



研究与开发

基于联合用户分组及天线选择的 大规模 MIMO 波束成形

王倩, 华权, 周应超, 申滨

(重庆邮电大学移动通信重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 大规模 MIMO 系统中, 当小区用户数与基站天线数较大时, 各用户的信道条件不尽相同, 提出一种适用于大规模 MIMO 下行链路的基于联合用户分组及天线选择的迫零波束成形算法。将用户分成两组, 选择信道条件较优的一组用户来接收信号, 并为每一个发送数据流选择最优的基站天线组合进行通信, 以较小的性能损失, 换取大规模 MIMO 射频电路的成本与功耗的大幅度降低。仿真结果证明, 该算法能够较好地实现系统性能与硬件复杂度的折中。

关键词: 大规模 MIMO; 用户分组; 天线选择; 迫零波束成形; 硬件复杂度

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016194

Joint user grouping and antenna selection based massive MIMO beamforming

WANG Qian, HUA Quan, ZHOU Yingchao, SHEN Bin

Chongqing Key Lab of Mobile Communications, Chongqing University of Posts and
Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: In massive MIMO systems, when the number of users is larger as that of antennas at base station (BS), the various channels may be significantly different. A new zero-forcing beamformer design algorithm was proposed based on joint user grouping and antenna selection for massive MIMO downlink systems. All users were divided into two groups and then the group of users with a better channel condition was selected to receive signal with selecting an optimal antenna combination for each transmit data stream, in order that RF circuit cost and power consumption could be reduced substantially with a little loss of performance in massive MIMO systems. The simulation results show that the proposed algorithm provides a better trade-off between rate performance and hardware complexity in massive MIMO system.

Key words: massive MIMO, user grouping, antenna selection, zero-forcing beamforming, hardware complexity

收稿日期: 2016-04-22; 修回日期: 2016-07-08

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2015ZX03001033-002)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project (No.2015ZX03001033-002)



1 引言

大规模 MIMO 最基本的特征在于在基站侧配置大量天线(几十甚至上百根),相较于 4G 系统的 4 根或 8 根天线数(如在 LTE 系统中最多采用了 4 根天线, LTE-Advanced 系统中最多采用了 8 根天线^[1])增加了 1~2 个数量级^[2]。分布在基站覆盖区的多个用户利用大规模 MIMO 天线配置所提供的空间自由度在同一时频资源上与基站同时进行通信,既大幅度增加了系统吞吐量^[3,4],提升了频谱资源利用率^[5-7],解决了频谱资源有限的问题,又降低了干扰,增强了系统的顽健性^[8,9]。同时,利用其提供的分集增益和阵列增益,用户与基站之间通信的效率可以得到显著提高^[10,11]。

大规模 MIMO 中基站配置大量的天线阵列,高达几十甚至上百根,进行信号传输时,一方面,为了支持大量天线阵列进行数据信息传输,对数字域和射频链路或模拟域的硬件复杂度要求较高^[12],同时大规模 MIMO 的大量天线单元使得消耗的能量相对增加,而且由于信道状况不同,部分天线的信道对系统容量的贡献较小,如果不采用天线选择技术选择出较有效的天线信道,而直接使用全部天线发射,就不可避免地造成射频单元和发射功率的浪费;另一方面,当小区用户数较大时,用户的信道条件各不相同,若选择小区内的所有用户作为信号接收端,系统的吞吐量并不一定能够达到最优状态。这时需要对小区内用户进行处理,例如用户分组^[13-19],这是因为系统中总有一部分用户的信道条件优于另外一部分用户,在任意给定的时刻,将信号只发向信道条件较好的用户组,能够提高系统资源分配效率,使得系统性能远大于将小区内所有用户均作为信号接收端的情况。

表 1 总结了参考文献[13~20]中的 10 种已有的用户分组选择算法,证明了当小区内用户数较大时,用户选择算法能够提高系统的吞吐量性能。其中性能最优的为贪婪迫零脏纸编码用户选择(greedy zero-forcing dirty-paper user selection, G-ZFDP)算法、半正交脏纸编码用户选择(zero-forcing dirty paper coding with semi-orthogonal user selection, ZFDPC-SUS)算法以及贪婪用户选择(greedy user selection with swap, GUSS)算法,其中前两种算法利用了脏纸编码技术,能够提高系统性能。然而,脏纸编码是一种非线性编码技术,其复杂度较高。贪婪用户选择算法则多次利用贪婪算法,使得算法复杂度较高。在这些算法中,删除

表 1 用户分组选择算法比较

算法	性能	复杂度	引用自参考文献
贪婪迫零脏纸编码用户选择	优	高	[13]
递增用户选择	中	高	[14]
贪婪用户选择	优	高	[14]
删除最小增益递减用户选择	优	中	[15]
半正交脏纸编码用户选择	优	高	[16]
半正交用户选择	中	高	[17]
简单半正交用户选择	中	中	[18]
改进半正交用户选择	优	高	[19]
随机用户选择	中	低	[20]
位置相关用户选择	优	低	[20]

最小增益递减用户选择算法和简单半正交用户选择(simplified semi-orthogonal user selection, S-SUS)算法能够使系统在吞吐量损失较小的情况下大幅度降低系统计算复杂度,实现系统性能与复杂度的较优折中。

本文提出一种基于联合用户分组及天线选择的大规模 MIMO 迫零波束成形方案。该方案将小区用户分组与基站天线选择结合起来,一方面将小区用户进行分组,一组用户是目标用户,用来接收信号,另一组用户空置,不接收信号,利用信道条件较好的用户组来接收信号,以便提高系统吞吐量;另一方面在基站端同时进行天线选择,为发送的每一个数据流选择一个最优的天线组合进行通信,降低系统硬件复杂度。该联合算法将天线选择与用户分组相结合,在低复杂度用户分组达到最优信道容量的情况下,进行天线选择,降低系统的硬件复杂度,能以较小的性能损失,换取系统硬件复杂度大幅度降低,降低大规模 MIMO 射频电路的成本与功耗。

2 系统模型

图 1 是一个单小区大规模 MIMO 下行链路的系统模型。图 1 中基站端配置发射天线数为 N , 小区内有大量的单天线用户,总数为 M ,其中, $N \geq M$ 。令 $H=[h_1^H, h_2^H, \dots, h_N^H]^H \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 表示所有用户的信道状态矩阵,其中, $h_k=[h_{k1}, h_{k2}, \dots, h_{kN}] \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 。假设信道传输环境为平坦衰落,系统工作在 TDD 模式,且基站可以获得全部的信道状态信息。

设 $\mathcal{U}=\{1, 2, \dots, M\}$ 为小区内所有用户的下标集合, $\mathcal{S}=\{\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(|\mathcal{S}|)\}$ 为用户分组后选择用来接收信号的最优用户下标集合,满足 $\mathcal{S} \subset \mathcal{U}$,其中, $\pi(i)$ 表示最优用户下标集合 $\mathcal{S}$ 的第 i 个元素以及 $\mathcal{U}$ 的第 $\pi(i)$ 个元素,其对应小区内第 $\pi(i)$ 个用户。 $|\mathcal{S}|$ 则为用户下标集合的大小,即最

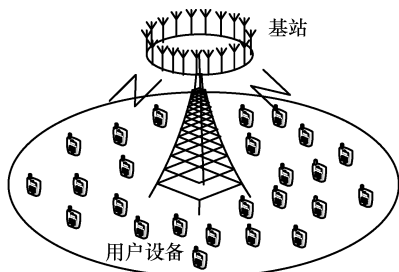


图1 单小区大规模MIMO系统模型

优用户数。基站端的发射信号 x 为传输的信号数据流 s 与波束成形向量 W_S 的结合,即:

$$x = W_S P_S^{\frac{1}{2}} s = \sum_{i=1}^{|S|} w_{\pi(i)} \sqrt{p_i} s_i \quad (1)$$

其中, $W_S = [w_{\pi(1)}, \dots, w_{\pi(|S|)}] \in \mathbb{C}^{N \times |S|}$ 表示最优用户的波束成形矩阵, $w_{\pi(i)} = [w_{\pi(i)1}, \dots, w_{\pi(i)N}]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 。 p_i 表示发射功率分配因子, $P_S = \text{diag}(p_1, \dots, p_{|S|})$ 。经过信道后最优用户集接收到的信号为:

$$y = H_S x + n$$

$$= H_S W_S P_S^{\frac{1}{2}} s + n \quad (2)$$

其中, $H_S = [h_{\pi(1)}^H, \dots, h_{\pi(|S|)}^H]^H \in \mathbb{C}^{|S| \times N}$ 为最优用户的信道矩阵, $h_{\pi(i)} = [h_{\pi(i)1}, \dots, h_{\pi(i)N}] \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 。而 $n = [n_1, n_2, \dots, n_{|S|}]^H \in \mathbb{C}^{|S| \times 1}$ 是最优用户信道中的噪声,服从均值为0、方差为1的高斯分布。所以第 i 个最优用户所接收到的信号为:

$$y_i = h_{\pi(i)} w_{\pi(i)} \sqrt{p_i} s_i + \sum_{l=1, l \neq i}^{|S|} h_{\pi(i)} w_{\pi(l)} \sqrt{p_l} s_l + n_i \quad (3)$$

选用迫零波束成形,其矩阵计算式为:

$$W_U = [w_{\pi(1)}, w_{\pi(2)}, \dots, w_{\pi(|U|)}] = H_U^H (H_U H_U^H)^{-1} \quad (4)$$

其中, $U = [\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(|U|)]$ 表示待选择用户下标集合, $U \subset U_{\text{all}}$, 初始用户下标集合 $U = U_{\text{all}}$ 。其信道矩阵为 $H_U = [h_{\pi(1)}^H, \dots, h_{\pi(|U|)}^H]^H \in \mathbb{C}^{|U| \times N}$, 波束成形矩阵为 $W_S = [w_{\pi(1)}, \dots, w_{\pi(|U|)}] \in \mathbb{C}^{N \times |U|}$ 。假设 $U \setminus \{n\}$ 表示在集合 U 中删除第 n 个元素, 即删除待选用户集的第 n 个用户, 其对应的波束成形向量删除第 n 列, 即 $W_{U \setminus \{n\}}$, 信道状态矩阵删除对应的 n 行, 即 $H_{U \setminus \{n\}}$ 。系统可达到的总速率为:

$$R(U) = \text{lb} | I_U + H_U W_U P_U W_U^H H_U^H |$$

$$= \sum_{\substack{\pi(i) \in U \\ p_i: \sum_{\pi(i) \in U} \lambda_i^{-1} p_i \leq P}} \text{lb} (1 + p_i) \quad (5)$$

其中, $\lambda_i = \frac{1}{\|w_i\|^2}$ 表示待选用户集中第 i 个用户的有效信

道增益^[7], $\lambda_i^{-1} p_i$ 表示分配给该用户的发射功率, 而 P 为总的发射功率。 I_U 表示 $|U| \times |U|$ 的单位矩阵。

利用注水法求出最优功率分配因子。首先构造拉格朗日函数:

$$L = \sum_{\pi(i) \in U} \text{lb} (1 + p_i) + \mu (\sum_{\pi(i) \in U} \lambda_i^{-1} p_i - P) \quad (6)$$

求导 $\frac{\partial L}{\partial P} = 0$, 则有:

$$\frac{\partial L}{\partial P} = \frac{1}{1 + p_i} \frac{1}{\ln 2} + \mu \lambda_i^{-1} = 0 \quad (7)$$

求得:

$$p_i = (\mu \lambda_i - 1)^+ \quad (8)$$

其中, $(x)^+ = \max\{x, 0\}$, μ 是注水法水位, 满足下列条件:

$$\sum_{\pi(i) \in U} (\mu - \lambda_i^{-1})^+ = P \quad (9)$$

3 联合迫零波束成形算法

本文所提的基于联合用户分组及天线选择的大规模MIMO迫零波束成形系统如图2所示。该方案将小区用户分组与基站天线选择结合起来: 在用户端将小区用户进行分组, 一组用户是目标用户, 为 S , 用来接收信号, 另一组则空置, 不接收信号, 为 S_0 ; 同时在基站端进行天线选择, 在性能降低较小的情况下, 大幅度降低系统的硬件复杂度。

将用户分组与天线选择结合起来, 以信道总速率为性能参数, 其约束条件较多。将该算法公式化:

$$\max R(U)$$

$$\text{s.t. } U \subset U_{\text{all}} \quad (10)$$

$$\|w_{\pi(i)}\|_0 = k, i = 1, \dots, |S| \quad (11)$$

$$\text{Tr}\{W_S P W_S\} \leq P, i = 1, \dots, |S| \quad (12)$$

其中, 约束条件式(10)为用户分组约束条件, 而式(11)、式(12)是天线选择约束条件。 $w_{\pi(i)}$ 的0范数表示该列向量中非零元素的个数信号, 即发射所选择的基站天线数, 式(12)为功率约束条件。

3.1 接收端用户分组

接收端用户分组选用一种递减用户分组方法, 依次删除波束成形矩阵增益最小的用户。下行链路首先选择全部用户作为接收信号用户, 然后进行迭代运算, 每次迭代删除一个有效信道增益 λ_n 最小的用户, 直到总速率增量 $\Delta R = R(U \setminus \{n\}) - R(U) < 0$, 可以得到最优用户下标集合

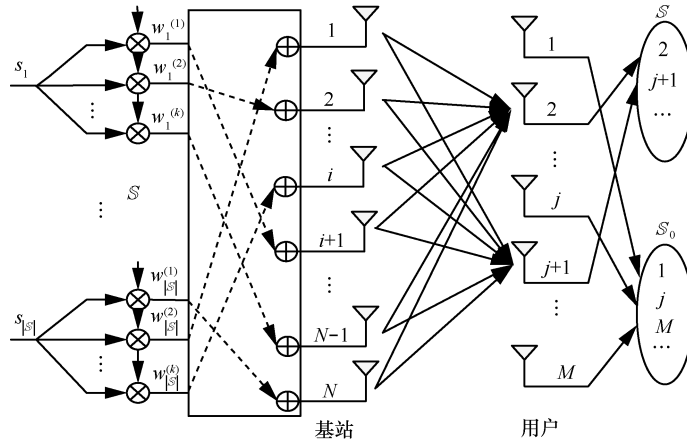


图2 基于联合天线选择及用户分组波束成形算法系统

S 和波束成形矩阵 W_s , 并利用注水法求出功率分配因子矩阵 P_s 。

在用户分组中暂时不考虑天线选择约束条件式(10)、式(11), 那么在接收端小区用户分组则只需考虑:

$$\begin{aligned} \max R(\mathcal{U}) \\ \text{s.t. } \mathcal{U} \subset \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned} \quad (13)$$

例如假设小区内有 4 个用户, 编号为 [1, 2, 3, 4], 信道矩阵为 $H=[h_1^H, h_2^H, h_3^H, h_4^H]^H$, 其对应的波束成形向量 $W=[w_1, w_2, w_3, w_4]$, 有效信道增益为 $\lambda=[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]$, 经比较若 λ_2 最小, 则删除用户 2, 信道矩阵更新为 $H=[h_1^H, h_3^H, h_4^H]$, 波束成形矩阵为 $W=[w_1, w_3, w_4]$ 。如果经计算得到的总速率为减小, 则此时被选择用来接收信号的用户下标集合为 $S=[1, 3, 4]$, 而被空置的用户下标集合为 $S_0=[2]$, 所以 $|\mathcal{S}|=3$ 。若总速率未减小, 则最优用户下标集合为 $S=[1, 2, 3, 4]$, 即选择所有用户接收信号。

迫零波束成形使得基站与用户之间信道相互正交, 能够完全消除其他用户对目标用户的干扰。删除用户 n 后, 待选择用户下标集合 $\mathcal{U}$ 会发生变化, 新的待选用户下标集更新为 $\tilde{\mathcal{U}}=\mathcal{U}\setminus\{n\}$, 其对应的有效信道增益向量同样会随之更新。迫零波束成形矩阵由参考文献[14]中的有效信道增益向量 v_i 定义可得:

$$v_i = h_i P_i^\perp \quad (14)$$

$$w_i = \frac{v_i^H}{\|v_i\|^2} \quad (15)$$

其中:

$$P_i^\perp = I_N - H_{\mathcal{U}\setminus\{i\}}^H (H_{\mathcal{U}\setminus\{i\}} H_{\mathcal{U}\setminus\{i\}}^H)^{-1} H_{\mathcal{U}\setminus\{i\}} \quad (16)$$

式(16)为子空间 $V_n = \text{span}\{h_j | j \in \mathcal{U}, j \neq n\}$ 的正交投影,

有效信道增益 $\lambda_i = \|v_i\|^2$ 。更新的有效信道增益向量为:

$$\begin{aligned} \tilde{v}_i &= h_i (I_N - H_{\mathcal{U}\setminus\{i\}}^H (H_{\mathcal{U}\setminus\{i\}} H_{\mathcal{U}\setminus\{i\}}^H)^{-1} H_{\mathcal{U}\setminus\{i\}}) \\ &= h_i \begin{bmatrix} v_i^H & v_n^H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i v_i^H & v_i v_n^H \\ v_n v_i^H & v_n v_n^H \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_i \\ v_n \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} h_i v_i^H & 0 \end{bmatrix} \frac{1}{\|v_i\|^2 \|v_n\|^2 - \|v_i v_n^H\|^2} \begin{bmatrix} v_n v_n^H & -v_i v_n^H \\ -v_n v_i^H & v_i v_i^H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ v_n \end{bmatrix} \\ &= \frac{\|v_i\|^2 \|v_n\|^2}{\|v_i\|^2 \|v_n\|^2 - \|v_i v_n^H\|^2} \left(v_i - \frac{v_i v_n^H}{\|v_n\|^2} v_n \right) \tilde{v}_i \end{aligned} \quad (17)$$

所以, 有效信道增益及有效信道增益向量为:

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_i &= \|\tilde{v}_i\|^2 = \lambda_i \frac{\|v_i\|^2 \|v_n\|^2}{\|v_i\|^2 \|v_n\|^2 - \|v_i v_n^H\|^2} \\ &= \frac{\lambda_i^2 \lambda_n}{\lambda_i \lambda_n - \|v_i v_n^H\|^2} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\tilde{v}_i = \frac{\lambda_i \lambda_n}{\lambda_i \lambda_n - \|v_i v_n^H\|^2} \left(v_i - \frac{v_i v_n^H}{\lambda_n} v_n \right) \quad (19)$$

将 $w_i = \frac{v_i^H}{\|v_i\|^2}$, $\lambda_i = \|v_i\|^2$ 代入式(18)、式(19)可得:

$$\tilde{\lambda}_i = \frac{\lambda_i}{1 - \lambda_n \lambda_i |w_n^H w_i|^2} \quad (20)$$

$$\tilde{w}_i = w_i - \lambda_n w_n^H w_i w_n \quad (21)$$

令 $\mathcal{U}$ 表示待选择的用户集合, i 表示可被选择的用户, 递减用户选择分组的步骤如下。

步骤 1 初始化。

$$\mathcal{U} = \{1, 2, \dots, M\} \lambda_i = \frac{1}{\|w_i\|^2}, i \in \mathcal{U} \quad (22)$$

其中, $[w_1, \dots, w_M] = H^H (H H^H)^{-1}$ 。

步骤2 删除有效增益最小的用户。

$$n = \arg \min_{i \in \mathcal{U}} \{\lambda_i\} \quad (23)$$

如果 $\Delta R = R(\mathcal{U} \setminus \{n\}) - R(\mathcal{U}) \geq 0$, 则删除用户 n , 利用式(14)、式(15), 更新 $\mathcal{U}$ 、 w_i 、 λ_i , 继续进行步骤2的迭代。

$$\begin{aligned} \mathcal{U} &\leftarrow \mathcal{U} \setminus \{n\}, w_i \leftarrow \tilde{w}_i = w_i - \lambda_n w_n^H w_i w_n, \\ i &\in \mathcal{U}, \lambda_i \leftarrow \tilde{\lambda}_i = \frac{\lambda_i}{1 - \lambda_n \lambda_i |w_n^H w_i|^2}, i \in \mathcal{U} \end{aligned} \quad (24)$$

否则就跳出迭代过程, 跳转到步骤3。

步骤3 跳出迭代后, 可以得到成功分组的最优用户下标集合 $\mathcal{S}$ 以及最优用户集的波束成形向量。

$$\mathcal{S} = \{\pi(1), \dots, \pi(|\mathcal{S}|)\} \quad (25)$$

$$W_{\mathcal{S}} = [w_{\pi(1)}, \dots, w_{\pi(|\mathcal{S}|)}] \quad (26)$$

综上所述, 步骤1为初始化过程, 首先选择全部用户为服务对象, 即 $\mathcal{U} = \mathcal{U}_{\text{all}}$, 有效信道增益则由迫零波束成形的式(5)得到。步骤2为迭代过程, 迭代次数小于或等于 M 即可, 每次迭代比较待选用户集中每个用户的有效信道增益 λ_i , 删除最小的用户, 同时更新各个参量。步骤3则可以得到迭代过程结束后输出的最优用户集以及波束成形矩阵。

3.2 基站端天线选择

大规模 MIMO 的多天线技术使得所需的 RF 链路数量增加, 硬件复杂度较高。RF 链路包含功率放大器、混合器、模数转换器(ADC)和滤波器。基站天线选择的原则是, 对于基站待发送的信号流, 将每一个信号数据流扩大 k 倍, 然后选择 k 个天线进行信号发射, 而不是选择全部的天线, 从而降低系统中模数转换器的数量, 以此降低系统硬件复杂度。这种选择的结果是波束成形矩阵的列向量的非零元素个数为 k 。

图3为基站天线选择架构。基站端天线为 N 。每一个信号数据流 s_i 乘以 k , 然后分成 k 束发送给 k 个基站天线, 则每一个天线发射的数据流均为 s_i 。当 $k=1$ 时, 则为常规的点对点信号传输, 复杂度最低, 性能最差; 当 $k=N$ 时, 则选择所有的基站天线发射信号, 性能最优, 复杂度最高; 当 $1 < k < N$ 时, 则选择基站全部天线中的部分天线来发送信号, 可以实现性能和复杂度之间的折中优化。

天线选择从基站大量天线中选择 k 个作为每个数据流的发射天线, 即波束成形矩阵列向量元素的非零个数为 k , 其他的均为零元素, 例如下面的一个 6×2 的波束成形矩阵:

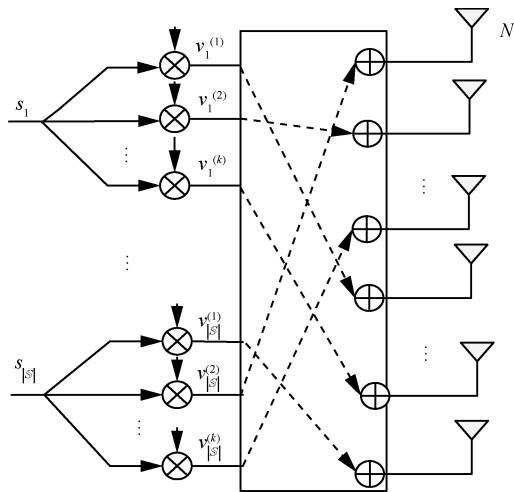


图3 波束成形天线选择架构

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \alpha_1 & 0 & \alpha_1 & \alpha_3 \\ \beta_1 & 0 & \beta_2 & 0 & 0 & \beta_2 \end{bmatrix}^H \quad (27)$$

式(27)其第一列和第二列分别有3个非零元素, 即 $k=3$, 发射的每个数据流均从基站多个天线中选择3个来发送该信号, 如图4所示。

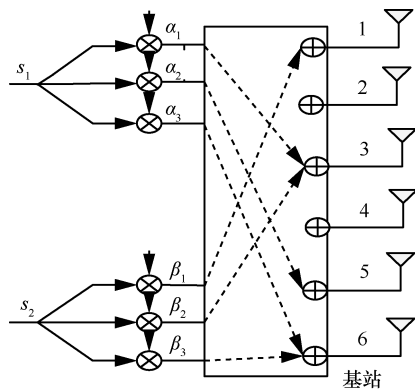


图4 基站天线选择: $N=6, |\mathcal{S}|=2, k=3$

确定天线选择 k 值的最优方法是穷举法, 即分别计算所有可能的天线组合的信道容量, 从中选择出能够使信道容量最大的组合, 然而这种算法每次选择时需要进行 C_N^k 次运算, 总复杂度为 $O((C_N^k)^M)$, 当天线数目很大时, 其复杂度过高, 无法在实际系统中实现数据的实时处理。本文利用的是基于向量模值的最大相关法, 相比于采用穷举法选择基站天线, 其将在实现天线选择的基础上, 大幅度减小计算复杂度。

基站天线选择, 是对波束成形矩阵进行处理, 信道总速率(式(6))可以写成:

$$R(\mathcal{S}) = \text{lb} |I_{|\mathcal{S}|} + H_{\mathcal{S}} W_{\mathcal{S}} P_{\mathcal{S}} W_{\mathcal{S}}^H H_{\mathcal{S}}^H| \quad (28)$$



其中, H_S 、 W_S 分别表示被确定的最优用户集的信道矩阵和波束成形矩阵, P_S 表示最优用户集的发射功率分配因子矩阵。

最大相关法天线选择问题转化为:

$$\max |\langle \psi_i, w_{\pi(i)} \rangle| \quad (29)$$

$$\text{s.t. } \|w_{\pi(i)}\|_0 = k, i=1, \dots, |\mathcal{S}| \quad (30)$$

$$\text{Tr}\{W_S P_S W_S\} \leq P, i=1, \dots, |\mathcal{S}| \quad (31)$$

其中, $\psi_i = [\psi_{i1}, \psi_{i2}, \dots, \psi_{iN}]^H$ 为天线选择后的波束成形列向量, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示向量内积, 式(29)为向量模值最大化, 在其满足天线选择数量和功率约束的基础上最大化该向量模值。

选取波束成形矩阵列向量元素绝对值较大的 k 个, 其他的均为 0, 即:

$$\psi_{ij} = \begin{cases} w_{\pi(i)j}, & i \in [1, 2, \dots, |\mathcal{S}|], j \in \mathcal{K} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (32)$$

其中, $\mathcal{K}$ 表示波束成形列向量绝对值较大的 k 个元素的下标集合, $\mathcal{K} \subset \{1, 2, \dots, N\}$ 。

如此得到的波束成形向量能够大幅度降低系统的硬件复杂度。在波束成形系统采用最大相关法时, 其所需的乘法器为 $N \times M^2 \times k$, 而直接进行迫零波束成形时则需要 $N^2 \times M^2$, 后续仿真证明当选择较小的 k 时, 即可达到较好的性能。

3.3 复杂度分析

基于联合用户分组及天线选择波束成形算法的计算复杂度主要在波束成形矩阵 W 上, 广义矩阵的求逆复杂度为 $O(NM^2)^{[20]}$ 。在后面的迭代用户分组中计算复杂度均低于 $O(NM^2)$ 。

在用户选择第一步初始化中, λ_i 的计算复杂度为 M 个 $1 \times N$ 的列向量的 2 范数求解, 为 MN 。第二步计算复杂度在于 $|\mathcal{S}|-1$ 个向量与向量相乘, 与 $|\mathcal{S}|-1$ 个 2 范数求解, 每次迭代包括 $2N(|\mathcal{S}|-1)$ 个乘法。所以, 基于联合用户分组及天线选择波束成形用户分组迭代过程总计算复杂度为:

$$MN + \sum_{n=|\mathcal{S}|}^M 2N(n-1) \ll MN + \sum_{n=1}^M 2N(n-1) = NM^2 \quad (33)$$

而在天线选择中复杂度主要在波束成形向量的 k 个非零元素的确定中, 复杂度为 $O(M|\mathcal{S}|)$, 从而可以得到该算法总的计算复杂度为:

$$O\left(NM^2 + MN + \sum_{n=|\mathcal{S}|}^M 2N(n-1) + N|\mathcal{S}|\right) \quad (34)$$

当选择全部用户作为信号接收端时, 其复杂度只存在

于广义矩阵的求逆上, 为 $O(NM^2)$, 较低, 但其性能较差。而迫零用户分组复杂度与半正交用户分组方案的复杂度较高, 约为 $O(NM^3)$ 。半正交用户分组的计算复杂度与 α 有关, 当 α 较大时, 其计算过程会复杂, 复杂度随之升高。

4 仿真结果

仿真中基站天线数为 64 根, 小区内有 30~64 个单天线用户, 选用 10^3 个独立瑞利衰落信道进行仿真。仿真分析了迫零用户分组选择 (zero-forcing with user selection, ZFS) 算法^[12]、递减用户分组选择 (zero-forcing with deleting the minimum lambda, ZFDML) 算法^[14]、半正交用户分组选择 (semi-orthogonal user selection, SUS) 算法^[18] ($\alpha=0.28, \alpha=0.35$) 以及基于联合用户分组及天线选择波束成形算法 ($k=55, k=40$), 仿真结果如图 5~图 8 所示。从图 7 可以看出, 当小区内用户较少时, 图 7 中为 $M < 45$, 除了半正交用户分组 ($\alpha=0.28$), 用户分组方案效果均不明显, 性能基本保持相同。而对于所提联合算法来说, 由图 5、图 6 可以看出其计算复杂度较低, 且明显降低了系统所需的 ADC 的数量, 从而降低了硬件复杂度。由图 7、图 8 可知, 当小区用户数大时, 性能较优的为递减用户分组、基于联合用户分组及天线选择波束成形算法 ($k=55, k=40$) 以及迫零用户分组, 这 3 种算法中用户最优集基本相同, 性能相差不大。但基于联合用户分组及天线选择波束成形算法能更好地实现性能与系统硬件复杂度的折中。仿真证明对基站进行天线选择时, 当 $k=55$ 和 $k=40$ 的时候, 基站天线空间自由度利用为 85.9%、62.5%, 系统的总速率降低较少, 但其硬件复杂度降低较大, 模拟域所需的模数转换器降低为 kM , 远小于其他算法中的 NM 。

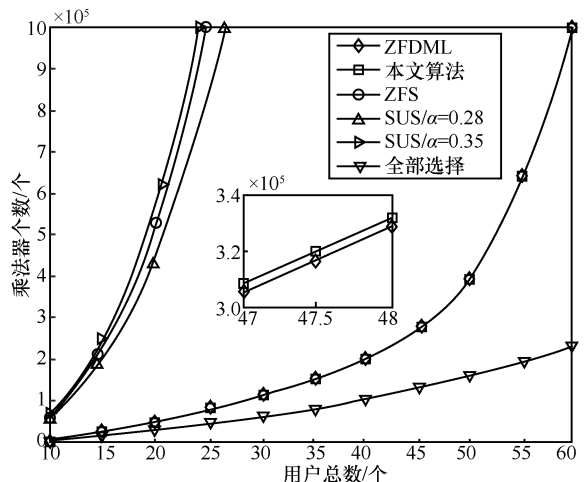


图 5 算法复杂度与小区用户总数的关系 ($N=64, M=30 \sim 64, \text{SNR}=20 \text{ dB}$)

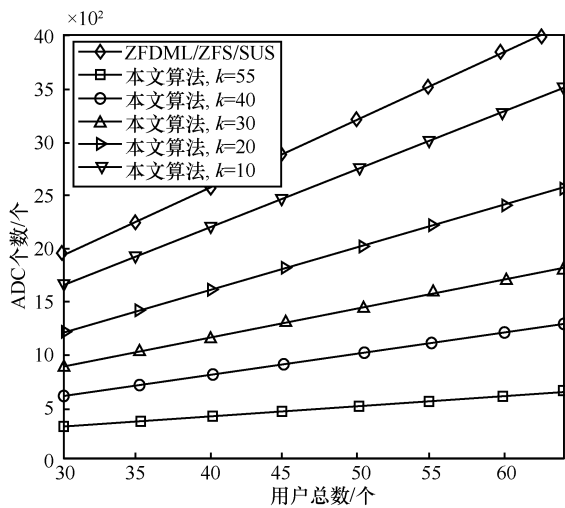
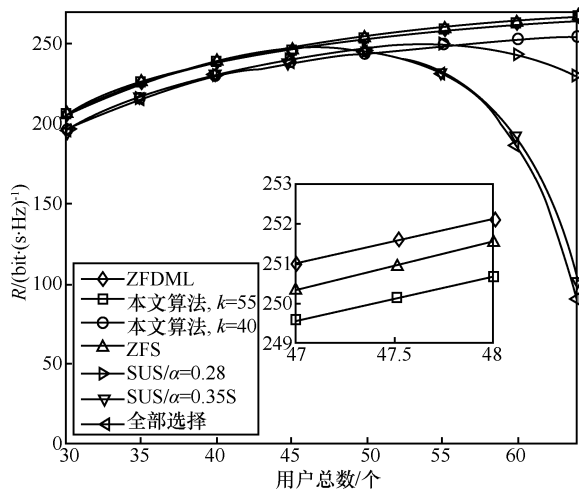
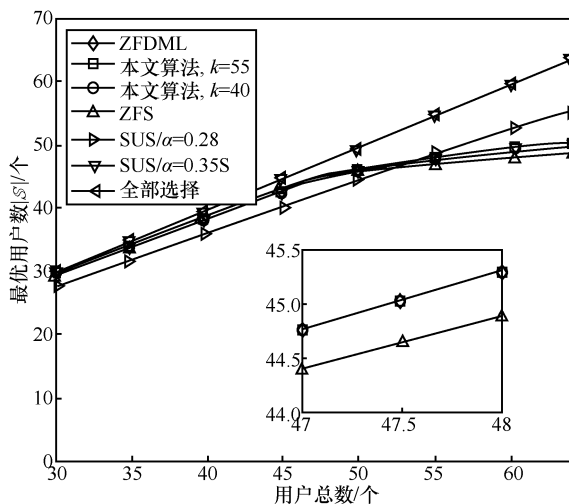


图6 硬件复杂度与小区用户、基站发射天线数关系

图7 系统总速率与小区用户之间的关系 ($N=64$, $M=30\sim 64$, $SNR=20$ dB)图8 最优用户集数目|S|与用户总数关系 ($N=64$, $M=30\sim 64$, $SNR=20$ dB)

5 结束语

当基站天线数和小区内用户数均较大时,提出了基于联合天线选择及用户分组的大规模 MIMO 波束成形算法,该算法在基站和用户端同时进行处理,选出最优的用户集,且在基站端选择较小的 k 值就可以使系统达到较优的性能。基于联合天线选择及用户分组波束成形算法能够在信道吞吐量达到较优的基础上,大幅度降低系统硬件复杂,实现二者之间较好的折中。

参考文献:

- [1] 杨绿溪, 何世文, 王毅, 等. 面向 5G 无线通信系统的关键技术综述[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(3): 469-485.
YANG L X, HE S W, WANG Y, et al. Towards 5G key technology of wireless communication system review [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(3): 469-485.
- [2] 尤力, 高西奇. 大规模 MIMO 无线通信关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(2): 26-28.
YOU L, GAO X Q. Large-scale MIMO wireless communication key technology [J]. Journal of ZTE Technology, 2014, 20(2): 26-28.
- [3] GUTHY C, UTSCHICK W, HONIG M L. Large system analysis of sum capacity in the gaussian MIMO broadcast channel [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(31): 149-159.
- [4] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 61(4): 1436-1449.
- [5] 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): 40-60.
- [6] HUH H, CAIRE G, PAPADOPOULOS H C, et al. Achieving "massive MIMO" spectral efficiency with a not-so-large number of antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 11(9): 3226-3239.
- [7] LU L, LI G Y, SWINDLEHURST A L, et al. An overview of massive MIMO: benefits and challenges [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 742-758.
- [8] MARZETTAT L. Massive MIMO: an introduction [J]. Bell Labs Technical Journal, 2015(20): 11-22.
- [9] LARSSON E, EDFORS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for next generation wireless systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 52(2): 186-195.
- [10] BJORNSSON E, KOUNTOURIS M, DEBBAAH M. Massive MIMO and small cells: improving energy efficiency by optimal soft-cell coordination [C]//2013 20th International Conference on Telecommunications (ICT), May 6-8, 2013, Casablanca, USA.



New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-5.

- [11] QIAN M, WANG Y, ZHOU Y, et al. A super base station based centralized network architecture for 5G mobile communication systems[J]. Digital Communications & Networks, 2015, 1(2): 152-159.
- [12] LEE G, PARK J, SUNG Y, et al. A new approach to beamformer design for massive MIMO systems based on k-regularity[C]//2012 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), December 3-7, 2012, Anaheim, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2012: 686-690.
- [13] DIMIC G, SIDIROPOULOS N D. On downlink beamforming with greedy user selection: performance analysis and a simple new algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(10): 3857-3868.
- [14] HUANG S, YIN H, WU J, et al. User selection for multiuser MIMO downlink with zero-forcing beamforming [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 62(7): 3084-3097.
- [15] HUANG S, YIN H, LI H, et al. Decremental user selection for large-scale multi-user MIMO downlink with zero-forcing beamforming [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 62(5): 480-483.
- [16] SUN L, MCKAY M R. Eigen-based transceivers for the MIMO broadcast channel with semi-orthogonal user selection [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(10): 5246-5261.
- [17] YOO T, GOLDSMITH A. On the optimality of multi-antenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24 (3): 528-541.
- [18] MAO J, GAO J, LIU Y, et al. Simplified semi-orthogonal user selection for MU-MIMO systems with ZFBF[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(1): 42-45.
- [19] XIN L, HUANG, XIN L, et al. An improved semi-orthogonal user selection algorithm based on condition number for multiuser MIMO systems[J]. Communications China, 2014, 11(A01): 23-30.
- [20] LIU H, GAO H, YANG S, et al. Low-complexity downlink user

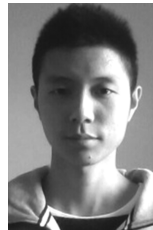
selection for massive MIMO systems [J]. IEEE Systems Journal, 2015: 1-12.

- [21] GOLUB G H, LOAN CFV. Matrix computations, 3rd edition[M]. Baltimore: the Johns Hopkins University Press, 1996.

[作者简介]



王倩(1989-),女,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为大规模 MIMO 系统波束成形技术。



华权(1991-),男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为大规模 MIMO 系统信号检测。



周应超(1991-),男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为大规模 MIMO 系统波束成形技术。



申滨(1978-),男,博士,重庆邮电大学教授,主要研究方向为认知无线电下频谱感知、大规模 MIMO 系统关键技术等。