夏雨, 李薇

(河北科技大学 信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050091)

摘要: 在大规模多输入多输出(massive MIMO)系统中使用天线选择算法可提高能效和系统吞吐量, 然而适用于传统 MIMO 系统的天线选择算法具有高复杂度, 很难用于 massive MIMO 系统。为优化天线选择算法, 以算法复杂度和系统容量为优化目标, 提出了收发联合阈值天线选择算法。该算法在发射端使用最大范数双向天线选择算法进行天线选择, 在接收端使用分组 maxvol 算法并通过仿真实验结果的预设阈值进行天线选择。仿真实验表明, 收发联合阈值天线选择算法在降低复杂度的同时可以提高系统容量, 与递增天线选择算法相比, 系统容量最多可提高 52.2 bit/s/Hz。提出的天线选择算法可以满足不同天线相关度和信噪比的传输环境。

关键词: 大规模 MIMO; 天线选择; 系统容量; 阈值; 相关性

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020252

Joint threshold antenna selection algorithm for transmissions in massive MIMO systems

SU Jia, XIA Yu, LI Wei

(School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050091, China)

Abstract: The use of antenna selection algorithms in massive Multiple Input Multiple Output(massive MIMO) systems can improve energy efficiency and system throughput. However, antenna selection algorithms suitable for traditional MIMO systems have high complexity and are difficult to be applied to massive MIMO systems. In order to optimize the antenna selection algorithm in two aspects: the algorithm complexity and system capacity, a joint threshold antenna selection algorithm for transmitting and receiving is proposed. The algorithm uses the maximum norm bidirectional antenna selection algorithm at the transmitting side, and the grouped maxvol antenna selection algorithm with an optimum preset threshold at the receiving side. The optimum threshold is obtained by simulation results. Results show that the joint threshold antenna selection algorithm can increase the system capacity while reducing the complexity. Compared with the incremental antenna selection algorithm, the system capacity can be increased up to 52.2 bit/s/Hz. The joint threshold antenna selection algorithm proposed in this paper can meet the transmission environment of different antenna correlation coefficients and SNR.

Keywords: massive MIMO; antenna selection; system capacity; thresholds; correlation

大规模 MIMO 系统基于传统 MIMO 系统延伸而来, 由于日益增长的信息需求, 传统 MIMO 系统已经无法满足数据速率的传输。为了解决这一问题, 作为 5G 无线系统的核心技术之一, 大规模 MIMO 系统通过增加收发两端的的天线数量来提高系统信道的自由度, 进而提高系统性能^[1]。提高天线数量的方法既能够提高频谱利用率和能量效率, 还能够增强信号传输的可靠性^[2-4]。研究表明, 大规模的 MIMO 技术很可能会满足未来高速铁路的通信需求, 并且有可能产生巨大的经济效益和环境影响, 进而促进绿色通信的实现^[5-6]。虽然天线数量的增加可以提高系统性能, 但需要为每一根天线配备与之对应的射频链路, 大大增加了系统硬件复杂度、系统损耗和硬件损耗, 天线选择技术可以解决这一问题^[7]。天线选择技术的核心思想是在所有天线中选择出较优的天线子集, 既能满足信号传输需求, 又能有效降低系统复杂度, 减少能量消耗和损耗。

收稿日期: 2020-05-29; 修回日期: 2020-08-28

基金项目: 河北省科技支撑计划基金资助项目(18210803D)

已有的传统天线选择算法在 MIMO 系统中各自具有优点和缺点,但无法直接应用于大规模 MIMO 系统,因此研究人员针对系统容量和能量提出了一些适用于大规模 MIMO 系统的天线选择算法。在提高系统容量方面,文献[8]提出结合天线选择和波束成型 2 种技术,通过凸函数获得最优解的方法;文献[9]提出了双向搜索选择算法,该算法结合了递增与递减算法的特性,能够适用于不同选择天线数的情况;为了降低系统容量计算复杂度,文献[10]提出了一种信道容量的分组算法,该算法能够克服天线相关性的影响并且具有低复杂度。在功率方面,文献[11]基于实际测量的大规模 MIMO 信道数据,提出基于功率的天线选择算法;文献[12]提出以最大化用户接收总功率为目标的天线选择算法,该算法通过将优化目标函数转换为凸函数获得有效解,进而提高接收功率。

为了进一步提高系统容量,降低算法的计算复杂度,能够在克服天线相关性影响的同时适应不同信号传输环境,本文在实际大规模 MIMO 系统环境下提出了一种收发联合阈值天线选择算法。根据收发天线的特点采用不同的天线选择算法,发送端采用最大范数双向天线选择算法,接收端采用阈值判断的分组天线选择算法。实验表明,本文所提算法在降低复杂度的同时保证了系统性能,并能够减少高天线相关性带来的影响。

1 系统模型

本文考虑的大规模 MIMO 系统,发射端配备 N 根天线,接收端配备 M 根天线,假设信道是平坦瑞利衰落的,且受到加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)的影响,系统信号传输模型可表示为:

$$\mathbf{x}(k) = \sqrt{E_s} \mathbf{H} \mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}(k)$ 为接收信号矢量, $\mathbf{x}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T$; $\mathbf{s}(k)$ 为发射信号矢量, $\mathbf{s}(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)]^T$; $\mathbf{n}(k)$

为零均值高斯噪声矢量, $\mathbf{n}(k) = [n_1(k), n_2(k), \dots, n_M(k)]^T$; \mathbf{H} 为信道矩阵, $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix}$; E_s 为每根接收天

线和每个信道使用的平均功率。较强的散射环境和稀疏的天线间距可以使得信道矩阵更加容易满足独立同分布的假设。

由于大规模 MIMO 系统的天线数量巨大,阵列排列密集,导致信道矩阵 \mathbf{H} 中元素的相关性大大增加。相关性天线信道常常建模为 Kronecker 模型^[10],Kronecker 信道模型通过发射端和接收端的天线相关矩阵来表征天线间的相关性。Kronecker 信道模型严格要求发射端和接收端之间的距离足够长,系统的收发两端完全独立,互不影响,且信道满足富散射条件。根据 Kronecker 信道模型,信道矩阵可以表示为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_0 \mathbf{R}_t^{1/2} \quad (2)$$

式中: \mathbf{R}_t 为发送端天线相关矩阵; \mathbf{R}_r 为接收端天线相关矩阵; \mathbf{H}_0 为未加相关性模型前的信道矩阵。如果仅考虑发送端或接收端天线的相关性,则可以将信道建模为半相关信道模型:

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_t^{1/2} \mathbf{H}_0 \quad (3)$$

或者

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \mathbf{R}_r^{1/2} \quad (4)$$

当天线之间没有相关性时,该信道矩阵等价于原信道矩阵,即 $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0$ 。对于相关矩阵 \mathbf{R} ,元素 $(R)_{ij}$ 有多个表达方式,本文的系统模型中使用指数形式:

$$\mathbf{R}_t = \begin{pmatrix} 1 & \dots & \mu^{1-N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu^{N-1} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

相关性矩阵 \mathbf{R}_t 中的元素 $(R)_{ij}$ 满足条件 $(R)_{ij} = \mu^{|i-j|}$,相关因子 $\mu (0 \leq \mu \leq 1)$ 越大,则天线间的相关性越大。该模型表明,随着天线距离的增加,天线间相关性大小呈指数衰减。

在进行天线子集选择时,假设在接收端处已知完整信道状态信息(Channel State Information, CSI),发射端处未知完整 CSI,则发射端需要把发射总功率平均分配给每根发射天线,对于任意给定的信道矩阵 \mathbf{H} ,大规模 MIMO 系统信道容量可表示为:

$$C(\mathbf{H}) = \log_2 \det(\mathbf{I}_N + E_s \mathbf{H}^H \mathbf{H}) = \log_2 \det(\mathbf{I}_M + E_s \mathbf{H} \mathbf{H}^H) \quad (6)$$

式中： C 为所求信道容量； \mathbf{I}_N 为 $N \times N$ 维的单位矩阵。massive MIMO 系统天线选择示意图如图 1 所示，分别在 N 根发射天线里选择 L_N 根发射天线，在 M 根接收天线里选择 L_M 根接收天线进行信号的传输^[13]。若在发射端选择全部发射天线进行信号发射，即 $L_N=N$ ，在接收端选择 L_M 根发射天线进行信号接收，即 $L_M < M$ 。收发两端进行天线选择之后的信道矩阵为 \mathbf{H}_{sel} ，该信道矩阵对应的信道容量为：

$$C(\mathbf{H}_{sel}) = lb \det(\mathbf{I}_{L_M} + E_s \mathbf{H}_{sel} \mathbf{H}_{sel}^H) \quad (7)$$

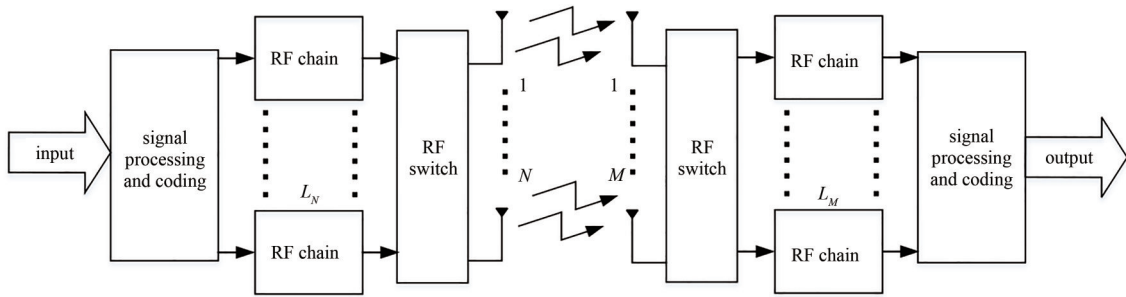


Fig.1 Antenna selection in massive MIMO
图 1 Massive MIMO 系统中的天线选择

2 天线选择算法

2.1 最大范数双向天线选择算法

最大范数双向天线选择算法是基于递增天线选择算法和递减天线选择算法提出的，算法所选择的天线子集从空天线集和全天线集分别增加和减少。本节基于文献[9]中的双向搜索算法，通过计算信道矩阵范数来判断天线对容量的贡献度来优化算法，进而选择出较优的天线子集，最大范数双向天线选择算法的复杂度主要集中在每次循环中，通过范数进行选择的方式可以降低每次循环的计算复杂度。假设发送端天线数为 N ，接收端天线数为 M ，以接受天线选择为例，选择 L_M 根天线，表 1 列出了最大范数双向天线选择算法的具体步骤及算法复杂度。算法输入包括接收天线子集 A ，递增天线选择子集 X 和递减天线选择子集 Y ，第 k 根天线对应的范数 F_k ，选择天线对应的天线序号为 K 和 P 。算法输出结果为选择后的天线子集 Z 。

在表 1 中， $\mathbf{h}_k(1 \leq k \leq M)$ 代表信道矩阵 \mathbf{H} 的第 k 行。第 7~13 行是通过递减算法进行天线选择，第 14~16 行是通过递增算法进行天线选择， P 和 K 为递减和递增天线选择过程中选择出天线对应的序号。集合之间的加减运算代表将天线或天线集加入集合或从集合中去除，当集合中的天线数满足要求选择的天线数时，算法循环结束，将符合条件的天线子集 X 或 Y 赋值给 Z ，返回集合 Z 。

2.2 分组 maxvol 天线选择算法

为了降低穷举法的高复杂度，研究人员以一定的性能为代价提出了一些天线选择算法，但这些算法仍然是次优算法。例如，递增天线选择算法和递减天线选择算法所采用的策略为“局部最优”的贪婪算法，在进行次优天线子集的选择过程中，一次只增加或减少一根天线的方法虽然降低了复杂度，但这种方法失去了“全局最优”的特点。文献[14]首次提出矩阵体积(matrix volume, 简称 maxvol)的概念，maxvol 算法可以有效减少天线相关性的影响，且系统在高信噪比的环境下具有良好的性能，本节基于 maxvol 算法提出了一种全局优化的天线选择算法。

为了降低每一次循环过程中重复计算的高复杂度，本节提出的分组 maxvol 天线选择算法可以减少循环次数

表 1 最大范数双向天线选择算法伪代码

Table 1 Pseudo code of maximum norm bidirectional antenna selection algorithm

pseudo code of maximum norm bidirectional antenna selection algorithm	
1:	$A = \{1, 2, \dots, M\}$
2:	for $k=1$ to M
3:	$F_k = \sqrt{\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H} \quad O(N^2 M)$
4:	end for
5:	$K = \arg \max F_k \quad O(M L_M)$
6:	$X = X + \{K\}, A = A - \{K\}, F = F - F_K$
7:	while $\text{length}(X) \neq L_M$
8:	$P = \arg \min F_k$
9:	$A = A - \{P\}, Y = X + A, F = F - F_P$
10:	if $\text{length}(Y) = L_M$
11:	$Z = Y$
12:	break
13:	end if
14:	$K = \arg \max F_k \quad O(M L_M)$
15:	$X = X + \{K\}, A = A - \{K\}, F = F - F_K$
16:	$Z = X$
17:	end while
18:	return Z

和降低循环过程中的矩阵维度。该算法的核心思想是避免选中密集分布的天线，减少天线相关性的影响，将天线矩阵进行分组并通过 maxvol 算法使信道状态尽可能达到全局最优。

使用分组 maxvol 算法的前提是对信道矩阵进行分组处理，假设发射端天线数和接收端天线数为 N 和 M ，该系统为点对点的大规模 MIMO 系统，以接收天线选择为例，选择天线数为 L_M ，分组的情况分为 2 种：

1) 如果 M 能够整除 L_M ，将接收天线阵列划分为 L_M 组，每组天线数为 M/L_M ；将发射端划分为 N 组，每组的的天线数为 1。划分后的信道矩阵被分为 $N \times L_M$ 个信道子矩阵，每个子矩阵的维度为 $(M/L_M) \times 1$ 。

2) 如果 M 不能整除 L_M ，为了使天线尽可能地均匀分布，将天线分为 2 个部分：第一部分将接收端天线分为 $M\%L_M$ 组，每组的的天线数为 $[M/L_M]+1$ ；第二部分将接收端分为 $L_M-M\%L_M$ 组，每组的的天线数为 $[M/L_M]$ ；将发射端划分为 N 组，每组的的天线数为 1。这样信道矩阵被分为 $N \times L_M$ 个矩阵，第一部分矩阵的维度为 $([M/L_M]+1) \times 1$ ，第二部分矩阵的维度为 $(M/L_M) \times 1$ 。

分组完成后，在每个分组矩阵中使用 maxvol 算法选择出与矩阵列数相等的行数，完成接收端天线的选择，每个分组矩阵选择出的天线组合而成的天线集即为选择天线集合。第一种情况下的最大计算复杂度为 $O(MN)$ ，第二种情况下的最大计算复杂度为 $O(MN+M\%L_M)$ ，相比于原 maxvol 算法的最大计算复杂度 $O(N^2M)$ ，分组 maxvol 算法的计算复杂度大大减少。

假设发送端天线数为 N ，接收端天线数为 M ，以接收天线选择为例，选择 L_M 根天线，表 2 给出了分组 maxvol 天线选择算法的具体步骤及算法复杂度。算法输入为信道矩阵 H ，算法输出为天线子集 H_{opt} 。

在表 2 中， $a, b, c, temp$ 为方便计算引入的中间变量， P_i 为信道子矩阵， H_{opti} 为使用 maxvol 天线选择算法选择出的天线矩阵。第 1~15 行是对矩阵进行分组处理，将矩阵分为 L_M 组。第 16~19 行通过 maxvol 算法进行天线选择，将选择出的天线组合成天线集合。第 20 行算法返回 H_{opt} 为所需最优子矩阵。

2.3 收发联合阈值天线选择算法

递增选择算法虽然可以使得系统容量较优，但由于天线相关性的影响，随着相关度的增加，系统容量会逐渐下降。分组 maxvol 算法虽然在低信噪比环境下性能较差，但可以降低天线相关性的影响，且复杂度较低。综上，本节提出了一种阈值天线选择算法，根据递增算法和分组 maxvol 算法的仿真结果来设定两个阈值：天线相关度阈值和信噪比阈值，当天线相关度或信噪比低于对应阈值时，使用递增天线选择算法；高于对应阈值时，使用分组 maxvol 算法，通过这种方式，系统无论是在哪种环境条件下，都可以获得较优的系统性能。

假设在大规模 MIMO 系统中，发送端天线数为 N 并且发送端选择天线数为 L_N ，接收端天线数为 M 且接收端选择天线数为 L_M ，由本节的阈值天线选择算法和 2.1 节提出的最大范数双向天线选择算法，可以得到一种新型收发联合天线选择算法，算法具体步骤如下：

1) 首先进行发射端天线选择，使用 2.1 节提出的最大范数双向天线选择算法选择出 L_N 根天线，并从原信道矩阵 H 中取相应的 L_N 列，表示为 H_{mid} ， H_{mid} 是一个 $M \times L_N$ 维的矩阵；

2) 然后进行接收端天线选择，使用 2.3 节提出的阈值天线选择算法从矩阵 H_{mid} 选择出 L_M 根天线，最终得到所需的天线子矩阵 H_{in} ， H_{in} 是一个 $L_M \times L_N$ 维的矩阵。

本节通过使用最大范数双向选择算法和阈值选择算法提出了收发联合阈值天线选择算法，与传统的收发联合天线选择算法相比，此算法可以优化在不同信道和信噪比环境下的系统容量，有效降低了算法的计算复杂度。

3 仿真结果

为了分析文中提出的收发联合阈值天线选择算法的性能，与其他收发联合天线选择算法—收发联合递增天

表 2 分组 maxvol 天线选择算法伪代码

Table 2 Pseudo code of grouped maxvol antenna selection algorithm

grouped maxvol antenna selection algorithm pseudo code	
1:	$a=[M/L_M], b=M \% L_M, c=[M/L_M+1]$
2:	if $M \% L_M = 0$
3:	for $i=1$ to L_M
4:	$P_i=H((i-1)a+1:ia,:)$
5:	end for
6:	else
7:	for $i=1$ to $M\%L_M$
8:	$P_i=H((i-1)a+1:ia,:)$
9:	end for
10:	$temp=(M/L_M)(M\%L_M+1)+M\%L_M$
11:	$P_{M\%L_M+1}=H(bc+1,temp)$
12:	for $i=M\%L_M+2$ to L_M
13:	$P_i=H((i-1)a+b+1:ia+b,:)$
14:	end for
15:	end if
16:	for $i=1$ to L_M
17:	$H_{opti}=\maxvol(P_i)$
18:	end for
19:	$H_{opt}=[H_{opt1}, H_{opt2}, \dots, H_{optL_M}]$
20:	return H_{opt}

线选择算法、收发联合随机天线选择算法以及收发联合范数天线选择算法进行比较，通过仿真分析以上几种天线选择算法的系统容量和误码率性能。

3.1 系统容量

在瑞利衰落信道条件下，假设大规模 MIMO 系统接收端和发射端均布设 256 根天线，在接收端和发射端通过算法进行选择的的天线数范围为 0 至 128 根，信噪比为 10 dB，接收端和发射端的天线相关系数均为 0.8，图 2 展示了选择天线数与系统容量的关系曲线图。

从图 2 中可以看出，系统容量随着选择天线数的增加而升高。由于高天线相关性的影响，随着选择天线数的增加，递增天线选择算法的容量甚至比随机天线选择算法的容量还要低，因为递增天线选择算法只选择增益较高的天线，没有考虑天线之间的相关性，所以无法保障系统性能的稳定。当选择天线数小于 64 根时，不同算法对应容量的差距并不大；当选择天线数为 128 根时，与收发联合递增天线选择算法相比，收发联合阈值天线选择算法的系统容量提高了 20.8 bit/s/Hz，收发联合阈值天线选择算法通过对信道矩阵进行分组来避免选择密集分布的天线，从而降低了天线相关性的影响，在高天线相关性的条件下系统性能优于其他 3 种算法。

3.2 收发联合阈值天线算法对系统容量的影响

首先对天线相关系数与系统容量的关系进行仿真。假设信噪比为 10 dB，为了体现接收端阈值天线选择算法适应不同天线相关系数的特点，假设发射端天线不相关，即 μ_T 为 0，接收端天线系数 μ_R 范围为 0~0.9，收发两端天线数为 256 根，选择天线数为 128 根，图 3 展示了天线相关系数与系统容量的关系曲线图。

从图 3 中可以看出，收发联合递增天线选择算法和范数天线选择算法对应的系统容量随着天线相关系数的增加而逐渐降低，当相关系数大于 0.8 时，系统容量甚至低于随机天线选择算法，说明递增和范数天线选择算法极大地受到了天线相关性的影响。收发联合阈值天线选择算法在天线相关系数小于 0.4 时，系统容量与递增和范数天线选择算法一致，当接收端天线相关系数为 0.9 时，与递增天线选择算法相比，收发联合阈值天线选择算法对应的系统容量提高了 16.9 bit/s/Hz，收发联合阈值天线选择算法对应的系统容量明显优于其余 3 种算法，算法大大降低了相关性对系统性能的影响。

接下来对信噪比与系统容量的关系进行仿真。接收端和发射端的天线相关系数均为 0.8，为了证明接收端阈值天线选择算法适应不同信噪比条件的特点，信噪比的范围为 -10~20 dB，收发两端天线数为 256 根，选择天线数为 128 根，图 4 展示了信噪比与系统容量的关系曲线图。

从图 4 中可以看出随着信噪比的增加，系统容量也在逐渐上升。当信噪比小于阈值 5 dB 时，收发联合阈值天线选择算法对应的系统容量与递增和范数天线选择算法一致，并且高于随机天线选择算法。在信噪比为 10 dB 时，与递增天线选择算法相比，收发联合阈值天线选择算法对应的系统容量提高了 52.2 bit/s/Hz。收发联合阈值天线选择算法克服了 maxvol 算法在低信噪比环境下系统容量较差的缺点，并且分组计算的方式在高相关性的环境下使系统保持稳定的性能。

由于天线之间的相关性和不同信噪比环境的影响，单独使用收发联合递增天线选择算法或 maxvol 天线选择

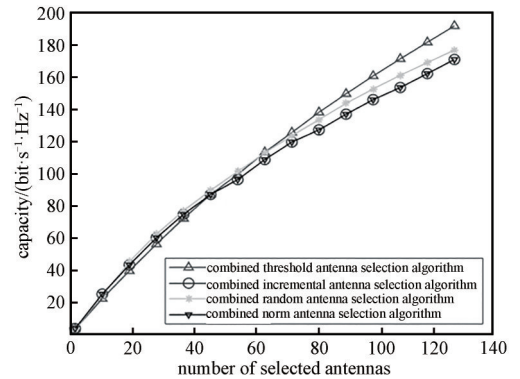


Fig.2 Antenna corresponding to capacity
图 2 天线对应容量图

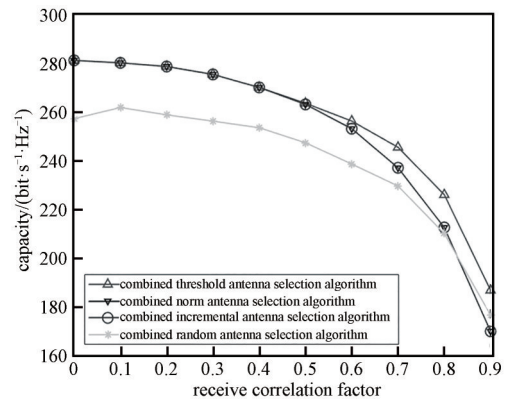


Fig.3 Correlation factor corresponding to capacity
图 3 相关系数对应容量图

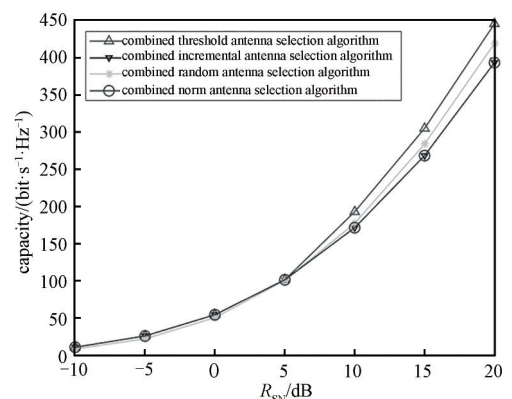


Fig.4 SNR corresponding to capacity
图 4 信噪比对应容量图

算法不能同时克服 2 种环境带来的负面影响。而收发联合阈值天线选择算法既可以克服高天线相关性的影响，又能适应不同的信噪比环境，该算法使系统具有较好的性能。

3.3 系统误码率

为测试所提算法在实际信号传输环境中的性能，对数据传输的误码率进行仿真。假设信噪比范围为 $-10\sim 10$ dB，收发两端的天线相关系数为 0.8，收发两端天线数为 256 根，选择天线数均为 128 根，系统进行 5 000 次循环，每次循环发送的数据量为 400，总数据量为 2×10^6 ，图 5 为信噪比与误码率的关系曲线图。

从图 5 中可以看出随着信噪比的增加，不同算法对应的误码率逐渐下降。收发联合阈值天线选择算法在不同信噪比条件下使系统保持了较低的误码率。天线之间的高相关性导致递增算法的误码率最差。与递增算法在信噪比为 10 dB 时的误码率约为 1×10^{-5} 相比较，阈值算法的误码率约为 1×10^{-6} 。收发联合阈值天线选择算法降低了天线相关性的负面影响并具有较低的误码率，同时，通过该算法选择出的天线子矩阵能够更好地满足系统数据的传输需求。

4 结论

本文针对大规模 MIMO 系统，提出了收发联合阈值天线选择算法。在发送端使用最大范数双向天线选择算法进行天线选择，在每个循环中同时选择对容量最大和最小的两根天线，与其他算法相比，该算法有效降低了计算复杂度并且保持了系统性能。在发射端使用阈值天线选择算法进行天线选择，该算法通过设定天线相关性阈值或信噪比阈值来选择递增算法或分组 maxvol 算法来进行天线选择，通过这种方式，能够在降低天线相关性、保持系统性能的同时降低计算复杂度。

在大规模 MIMO 系统的接收端和发射端，通过联合上述的天线选择算法，通过仿真和推导证明了收发联合阈值天线选择算法是一种高适应性算法，在不同天线相关性和信噪比环境下性能均能保持稳定。阈值算法在天线相关度较高时具有较强的抗干扰能力，降低了天线选择过程中的计算复杂度，系统传输误码率较低，因此该算法适用于实际的通信系统。

参考文献：

- [1] ANDREWS J G, BRINK S T, DEBBAH M. Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: how many antennas do we need? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2): 160–171.
- [2] 迟盛. 大规模 MIMO 天线选择关键技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017. (CHI Sheng. Research on key technology of massive MIMO antenna selection [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.)
- [3] RUSEK F, PERSSON D, LAU B K, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 30(1): 20–60.
- [4] 汪鹏. 大规模 MIMO 系统能效问题研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2017. (WANG Peng. Research on energy efficiency of massive MIMO system [D]. Nanjing, China: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.)
- [5] AI B, CHENG X, KURNER T. Challenges toward wireless communications for high-speed railway [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2014, 15(5): 2143–2158.
- [6] AI B, CHENG X, RUPP M. Future railway services-oriented mobile communications network [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 53(10): 78–85.
- [7] SILJAK H, MACALUSO I, MARCHETTI N. Distributing complexity: a new approach to antenna selection for distributed massive MIMO [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2018, 7(6): 902–905.
- [8] QIAN Kun, WANG Wenqin, SHAO Huaizong. Low-complexity transmit antenna selection and beamforming for large-scale MIMO communications [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2014, 35(4): 1–11.
- [9] 刘留, 迟盛, 刘凯, 等. 大规模 MIMO 系统中的双向搜索天线选择算法 [J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(5): 56–62. (LIU Liu, CHI Sheng, LIU Kai, et al. Antenna selection algorithm for bidirectional search in massive MIMO system [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(5): 56–62.)

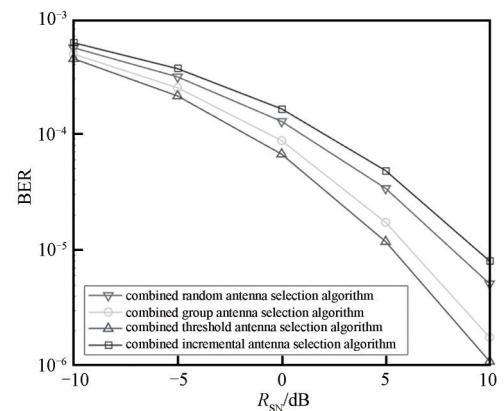


Fig.5 Relationship between SNR and BER
图 5 信噪比与误码率关系图

- [10] 徐宇阳. 大规模 MIMO 系统中的天线选择技术研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2018. (XU Yuyang. Research on antenna selection technology in massive MIMO system[D]. Wuhan,China:Huazhong University of Science and Technology, 2018.)
- [11] GKIZELI M,KARYSTIONS G N. Maximum-SNR antenna selection among a large number of transmit antennas[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014,8(5):891-907.
- [12] 李国民,李亚如,李新民,等. 一种改进的大规模 MIMO 发射天线选择算法[J]. 电讯技术, 2019,59(4):395-400. (LI Guomin,LI Yaru, LI Xinmin, et al. An improved transmit antenna selection algorithm for massive MIMO systems[J]. Telecommunication Engineering, 2019,59(4):395-400.)
- [13] SANAVEI S,NOSRATINIA A. Antenna selection in MIMO systems[J]. IEEE Communication Magazine, 2004,42(10):68-73.
- [14] VISWANATHAN H, VENKATESAN S, HUANG H. Downlink capacity evaluation of cellular networks with known-interference cancellation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004,21(5):802-811.

作者简介:

苏 佳(1981-), 女, 石家庄市人, 副教授, 博士, 研究生导师, 主要研究方向为无线通信、信号处理.
email:sujia@hebust.edu.cn.

李 薇(1996-), 女, 河北省邯郸市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、车辆跟踪技术.

夏 雨(1996-), 男, 石家庄市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向无线通信、大规模 MIMO 系统天线选择技术.

勘 正

因作者投稿注册时的疏忽, 导致个人信息填写有误, 现予以勘正。

《太赫兹科学与电子信息学报》2022年第5期第457页:

作者简介: 杜 晓(1988-), 男, 博士, 高级工程师。应为: 杜 晓(1988-), 男, 本科, 工程师。