



一种新型低复杂度双层分组天线选择算法

张沛昌¹, 安万年¹, 钟世达¹, 黄磊¹, 庄春生², 张伟²

(1. 深圳大学电子与信息工程学院, 广东 深圳 518000;

2. 河南省科学院应用物理研究所有限公司, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对平坦相关瑞利衰落信道环境下的端到端大规模 MIMO 系统复杂度过高的问题, 提出一种基于离散布谷鸟搜索的低复杂度双层分组天线选择算法。该算法首先基于天线信道相关性对大规模天线阵列进行分组处理, 进而利用新型双层算法对分组的的天线集合进行优化天线选择。其中, 新型双层算法的第一层是每小组天线基于离散布谷鸟搜索的内部选择, 第二层是对第一层选择的所有天线利用离散布谷鸟搜索进行最终的选择。提出的新型天线选择算法可有效降低大规模 MIMO 系统复杂度。仿真结果验证了在平坦相关瑞利衰落信道环境下, 提出的天线选择算法能够以较低选择复杂度获得接近最优选择方法的容量性能和较优的 BER 性能。

关键词: 大规模 MIMO; 分组天线选择; 离散布谷鸟搜索; 低复杂度

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021111

A novel low-complexity two-tier group antenna selection algorithm

ZHANG Peichang¹, AN Wannian¹, ZHONG Shida¹, HUANG Lei¹, ZHUANG Chunsheng², ZHANG Wei²

1. College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, China

2. Institute of Applied Physics, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450002, China

Abstract: Aiming at the high complexity of the end-to-end massive MIMO systems in flat correlated Rayleigh fading channel environments, a low-complexity two-tier group antenna selection algorithm based on discrete cuckoo search was proposed. The algorithm firstly grouped large-scale antenna arrays based on the correlation of antenna channels, and then used a new two-tier algorithm to optimize antenna selection for the grouped antenna sets. The first layer of the new two-tier algorithm was the internal selection of each group of antennas based on discrete cuckoo search, and

收稿日期: 2020-12-25; 修回日期: 2021-05-10

通信作者: 安万年, 1914852893@qq.com

基金项目: 广东省普通高校“服务乡村振兴战略”重点领域专项 (No.2019KZDZX2014, No.2020ZDZX1037); 国家自然科学基金资助项目 (No.61601304, No.U1713217, No.U1501253, No.61801297, No.61801302); 深圳市基金资助项目 (No.JCYJ20170302142545828); 深圳大学科研启动项目 (No.2019119)

Foundation Items: The Foundation of Guangdong Key Areas of “Service for Rural Revitalization Plan” (No.2019KZDZX2014, No.2020ZDZX1037), The National Natural Science Foundation of China (No.61601304, No.U1713217, No.U1501253, No.61801297, No.61801302), The Foundation of Shenzhen (No.JCYJ20170302142545828), The Foundation of Shenzhen University Scientific Research Start Project (No.2019119)



the second layer was the final selection of all antennas selected by the first layer using discrete cuckoo search. The novel antenna selection algorithm could effectively reduce the complexity of large-scale MIMO systems. The simulation results verify that the antenna selection algorithm can obtain the capacity performance close to the optimal selection method and better BER performance with lower selection complexity under the flat correlated Rayleigh fading channel environments.

Key words: massive MIMO, group antenna selection, discrete cuckoo search, low complexity

1 引言

作为 5G 移动通信系统的关键技术之一,大规模 MIMO (multiple-input multiple-output, 多输入多输出) 无线通信技术因其能够在不增加带宽的情况下成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率而受到广泛关注^[1-3]。然而,在大规模 MIMO 系统中,所有天线始终处于激活状态,每根天线对应的信息流需要单独使用一条射频链路,天线数量的增加直接带来射频链路数量的增加。特别是在未来 B5G,甚至 6G 通信系统中,为满足通信巨流量 (Tbit/s)、巨连接 (千万级) 需求,基站天线阵列规模预计将十倍于现有 5G 大规模 MIMO 系统,这无疑极大地加剧了 MIMO 系统复杂度^[2-3]。

AS (antenna selection, 天线选择) 作为一种能够有效控制 MIMO 系统复杂度和硬件成本的技术,能够在有限的射频链路数量情况下,在 MIMO 通信系统的发射端和接收端基于一定的准则选择得到信道质量较优的天线用于发射信号和接收信号。这样既降低了射频链路成本和系统功率消耗,同时又能最大限度地发挥 MIMO 通信技术的优势。通常,AS 有 NBAS (norm-based antenna selection, 基于范数的天线选择) 和 CBAS (capacity-based antenna selection, 基于容量的天线选择) 两种优化准则。其中,NBAS 是通过选择具有最高信道增益的天线子集以获得最大等效信噪比^[4-5];而 CBAS 是选择具有最高信道容量特性的天线子集^[6-7]。在实际应用场景中,由于 MIMO 终端设备物理尺寸往往是有限的,所以天线之间

的相关性不可避免。在信道相关的条件下,NBAS 通常会经历严重的性能损失,这是因为基于范数选择的具有高信道增益的天线之间往往具有较高的信道相关性,从而导致相应的 MIMO 性能损失;与 NBAS 方案相比,CBAS 方法以优化所选的天线子集的容量性能为目的,并且受信道相关性的影响较低^[8-10]。因此,在信道相关的 MIMO 系统中,特别是在信道相关的大规模 MIMO 系统中,CBAS 方法通常更具优势。然而,最优的 CBAS 的实现方式是遍历搜索的方式,其运算复杂度随着天线阵列规模扩大而急剧升高,这将显著增加系统的计算复杂度。因此,研究计算复杂度较低的次优 CBAS 方案更具有实际意义。参考文献[11-13]提出增量逐次选择算法来寻找发射天线和接收天线的最佳集合。该算法首先从一组空的选择天线集合开始,然后在每个步骤中,将对系统容量贡献最大的天线添加到选择天线集合中,并重复此过程,直到选定所需的天线数量。参考文献[14]研究了一种基于迭代的天线选择算法,该算法是在容量减少较少的情况下,降低了天线选择的复杂性。另外,参考文献[15]提出了更加有效的基于分支定界的 AS 算法,其选择速度比基于遍历搜索算法要快很多。然而,上述这些算法都是基于独立信道这个前提条件的,都不太适合信道高度相关的大规模 MIMO 系统,因为在大规模 MIMO 系统中,它们可能导致非常高的计算复杂度和明显的性能损失。

CS (cuckoo search, 布谷鸟搜索) 算法作为一种新颖的启发式优化算法,由 Yang 等^[16]于 2009 年提出,该算法通过模仿布谷鸟的寄生育种

过程来解决优化问题。相对于经典的群智能优化算法如鱼群优化^[17]和粒子群优化^[18], CS 算法具有显著的高效性。CS 算法的高效性主要来源于两个关键的搜索策略: 全局随机搜索策略和局部随机搜索策略。鉴于 CS 算法能够简单高效地解决优化问题, 众多学者对其进行了研究, 提出了多种改进的 CS 算法, 并应用于多种工程优化问题。参考文献[19]为了进一步提高算法的适应性, 将反馈引入算法框架, 建立了 CS 算法参数的闭环控制系统。将 Rechenberg 的 1/5 法则作为进化的评价指标, 引入学习因子平衡种群的多样性和集中性, 提出动态适应布谷鸟搜索算法。参考文献[20]针对当前智能算法对股票市场预测精度不高的问题, 提出使用布谷鸟算法优化神经网络的方法, 对股票市场进行有效预测。参考文献[21]为解决当前图像分割算法对噪声鲁棒性差的缺陷, 改善图像分割的效果, 设计基于改进 CS 算法的图像分割方法, 使分割精度和速度均能满足实际应用需求。参考文献[22]提出了改进的 CS 算法, 将其应用于某梯级水库优化调度问题中, 并通过实例验证了布谷鸟算法在梯级水库优化调度中的可行性和有效性。但到目前为止, 鲜有将布谷鸟搜索算法用于 AS 方面的研究。

在上述背景下, 本文在平坦相关瑞利衰落信道环境下创新性地提出了一种适用于大规模 MIMO 系统的基于 DCS (discrete cuckoo search, 离散布谷鸟搜索) 算法的低复杂度双层分组 AS 算法。该 AS 系统包含天线相关性分组、天线初级选择、天线高级选择 3 个部分。其中, 该算法首先基于天线相关性对大规模天线阵列进行分组处理; 其次, 天线初级选择部分是利用 DCS 算法从分组的天线集合选择多个天线; 最后, 天线高级选择部分再利用 DCS 算法从初级部分选出的天线集合中选择最终需要的多个天线。相应的仿真结果表明, 在平坦相关瑞利衰落信道环境下的大规模 MIMO 系统中, 提出的 AS 系统能够以较低

的选择复杂度获得接近最优的容量性能和较优的 BER (bit error rate, 误码率) 性能。

2 系统模型

本文考虑一个处于平坦相关瑞利衰落信道环境中的端到端大规模 MIMO 系统。在此系统中, 发射端配备 N_T 根发射天线和 L_t ($L_t \leq N_T$) 条射频链路, 接收端配备 N_R 根接收天线和 L_r ($L_r \leq N_R$) 条射频链路。此外, 笔者考虑了系统发射端的信道相关性并假设接收端拥有充足的散射条件。该系统的平坦相关瑞利衰落信道模型 $H \in C^{N_R \times N_T}$ 如下:

$$H = GR_t^{1/2} \quad (1)$$

其中, $G \in C^{N_R \times N_T}$ 表示平坦瑞利衰落信道矩阵, 其元素均为独立同分布且服从 $CN(0,1)$ 的复高斯随机分布; $R_t \in C^{N_T \times N_T}$ 表示发射端的信道相关系数矩阵, 采用了其对应的指数模型^[23]:

$$R_t(l_1, l_2) = \rho_t^{|l_1 - l_2|} \in (0, 1] \quad (2)$$

其中, $l_1, l_2 \in \{1, 2, \dots, N_T\}$, ρ_t 表示发射端天线信道相关系数。在上述条件下, 接收信号向量 $y \in C^{N_R \times 1}$ 可以表示为^[24]:

$$y = Hx + v \quad (3)$$

其中, $x \in C^{N_T \times 1}$ 为发射信号向量, $v \in C^{N_R \times 1}$ 是加性高斯白噪声向量且元素服从 $CN(0, \sigma_n^2)$ 。

3 AS 优化问题和 AS 算法

3.1 AS 优化问题

前面已经说明在信道相关的大规模 MIMO 系统中, CBAS 算法由于受信道相关性影响较小, 其性能通常优于 NBAS 算法。因此, 本文选择基于容量最大化作为优化准则。对于一个配备了 N_T 根发射天线和 N_R 根接收天线的 MIMO 系统来说, 其系统的信道容量可以由式 (4) 计算得到^[25]:



$$C = \text{lb} \left[\det \left(I_{N_R} + \frac{P}{N_T \sigma_n^2} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right] \quad (4)$$

其中, P 表示发射总功率, 而 $\mathbf{H}^H$ 代表信道矩阵 $\mathbf{H} \in C^{N_R \times N_T}$ 的共轭转置。 I_{N_R} 表示 $N_R \times N_R$ 单位矩阵。在已知信道状态信息的情况下, 发射端可以通过遍历搜索的方式从 N_T 根发射天线中选择 L_t 根发射天线得到信道矩阵 $\mathbf{H} \in C^{N_R \times N_T}$ 的具有最优容量的信道子集 $\mathbf{H}_{\max}$:

$$\mathbf{H}_{\max} = \arg \max_{s_r \in S} \left\{ \text{lb} \left[\det \left(I_{N_R} + \frac{P}{N_T \sigma_n^2} \mathbf{H}_{s_r} (\mathbf{H}_{s_r})^H \right) \right] \right\} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{H}_{s_r} \in C^{N_R \times L_t}$ 是信道矩阵 $\mathbf{H} \in C^{N_R \times N_T}$ 的一个子集, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_r, \dots, s_\lambda\}$ 代表 N_T 根发射天线中所有可能选择的 L_t 根发射天线的索引组合 ($\lambda = N_T! / [L_t! (N_T - L_t)!]$), 且 $s_r \in C^{1 \times L_t}$ 。通过上述遍历搜索方式虽然可以得到容量最优的信道子集, 但是其对应的选择复杂度相对较高, 尤其是随着天线规模的不断增大, 遍历搜索的复杂度急剧升高。因此, 基于遍历搜索的 AS 方案在大规模 MIMO 系统中可行性较低。针对此问题, 本文在平坦相关瑞利衰落信道环境下创新性地提出了一种适用于大规模 MIMO 系统的基于 DCS 算法的快速分组 AS 系统, 从而实现以较低的容量损失为代价来明显地降低 AS 的复杂度的目的。

3.2 基于 DCS 的 AS 算法

经典 CS 算法^[16]通过模拟布谷鸟的寄生孵化习性可以有效地解决连续优化问题。经典 CS 算法的高效性主要来源于两个关键的搜索策略: 全局随机搜索策略和局部随机搜索策略。其中, 全局随机搜索策略是基于莱维飞行方式搜索得到新解。解集的更新计算式如下:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \alpha \varepsilon, i \in \{1, 2, \dots, z\} \quad (6)$$

其中, X_i^t 表示第 t 代解集的第 i 个解, z 表示解集的大小, α 是步长缩放因子, 用于控制步长的搜索范围, 通常 $\alpha = 1$; ε 是遵从如下莱维分布^[26]

的随机步长:

$$\varepsilon = \frac{u}{|\theta|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (7)$$

其中, u 和 θ 均是服从正太分布的变量, 如下:

$$u \sim N(0, \delta^2), \theta \sim N(0, 1)$$

$$\delta = \left\{ \frac{\Gamma(1 + \beta) \sin \frac{\pi \beta}{2}}{\beta \Gamma\left(\frac{1 + \beta}{2}\right) 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

其中, Γ 是标准伽马函数, 此外, $\beta \in (0, 2)$, 一般情况下 $\beta = 1.5$ ^[20, 26]。在按一定的概率 (发现概率: $pa \in [0, 1]$) 丢弃部分解之后, 局部随机搜索策略表示如下:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \gamma h(pa - \phi)(X_i^t - X_k^t) \quad (9)$$

其中, γ 和 ϕ 是服从均匀分布的随机数, $h(x)$ 是跳跃函数, X_j^t 和 X_k^t 是其他任意两个解。

由于经典的 CS 算法能够有效解决连续优化问题, 然而大规模 MIMO 系统中的 AS 是离散的组合优化问题, 所以经典的 CS 算法无法直接应用于解决此问题。这里笔者对经典的 CS 算法进行了相应的离散化改进, 创新性地提出了一种能够用于信道相关条件下的大规模 MIMO 系统中 AS 的 DCS 算法。具体来讲:

- 笔者利用天线子集的所有可能组合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_r, \dots, s_\lambda\}$ 作为算法的解空间, 任意一个组合 s_r 作为搜索过程中的一个解;
- 由于笔者解决的问题是容量最大化的优化问题, 所以这里利用天线子集的对应的信道容量 C 作为搜索过程中的适应度函数 F ;
- 由于布谷鸟搜索在更新解的过程中产生的是实数组解, 笔者所需要的是整数组合解, 所以对产生的新解 $s'_r(i)$ ($i \in \{1, 2, \dots, L_t\}$) 采用了向下取整的操作:

$$s'_r(i) = \lfloor s'_r(i) \rfloor \in \{1, 2, \dots, N_T\} \quad (10)$$

- 解的更新过程具有随机性, 经过取整操作后的解 s'_r 对应的天线组合里会有重复的天线索引出现, 所以对取整后的解 s'_r 进行了如下的去重操作:

$$\begin{cases} \text{若 } s'_r(i) = s'_r(j), j \in \{1, 2, \dots, L_t\} \text{ 且 } i \neq j \\ \text{令 } s'_r(j) = k, k \in \{1, 2, \dots, N_T\} \text{ 且 } k \notin s'_r \end{cases} \quad (11)$$

基于 DCS 的 AS 算法详细计算步骤如下。

输入 随机初始化大小为 N_T 的解集 $T = \{s_1, s_2, \dots, s_r, \dots, s_{N_T}\}$ ($s_r \in C^{1 \times L_t}$), 并计算解集 T 中每个解的适应度 $F(s_r)$;

迭代过程:

步骤 1 在解集 T 的基础上, 利用式 (6)、式 (10) 和式 (11) 产生大小为 N_T 的新解集 $T' = \{s_1, s_2, \dots, s'_r, \dots, s'_{N_T}\}$ ($s'_r \in C^{1 \times L_t}$), 并计算每个新解的适应度 $F(s'_r)$;

步骤 2 遍历比较解集 T 和解集 T' 的适应度, 如果 $F(s_r) \geq F(s'_r)$, 则将 s_r 放入新解集 T'' 中, 否则将 s'_r 放入新解集 T'' 中, 得到新解集 $T'' = \{s_1'', s_2'', \dots, s_r'', \dots, s_{N_T}''\}$;

步骤 3 在解集 T'' 的基础上, 利用式 (9)、式 (10) 和式 (11) 产生大小为 N_T 的新解集 $T''' = \{s_1''', s_2''', \dots, s_r''', \dots, s_{N_T}'''\}$ ($s_r''' \in C^{1 \times L_t}$), 并计算每个新解的适应度 $F(s_r''')$;

步骤 4 遍历比较解集 T'' 和解集 T''' 的适应度, 如果 $F(s_r'') \geq F(s_r''')$, 则将 s_r'' 放入新解集 T'''' 中, 否则将 s_r''' 放入新解集 T'''' 中, 得到新解集 $T'''' = \{s_1'''', s_2'''', \dots, s_r'''', \dots, s_{N_T}'''\}$;

步骤 5 找出新解集 T'''' 中取得最高的适应度 $F_{\max}$, 判断是否满足终止条件 (式 (12)), 若满足则结束循环, 若不满足, 则令 $T = T''''$, 并返回步骤 1, 直至满足要求。其中, $C_{\max}$ 表示遍历搜索得到的最优子集容量。

$$F_{\max} \geq (C_{\max} - 0.05 \text{ bit} / (\text{s} \cdot \text{Hz})) \quad (12)$$

输出 新解集 T'''' 中取得最高适应度 $F_{\max}$ 的解 s_r'''' 。

综上所述, DCS 算法与经典 CS 算法的主要区别在于 DCS 算法的解的搜索空间是由离散的天线索引组合构成的集合, 以及 DCS 算法对经典 CS 算法的全局随机搜索策略和局部随机搜索策略的结果进行了量化和去重操作, 使原本的随机实数值变为对应天线索引的整数值。此外, DCS 算法利用近似最优的天线子集容量作为结束搜索的条件, 这充分保证该算法的搜索得到的天线子集的性能。

基于 DCS 的 AS 算法是一个循环迭代的过程, 它的选择复杂度主要由计算适应度函数的次数决定。由于 DCS 算法在每次迭代中需要计算 $2N_T$ 次适应度函数, 可得出 DCS 算法每次迭代的选择复杂度为 $O(N_T)$ 。表 1 进一步列出了在 $\rho_t = 0.98$ 、 L_t 和 N_T 取不同值时, DCS 算法所需要的迭代次数 N 。其中, 迭代次数 N 是利用 1 000 个信道样本循环实验得到的。由表 1 可以明显地看出: $L_t = 2$ 时, DCS 算法总共大约需要计算 $2N_T N_{L_t=2}$ 次适应度函数, 其中 $N_{L_t=2}$ 为远小于 N_T 的数, 故 DCS 算法的选择复杂度为 $O(N_T)$; $L_t = 4$ 时, DCS 算法总共大约需要计算 $2N_T^2$ 次适应度函数, 故 DCS 算法的选择复杂度为 $O(N_T^2)$ 。相比之下, $L_t = 4$ 时, 最优的遍历搜索算法的选择复杂度为:

$$O\left\{\frac{N_T!}{4!(N_T-4)!}\right\} = O(N_T^4) \gg O(N_T^2) \gg O(N_T) \quad (13)$$

由上述分析可以看出, 基于 DCS 的 AS 算法的选择复杂度远低于遍历搜索算法的选择复杂度; 同时可以发现, L_t 越小, 其对应的基于 DCS 的 AS 算法的选择复杂度越低。

3.3 基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法

从第 3.2 节的论述可以看出, 基于 DCS 的 AS 算法能够达到遍历搜索算法的性能, 且能够有效地降低遍历搜索算法的选择复杂度。但由表 1 以及选择复杂度式 (13) 能够看出, 随着选择天线

表 1 $\rho_t = 0.98$ 、 L_t 和 N_T 取不同值时对应的

DCS 算法的迭代次数 N				
N_T	16	32	64	128
$N_{L_t=4}$	15	30	62	125
$N_{L_t=2}$	1	3	7	12

数 L_t 的增加, 基于 DCS 的 AS 算法的选择复杂度会有数量级的增加。因此, 在 L_t 较大时, 为了能在保持基于 DCS 的 AS 算法性能的同时, 进一步降低基于 DCS 的 AS 算法的选择复杂度, 本文创新性地提出了基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法。算法如图 1 所示, 该算法由天线信道相关性分组、天线初级选择、天线高级选择 3 个部分组成。

在大规模 MIMO 阵列中, 信道的相关性会对 MIMO 系统的通信性能产生很大的影响。在天线选择中为了降低平坦瑞利衰落信道的相关性带来的影响, 笔者对发射天线阵列采用了基于天线信道相关性的分组, 使得分组后的每小组内的天线信道相关性较高, 不同组之间的天线信道相关性较低。发射天线分组的执行过程如下。

步骤 1 利用如下的信道相关性计算式来计算不同发射天线对应的平坦瑞利衰落信道间的相关性 $\mathbf{cor}_{i1,i2}$:

$$\mathbf{cor}_{i1,i2} = \frac{h_{i1}^H h_{i2}}{\|h_{i1}\|_2 \|h_{i2}\|_2} \quad (14)$$

其中, $h_{i1} \in C^{N_R \times 1}$ 表示第 $i1$ 根发射天线对应的平坦瑞利衰落信道, $\|h_{i1}\|_2$ 表示 h_{i1} 的欧几里得范数。

步骤 2 找出信道相关性矩阵 $\mathbf{cor} \in C^{N_T \times N_T}$ 中最小的元素对应的两根发射天线的索引 n_1 和 n_2 , 把两根天线分别放置在两个不同的空天线集合 ST_1 和 ST_2 中, 剩余天线构成天线集合 ST_0 。

步骤 3 从 ST_0 中找到与 ST_1 中天线的平均相关性最大的天线加入 ST_1 中, 更新 ST_0 。

步骤 4 从 ST_0 中找到与 ST_2 中天线的平均相关性最大的天线加入 ST_2 中, 更新 ST_0 。

步骤 5 重复步骤 3、步骤 4, 直至 ST_0 变成空集。

步骤 6 如果需要划分更多的组, 则对划分好的每个天线子集重复步骤 1~5, 直至满足要求。

基于 DCS 的双层分组 AS 算法执行过程如下。

步骤 1 发射天线的信道相关性分组部分: 利用前面所述的基于信道相关性的发射天线分组算法把发射天线分成 K 组。

步骤 2 发射天线的初级选择部分: 对每一组天线利用 DCS 算法搜索出 2 ($L_t < 2K$) 根性能较好的发射天线, 并按分组前的次序构成新的

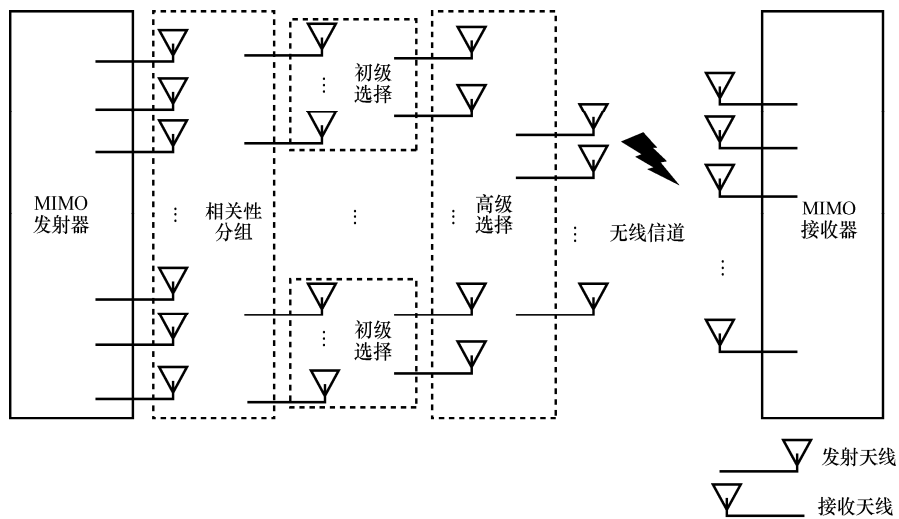


图 1 基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法

发射天线组合。

步骤 3 发射天线的高级选择部分：对步骤 2 得到的新的天线组合再次利用 DCS 算法搜索出最终需要的 L_t 根容量性能较优的发射天线。

基于 DCS 的双层分组 AS 算法选择复杂度分析：此 AS 算法的选择复杂度主要集中于天线的初级选择和高级选择部分。在天线初级选择部分， K 组的 DCS 搜索需要的总的计算适应度函数的次数为 $2N_1N_T$ ，其中每组需要的计算适应度函数的次数为 $N_1(2N_T/K)$ ；在天线高级选择部分，DCS 算法搜索 L_t 根天线需要的计算适应度函数的次数为 $2N_2N_T$ ，故天线选择系统需要的总的计算适应度函数的次数为 $2(N_1 + N_2)N_T$ ，其中， N_1 、 N_2 分别为初级选择部分每组天线需要的 DCS 的迭代次数和高级选择部分需要的 DCS 的迭代次数，由表 1 可以明显地看出 N_1 、 N_2 均远小于 N_T ，所以基于 DCS 算法的双层分组 AS 系统的选择复杂度可以表示为：

$$O(2(N_1 + N_2)N_T) = O(N_T) \ll O(N_T^2) \quad (15)$$

由式 (15) 可知，基于 DCS 的双层分组 AS 算法的选择复杂度要远小于 DCS 算法的选择复杂度，且接近于 NBAS 算法的选择复杂度 $O(1)$ 。

4 性能仿真分析

在本节中，首先，配置了 N_T 根发射天线、 L_t 条发射射频链、 N_R 根接收天线、 L_r 条接收射频链以及发射端平坦相关瑞利衰落信道的相关性系数为 ρ_t 的 MIMO 系统，统一采用 $(N_T, L_t, N_R, L_r, \rho_t)$ 来表示。仿真过程中，工作频点为 2.65 GHz，信道带宽为 50 MHz，调制方式为 BPSK (binary phase shift keying，二进制移相键控)，在接收端配置了 $N_R = 16$ 根天线和 $L_r = 16$ 条接收射频链。然后，以接近最优的 DCS 算法作为参照，分析了在 ρ_t 、 L_t 和 N_T 变化的情况下，提出的基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的通信性能。此外，还将基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法和 NBAS

算法的通信性能进行了对比分析。在仿真图中，基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法由 CBG DCS 简化表示。

图 2 分析了在 (128, 4, 16, 16, 0.5) MIMO 系统、(128, 4, 16, 16, 0.98) MIMO 系统和 (128, 2, 16, 16, 0.98) MIMO 系统中，以 DCS 算法作为参照，在信道相关系数 ρ_t 以及选择天线数 L_t 变化时，提出的基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的容量性能。从图 2 可以明显地看出，随着 SNR (signal to noise ratio，信噪比) 由低到高的变化，无论是在高相关的情况 ($\rho_t = 0.98$) 还是低相关的情况 ($\rho_t = 0.5$)，无论是选 $L_t = 4$ 根天线还是选 $L_t = 2$ 根天线，基于 DCS 的双层分组 AS 系统均能达到和 DCS 算法近似相同的容量性能。

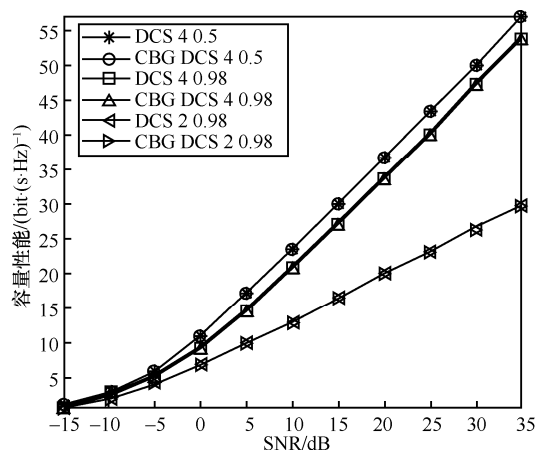


图 2 在 (128, 4, 16, 16, 0.5) MIMO 系统、(128, 4, 16, 16, 0.98) MIMO 系统和 (128, 2, 16, 16, 0.98) MIMO 系统中 DCS 算法与基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的容量性能比较

图 3 展示了在 (128, 4, 16, 16, 0.98) MIMO 系统和 (64, 4, 16, 16, 0.98) MIMO 系统中，以 DCS 算法为参照，系统发射天线数 N_T 变化时，提出的基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的容量性能。由图 3 可以容易地看出，随着 SNR 由低到高的变化，无论是在 $N_T = 128$ 时还是在 $N_T = 64$ 时，基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的容量性能均和 DCS 算法的容量性能一直非常接近。由此可以得出，当信道高度相关 $\rho_t = 0.98$ 时，基于 DCS 的低复杂度双层分组



AS 算法均能获得近似最优的容量性能, 且此性能基本不受 MIMO 系统发射天线规模 N_T 的影响。

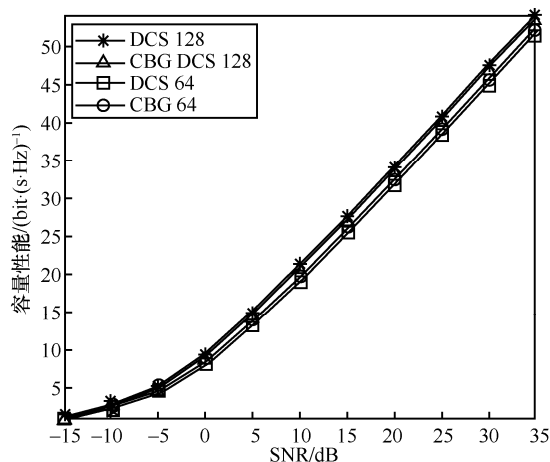


图3 在 (128,4,16,16,0.98) MIMO 系统和 (64,4,16,16,0.98) MIMO 系统中 DCS 算法与基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的容量性能比较

图 4 显示了在 (128,4,16,16,0.98) MIMO 系统中, DCS 算法、NBAS 算法以及基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的容量性能比较。从图 4 中可以明显地看出, 在信道高度相关的大规模 MIMO 系统中, 基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的容量性能要明显优于 NBAS 算法的容量性能, 比如, 在 $\text{SNR} = 25 \text{ dB}$ 处, 基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法与 DCS 算法的容量性能仅相差约 $0.52 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$, 而 NBAS 算法与 DCS 算法的容量性能却相差约 $10.11 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。

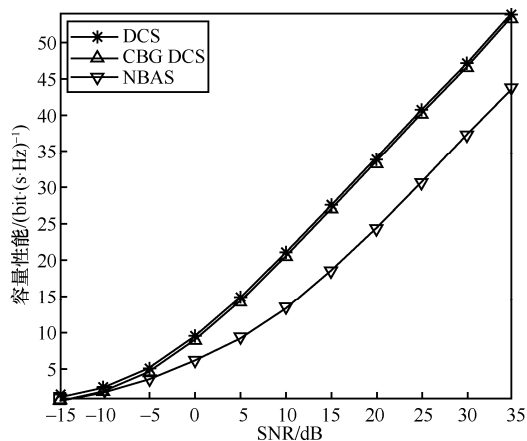


图4 在 (128,4,16,16,0.98) MIMO 系统中 DCS 算法、NBAS 算法和基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的容量性能比较

图 5 则给出了在 (128,4,16,16,0.98) MIMO 系统中, DCS 算法、NBAS 算法以及基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的 BER 性能比较。通过图 5 可以清楚地看出, 在信道高度相关的大规模 MIMO 系统中, 基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的 BER 性能与 DCS 算法的 BER 性能非常接近, 同时, 又明显优于 NBAS 算法的 BER 性能。例如, 在 $\text{SNR} = 2 \text{ dB}$ 时, DCS 算法获得的 BER 约为 1.56×10^{-6} , 基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法获得的 BER 约为 6.25×10^{-6} , 而 NBAS 算法获得的 BER 却高达约为 9.57×10^{-2} 。

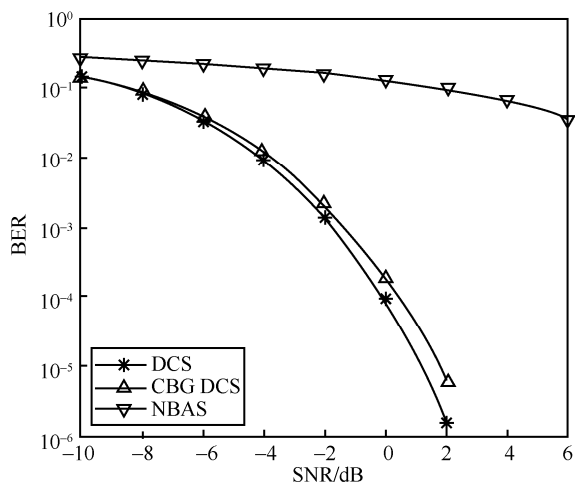


图5 在 (128,4,16,16,0.98) MIMO 系统中 DCS 算法、NBAS 算法和基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法的 BER 性能比较

5 结束语

针对在平坦相关瑞利衰落信道环境下的端到端大规模 MIMO 系统复杂度以及成本过高的问题, 本文创新性地提出了基于 DCS 算法的低复杂度双层分组 AS 算法, 有效降低大规模 MIMO 系统的复杂度及实现成本, 为其在未来 5G 以及 6G 通信中的进一步应用提供有效理论技术支撑。相应的仿真结果验证了在平坦相关瑞利衰落信道环境下, 提出的基于 DCS 的低复杂度双层分组 AS 算法能够获得接近最优的容量性能和较优的 BER 性能, 同时 AS 的选择复杂度能够保持在明显较低的水平。

参考文献:

- [1] SANGUINETTI L, BJÖRNSON E, HOYDIS J. Toward massive MIMO 2.0: understanding spatial correlation, interference suppression, and pilot contamination[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(1): 232-257.
- [2] ZHANG J Y, BJÖRNSON E, MATTHAIIOU M, et al. Prospective multiple antenna technologies for beyond 5G[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1637-1660.
- [3] ZHANG J Y, BJÖRNSON E, MATTHAIIOU M, et al. Guest editorial special issue on multiple antenna technologies for beyond 5G-part—I[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1633-1636.
- [4] ZHANG P C, CHEN S, HANZO L. Two-tier channel estimation aided near-capacity MIMO transceivers relying on norm-based joint transmit and receive antenna selection[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(1): 122-137.
- [5] ZHANG P C, XU J J, ZHONG S D, et al. Design of reconfigurable SDR platform for antenna selection aided MIMO communication system[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 169267-169280.
- [6] WANG X N, XIAO L M, ZHANG Y, et al. Measurement-based massive MIMO antenna selection in indoor office scenario at 3.52 GHz[C]//*Proceedings of 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 573-577.
- [7] DEOTALE N, KOLEKAR U, HENDRE V. Ergodic capacity based antenna selection in MIMO for Rayleigh fading[C]//*Proceedings of 2015 International Conference on Information Processing (ICIP)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 317-321.
- [8] AL-HUSSAIBI W A, ALI F H. Receive antenna selection for uplink multiuser MIMO systems over correlated Rayleigh fading channels[C]//*Proceedings of 2011 The 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [9] TAI T H, CHUNG W H, LEE T S. A low complexity antenna selection algorithm for energy efficiency in massive MIMO systems[C]//*Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 284-289.
- [10] TAI T H, CHEN H J, CHUNG W H, et al. Energy efficient norm-and-correlation-based antenna selection algorithm in spatially correlated massive multi-user MIMO systems[C]//*Proceedings of 2017 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPS)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [11] BLUM R S, XU Z M, SFAR S. A near-optimal joint transmit and receive antenna selection algorithm for MIMO systems[C]//*Proceedings of 2009 IEEE Radio and Wireless Symposium*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 554-557.
- [12] SANAYEI S, NOSRATINIA A. Capacity maximizing algorithms for joint transmit-receive antenna selection[C]//*Proceedings of Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. Piscataway: IEEE Press, 2004: 1773-1776.
- [13] CHEN C E. A computationally efficient near-optimal algorithm for capacity-maximization based joint transmit and receive antenna selection[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(5): 402-404.
- [14] YUVARAJ R, NITHYANANDAN L, EMMANUEL N J. Capacity enhancement with reduced complex receiver antenna selection algorithm for MIMO MC-CDMA system in mobile WiMAX networks[C]//*Proceedings of 2015 Conference on Power, Control, Communication and Computational Technologies for Sustainable Growth (PCCCTSG)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 267-272.
- [15] GAO Y, VINCK H, KAISER T. Massive MIMO antenna selection: switching architectures, capacity bounds, and optimal antenna selection algorithms[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(5): 1346-1360.
- [16] YANG X S, DEB S. Cuckoo search via lévy flights[C]//*Proceedings of 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 210-214.
- [17] 吴亚萍, 董红召, 林盈盈, 等. 混沌改进鱼群算法及其在工业控制网络异常检测中的应用[J]. *电信科学*, 2020, 36(3): 27-33.
WU Y P, DONG H Z, LIN Y Y, et al. Improved fish swarm algorithm based on chaos and its application in abnormal detection of industrial control network[J]. *Telecommunications Science*, 2020, 36(3): 27-33.
- [18] ELHADY G F, TAWFEEK M A. A comparative study into swarm intelligence algorithms for dynamic tasks scheduling in cloud computing[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Seventh International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 362-369.
- [19] 张永韡, 汪镭, 吴启迪. 动态适应布谷鸟搜索算法[J]. *控制与决策*, 2014, 29(4): 617-622.
ZHANG Y W, WANG L, WU Q D. Dynamic adaptation cuckoo search algorithm[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(4): 617-622.
- [20] 孙晨, 李阳, 李晓戈, 等. 基于布谷鸟算法优化 BP 神经网络模型的股价预测[J]. *计算机应用与软件*, 2016, 33(2): 276-279.
SUN C, LI Y, LI X G, et al. Stock forecasting model based on optimising BP neural network with cuckoo search[J]. *Computer Applications and Software*, 2016, 33(2): 276-279.
- [21] 朱浩亮, 李光平. 基于改进布谷鸟搜索算法的图像分割[J]. *计算机工程与设计*, 2018, 39(5): 1428-1432.
ZHU H L, LI G P. Image segmentation based on improved cuckoo search algorithm[J]. *Computer Engineering and Design*, 2018, 39(5): 1428-1432.
- [22] 明波, 黄强, 王义民, 等. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(3): 341-349.



- MING B, HUANG Q, WANG Y M, et al. Cascade reservoir operation optimization based-on improved cuckoo search[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3): 341-349.
- [23] MI D, DIANATI M, MUHAIDAT S, et al. A novel antenna selection scheme for spatially correlated massive MIMO up-links with imperfect channel estimation[C]//Proceedings of 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [24] ZHANG P C, CHEN S, HANZO L. Reduced-complexity near-capacity joint channel estimation and three-stage turbo detection for coherent space-time shift keying[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(5): 1902-1913.
- [25] LEE W C Y. Estimate of channel capacity in Rayleigh fading environment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1990, 39(3): 187-189.
- [26] 王李进, 尹义龙, 钟一文. 逐维改进的布谷鸟搜索算法[J]. 软件学报, 2013, 24(11): 2687-2698.
- WANG L J, YIN Y L, ZHONG Y W. Improved cuckoo search algorithm by dimension[J]. Journal of Software, 2013, 24(11): 2687-2698.

[作者简介]



张沛昌(1987-), 男, 博士, 深圳大学电子与信息工程学院讲师、硕士生导师, 主要研究方向为天线选择、相干和非相干检测、迭代检测和信道估计。



安万年(1995-), 男, 深圳大学电子与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为 MIMO 无线通信、协同通信、天线选择、机器学习。



钟世达(1985-), 男, 博士, 深圳大学电子与信息工程学院讲师、硕士生导师, 主要研究方向为测试设计、天线选择、联合算法和硬件协同设计、FPGA 以及下一代信道编码系统的 ASIC 实现。



黄磊(1975-), 男, 博士, 深圳大学电子与信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为谱估计、阵列信号处理、统计信号处理、以及它们在雷达和无线通信系统中的应用。

庄春生(1969-), 男, 河南省科学院应用物理研究所有限公司研究员, 主要研究方向为计算机应用及新材料。

张伟(1984-), 男, 河南省科学院应用物理研究所有限公司高级工程师, 主要研究方向为电子电路。