

毫米波大规模 MIMO 系统中基于智能搜索的混合预编码算法

何雪云 钱 旻 梁 彦

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏南京 210003)

摘 要: 为解决传统全连接结构毫米波大规模 MIMO 系统高硬件成本和实现难度大的问题, 本文提出了一种基于智能搜索的部分连接结构混合预编码算法。该算法在基站端采用经典的迫零数字预编码, 在模拟预编码部分单独设计模拟预编码矩阵, 避免了数字、模拟预编码矩阵联合设计的高复杂度, 并利用模拟预编码矩阵的块对角化特性, 将其设计问题转化为最优化问题, 采用 SBO(satin bowerbird optimization)优化算法解决此问题。针对原始 SBO 算法易陷入局部最优的缺点, 提出了一种基于动态突变概率的 DSBO(satin bowerbird optimization based on dynamic mutation probability)算法。针对移相器分辨率有限的情况, 改进了 DSBO 算法, 使之能解决此离散优化问题。仿真结果表明, 与其他现有算法相比, 提出的算法具有更高的系统容量和更低的误码率, 且能处理移相器分辨率有限的情况。

关键词: 部分连接; 毫米波; 大规模 MIMO; 混合预编码; SBO 优化; 动态突变概率

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2019.11.007

引用格式: 何雪云, 钱旻, 梁彦. 毫米波大规模 MIMO 系统中基于智能搜索的混合预编码算法[J]. 信号处理, 2019, 35(11): 1826-1834. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2019.11.007.

Reference format: He Xueyun, Qian Yang, Liang Yan. A Hybrid Precoding Algorithm Based on Intelligent Search in Millimeter Wave Massive MIMO Systems[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(11): 1826-1834. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2019.11.007.

A Hybrid Precoding Algorithm Based on Intelligent Search in Millimeter Wave Massive MIMO Systems

He Xueyun Qian Yang Liang Yan

(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: In order to solve the problem of high hardware cost and difficult implementation in traditional fully connected millimeter wave massive MIMO systems, a partially connected hybrid precoding scheme based on intelligent search algorithm is proposed. In this algorithm, the classical zero-forcing digital precoding scheme is used at the base station, and the analog precoding matrix is designed separately in the part of analog precoding, which avoids the high complexity of the joint design of the digital and analog precoding matrix. After that, the block diagonalization property of analog precoding matrix is made use of to transfer the problem of designing analog precoding matrix to the problem of optimization, which is to be solved by Satin Bowerbird Optimization. Aiming at making up the shortcoming of original SBO in searching global optimum, an algorithm called DSBO is proposed. In the case that phase shifters' resolution is limited, DSBO is improved to solve this discrete optimization problem. The simulation results show that the scheme proposed presents competitive system capacity as

well as a relatively low bit error rate, and is able to handle the case that phase shifters' resolution is limited.

Key words: partially connection; millimeter wave; massive MIMO; hybrid precoding; satin bowerbird optimization; dynamic mutation probability

1 引言

毫米波通信工作在 30 ~ 300 GHz 频率范围,能够获得很高的带宽^[1],极大地提高了通信系统的传输速率,成为 5G 的关键技术之一^[2]。毫米波较小的波长使在小孔径内装配大量天线成为可能,由此产生的阵列增益可以弥补毫米波的路径损耗,利用这一特点,毫米波大规模 MIMO 系统在基站端应用了大天线阵列,从而允许了多数据流的传输,使得系统有更高的数据传输速率^[4]。在毫米波大规模 MIMO 系统中,预编码技术^[5]利用信道的状态信息,在发射端调整发射策略,接收端进行均衡,使用户更好地获得天线复用增益,提高了系统容量。由于“虚拟天线阵列”与 MIMO 系统的多天线阵列间的相似性,有文献研究了预编码技术在使用中继的协同通信系统中的应用^[6-10],即利用中继与终端和基站间的信道状态信息,设计最优中继预编码方案,提高了频谱效率,降低了中继总功率。

在数字预编码技术中,所需要的射频链路数与发送天线数相等^[5],导致其应用在大规模 MIMO 系统中时有很高的射频链路成本和硬件损耗。为了解决此问题,文献[11]提出了一种纯模拟预编码方案,该方案用廉价、低耗的移相器代替了数字预编码中的射频链路。但是,由于移相器只能控制发射信号的相位,此方案的性能会大大低于数字预编码。为了平衡硬件成本与系统的性能,文献[12-18]相继提出了混合预编码方案。此方案在基带进行低维的数字预编码,并通过少量的射频链路与移相器相连,有效地减少了基站端硬件成本。传统的混合预编码方案基于全连接结构^[12-14],此结构能充分利用天线的增益,但同时需要大量的移相器和相加器,导致系统硬件成本和功耗很高。针对此问题,有文献[15-18]研究了基于部分连接结构的混合预编码方案,即每个射频链路通过移相器固定地与有限数量的发送天线相连,大大地减少了所需移相器的数量,并且不需要相加器,降低了硬件损耗和实现复杂度,但是由于这种结构的限制,预编码矩阵

将受限于块对角矩阵的形式,从而性能上会低于全连接结构。文献[15]提出了一种基于 SIC(Successive Interference Cancellation,持续干扰消除法)的部分连接混合预编码方案,该方案将数字预编码矩阵预先设计为对角阵,以系统可达和速率为目标函数,得到最终的预编码矩阵。此种方案性能较优,但是存在射频链路数等于用户数的限制,因此在实际应用上有较大的局限性。文献[18]提出了一种基于 BSA(Bird Swarm Algorithm,鸟群算法)的部分连接结构混合预编码方案,该方案通过对移相器的相位进行搜索来设计模拟预编码矩阵,破除了射频数等于用户数的限制,并且考虑了移相器有限分辨率的情况,但是算法本身的性能较差。

针对文献[18]算法性能差的问题,本文提出了一种基于部分连接结构的混合预编码算法。传统的迫零预编码(Zero-Forcing, ZF)技术在消除用户间干扰上有很好的效果^[5],因此本文在基带数字预编码部分采用迫零预编码,在模拟预编码部分单独设计模拟预编码矩阵。本文将使系统可达和速率最大的条件作为目标函数,以模拟移相器的相位作为目标变量,采用 SBO(satin bowerbird optimization)算法对此问题进行寻优,求得预编码矩阵。Satin Bowerbird Optimization^[22]是 2017 年 Seyyed Hamid Samareh Moosavi 等人受缎蓝园丁鸟求偶行为的启发而提出的群体智能搜索算法,该算法在求解高维复杂函数上被验证比传统的粒子群算法、萤火虫算法等有更高的搜索精度。然而现有的 SBO 算法有易陷入局部最优,收敛速度慢的缺点,针对这一问题,本文提出一种基于动态突变概率的 SBO 改进算法,即 DSBO(satin bowerbird optimization based on dynamic mutation probability)算法。最后,针对模拟移相器分辨率有限的情况,本文进一步改进了 DSBO 算法,使其能够解决此离散优化问题。仿真结果表明,本文算法的性能大大优于文献[11]和文献[18]的性能,验证了其有效性。

符号说明: $(\cdot)^T$ 、 $(\cdot)^H$ 、 $(\cdot)^*$ 、 $(\cdot)^{-1}$ 分别表示矩阵的转置、共轭转置、共轭、逆, $\|\cdot\|_F$ 、 $\text{tr}(\cdot)$ 分别表示取矩

阵的F-范数、迹, $|\cdot|$ 表示取模, \mathbf{I}_K 表示 $K \times K$ 的单位矩阵。

2 系统模型

2.1 系统模型

本文的研究基于下行多用户毫米波大规模 MIMO 系统,混合预编码结构采用部分连接方式,如图1所示。发射机配置 N 个射频链路,每个射频链路固定地连接 M 个移相器,发射天线数 $N_t = MN$,发送数据流为 N_s ,接收天线数为 K 。发射机首先通过数字预编码器对 N_s 个数据流进行数字预编码,接着通过射频链路将数据流传输到模拟预编码部分进行模拟预编码,并映射到发射天线上传输至接收天线。

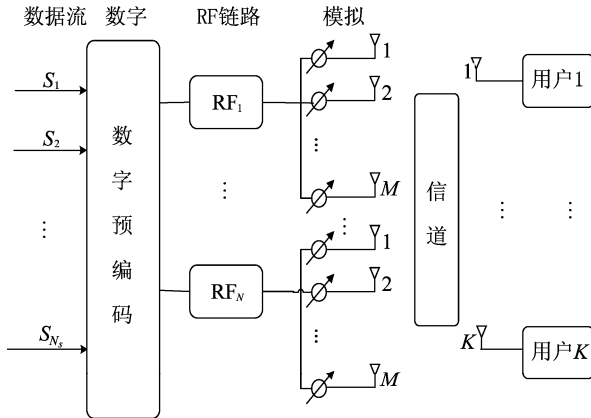


图1 部分连接毫米波大规模 MIMO 系统

Fig. 1 Millimeter-wave massive MIMO system with partially connected structure

此系统中,用户接收信号 $\mathbf{y} \in \mathbf{C}^{K \times 1}$ 可以表示如下:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{s} \in \mathbf{C}^{N_s \times 1}$ 为发送信号,满足 $N_s \leq N$; $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K]^T \in \mathbf{C}^{K \times MN}$ 为信道矩阵,这里假设 \mathbf{H} 矩阵已通过用户侧下行信道估计和信道状态反馈过程得到; $\mathbf{F}_{RF} \in \mathbf{C}^{MN \times N}$ 为模拟预编码矩阵,形式为 $\mathbf{F}_{RF} = \text{diag}\{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_N\}$,其中 $\mathbf{f}_n \in \mathbf{C}^{M \times 1}$, $n = 1, 2, \dots, N$, $|\mathbf{f}_n| = \frac{1}{\sqrt{M}}$, f_{ni} 表示向量 \mathbf{f}_n 中的第 i 个元素, $i = 1, 2, \dots, M$; $\mathbf{F}_{BB} = [\mathbf{f}_1^{BB}, \mathbf{f}_2^{BB}, \dots, \mathbf{f}_{N_s}^{BB}] \in \mathbf{C}^{N \times N_s}$ 为数字预编码矩阵,其中 $\mathbf{f}_n^{BB} \in \mathbf{C}^{N \times 1}$, $n = 1, 2, \dots, N_s$, 本文 \mathbf{F}_{BB} 由 ZF 预编码算法求得; $\mathbf{n} \in \mathbf{C}^{K \times 1}$ 表示加性高斯白噪声,即 \mathbf{n}

$\sim \text{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_K)$, σ^2 表示方差。 \mathbf{F}_{RF} 与 \mathbf{F}_{BB} 满足总发射功率约束,即 $\|\mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB}\|_F^2 = N_s$ 。

2.2 信道模型

由于毫米波频段较高的路径损耗导致了其有限的空间选择性以及紧密排列的天线阵列产生了很高的天线相关性,因此传统的信道模型已经不适用于毫米波大规模 MIMO 系统。本文考虑毫米波大规模 MIMO 系统中常用的扩展 Saleh-Valenzuela 模型^[19-20],该模型充分地捕捉了毫米波信道的特点,信道矩阵如下所示:

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{N_t K}{L}} \sum_{i=1}^L \delta_i \boldsymbol{\alpha}_{MS}(\varphi_i) \boldsymbol{\alpha}_{BS}^H(\theta_i) \quad (2)$$

其中, N_t 为基站发送天线数, K 为接收天线数, L 为毫米波散射波束路径数, δ_i 表示第 i 条散射波束路径的增益, $\varphi_i \in [0, 2\pi]$, $\theta_i \in [0, 2\pi]$ 分别表示第 i 条路径的离开角和到达角, $\boldsymbol{\alpha}_{MS}(\varphi_i)$, $\boldsymbol{\alpha}_{BS}(\theta_i)$ 分别表示用户天线阵列响应矢量和基站天线阵列响应矢量,其表达式的形式由天线阵列的分布方式决定。常见的天线阵列有均匀线性阵列和均匀平面阵列^[21]。本文采用均匀线性阵列, $\boldsymbol{\alpha}_{MS}(\varphi_i)$, $\boldsymbol{\alpha}_{BS}(\theta_i)$ 表示如下:

$$\boldsymbol{\alpha}_{MS}(\varphi_i) = \frac{1}{\sqrt{N_s}} [1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi_i}, \dots, e^{j(K-1)\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi_i}]^T \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\alpha}_{BS}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{N_t}} [1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_i}, \dots, e^{j(N-1)\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_i}]^T \quad (4)$$

其中 λ 表示电磁波的波长, d 表示天线间的距离。

3 基于 DSBO 的混合预编码算法

3.1 目标函数

本文混合预编码系统中 K 个用户的可达和速率可由下式表示^[23]:

$$R = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \gamma_k) \quad (5)$$

其中, γ_k 是第 k 个用户的信干噪比,表示如下:

$$\gamma_k = \frac{|\mathbf{h}_k^T \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_k^{BB}|^2}{\sum_{j \neq k} |\mathbf{h}_k^T \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_j^{BB}|^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

由于本文的研究是基于部分连接结构的,因此,模拟预编码矩阵将会受限于块对角矩阵的形式,如式(7)所示:

$$\mathbf{F}_{RF} = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & f_2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & f_N \end{bmatrix}_{MN \times N} \quad (7)$$

式中,向量 $\mathbf{f}_i \in \mathbf{C}^{M \times 1}$, $i=1,2,\dots,N$ 中的元素 $f_{il} = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{j\theta_{il}}$, $l=1,2,\dots,M$ 。由此可见,模拟预编码矩阵 \mathbf{F}_{RF} 是随向量 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N_l}]$ 唯一变化的矩阵,其中元素 $\theta_j = \theta_{i+(l-1)N} = \theta_{il}$, $j=1,2,\dots,N_l$, $i=1,2,\dots,N$, $l=1,2,\dots,M$ 为第 j 个移相器的相位。本文的基带数字预编码采用了经典的迫零预编码算法,在此种情况下,系统可达和速率可以表示为下式^[18]:

$$R = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \text{snr}_k / \text{tr}(\mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{RF})^{-1}) \quad (8)$$

其中, R 代表系统可达和速率, snr_k 表示第 k 个用户的信噪比。由此式可见,系统可达和速率最大等价于 $\text{tr}(\mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{RF})^{-1}$ 达到最小值,因此将 $\text{tr}(\mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{RF})^{-1}$ 作为本文算法的目标函数,混合预编码的设计问题等价于下式表示的最优化问题:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta} &= \arg \min \text{tr}(\mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{RF})^{-1} \\ \text{s.t. } &0 < \theta_j < 2\pi, j=1,2,\dots,N_l \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 基于 SBO 算法求取最优模拟预编码矩阵

式(9)所示优化问题的搜索对象为模拟移相器角度 $\boldsymbol{\theta}$, 维度为发射天线数 N_l , 属于非线性高维优化问题。由于 SBO 算法在求解高维复杂函数问题上具有优越的性能, 本文首次提出采用 SBO 算法来解决此问题。

缎蓝园丁鸟 (satin bowerbird) 生长于澳大利亚东部的森林, 在求偶时, 雄缎蓝园丁鸟会建造一种凉亭状物来吸引配偶。在 SBO 算法中, 凉亭对应优化问题的目标变量, 缎蓝园丁鸟的模仿和攻击行为分别对应目标变量的移动规则和突变规则。本文将函数 $\text{tr}(\mathbf{F}_{RF}^H \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{RF})^{-1}$ 作为 SBO 算法的目标函数, 搜索对象 $\boldsymbol{\theta}$ 作为 SBO 算法的目标变量, 最后以搜索到的最优向量 $\boldsymbol{\theta}$ 生成模拟预编码矩阵。根据 SBO 算法的规则, 以 SBO 算法求取本文模拟预编码矩阵的过程如下所示:

输入: nPop: 初始的 $\boldsymbol{\theta}$ 方案数, MaxIt: 最大迭代次数, \mathbf{H} : 信道矩阵, pMutation: 突变概率, N_l : 向量 $\boldsymbol{\theta}$ 的维度, K : 接收天线数, snr: 信噪比。

步骤 1 初始化凉亭: 当前迭代次数 $t=0$, 随机生成 nPop 个维度为 N_l 的 $\boldsymbol{\theta}$ 向量, 记为 $\boldsymbol{\theta}_i^0$ ($1 \leq i \leq \text{nPop}$)。计算每个 $\boldsymbol{\theta}$ 对应的目标函数值 ζ_i , 即 $\zeta_i^0 = \text{tr}(\mathbf{F}_{RF}(\boldsymbol{\theta}_i^0)^H \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{RF}(\boldsymbol{\theta}_i^0))^{-1}$ 。

步骤 2 用 ζ_i 来计算 nPop 个凉亭的适应度, 适应度越大, 凉亭对雌鸟的吸引力越大。当 $t < \text{MaxIt}$ 时, 根据式(10)、(11) 计算 $\boldsymbol{\theta}_i^t$ ($1 \leq i \leq \text{nPop}$) 的适应度 prob_i^t 。

$$\text{prob}_i^t = \frac{f_i}{\sum_{n=1}^{\text{nPop}} f_n} \quad (10)$$

$$f_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + \zeta_i^t}, & \zeta_i^t \geq 0 \\ 1 + |\zeta_i^t|, & \zeta_i^t < 0 \end{cases} \quad (11)$$

步骤 3 根据上步的计算结果选出当前迭代的 nPop 个凉亭中最吸引雌鸟的凉亭, 即适应度最大的方案, 将其作为当前最佳方案, 记为 $\boldsymbol{\theta}_j$, 为其他雄鸟建造凉亭提供经验和正确的方向。

步骤 4 雄鸟在建造凉亭时会通过模仿历史最佳凉亭以及当前最佳凉亭来改善自己的凉亭。根据这一特点, 按照记录下的历史最佳方案和当前最佳方案的合方向移动 $\boldsymbol{\theta}_i^t$, 将 $\boldsymbol{\theta}_i^t$ 代入式(12) 得到 $\boldsymbol{\theta}_i^{t+1}$ 。在雄鸟忙于建造凉亭时, 它们可能受到其他动物的攻击行为, 因此, 在迭代的过程中, 需要对 $\boldsymbol{\theta}_i^t$ 依概率施加一定的突变, 如果 $\text{rand} < \text{pMutation}$ (rand 表示区间 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数), 则将 $\boldsymbol{\theta}_i^t$ 代入式(14) 计算, 得到施加突变后的方案。

$$\boldsymbol{\theta}_{ik}^{t+1} = \boldsymbol{\theta}_{ik}^t + \lambda_k \left(\left(\frac{\boldsymbol{\theta}_{jk} + \boldsymbol{\theta}_{\text{elite},k}}{2} \right) - \boldsymbol{\theta}_{ik}^t \right) \quad (12)$$

其中,

$$\lambda_k = \frac{\alpha}{1 + \text{prob}_j} \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\theta}_{ik}^{t+1} = \boldsymbol{\theta}_{ik}^t + \delta \times \mathcal{N}(0, 1) \quad (14)$$

其中,

$$\delta = z \times (\text{var}_{\max} - \text{var}_{\min}) \quad (15)$$

其中, $\boldsymbol{\theta}_{ik}^t$ 、 $\boldsymbol{\theta}_{ik}^{t+1}$ 分别表示当前迭代中 $\boldsymbol{\theta}_i^t$ 的第 k 个元素和变化后的新方案 $\boldsymbol{\theta}_i^{t+1}$ 的第 k 个元素, $\boldsymbol{\theta}_{\text{elite},k}$ 、 $\boldsymbol{\theta}_{jk}$ 分别表示历史最佳方案 $\boldsymbol{\theta}_{\text{elite}}$ 和当前最佳方案 $\boldsymbol{\theta}_j$ 的第 k 个元素, prob_j 表示当前最佳方案 $\boldsymbol{\theta}_j$ 的适应度值, var_{\max} 、 var_{\min} 分别表示向量 $\boldsymbol{\theta}$ 中每个元素的上限和下限, 在本文问题中分别为 2π 、0, α 、 z 分别为常数

0.94、0.02,与文献[22]一致, $N(0,1)$ 表示服从标准正态分布的随机数。

步骤5 根据目标函数值评估 nPop 个既得方案,保留表现更好的 θ 向量,记录为 θ_{elite} 。当 $t < \text{MaxIt}$ 时, $\zeta_i^{t+1} = \text{tr}(\mathbf{F}_{RF}(\theta_i^{t+1})^H \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{RF}(\theta_i^{t+1}))^{-1}$, 如果 $\zeta_i^t < \zeta_i^{t+1}$, 则 $\theta_i^{t+1} = \theta_i^t$ 。 $\theta_{\text{elite}} = \theta_i^{t+1}$ 。迭代次数 $t = t + 1$, 当迭代次数小于 MaxIt 时, 返回步骤2, 否则进入步骤6。

步骤6 当达到最大迭代次数后, 以 θ_{elite} 生成模拟预编码矩阵。即 $f_{il} = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{j\theta_{il}}$, $i = 1, 2, \dots, N$, $l = 1, 2, \dots, M$ 。则 $\mathbf{F}_{RF} = \text{diag}\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$, 将其代入式(8)得到系统可达和速率 R 。

输出 \mathbf{F}_{RF} : 模拟预编码矩阵, R : 系统可达和速率。

3.3 基于动态突变概率的 SBO 改进算法 (DSBO 算法)

原始的 SBO 算法在求解高维复杂函数时有易陷入局部最优的缺点, 即全局搜索能力较差。针对这一问题, 本文提出了一种基于动态突变概率的 DSBO 算法。在原始的 SBO 算法中, 使算法有一定全局搜索能力的是 3.2 节步骤 4 中搜索对象 θ 向量依概率 pMutation 突变的环节, 因此, 突变概率的大小决定了算法的全局搜索和局部搜索能力。考虑到算法在前中期的迭代过程中需要更广的搜索范围, 在迭代后期需要更强的局部搜索能力, 本文将突变概率 pMutation 从固定值改为随迭代次数非线性下降的变量, 遵循式(16):

$$\text{pMutation}(n) = \text{pMutation}_{\max} - (\text{pMutation}_{\max} - \text{pMutation}_{\min}) \times \exp(-6 \times (\frac{\text{MaxIt} + 1 - n}{\text{MaxIt}})) \quad (16)$$

其中, $\text{pMutation}(n)$ 表示第 n 次迭代时 pMutation 的取值, pMutation_{\max} 、 pMutation_{\min} 分别表示最大和最小突变概率, 本文分别取为 1/8、1/30, MaxIt 为最大迭代次数, exp 表示以自然常数为底的指数函数。

3.4 移相器相位离散的情况

以上内容都是基于模拟移相器分辨率无限的情况, 而分辨率无限的模拟移相器成本相对较高。因此, 本节在以上分析的基础上进一步研究移相器分辨率受限制的问题。若移相器为 B bit 量化, 整数

集合 $\mathbf{S} = \{0, 1, \dots, 2^B - 1\}$, 则移相器相位的取值范围为:

$$\theta_n \in \Omega_B, \Omega_B = \left\{ \frac{2\pi m}{2^B}; m \in \mathbf{S} \right\}, n = 1, 2, \dots, N_i \quad (17)$$

由上式可见, $\theta_n = \frac{2\pi m_n}{2^B}$ 是关于正整数变量 m_n , $m_n \in \mathbf{S}$ 的函数, 记为 $\theta_n = f(m_n)$, 原优化问题(9) 转变为关于向量 $\mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_{N_i}]$ 的离散优化问题, 而 DSBO 算法无法解决离散变量的优化问题, 因此, 本文对 DSBO 算法进一步改进, 使之能解决该离散优化问题, 并称之为离散 DSBO 算法, 具体改进如下:

(1) 在初始化时, 不再随机产生 θ_i , $i \in [1, \text{nPop}]$, 而是在集合 \mathbf{S} 内随机产生 nPop 个向量 \mathbf{m}_i , $i \in [1, \text{nPop}]$, 在后续步骤中对 \mathbf{m}_i 进行搜索。

(2) 目标函数由 $\text{tr}(\mathbf{F}_{RF}(\theta_i)^H \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{RF}(\theta_i))^{-1}$ 的形式变为 $\text{tr}(\mathbf{F}_{RF}(f(\mathbf{m}_i))^H \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{RF}(f(\mathbf{m}_i)))^{-1}$ 的形式。

(3) 将 3.2 节步骤 4 中式(12)、(14)的向量 θ 替换为向量 \mathbf{m} , 并对式中当前迭代产生的变化量进行取整运算, 保证迭代过程中 \mathbf{m}_i 的元素为整数值, 如(18)、(19)所示:

$$m_{ik}^{t+1} = m_{ik}^t + \text{round}(\lambda_k ((\frac{m_{ik}^t + m_{\text{elite},k}}{2}) - m_{ik}^t)) \quad (18)$$

$$m_{ik}^{t+1} = m_{ik}^t + \text{round}(\delta \times N(0, 1)) \quad (19)$$

其中, $\text{round}(\cdot)$ 表示四舍五入取整运算。

经过上述改进, 离散 DSBO 算法迭代结束后可求得最优整数值向量 \mathbf{m} , 则最优 $\theta = f(\mathbf{m}) = \frac{2\pi \mathbf{m}}{2^B}$, 代入 3.2 节步骤 6 中可得移相器离散情况下的模拟预编码矩阵以及系统可达和速率。

4 复杂度分析

从 3.2 节内容可见, 本文算法的复杂度主要来自于 $\zeta_i = \text{tr}(\mathbf{F}_{RF}(\theta_i)^H \mathbf{H}^* \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{RF}(\theta_i))^{-1}$ 的计算。此式在每次迭代过程中会被计算两次, 即计算 prob_i^t 和 ζ_i^{t+1} 。因此, 在算法达到最大迭代次数 MaxIt 时, 总的复杂度可以表示为 $O(2n \text{PopMaxIt} N_i N^2)$ 。其中, 射频链路数 N 的值通常较小, 并且下节将会说明 nPop、MaxIt 的取值不必很大, 所以本文算法的复杂度是可以接受的。文献[18]算法的复杂度可以表

示为 $O(\text{pop}TN_iN^2)$, 其中 pop 、 T 分别表示文献[18]算法的初始种群数和最大迭代次数, 由此可见, 本文算法复杂度与文献[18]算法复杂度处于同一量级。

5 仿真分析

为了验证算法的有效性, 将本文算法与以下算法作对比: (1) 纯数字 ZF 预编码; (2) 文献[24]的全连接结构混合预编码; (3) 文献[11]的纯模拟预编码; (4) 文献[18]基于 BSA 算法的部分连接结构混合预编码, 主要性能指标为系统可达和速率以及误码率。仿真采用单小区毫米波大规模 MIMO 系统模型, 发射信号采用 QAM 调制, 具体仿真参数和算法参数如表 1 示。

表 1 仿真参数
Tab. 1 Simulation parameters

参数	参数值
毫米波波束的散射体数	10
基站发射功率/W	1
DSBO、SBO、BSA 初始种群数	50
DSBO、SBO、BSA 最大迭代次数	250
SBO 突变概率	0.05
DSBO 突变概率	[1/30, 1/8]

5.1 算法参数分析

图 2 给出了 $N_t = MN = 128, N = K = 32, \text{SNR} = 10$ dB 时系统可达和速率与本文算法初始种群数 $n\text{Pop}$ (凉亭数) 和最大迭代次数的关系, 从图中可以看

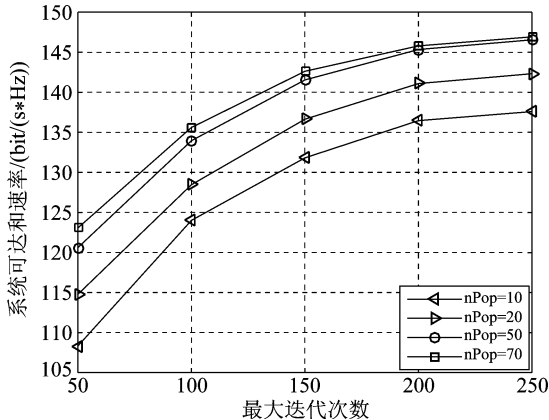


图 2 算法参数分析

Fig. 2 Analysis of parameters of the proposed algorithm

出, 当 $n\text{Pop}$ 很小时, 增加 $n\text{Pop}$ 可以明显地提高系统性能, 但是当其增加到 50 以后, 性能提升不再明显, 因此 $n\text{Pop}$ 取 50 已经足够。由图中还可见, 当最大迭代次数为 250 时, 算法已趋于收敛, 这也证明了表 2 中算法参数的合理性。

5.2 系统可达和速率性能分析

图 3、图 4 分别给出了当系统为 $N_t = MN = 128, N = K = 32$ 和 $N_t = MN = 256, N = K = 32$ 时各算法系统可达和速率的性能对比。由两图可见, 图 3 与图 4 的趋势是相似的, 即各算法性能随着信噪比和发射天线数的增加而增加, 且本文改进的 DSBO 算法性能优于原 SBO 算法性能, 两种算法性能均大大优于文献[11]和文献[18]算法的性能。另外, 当发射天线数增加到 256 时, 全连接结构性能

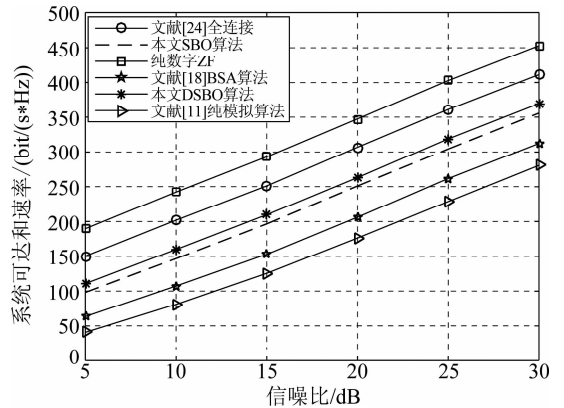


图 3 发射天线数为 128 时各算法系统可达和速率比较

Fig. 3 Rate performance comparisons for different algorithms with 128 transmitting antennas

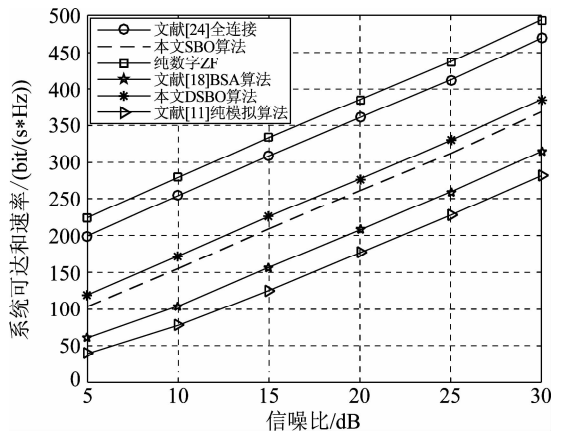


图 4 发射天线数为 256 时各算法系统可达和速率比较

Fig. 4 Rate performance comparisons for different algorithms with 256 transmitting antennas

提升明显,但其硬件复杂度远高于部分连接结构混合预编码。

图5给出了当 $N_t = MN = 200, K = 10, \text{SNR} = 10 \text{ dB}$ 时各算法系统可达和速率与射频链路数之间的关系,从图中可以看出,三种部分连接结构算法的可达和速率随着射频数的增加而增加,并最终接近全连接结构的性能。另外,本文所提两种算法的性能均优于文献[18]的算法,且本文改进的 DSBO 算法的性能优于原始的 SBO 算法。

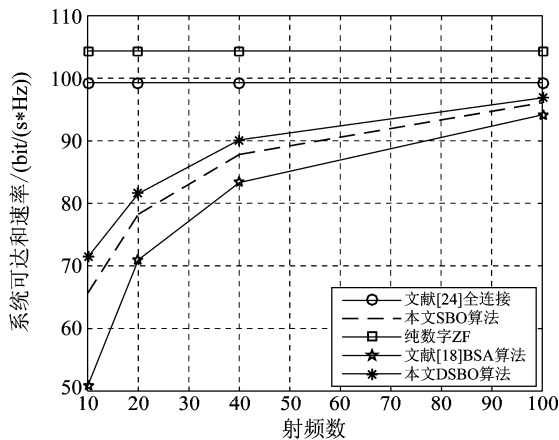


图5 不同射频数时各算法系统可达和速率比较

Fig. 5 Rate performance comparisons for different algorithms with different numbers of radio frequency

5.3 系统误码率性能分析

图6给出了当 $N_t = MN = 128, N = K = 32$ 时各算法的误码率随信噪比的变化关系。由图可见,纯数字 ZF 预编码的误码率最低,全连接结构预编码

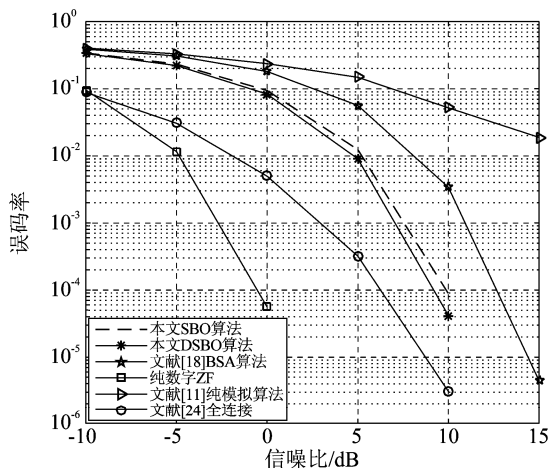


图6 各算法系统误码率比较

Fig. 6 BER performance comparisons for different algorithms

次之。由图还可见,本文 SBO 算法的误码率性能优于文献[18]算法,增益约 2.5 dB,而本文改进的 DSBO 算法误码率性能优于原始 SBO 算法,增益接近 1 dB。

5.4 移相器相位离散的情况

图7给出了 $N_t = MN = 200, N = K = 10, \text{SNR} = 10 \text{ dB}$ 时本文 DSBO 算法和改进后的离散 DSBO 算法的系统可达和速率与移相器分辨率 B/bit 的关系。由图可见,当 $B > 4$ 时,离散 DSBO 的性能已经接近移相器分辨率无限时的性能,并随着 B 的增加进一步逼近分辨率无限时的系统和速率,证明了本文改进的离散 DSBO 算法的有效性。

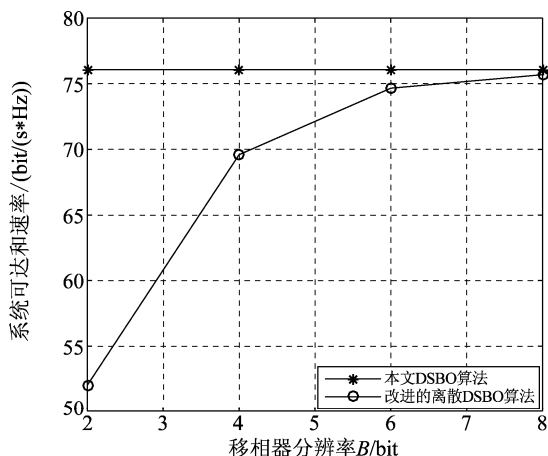


图7 移相器分辨率与系统可达和速率的关系

Fig. 7 Relation between the resolution of phase shifter and sum rate

6 结论

本文提出了一种基于部分连接的毫米波大规模 MIMO 系统的混合预编码算法。首先在基站端采用经典的迫零数字预编码的情况下,将模拟预编码矩阵的设计问题转化为最优化问题,并用 SBO 算法对此问题进行搜索;其次,在原始 SBO 算法的基础上,基于动态突变概率对其进行了改进,提出了 DSBO 算法;最后,针对移相器分辨率有限的情况,将原优化问题转化为离散优化问题,并进一步改进了 DSBO 算法,使其能解决此问题。仿真结果表明,本文提出的 DSBO 算法的系统可达和速率性能以及误码率性能优于原始 SBO 算法的性能,且大大优于文

献[11]和文献[18]算法的性能。

参考文献

- [1] Bai T, Alkhateeb A, Heath R W. Coverage and capacity of millimeter-wave cellular networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 52(9): 70-77.
- [2] Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays[J]. *Signal Processing Magazine IEEE*, 2012, 30(1): 40-60.
- [3] Zhang D, Wang Y, Li X, et al. Hybridly-connected structure for hybrid beamforming in mmWave massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(2): 662-674.
- [4] Sheldon C, Seo M, Torkildson E, et al. Four-channel spatial multiplexing over a millimeter-wave line-of-sight link[C] // *IEEE International Microwave Symposium Digest*, 2009: 389-392.
- [5] Axel M, Abla K, Emil B, et al. Linear precoding based on polynomial expansion: reducing complexity in massive MIMO[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking*, 2016, 2016(1): 63.
- [6] Li C, Yang H J, Sun F, et al. Multiuser overhearing for cooperative two-way multi-antenna relays[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(5): 3796-3802.
- [7] Li C, Zhang S, Liu P, et al. Overhearing protocol design exploiting intercell interference in cooperative green networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(1): 441-446.
- [8] Li C, Liu P, Zou C, et al. Spectral-efficient cellular communications with coexistence one-and two-hop transmissions[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 6765-6772.
- [9] Li C, Sun F, John M, et al. Energy efficient MIMO relay transmissions via joint power allocations[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2014, 61(7): 531-535.
- [10] Li C, Yang H J, Sun F, et al. Adaptive overhearing in two-way multi-antenna relay channels[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2016, 23(1): 117-120.
- [11] Ayach O E, Heath R W, Rajagopal S, et al. Multimode precoding in millimeter wave MIMO transmitters with multiple antenna sub-arrays[C] // *IEEE Global Communications Conference*, 2013:3476-3480.
- [12] Ayach O E, Rajagopal S, Abu-Surra S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(3): 1499-1513.
- [13] 申敏, 徐浩, 何云, 等. 毫米波 MIMO 系统中迭代最小均方误差混合波束成形算法[J]. *电信科学*, 2017, 33(8): 77-84.
Shen M, Xu H, He Y, et al. Alternating minimum mean square error hybrid beamforming algorithm in mmwave MIMO system[J]. *Journal of Telecommunications Science*, 2017, 33(8): 77-84. (in Chinese)
- [14] Cui M, Zou W. Low complexity joint hybrid precoding for millimeter wave MIMO systems[J]. *China Communications*, 2019, 16(2): 49-58.
- [15] Dai L, Gao X, Quan J, et al. Near-optimal hybrid analog and digital precoding for downlink mmWave massive MIMO systems[J]. *IEEE International Conference on Communications*, London, 2015: 1334-1339.
- [16] Chen J C. Energy-efficient hybrid precoding design for millimeter-wave massive MIMO systems via coordinate update algorithms[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 17361-17367.
- [17] Xu Z, Han S, Pan Z, et al. Alternating beamforming methods for hybrid analog and digital MIMO transmission[C] // *IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2015: 1595-1600.
- [18] 黄天宇, 马林华, 胡星, 等. 一种实用的毫米波大规模 MIMO 混合预编码算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(8): 1788-1795.
Huang T Y, Ma L H, Hu X, et al. Practical hybrid precoding algorithm for millimeter wave massive MIMO[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1788-1795. (in Chinese)
- [19] Raghavan V, Sayeed A M. Sublinear capacity scaling laws for sparse MIMO channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 57(1): 345-364.
- [20] Alkhateeb A, Ayach O E, Leus G, et al. Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(5): 831-846.
- [21] Crosswell W. Antenna theory, analysis, and design[J]. *IEEE Antennas & Propagation Society Newsletter*, 1982, 24(6): 28-29.

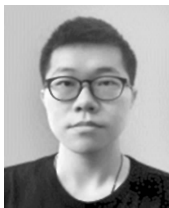
- [22] Moosavi S H S, Bardsiri V K. Satin bowerbird optimizer: a new optimization algorithm to optimize ANFIS for software development effort estimation[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017, 60(1): 1-15.
- [23] Gao X, Dai L, Sun Y, et al. Machine learning inspired energy-efficient hybrid precoding for mmwave massive MIMO systems[C]//IEEE Wireless Communications Symposium, 2017: 1-6.
- [24] Liang L, Xu W, Dong X. Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser MIMO systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 653-656.
- [25] 朱益民, 陈小敏, 方竹, 等. MIMO 多中继系统中基于不完全信道状态信息的预编码算法研究[J]. 信号处理, 2017, 33(2): 185-191.
Zhu Y M, Chen X M, Fang Z, et al. Precoding algorithm for MIMO multi-relay system with imperfect channel state information[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(2): 185-191. (in Chinese)
- [26] 周雯, 吴寅. 均值反馈下信息与能量传输系统的预编码设计[J]. 信号处理, 2018, 34(10): 1151-1159.
Zhou W, Wu Y. The precoder design in wireless information and energy transmission systems with mean feedback

[J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(10): 1151-1159. (in Chinese)

作者简介



何雪云 女, 1978 年生, 安徽铜陵人。南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 博士, 主要研究方向为宽带无线通信理论与技术、压缩感知理论与技术。
E-mail: hexy@njupt.edu.cn



钱 旻 男, 1994 年生, 江苏扬中人。南京邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为毫米波大规模 MIMO 系统中的预编码技术。
E-mail: 976131352@qq.com



梁 彦 女, 1979 年生, 河北唐山人。南京邮电大学通信与信息工程学院讲师, 博士, 主要研究方向为宽带无线通信理论与技术。
E-mail: liangyan@njupt.edu.cn