

doi:10.13682/j.issn.2095-6533.2026.05.007

采用凸优化的 massive MIMO 系统能效提升算法

张俊星¹, 李鑫¹, 刘江¹, 陈睿博², 刘哲², 黄晓俊², 李新民²

(1. 陕西延长石油巴陵素煤业有限公司, 陕西 榆林 719000; 2. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 在大规模多输入多输出 (Massive Multiple Input Multiple Output, massive MIMO) 天线阵列系统中, 为了有效降低硬件成本和系统功耗, 采取基站侧的天线选择结合预编码技术提升系统能效。首先使用凸优化算法求解按照最大化系统容量准则选取最佳天线子集问题, 然后利用半定松弛方法设计具有功率控制的最优预编码器, 该预编码器满足信漏噪比约束下最小化发射功率准则, 能够有效降低系统能耗。仿真结果表明, 所提算法在保持最大系统容量情况下随信噪比提高, 系统能耗不断降低, 如在信噪比为 20 dB 时所提的预编码器比传统的最大化信漏噪比的预编码器能耗降低 66%, 从而有效提升了系统的能效。

关键词: 大规模多输入输出; 预编码; 天线选择; 信漏噪比; 半定松弛

中图分类号: TN919.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-6533(2026)05-0074-08

Energy efficiency enhancement algorithm for massive MIMO system using convex optimization

ZHANG Junxing¹, LI Xin¹, LIU Jiang¹, CHEN Ruibo², LIU Zhe²,
HUANG Xiaojun², LI Xinmin²

(1. Shaanxi Yanchang Petroleum Balasu Coal Industry Co., Ltd., Yulin, 719000, China;

2. College of Communication and Information Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, 710054, China)

Abstract: In massive multiple input multiple output (massive MIMO) systems, antenna selection combined with precoding technology is adopted at the base station to effectively reduce hardware costs and system power consumption, thereby enhancing energy efficiency. First, a convex optimization algorithm is employed to select the optimal antenna subset under the criterion of maximizing system capacity. Subsequently, a precoder with power control is designed to minimize transmit power under the signal to leakage plus noise ratio constraint using semidefinite relaxation, which can effectively decrease the system energy consumption. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm maintains maximum system capacity while progressively reducing energy consumption as the signal to noise ratio increases. For instance, at a signal to noise ratio of 20 dB, the proposed precoder reduces energy consumption by 66% compared with the conventional maximum signal to leakage plus noise ratio precoder, confirming that the algorithm significant-

收稿日期: 2025-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(52574205); 陕西省重点研发计划项目(2022GD-TSLD-64)

通信作者: 黄晓俊, hxj@xust.edu.cn

引文格式: 张俊星, 李鑫, 刘江, 等. 采用凸优化的 massive MIMO 系统能效提升算法[J]. 西安邮电大学学报, 2026, 31(5): 74-81.

ZHANG Junxing, LI Xin, LIU Jiang, et al. Energy efficiency enhancement algorithm for massive MIMO system using convex optimization[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2026, 31(5): 74-81.

ly improves system energy efficiency.

Keywords: massive multiple input multiple output; precoding; antenna selection; signal to leakage plus noise ratio; semidefinite relaxation

在第五代(5th Generation, 5G)移动通信系统中的大规模天线阵列相比于多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统具有更多的天线阵元,能够显著提高无线链路的可靠性、传输速率和频谱效率^[1-2]。近年来,5G系统中基站的大规模天线系统阵列具有上百根天线,相比传统的多输入多输出系统能够为无线通信提供更高的空间自由度,带来大的复用增益和分集增益。但是过多的射频链路中诸如低噪声放大器、混频器和模数转换器等器件带来的较高硬件成本以及较大系统功耗。所以在基站侧的天线选择是一种有效的减少射频链路的方法,该技术既保证了多天线带来的复用或分集增益,又降低了大规模天线阵列的应用的系统功耗。同时大规模 MIMO(massive MIMO)天线阵列系统允许多用户使用同一时隙和同一频段通信,会带来用户间的同道干扰(Co-Channel Interference, CCI),基站侧的预编码技术能够有效抑制同道干扰,并且能够简化手持终端的接收复杂度保证系统容量和误码率性能。总之 massive MIMO 基站侧的天线选择和预编码技术能够有效提升系统的能量效率。

天线选择技术在保证系统获得分集增益的基础上减少所使用的射频链路,从而降低系统的能耗。目前天线选择的准则有最大化信道矩阵范数、最大化系统容量^[3]、最大化最小信道特征值^[4]等。随着发送天线数目急剧增加,为每个用户选取最佳天线的遍历搜索的方法由于计算量剧增而变得不可行。为了降低运算复杂度,凸优化方法在天线选择中得到了广泛应用,其中二次约束的二次规划^[3]、半定松弛方法^[4]在求解最佳天线中得到应用,以及一种两步选择算法被提出以降低计算复杂度^[5]。

学者们在 massive MIMO 系统能效优化技术方面已经展开了很多研究,可以结合线性与非线性预编码技术进行能效优化^[6]。由于 massive MIMO 系统天线数目巨大会带来预编码器设计的运算复杂度增加,因此对于 massive MIMO 多采用线性预编码技术进行基站侧的预处理。在设计线性预编码器的众多方法中,凸优化方法已被用于多用户 MIMO 下行链路的预编码器设计与分

析^[7-11]。当基站知道完美的信道状态信息(Channel State Information, CSI)时,可以通过二次约束二次规划(Quadratical Constrained Quadratic Program, QCQP)成功获得最优预编码器,该预编码器在满足每个用户的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)约束的同时,最小化总发射功率^[7]。此外,上述优化问题可以放松或转化为半定规划(Semidefinite Programming, SDP)^[8-9]。在文献[10-11]中,也可以通过凸优化方法获得鲁棒的预编码器,这些方法解决了与文献[7-9]中相同的目标问题。然而,由于 SINR 约束的耦合性质, SINR 约束的功率最小化解决方案仅适用于单远程天线的情况。文献[12]提出了一种称为信号与漏比(Signal to Leakage Plus Noise Ratio, SLNR)的优化度量用于线性预编码器设计。该度量将耦合的优化问题转化为完全解耦的问题,从而可以得到闭式解。

文献[13-14]提出了一种联合发射天线选择和预编码技术的算法以优化大规模天线系统的能量效率。其中文献[13]分析了联合求解在计算复杂度和能量效率的最优解,而文献[14]分析了大规模天线系统的硬件和计算复杂性的权衡折中问题。文献[15]分析了迫零(Zero Forcing, ZF)和匹配滤波(Matched Filtering, MF)两种预编码技术的性能,分析保密频谱效率、能量效率之间的权衡。文献[16]重点研究了多种线性和非线性预编码算法性能,分析比较了它们的频谱效率、能量效率性能。文献[17]提出联合信漏噪比预编码方案来优化系统获得最佳能效。发现 SLNR 比 MF 和 ZF 方案具有更高的能效。文献[18]在预编码矩阵上施加稀疏特性并利用凸优化求解最大功率约束的最佳预编码矩阵以降低运算复杂度。文献[19]分析了不同负荷时系统能耗,给出一种降低发送功率的方法。文献[20]利用神经网络进行用户能耗分配的最佳化设计。文献[21]利用量子能谷优化算法进行天线选择和功率分配的联合优化设计。文献[22]分析了各种混合预编码的结构,并且一种低复杂度的混合预编码的系统能效。文献[23]和文献[24]分析了 massive MIMO 系统最佳天线数对能效优化的影响。文献[25]分析了 massive

MIMO 系统的能效、频效以及经济效率三者之间的折中问题。文献[26]给出了利用有监督深度神经网络进行 5G 功率分配的最佳化设计。

为了对基于信漏噪比预编码方案和天线选择算法联合求系统最佳能效的方案^[27]做出改进,参照文献[27]利用天线选择算法可以提升系统容量,在此基础上,结合最大化信漏噪比预编码可以降低干扰并且减少在用户端信号处理的复杂度,从而联合优化系统的能效。首先提出一种可以兼容以上天线选择目标的统一的信号处理模型,并且给出利用凸优化得出最大化信道容量准则下的天线选择方案。然后在天线选择的基础上利用凸优化求解具有功率约束和信漏噪比约束下的最小化发射总功率的预编码方案,以此提升 massive MIMO 系统的能量效率。

1 系统模型

首先分析大规模 MIMO 系统的数学模型以及各种天线选择算法的目标问题,发送信号流可用如下矢量形式描述

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{y}$ 表示大小为 $K \times 1$ 的接收信号矢量; $\mathbf{s}$ 为发射信号矢量; $\mathbf{n}$ 是 $K \times 1$ 的零均值复高斯噪声,方差为 $\sigma_n^2 \mathbf{I}$; $\mathbf{H}$ 表示大小为 $K \times M$ 的信道矩阵。发射天线选择需要从全部 M 根发射天线中选择 N 根天线,天线选择的准则有最大化系统和容量、最大化接收信号总功率以及最小化系统误码率等。图 1 给出了大规模天线阵列系统下行链路模型。

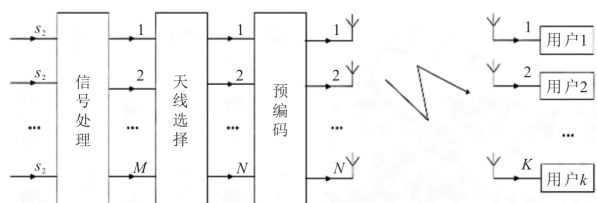


图 1 大规模天线阵列系统下行链路模型

目前天线选择的准则有最大化信道矩阵范数、最大化系统容量^[3]、最大化最小信道特征值^[4]等,其对应的设计目标函数分别为 $\max_{\mathbf{Y}} \text{trace}(\mathbf{H}^H \mathbf{Y} \mathbf{H})$ 、 $\max_{\mathbf{Y}} \log_2 \det(\mathbf{I}_K + \mathbf{H}^H \mathbf{Y} \mathbf{H})$ 和 $\max_{\mathbf{Y}} \lambda_{\min}(\mathbf{H}^H \mathbf{Y} \mathbf{H})$ 。其中 $\text{trace}(\cdot)$ 表示求矩阵的迹, $\det(\cdot)$ 表示矩阵的行列式,而 $\lambda_{\min}(\cdot)$ 表示矩阵的最小特征值, $\mathbf{A}^H$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 的共轭转置。

为了选择最优的天线集可以引入一个对角矩阵 $\mathbf{Y}$, 大小为 $M \times M$, 其对角元素 γ_i 只取 0 和 1 两个值, 表征第 i 根天线是否被选择(1 表示被选中, 0 表示未被选中), 即

$$\gamma_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (2)$$

同时必须满足 $\sum_{i=1}^M \gamma_i = N$, N 是选择的天线个数。引入该矩阵后, 可把需要求解的目标问题变为 $\mathbf{H}^H \mathbf{Y} \mathbf{H}$ 的操作。

比如最大化和容量算法的目标问题可以写为: $\max_{\mathbf{Y}} \log_2 \det(\mathbf{I}_K + \mathbf{H}^H \mathbf{Y} \mathbf{H})$, 最大化最小特征值的目标问题可以写为: $\max_{\mathbf{Y}} \lambda_{\min}(\mathbf{H}^H \mathbf{Y} \mathbf{H})$, 以及最大化传输信道的 F 范数(即最大化接收信号总功率)的目标问题可以写为: $\max_{\mathbf{Y}} \text{trace}(\mathbf{H}^H \mathbf{Y} \mathbf{H})$ 。这些问题均可以使用半正定松弛方法转化为典型的凸优化问题, 从而使用内点法等经典算法进行求解。

2 最大化系统和容量的天线选择

为了追求能效最大化, 首先进行天线选择时采用最大化系统和容量的天线选择准则。

最大化系统和容量的优化目标为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{Y}} \log_2 \det(\mathbf{I}_K + \mathbf{H}^H \mathbf{Y} \mathbf{H}) \\ & \text{s. t. } \sum_{i=1}^M \gamma_i = N, \gamma_i \in \{0, 1\}. \end{aligned} \quad (3)$$

对于 massive MIMO 系统天线数目较多, 在数量极大天线分组中进行遍历的搜索变得不可行, 所以使用凸优化方法来解决上述问题, 注意到 $\gamma_i \in \{0, 1\}$ 使目标问题难以解决, 放松这一约束条件, 将目标问题改为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{Y}} \log_2 \det(\mathbf{I}_K + \mathbf{H}^H \mathbf{Y} \mathbf{H}) \\ & \text{s. t. } \sum_{i=1}^M \gamma_i = N, 0 \leq \gamma_i \leq 1. \end{aligned} \quad (4)$$

这样目标问题转化为可解的凸优化问题, 使用凸优化中常用的内点算法来解决。这样求解获得的 γ_i 变成一个分数, 选择 N 个最大取值, 它们的下标代表被选取的天线。

3 预编码器的设计

在设计预编码器时, 尝试进一步降低预编码器的功耗以最大化系统能效。

本文基于已经选取的天线子集进行预编码器的设计。在考虑到预编码时,将式(1)的信号模型写为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_s \mathbf{P}_s \mathbf{n} + \mathbf{n} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{H}_s$ 是天线选择后的可用信道矩阵,大小为 $K \times N$; $\mathbf{P}$ 是线性预编码矩阵。则第 k 个用户接收到的信号可表示为

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}_{sk} \mathbf{P}_k \mathbf{d}_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_{si} \mathbf{P}_i \mathbf{d}_i + \mathbf{n}_k \quad (6)$$

式中: $\mathbf{d}_k$ 为发送给第 k 个用户的并行的 L 路数据 ($L < N$), 大小为 $L \times 1$; $\mathbf{P}_k$ 是第 k 个用户的预编码矩阵, 大小为 $N \times L$; $\mathbf{H}_k$ 是基站到第 k 个用户的信道矩阵, 大小为 $K \times N$; $\mathbf{n}_k$ 是均值为 0 方差为 1 的加性高斯白噪声矢量。由此第 k 个用户的信漏噪比可定义为^[12]

$$\rho_{\text{SLNR}_k} = \frac{\|\mathbf{H}_{sk} \mathbf{P}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{H}_{si} \mathbf{P}_i\|^2 + \sigma_n^2} \quad (7)$$

文献[12]中基于 SLNR 的预编码方案通过最大化每个用户的 SLNR 来设计最优预编码器, 本文称之为最大化 SLNR 方案。该方案是广义瑞利商的一种应用。对于第 k 个用户, 最优预编码矩阵是矩阵对 $\{\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k, M/L\sigma_n^2 \mathbf{I} + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_i^H \mathbf{H}_i\}$ 的 L 个最大广义特征向量。然而, 最大 SLNR 方案的一个缺点是, 当某些条件满足时, 每个数据流的有效信道增益可能会严重不平衡, 按照水桶原理系统的整体误码率性能较差, 另外这种方法的预编码器的功率控制是利用矢量 2 范数进行归一化处理, 并不能有效降低发射端的功耗, 进而提高系统的能效。所以提出基于每个用户信漏噪比约束下的最小化发射总功率的预编码器优化问题

$$\min_{\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_K} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{P}_k\|_2^2 \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \rho_{\text{SLNR}_k} \geq \mu_0 \quad (k=1, 2, \dots, K)$$

式中: μ_0 是 SLNR 的门限值。由于每个用户的 SLNR 只取决于该用户的预编码矢量而与其他用户的预编码矢量无关, 所以式(8)可以分解为 K 个局部优化的问题, 即

$$\min_{\mathbf{P}_k} \|\mathbf{P}_k\|_2^2 \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \rho_{\text{SLNR}_k} \geq \mu_0 \quad (k=1, \dots, K)$$

上述每个 K 目标问题都追求在各自的 SLNR 约束下最小化每个用户的发射功率。这些问题可以独立地为每个用户解决, 这比文献[7]中解决耦

合的信干噪比约束下的问题更容易。为了获得良好的误码率(Bit Error Rate, BER)性能, 可以指定较大的 SLNR 阈值 μ_0 。

当每个用户具有单个接收天线时, 每个用户的 SLNR 变成

$$\beta_{\text{SLNR}_k} = \frac{\|\mathbf{h}_{sk} \mathbf{p}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{h}_{si} \mathbf{p}_i\|^2 + \sigma_n^2} \quad (k=1, \dots, K) \quad (10)$$

式中: $\mathbf{h}_k$ 和 $\mathbf{p}_k$ 分别是每个用户的信道矢量和预编码矢量。因此式(9)目标问题可以写为

$$\min_{\mathbf{P}_k} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{P}_k\|_2^2 \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \beta_{\text{SLNR}_k} \geq \mu_0 \quad (k=1, 2, \dots, K)$$

上述问题可以通过二阶锥规划(Second Order Cone Programming, SOCP)或半定规划有效解决。将式(10)代入式(11)中可得

$$\min_{\mathbf{P}_k} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{P}_k\|_2^2 \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \|\mathbf{h}_{sk} \mathbf{p}_k\|^2 - \mu_0 \sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{h}_{si} \mathbf{p}_i\|^2 \geq \mu_0 \sigma_n^2 \quad (k=1, 2, \dots, K)$$

上述问题是一个二次约束二次规划(Quadratically Constrained Quadratic Programming, QCQP)问题。本文通过使用半定松弛(Semidefinite Relaxation SDR)方法进行求解。定义矢量 $\mathbf{w} = [\mathbf{p}_1^H \mathbf{p}_2^H \dots \mathbf{p}_K^H]^H$, 则式(12)可写为

$$\min_{\mathbf{P}_k} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{P}_k\|_2^2 \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \|\mathbf{h}_{sk} \mathbf{P}_k\|^2 - \mu_0 \sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{h}_{si} \mathbf{P}_i\|^2 \geq \mu_0 \sigma_n^2 \quad (k=1, 2, \dots, K)$$

其中, $\mathbf{Q}_k = \mathbf{h}_{sk}^H \mathbf{h}_{sk}$, $\mathbf{Q}_i = \mathbf{h}_{si}^H \mathbf{h}_{si}$, $\mathbf{C}_k = [0 \dots \mathbf{I}_k \dots 0]$ ($\mathbf{I}_k$ 是 $N \times N$ 的单位阵)。记 $\mathbf{X} = \mathbf{w} \mathbf{w}^H$, 则式(13)等价于

$$\min_{\mathbf{w}} \text{trace}(\mathbf{X}) \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \text{trace}(\mathbf{A}_k \mathbf{X}) \geq \mu_0 \sigma_n^2, \quad (k=1, \dots, K),$$

$$\mathbf{X} \geq 0, \text{rank}(\mathbf{X}) = 1.$$

其中, $\mathbf{A}_k = \mathbf{C}_k^H \mathbf{Q}_k \mathbf{C}_k - \sum_{i=1, i \neq k}^K \gamma_0 \mathbf{C}_k^H \mathbf{Q}_i \mathbf{C}_k$ 。

注意到上述关于 $\mathbf{X}$ 的秩约束不是凸的, 而其他约束都是凸的。因此, 这个问题适合采用半定松弛的形式。也就是说, 通过去掉秩为 1 的约束, 可以得到

$$\min_{\mathbf{w}} \text{trace}(\mathbf{X}) \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \text{trace}(\mathbf{A}_i \mathbf{X}) \geq \mu_0 \sigma_n^2, \quad (k=1, \dots, K), \mathbf{X} \geq 0.$$

这样上述问题就是一个标准的半定规划问题,

并且可以使用内点法的通用方法进行有效求解,常用的求解工具包有 SeDuMi 或 CVX 等^[9]。

由于采用松弛处理,通过求解上述半定规划得到的矩阵通常不会是秩为 1 的。在凸优化中,有许多方法可以逼近原始问题的最优解。本文选择以下高斯随机化过程来逼近最优解^[8],其过程如下。

1) 设 $\mathbf{X}'$ 是式(15)的解,对 $\mathbf{X}'$ 进行特征值分解,即 $\mathbf{X}' = \mathbf{U}^H \mathbf{\Sigma} \mathbf{U}$ 。

2) 随机产生 L 个高斯分布的矢量 $\xi_l (l=1, \cdots, L)$, 要求其为零均值, 方差为 $\mathbf{X}'$, 即可使 $\xi_l = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma}^{1/2} \mathbf{v}_l$ (其中 $\mathbf{v}_l$ 服从零均值, 单位方差的高斯分布) 获得。

3) 在此基础上构造 $\tilde{\mathbf{x}}_l = \xi_l \sqrt{\min_{i=1, \cdots, K} \xi_l^H \mathbf{A}_i \xi_l}$, 最后选取的最佳 $\mathbf{x}_{\text{opt}} = \tilde{\mathbf{x}}_l$ 满足 $\tilde{\mathbf{x}}_l^H \tilde{\mathbf{x}}_l$ 具有最小值。

通过高斯随机化过程获得的 $\mathbf{x}_{\text{opt}}$ 就是每个用户的预编码矢量。

如果进一步限制每个用户的发送功率, 则可对目标问题式(12)再添加功率约束条件, 变为

$$\min_{\mathbf{p}_k} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{p}_k\|_2^2 \tag{16}$$
$$\text{s. t. } \|\mathbf{h}_{sk} \mathbf{p}_k\|^2 - \mu_0 \sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{h}_{si} \mathbf{p}_k\|^2 \geq \mu_0 \sigma_n^2,$$
$$\|\text{vec}([\mathbf{p}_1, \cdots, \mathbf{p}_K])\|_2 \leq \sqrt{P_{\text{total}}} (k = 1, 2, \cdots, K).$$

式中: $\text{vec}(\cdot)$ 表示对矩阵进行矢量化处理; P_{total} 表示发射总功率阈值。

式(16)仍然可以按照上述凸优化方法进行求解, 但 SLNR 阈值 μ_0 在解决目标问题中起着至关重要的作用, 因为这些问题能否解决取决于 μ_0 。如果求解式(16), 其 SLNR 阈值应设置为 1~5 之间的任意值, 这样我们都能获得性能满意的最优解。如果求解式(12), 则应将其设置为 10~100 之间的任意值。式(16)中的 SLNR 阈值远小于式(12)的阈值, 因为式(16)比式(12)具有更严格的功率约束。

4 仿真结果分析

为了分析提出算法的性能, 对所提利用凸优化算法求解各种天线选择方案进行 Monte-Carlo 仿真, 分析其系统容量和误码率性能。仿真中, 假设具有 128 根发射天线的基站与 3 个单天线用户进行通信, 大规模 MIMO 信道为瑞利(Rayleigh)平坦衰落信道, 数据调制方式为二相键控。基站已知 CSI 设计预编码矢量, 且每个预编码矢量确保功率归一化。进行天线选择时采用仿真参数为 $M=128, N=$

6, 预编码时 $N=6, L=2$ (或 1), $K=3$ 。即 128 根天线中选择 6 根发射天线, 然后进行支持并行 2 路或 1 路数据流的预编码器设计。

图 2 给出各种天线选择方法的系统容量, 所选择的 天线数为 6。从图 2 可见提出的最大化系统容量的天线选择方法比随机选择、最大化最小特征值方法和范数最大化方法能够获得最大的系统容量。利用提出的这种信号处理模型和求解方法具有很高的可行性以及普适性, 能够获得出系统容量最大化的天线子集。

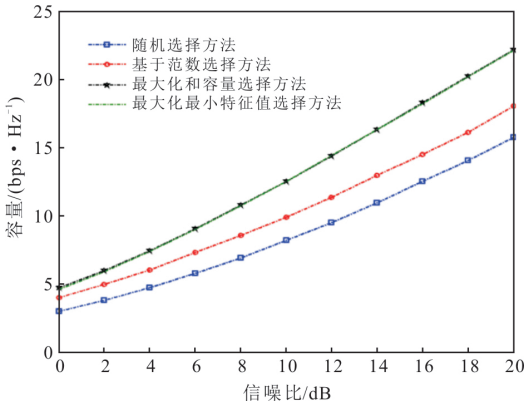


图 2 各种选择方法的系统容量

表 1 给出了对 3 个单天线用户进行预编码设计时, 不同预编码器功率控制方案带来的平均发送功率。从表 1 可见, 已有的最大化信漏噪比预编码器设计其发送功率按照矢量 2 范数进行了归一化处理, 所以功耗恒为 3。按照式(15)的预编码方案设计, 则预编码器的平均功耗随着信道信噪比的提高而不断降低, 比如在信噪比为 20 dB 时预编码器的能耗比传统的基于信漏噪比预编码器的功耗降低了 66%, 这样就可以有效减少系统的功耗。

表 1 不同预编码器方案在不同信噪比下的功耗比较

方案	0 dB	5 dB	10 dB	15 dB	20 dB
最大化 SLNR	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
所提方案	3.00	2.91	2.33	1.64	0.98

图 3 给出了本文提出的预编码方案与已有的最大化 SLNR 预编码方案的系统误码率曲线。从图中可见, 本文提出的预编码方案相比于传统的信漏噪比最大化预编码方案具有更好的误码率性能, 并且所提方案也能支持多数据流($L=2$)的传输(仿真中单数据流和双数据流预编码设计时均采用相同的 SLNR 阈值, 由于支持双数据流时如果式(16)不可解则降为求解式(12)。但支持多数据流时误码率性能变差, 这是由于系统的误码率性能取决于信

道条件最差的那条数据流的误码率。

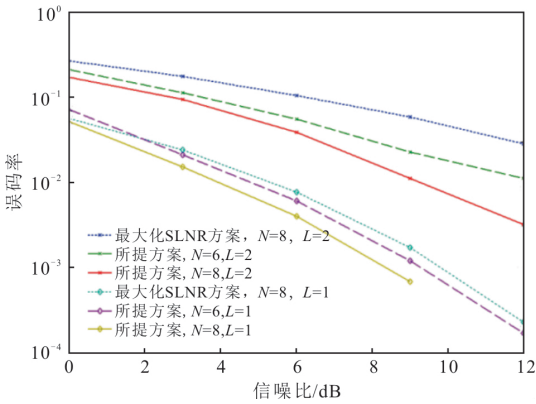


图 3 各种预编码系统的误码率曲线

图 4 给出了本文联合优化算法、文献[24]中 SLNR 预编码结合天线选择的算法(该算法中采用文献[17]的 SLNR 预编码方法)以及传统的 ZF 预编码结合天线选择的算法的能效曲线。从图 4 可见本文联合预编码算法的系统能效性能是 3 种算法中最佳的。由于本文中基于 SLNR 的预编码比文献[24]预编码具有更低的功耗,所以其能效也高于后者。由于 ZF 预编码方案在容量和误码率性能上均不及 SLNR 预编码方案,所提算法能效性能优于 ZF 预编码结合天线选择算法。另外,本文的预编码器具有比最大化信漏噪比预编码算法更小的能耗,所以提出的预编码方案结合天线选择联合比最大化 SLNR 预编码算法对能效的提高更大,性能更好。

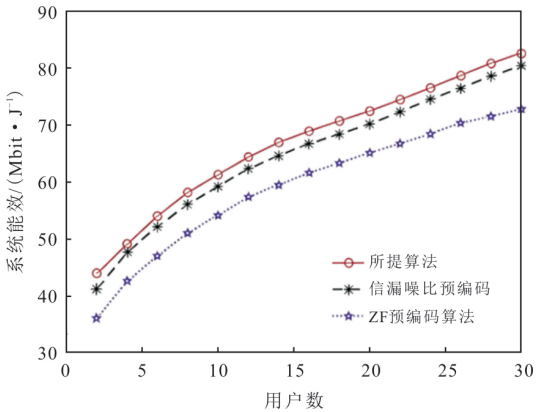


图 4 各算法用户系统能效性能比较

5 结语

提出了一种 massive MIMO 系统基站侧天线选择结合预编码技术提升系统能效的优化方案。首先利用最大化系统容量算法进行基站的天线选择以提升系统的和容量,给出了基于半定优化方法求解此问题的算法。然后给出了一个具有功率约束

和信漏噪比约束下发射总功率最小化的预编码设计方案。利用 SLNR 的定义的解耦特性,将全局优化问题分解为一系列低复杂度的 QCQP 问题,并利用 SDR 技术有效求解,这种预编码器能够有效降低系统能耗。仿真结果表明,所提天线选择方案具有最大化系统容量,并且所提预编码系统保持良好误码率的性能情况下其能耗随着信噪比提高可以逐渐降低,如在信噪比为 20 dB 时,所提方案中预编码器比最大化信漏噪比预编码器能耗降低 66%,进而比已有的天线选择结合预编码方法能更有效地提高系统能量效率。

参 考 文 献

[1] Araújo D C, Maksymyuk T, de Almeida A L F, et al. Massive MIMO: Survey and future research topics[J]. IET Communications, 2016, 10(15): 1938-1946.

[2] Albreem M A, Juntti M, Shahabuddin S. Massive MIMO detection techniques: A survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3109-3132.

[3] Gao X, Edfors O, Liu J N, et al. Antenna selection in measured massive MIMO channels using convex optimization[C]//2013 IEEE Globecom Workshops. Atlanta: IEEE, 2013: 129-134.

[4] Sun F G, Liu J, Xu H J, et al. Receive antenna selection using convex optimization for MIMO systems [C]//2008 Third International Conference on Communications and Networking in China. Hangzhou: IEEE, 2008: 426-430.

[5] Li X M, Li G M, Liu Y, et al. Low-complexity transmit antenna selection algorithm for massive MIMO [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2020, 27(5): 63-68.

[6] 王正强,杨晓娜,万晓榆,等. 大规模 MIMO 系统能效优化算法研究综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2019, 31(6): 743-752.

Wang Zhengqiang, Yang Xiaona, Wan Xiaoyu, et al. Energy efficiency optimization algorithm in massive MIMO systems: A survey[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2019, 31(6): 743-752

[7] Wiesel A, Eldar Y C, Shamai S. Linear precoding via conic optimization for fixed MIMO receivers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(1): 161-176.

[8] 李新民,白宝明. 基于半正定松弛的 MIMO 系统下行链路预编码方案[J]. 电子与信息学报, 2012(2): 423-

- 426.
- Li Xinmin, Bai Baoming. A precoding scheme based on semidefinite relaxation for MIMO downlinks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012(2): 423-426.
- [9] Luo Z Q, Ma W K, So A M, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(3): 20-34.
- [10] Shenouda M B, Davidson T N. Linear matrix inequality formulations of robust QoS precoding for broadcast channels[C]//2007 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Vancouver: IEEE, 2007: 324-328.
- [11] Shenouda M B, Davidson T N. Nonlinear and linear broadcasting with QoS requirements: Tractable approaches for bounded channel uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(5): 1936-1947.
- [12] Sadek M, Tarighat A, Sayed A H. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(5): 1711-1721.
- [13] Khalid S, Mehmood R, Bin Abbas W, et al. Joint transmit antenna selection and precoding for millimeter wave massive MIMO systems[J]. *Physical Communication*, 2020, 42: 101137.
- [14] Amadori P V, Masouros C. Large scale antenna selection and precoding for interference exploitation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(10): 4529-4542.
- [15] Al-nahari A, Sakran H, Su W F, et al. Energy and spectral efficiency of secure massive MIMO downlink systems[J]. *IET Communications*, 2019, 13(10): 1364-1372.
- [16] Albreem M A, Al Habbash A H, Abu-Hudrouss A M, et al. Overview of precoding techniques for massive MIMO[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 60764-60801.
- [17] Tran T X, Teh K C. Spectral and energy efficiency analysis for SLNR precoding in massive MIMO systems with imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(6): 4017-4027.
- [18] Sedghi R, Azghani M. Sparsity-based MIMO interference suppression technique in the presence of imperfect channel state information[J]. *IET Communications*, 2019, 13(19): 3201-3206.
- [19] Wesemann S, Du J F, Viswanathan H. Energy efficient extreme MIMO: Design goals and directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(10): 132-138.
- [20] Le M T P, Nguyen T H, Nguyen A T, et al. Energy efficiency optimization for Massive MIMO network: A neural network-based approach[C]//2023 International Conference on Advanced Technologies for Communications. Da Nang: IEEE, 2023: 462-467.
- [21] Gu X, Gao H, Wang J Y, et al. Joint antenna selection and power allocation method based on quantum energy valley optimization algorithm for massive MIMO IoT systems[J]. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, 2024, 18(10): 2840-2856.
- [22] Sharma N, Gupta B. Energy efficiency performance of millimeter wave massive MIMO systems with hybrid precoding[C]//2023 International Conference on Disruptive Technologies. Greater Noida: IEEE, 2023: 148-153.
- [23] Ramalakshmi R, Tamil Selvi S. Spectral efficiency analysis on massive MIMO filter bank[J]. *International Journal of Electronics*, 2024, 111(10): 1631-1652.
- [24] Aisyah S, Doufexi A, Armour S, et al. Impact of number of RF chains on spectral and energy efficiency of massive MIMO systems[C]//2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Dubai: IEEE, 2024: 1-6.
- [25] Fu Y, Wang C X, Mao X C, et al. Spectrum-energy-economy efficiency analysis of B5G wireless communication systems with separated indoor/outdoor scenarios[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(12): 9718-9731.
- [26] 孙长印, 毛亚宁, 江帆, 等. 基于无监督 DNN 和 Sub-6GHz 的毫米波功率控制算法[J]. *西安邮电大学学报*, 2023, 28(2): 29-38.
- Sun Changyin, Mao Yaning, Jiang Fan, et al. Millimeter wave power control algorithm based on unsupervised DNN and Sub-6GHz[J]. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 2023, 28(2): 29-38.
- [27] 李甜. 大规模 MIMO 系统能效优化算法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022: 42-53.
- Li Tian. Research on energy efficiency optimization algorithm for massive MIMO system[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022: 42-53.

[作者简介]



张俊星(1985—),男,山西吕梁人,陕西延长石油巴拉素煤业有限公司工程师,主要研究方向为矿山通信技术以及煤矿机电。E-mail: zhangjunxing@sxy-cpc.com



李鑫(1996—),男,陕西渭南人,陕西延长石油巴拉素煤业有限公司工程师,主要研究方向为煤矿智能化。E-mail:lixin5435@sxycpc.com



刘哲(2002—),男,陕西西安人,西安科技大学硕士研究生,主要研究方向为电磁超表面、无线通信等。E-mail:liuzhe229641@yeah.net



刘江(1997—),男,陕西榆林人,陕西延长石油巴拉素煤业有限公司工程师,主要研究方向为煤矿智能化。E-mail:1029360986@qq.com



黄晓俊(1983—),男,新疆伊犁人,西安科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为电磁新材料和微波/射频器件、新一代矿山通信技术。E-mail:657953883@qq.com



陈睿博(2001—),男,陕西咸阳人,西安科技大学硕士研究生,主要研究方向为共口径天线、无线通信等。E-mail:chenruibo311@yeah.net



李新民(1977—),男,陕西宝鸡人,博士,西安科技大学讲师,主要研究方向为宽带无线通信技术。E-mail:xinmin-lee@163.com。

[责任编辑:蔡秀梅]