

文章编号: 1000-582X(2011)10-124-06

基站协作系统中的低复杂度天线选择算法

韩东升^{1,2}, 杨 维^{1,2}

(1. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044;
2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:根据多基站协作系统的特点,提出了 2 种次优的低复杂度天线选择算法:基于协作基站总体信道矩阵范数的天线选择算法(aggregate channel frobenius norm antenna selection, ACFAS)和基于每个协作基站信道矩阵范数的天线选择算法(individual channel frobenius norm antenna selection, ICFAS)。ACFAS 算法以全部协作基站与用户的整体信道矩阵的 Frobenius 范数为天线选择的目标函数,而 ICFAS 算法则以参与协作的每个基站与用户的信道矩阵的 Frobenius 范数为天线选择的目标函数。仿真结果和复杂度分析表明,提出的多基站协作系统天线选择算法复杂度较低,但是系统的容量性能受到损失,是一种次优的低复杂度天线选择算法。

关键词: MIMO 系统; 基站协作; 天线选择; 多用户干扰

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Low complexity antenna selection algorithms for base-station coordination system

HAN Dong-sheng^{1,2}, YANG Wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China; 2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, P. R. China;)

Abstract: Two kinds of antenna selection algorithm one proposed according to the characteristics of base-station coordination system. One is called aggregate channel frobenius norm antenna selection (ACFAS), another one is individual channel frobenius norm antenna selection (ICFAS). The object function of antenna selection in ACFAS is based on the aggregate channel frobenius norm of all of the coordinating base-stations and users, while the object function of ICFAS is based on the individual channel frobenius norm of every base-station and user. With the complexity analysis and system simulations, it is proved that the antenna selection algorithms proposed are capable of reducing the complexity, yet at a cost of system capacity lost. So they are suboptimal algorithms.

Key words: MIMO systems; base-station coordination; antenna selection; multiuser interference

收稿日期: 2010-12-10

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2009ZX03003-005); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0949); 轨道交通控制与安全国家重点实验室自主研究课题资助项目(RCS2009ZT014); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(2010D11)。

作者简介: 韩东升(1980-), 男, 北京交通大学博士, 主要从事移动通信中的信号处理技术方向研究, (Tel) 13810453757; (E-mail) dshhan@gmail.com。

MIMO(multiple-input multiple-output)技术是改善未来无线宽带系统吞吐量的关键技术。对于 1 个发送机和接收机配置多个天线的点对点的链路,已经证实系统的容量随着发送天线和接收天线数量的最小值线性增加^[1-2]。然而,传统蜂窝系统存在的小区边缘问题制约着 MIMO 系统频谱效率的进一步提高。近年来的研究表明,多基站协作能够增加系统的频谱效率,减少小区间的干扰^[3-8]。多基站协作系统中,参与协作的全部基站天线一起形成 1 个网络天线阵列,每个用户能够从全部参与协作的基站接收到有用信号。多基站协作被认为是下一代无线通信系统的核心技术。

无论是在单基站系统还是在多基站协作系统中,MIMO 系统随着性能的改善,也带来了硬件复杂度的代价。随着天线数目的增加,无线终端的大小、成本和信号处理复杂度都随之增加。天线选择技术能够在保持 MIMO 优势的情况下减轻这些代价,近年来得到广泛的关注^[9]。天线选择可以在接收端或者发送端实施,可以以系统的容量最大化为目标,也可以以系统的误码率性能作为目标^[10]。在以往的天线选择文献中,主要是关注于单基站的蜂窝系统,对于多基站协作系统很少涉及。

文献[11]研究了多小区环境下下行 MIMO 系统中传送天线子集的选择,该文献中将其它小区的信号视为干扰信号,然后在多小区中综合考虑本小区的性能和对其他小区的干扰进行发送天线子集的选择。文献[12]对多基站系统中的基站天线选择进行了研究,研究表明通过基站天线选择能够增加系统的吞吐量,但是文献[12]只提出了一种穷举性能最优的算法,应用该算法系统的吞吐量能够达到最优,但是系统的计算复杂度极高,尤其是当参与协作的基站很多的情况下。

为此,根据多基站协作系统的特点,提出了两种次优的低复杂度天线选择算法:基于协作基站总体信道矩阵范数的天线选择算法(aggregate channel frobenius norm antenna selection, ACFAS)和基于每个协作基站信道矩阵范数的天线选择算法(individual channel frobenius norm antenna selection, ICFAS)。基于范数的天线选择算法在文献[13-14]中有所提及,该算法是指通过选择使信道矩阵的范数最大的方法对天线进行选择。然而,文献[13-14]中针对的是接收天线选择,且针对的是单基站单用户系统。所提的 2 种算法针对多基站协作多用户系统,其中 ACFAS 算法以全部协作基站与用户的整体信道矩阵的 Frobenius 范数为天线选择

的目标函数,而 ICFAS 算法则以参与协作的每个基站与用户的信道矩阵的 Frobenius 范数为天线选择的目标函数。仿真结果和复杂度分析表明,提出的多基站协作系统天线选择算法复杂度较低,但是系统的容量性能受到损失,是次优的低复杂度天线选择算法。

1 系统模型

此节介绍基站协作下行系统模型,系统中有多个基站协作为多个用户服务,系统采用块对角化预编码方法(block diagonalization, BD)消除多用户的干扰,并计算得到了系统容量的表达式,作为天线选择算法优劣的性能指标。

如图 1 所示,考虑 1 个由 B 个基站 K 个用户组成的多小区多点协作系统。

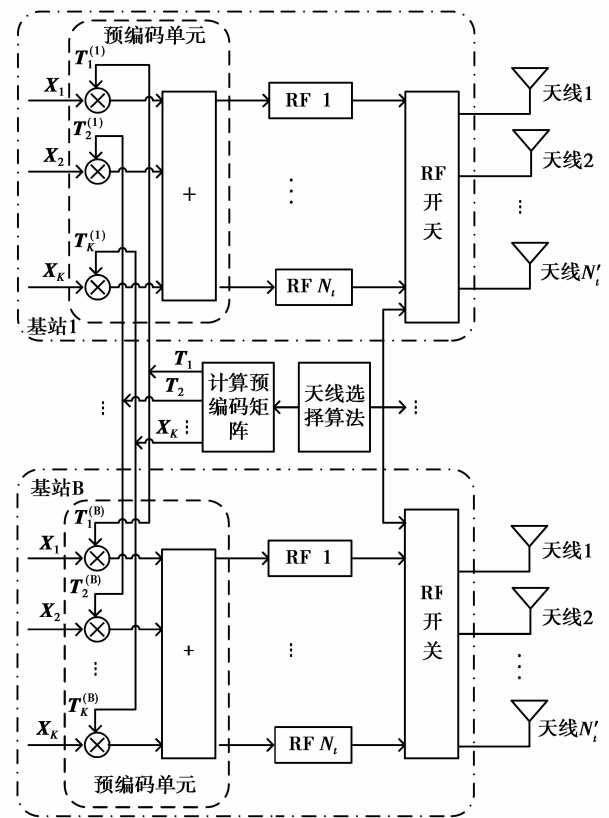


图 1 系统框图

每个基站配置 N_i 个射频链路, $N_i' > N_i$ 个天线;每个移动用户配置 N_r 个天线。基站间通过高速骨干网相连,共同组成 1 个天线阵列,为全部 B 个小区内的 K 个用户服务,即每个移动用户,能够收到来自全部 B 个基站的信号。假设每个基站能够获得理想的信道信息,并且相互协作的基站间能够互相交流不同用户的信道信息。每个基站根据某种选择

算法,选择了 N_t 个天线作为发送天线,那么,对于第 k 个用户的接收向量表示为

$$\mathbf{y}_k = \sum_{b=1}^B \mathbf{H}_k^{(b)} \mathbf{T}_k^{(b)} \mathbf{x}_k + \sum_{b=1}^B \mathbf{H}_k^{(b)} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \mathbf{T}_i^{(b)} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_k, \quad (1)$$

其中: \mathbf{y}_k 是 $N_r \times 1$ 维用户 k 的接收向量; \mathbf{x}_k 是 $l_k \times 1$ 维用户 k 的传送向量,假设针对每个用户传送的数据流相等,即 $l_k = l, k = 1, \dots, K$; $\mathbf{H}_k^{(b)}$ 是协作系统中第 b 个基站到用户 k 的信道矩阵,信道矩阵为 $N_r \times N_t$ 维,矩阵中的元素独立同分布,服从均值为 0,方差为 1 的复高斯分布; $\mathbf{T}_k^{(b)}$ 是用户 k 在基站 b 处的预编码矩阵,矩阵为 $N_t \times l_k$ 维; \mathbf{n}_k 是用户 k 的接收高斯白噪声,噪声均值为 0,方差为 $\sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_r}$ 。

B 个基站一起协同传送信号,如同 1 个天线阵列,在文献[3]中,将其称为“超级基站”,于是公式(1)可以写成

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{x}_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \mathbf{H}_k \mathbf{T}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_k, \quad (2)$$

这里, $\mathbf{H}_k = [\mathbf{H}_k^{(1)}, \mathbf{H}_k^{(2)}, \dots, \mathbf{H}_k^{(B)}]$, 是一个 $N_r \times BN_t$ 的矩阵,表示从“超级基站”到用户 k 的信道传输矩阵。 $\mathbf{T}_i = [(\mathbf{T}_i^{(1)})^H, (\mathbf{T}_i^{(2)})^H, \dots, (\mathbf{T}_i^{(B)})^H]^H$, 表示在全部 B 个基站处的对应用户 i 的传送预编码矩阵,维数为 $BN_t \times l_k$, 这里 $(*)^H$ 表示矩阵的共轭转置矩阵。 $\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_k \mathbf{T}_i \mathbf{x}_i$ 表示多用户干扰。

采用块对角化预编码方法 (block diagonalization, BD) 消除多用户的干扰。BD 预编码方法是针对多用户下行 MIMO 系统的线性预编码方法,文献[10-16]对单基站 BD 方法进行了研究,文献[3]对多基站 BD 方法进行介绍。BD 预编码方法的主要思想就是找到预编码矩阵 $\{\mathbf{T}_k\}_{k=1}^K$, 对于任意 $j \neq k$, 使得 $\mathbf{H}_k \mathbf{T}_j = 0$, 即通过此方法消除了系统中的多用户干扰。令 $\bar{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{H}_k^H, \dots, \mathbf{H}_{k-1}^H, \mathbf{H}_{k+1}^H, \dots, \mathbf{H}_K^H]^H$, 表示对用户 k 的干扰矩阵,假设 $BN_t > KN_r$, 令 $\bar{l}_k = \text{rank}(\bar{\mathbf{H}}_k)$, 对 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 进行矩阵奇异值分解 (SVD), 得

$$\bar{\mathbf{H}}_k = \mathbf{U}_k (\sum_k \mathbf{0}) (\bar{\mathbf{V}}_k^1 \bar{\mathbf{V}}_k^0)^H, \quad (3)$$

其中: $\bar{\mathbf{V}}_k^1$ 包含了 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 的前 \bar{l}_k 个右奇异值向量; $\bar{\mathbf{V}}_k^0$ 包含了 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 的后 $BN_t - \bar{l}_k$ 个右奇异值向量, 对应着 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 的零奇异值。这样可以选择 $\bar{\mathbf{V}}_k^0$ 的 l_k 列构造 \mathbf{T}_k , 则 \mathbf{T}_k 将自动满足零干扰的条件。假设 $l = N_r$, 这样接收信号变为

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k. \quad (4)$$

令 $\bar{\mathbf{T}}_b = [\mathbf{T}_1^{(b)}, \mathbf{T}_2^{(b)}, \dots, \mathbf{T}_K^{(b)}]$ 表示基站 b 的 K 个用户的预编码矩阵。这样,每个基站的传送功率约束条

件为

$$Tr(\bar{\mathbf{T}}_b \mathbf{Q} \bar{\mathbf{T}}_b^H) \leq P, b = 1, 2, \dots, B.$$

这里 $\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_1^H, \mathbf{Q}_2^H, \dots, \mathbf{Q}_K^H]^H$, \mathbf{Q}_k 为 \mathbf{x}_k 的方差矩阵。这样,对于多小区 BD 能够达到的总容量可由下式得到^[3]

$$C_{\text{CBD}} = \max_{Tr(\bar{\mathbf{T}}_b \mathbf{Q} \bar{\mathbf{T}}_b^H) \leq P} \sum_{k=1}^K \log_2 \left| \mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{T}_k^H \mathbf{H}_k^H \right|. \quad (5)$$

单小区与多小区 BD 的主要区别是功率约束。在单位小区 BD 中 1 个基站受总的功率约束,在多小区 BD 中则多个基站中的每个有自己的功率约束。文献[3]中提出了 3 种不同的针对每个基站的功率约束算法。笔者研究目标是阐述基站天线选择对于系统性能的影响,所以,为了简便采用每个基站平均功率分配算法,而不影响结果的表述。假设每个用户发送符号的功率为 $P_{s,k} = P/BN_t$, $P_s = P/B$ 是每个基站分配的总功率, P 为系统的总的发送功率。

由以上假设,化简公式(5)的容量公式得^[15]

$$C_{\text{CBD}} = \sum_{k=1}^K \log_2 \left| \mathbf{I}_{N_r} + \frac{1}{BN_t \sigma_n^2} \mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{T}_k^H \mathbf{H}_k^H \right|. \quad (6)$$

2 基站天线选择算法

首先介绍了基于穷举的最优天线选择算法 (optimal antenna selection, OAS)。该算法以系统的总容量为目标函数,通过天线选择能够提高系统的容量性能,但是该算法计算复杂度极高。为了解决复杂度高的问题,提出了 2 种次优的低复杂度天线选择算法:基于协作基站总体信道矩阵范数的天线选择 (ACFAS) 算法和基于每个协作基站信道矩阵范数的天线选择 (ICFAS) 算法。

如上文假设,每个基站有 N_t 个射频 (RF) 链路,有 N'_t 个传送天线,且 $N'_t > N_t$ 。天线选择的目的是将每个基站的一个由 N_t 个天线构成的天线子集与 RF 链路连接,使发送信号在最优的天线子集上传播。将第 b 个基站的选择子集标记为 $\omega_b \in W_b$, 这里 W_b 是 $\binom{N'_t}{N_t}$ 的子集群。那么, B 个基站组成的“超级基站”的天线选择子集为 $\omega_s \in W_s$, $W_s = \{W_1, W_2, \dots, W_B\}$ 。假设每个基站上的 RF 链路相同,天线数相同,则 W_s 是 $\binom{N'_t}{N_t}^B$ 的子集群。每个基站选择发送天线子集 ω_b 的信道矩阵记为 $\{\mathbf{H}_{k, \omega_b}\}_{k=1}^K$, B 个基站组成的“超级基站”选择发送天线子集 ω_s 的信道矩阵记为 $\{\mathbf{H}_{k, \omega_s}\}_{k=1}^K$ 。

2.1 最优基站天线选择算法

最优基站天线选择算法,以最大化系统的容量为天线选择目标。针对每 1 个传送天线子集 $w_s \in W_s$, 计算相应的系统总的容量,选择最优的子集 w_s^{opt} 使得容量最大,即

$$w_s^{opt} = \arg \max_{w_s \in W_s} C_{CBD}. \quad (7)$$

该算法通过计算全部可能的天线子集所对应的容量,来获得最优的天线子集,是 1 种穷举的搜索方法,该算法能够获得最优的基站天线子集。然而,该算法需要计算每种可能的天线子集选择所对应的预编码矩阵和相应的容量,需要进行大量的 SVD 分解计算,计算复杂度极高,且该算法的计算复杂度随着参与协作的基站数和发送天线数的增加而增加,该算法在实际系统中很难实现。为此,需要寻找低复杂度的天线选择算法。

2.2 基于协作基站总体信道矩阵范数的天线选择算法

低复杂度的基于协作基站总体信道矩阵范数的天线选择(ACFAS)算法。该算法能够极大的降低天线选择计算的复杂度,但是其容量性能会受到损失,是 1 种低复杂度的次优天线选择算法。

由式(6)可知,系统容量与矩阵 $\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k$ 的特征值紧密相关。如文献[16]所述,尽管 $\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k$ 的范数值不能完全表征容量,但由于 $\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k \mathbf{T}_k^H \mathbf{H}_k^H$ 的特征值的总和与 $\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k$ 范数值相等,所以 $\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k$ 范数值与系统容量也密切相关。因此,通过对经过预编码的信道矩阵的范数值,来选择天线。选择使 $\|\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k\|_F$ 最大的天线,与射频链路相连接。然而,求 $\|\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k\|_F$ 的过程仍需对干扰信道进行 SVD 分解,为降低计算复杂度,应用矩阵范数的乘法相容性^[17],计算 $\|\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k\|_F$ 的上限,

$$\|\mathbf{H}_k \mathbf{T}_k\|_F \leq \|\mathbf{H}_k\|_F \|\mathbf{T}_k\|_F. \quad (8)$$

$$= \|\mathbf{H}_k\|_F. \quad (9)$$

式(9)的获得是因为 \mathbf{T}_k 来自酉空间,所以 $\|\mathbf{T}_k\|_F = 1$ 。

为此,可通过下式来选择天线子集

$$w_s^{opt} = \arg \max_{w_s \in W_s} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{H}_{k,w_s}\|_F. \quad (10)$$

该算法通过计算协作基站总体信道矩阵范数进行天线选择,在天线选择过程中并未计算预编码矩阵,所以整个过程中为进行 SVD 分解计算,极大的降低了计算复杂度,但是由于天线选择的目标函数是实际容量的上限值,所以该算法与最优天线选择算法相比有容量上的损失。

2.3 基于每个协作基站信道矩阵范数的天线选择算法

根据矩阵范数的性质,提出了基于每个协作基站信道矩阵范数的天线选择(ICFAS)算法,进一步降低天线选择的计算复杂度。

$\mathbf{H}_k = [\mathbf{H}_k^{(1)}, \mathbf{H}_k^{(2)}, \dots, \mathbf{H}_k^{(B)}]$, 设 $\alpha_{k,b,i}$ 表示矩阵 $\mathbf{H}_k^{(b)}$ 的第 i 列,则 $\mathbf{H}_k = [\alpha_{k,1,1}, \dots, \alpha_{k,1,N_t}, \dots, \alpha_{k,B,1}, \dots, \alpha_{k,B,N_t}]$, 根据矩阵范数的性质^[15]

$$\|\mathbf{H}_k\|_F^2 = \sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^{N_t} \|\alpha_{k,b,i}\|_F^2 = \sum_{b=1}^B \|\mathbf{H}_k^{(b)}\|_F^2. \quad (11)$$

因此天线选择算法可以进一步简化为基于每个协作基站信道矩阵范数的天线选择算法,即

$$w_b^{opt} = \arg \max_{w_b \in W_b} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{H}_{k,w_b}\|_F^2, b = 1, \dots, B; \quad (12)$$

$$w_s^{opt} = \{w_1^{opt}, w_2^{opt}, \dots, w_B^{opt}\}. \quad (13)$$

3 复杂度分析

为了便于分析,采用 flop 表示计算复杂度。1 个 flop 定义为 1 个实浮点数操作。1 个实数加、乘、除计算为 1 个 flop。1 个复数的加和乘分别为 2flop 和 6flop^[18]。对于一个 $m \times n$ 的复数矩阵,范数计算复杂度为 $4mn$ flop; SVD 分解的计算复杂度为 $24m^2n + 48mn^2 + 54m^3$ flop。

当采用 OAS 算法时,需要计算全部可能的天线子集所对应的容量,每次计算容量时,需要求得预编码矩阵,因此需要对 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 进行 SVD 分解,且共需要计算 $\binom{N_t'}{N_t}$ 次,矩阵 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 的维度为 $(K-1)N_r \times BN_t$, 因

该算法计算所需的 flop 数为

$$\binom{N_t'}{N_t} \times K \times \{24(K-1)^2 N_r B N_t + 48(K-1)N_r B^2 N_t^2 + 54(K-1)^3 N_r^3\}. \quad (14)$$

当采用 ACFAS 算法时,只需要计算所有参与协作基站与所有用户间的信道矩阵 \mathbf{H}_k 的范数,信道矩阵 \mathbf{H}_k 的维度为 $N_r \times BN_t$, 因该算法计算所需的 flop 数为

$$\binom{N_t'}{N_t} \times K \times (4BN_r N_t). \quad (15)$$

显然该算法的计算量远远低于 OAS 算法。

当采用 ICFAS 算法时,只需计算每个参与协作基站与所有用户间的信道矩阵的范数,信道矩阵

$\mathbf{H}_k^{(b)}$ 的维度为 $N_r \times N_t$, 每个基站需计算 $\binom{N_t'}{N_t}$ 次, 因

该算法计算所需的 flop 数为

$$B \times \binom{N_t'}{N_t} \times K \times 4N_r N_t = \binom{N_t'}{N_t} \times K \times 4BN_r N_t. \quad (16)$$

显然该算法计算量较 ACFAS 算法得到了进一步的降低, 该算法计算所需的 flop 数为 ACFAS 算

法的 $1/\binom{N_t'}{N_t}^{B-1}$ 。

表 1 列出了系统采用部分参数配置下 3 种算法 flop 值。由表 1 可知, 系统采用 OAS 算法时复杂度最高, 而采用 ACFAS 算法时复杂度较低, 只有 OAS 算法的几千分之一, 而采用 ICFAS 算法时复杂度最低, 此时系统的计算复杂度只有 OAS 的几万分之一。这与前面的理论分析结论相符。

表 1 部分参数配置下算法复杂度比较

| 参数配置 (B, K, N_r, N_t, N_t') | Flops | | |
|------------------------------------|-----------------------|-----------|--------|
| | OAS | ACF-AS | ICF-AS |
| $B=3, K=4, N_r=2, N_t=4, N_t'=5$ | 3.1752×10^7 | 48 000 | 1 920 |
| $B=3, K=4, N_r=2, N_t=4, N_t'=6$ | 8.57304×10^8 | 129 6000 | 5 760 |
| $B=2, K=4, N_r=2, N_t=6, N_t'=9$ | 1.7923×10^9 | 2 709 504 | 32 256 |
| $B=3, K=6, N_r=2, N_t=4, N_t'=5$ | 1.1394×10^8 | 72 000 | 2 880 |

4 性能仿真

对系统总的容量性能随信噪比变化进行了仿真, 通过仿真比较不同天线选择算法下系统性能变化。经过在几种场景下的比较, 得出了基站协作系统中 3 种天线选择算法系统性能比较的结论。

图 2 为 3 种天线选择算法下系统容量的性能比较。参与协作的基站数为 3, 每个基站的配置的射频链路 RF 为 4, 系统容纳用户数为 4, 每个用户配置 2 个接收天线, 比较了每个基站配置不同发送天线数情况下, 3 种天线选择算法下系统容量的性能随信噪比 (SNR) 变化曲线。从图 2 可以看出, 当系统天线数大于射频链路数, 采用天线选择算法时系统的性能较没有采用天线算法时性能有所改善, 可见通过基站天线选择能够增加系统的容量。且在射频链路数不变的情况下, 3 种选择算法的性能都随着发送天数的增加而增加, 这是因为随着天线数的增加, 可供选择的的天线子集数增加, 系统的性能随之得到改善。而在发送天线一定的情况下, 3 种天线选择算法中, 采用最优天线选择算法 OAS 系统性能最优, 采用 ACFAS 和 ICFAS 算法系统的性能相同, 且均较 OAS 算法差, 这与前面的分析相吻合。

图 3 为总发射天线和总链路数固定, 参与协作的基站数不同的情况下 3 种天线选择算法系统容量的性能比较。其中, 总发射天线 $BN_t'=18$, 总链路数

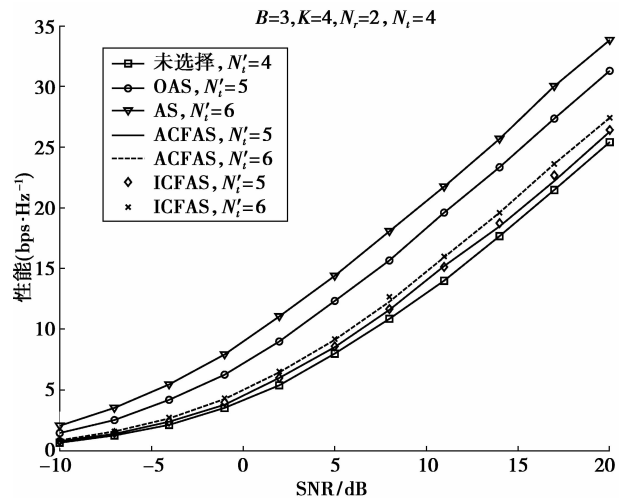


图 2 3 种选择算法的比较

$BN_t=12$, 系统容纳用户数为 4, 每个用户配置 2 个接收天线。图 3 中, 当系统未采用天线选择时, 无论系统参与协作的基站数为 2 或者 3, 系统的容量性能曲线相重合。这与前文所述的基站协作系统的系统模型性质相符, 基站协作系统中参与协作的全部基站天线一起形成 1 个网络天线阵列, 将所有基站天线视为一体, 联合进行预编码处理。因此, 当总发生天线固定的情况下, 系统的容量性能不随基站数变化而改变。图 3 中, 采用 OAS 算法时, 基站数为 3 时系统性能与基站数为 2 时系统性能相比, 系统容量下降。这是由于当总发射天线和总链路数固定的前提下, 基站数为 3 时比基站数为 2 时可供选择的

天线子集少,所以会有性能的损耗。图 3 中,当采用 ACFAS 和 ICFAS 算法时,系统容量性能不随基站数变化而改变。这是由于 ACFAS 和 ICFAS 算法均是对信道矩阵的范数进行操作,根据范数的性质,当总发射天线和总链路数固定的前提下,其范数值不会因为基站数的变化而改变。

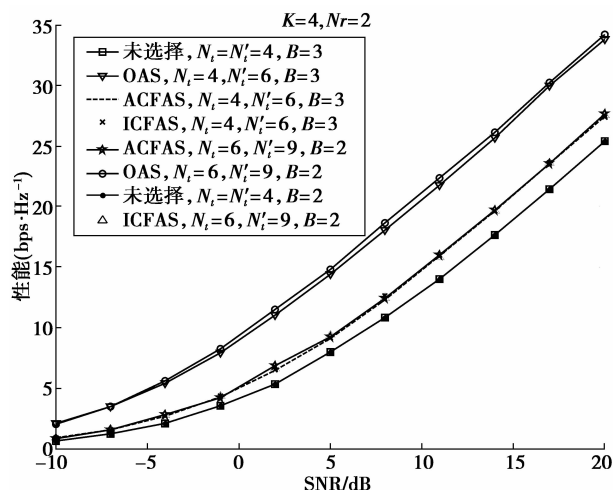


图 3 总发射天线和总链路数固定下算法的比较

综上所述,经系统仿真比较可见,通过采用天线选择算法可以改善系统的性能。采用 OAS 算法时,系统的性能最优,采用 ACFAS 和 ICFAS 算法时性能相同,都比 OAS 算法有一定的性能损耗。

5 结 论

根据多基站协作系统的特点,提出了 2 种次优的低复杂度天线选择算法:基于协作基站总体信道矩阵范数的天线选择算法(ACFAS)和基于每个协作基站信道矩阵范数的天线选择算法(ICFAS)。ACFAS 算法以全部协作基站与用户的整体信道矩阵的 Frobenius 范数为天线选择的目标函数,而 ICFAS 算法则以参与协作的每个基站与用户的信道矩阵的 Frobenius 范数为天线选择的目标函数。经复杂度分析表明,系统采用 OAS 算法时复杂度最高,而采用 ACFAS 算法时复杂度较低,采用 ICFAS 算法时复杂度最低。而系统仿真结果表明,采用 OAS 算法时,系统的性能最优,采用 ACFAS 和 ICFAS 算法时性能相同,都比 OAS 算法有一定的性能损耗。因此结合复杂度和系统性能 ACFAS 和 ICFAS 算法是一种次优的低复杂度天线选择算法,ICFAS 算法与 ACFAS 算法相比,在并未损失容量性能的情况下,计算复杂度更低,因此 ICFAS 算法更具优势。

参考文献:

- [1] TELATAR E. Capacity of multi-antenna gaussian channels [J]. European Transactions on Telecommunications, 1999,10(6): 585-595.
- [2] ANDREWS J G, WAN C, HEATH R W. Overcoming interference in spatial multiplexing MIMO cellular networks [J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2007, 14(6): 95-104.
- [3] ZHANG J, CHEN R H, ANDREWS J G, et al. Networked MIMO with clustered linear pre-coding [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1910-1921.
- [4] KARAKAVALI M K, FOSCHINI G J, VALENZUELA R A. Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems [J]. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(4): 56-61.
- [5] PISCHELLA M, BELFIORE J C. Resource allocation for QoS-Aware OFDMA using distributed network coordination [J]. IEEE Trans Veh Technol, 2009, 58(4): 1766-1775.
- [6] BJORNSON E, ZAKHOUR R, GESBERT D, et al. Cooperative multicell precoding rate region characterization and distributed strategies with instantaneous and statistical CSI [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2010, 58(8): 4298-4310.
- [7] SAWAHASHI M, KISHIYAMA Y, MORIMOTO, A, et al. Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced [J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(3): 26-34.
- [8] VENTURINO L, PRASAD N, WANG X D. Coordinated linear beamforming in downlink multi-cell wireless networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1451-1461.
- [9] SEUNG Y P, LOVE D J. Capacity limits of multiple antenna multicasting using antenna subset selection [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(6): 2524-2534.
- [10] CHEN R H, HEATH R W, ANDREWS J G. Transmit selection diversity for unitary precoded multiuser spatial multiplexing systems with linear receivers [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2007, 55(3): 1159-1171.
- [11] KANF J W, JE J W, PARK C S, et al. Transmit antenna subset selection for downlink MIMO systems in multicell environments [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2010, 9(7): 2113-2118.

- Proceedings of International Conference on Communication Technology Proceedings. Beijing: IEEE, 2003, 2:835-838.
- [7] KOSKIE S, GAJIC Z. A nash game algorithm for SIR-Based power control in 3G wireless CDMA networks [J]. IEEE ACM Trans on Networking, 2005, 13(5): 1017-1026.
- [8] HAYAINEH M, KHALIL I, AWAD M. Non-cooperative uplink power control game for CDMA wireless [J]. IEEE Symposium on Computers and Communications, 2009:587-592.
- [9] 程世伦, 杨震, 张晖. 新的认知无线电功率控制博弈算法[J]. 通信学报, 2007, 28(3): 100-107.
CHENG SHI-LUN, YANG ZHEN, ZHANG HUI, Novel power control game algorithm for cognitive radios[J]. Journal on Communications, 2007, 28(3): 100-107.
- [10] ZHAO C L, GUO Y, A novel distributed power control algorithm based on game theory [J]. IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009:1-4.
- [11] 程世伦, 杨震. 基于信干比的认知无线电自适应功率控制算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1):59-62.
CHENG SHI-LUN, YANG ZHEN. Adaptive power control algorithm based on SIR in cognitive radios[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(1):59-62.
- [12] 张维迎. 博弈论与信息经济学[M]. 上海:上海人民出版社, 2004.
- [13] 姚国庆. 博弈论[M]. 天津:南开大学出版社, 2005.
- [14] 黄涛. 博弈论教程[M]. 北京:首都经济贸易大学出版社, 2004.
- [15] 任建英. 用逆向归纳法求解动态博弈问题[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2009, 5:126-127.
REN JIAN-YING. Solving dynamic game with backward induction [J]. Management, science and technology in enterprise, 2009, 5:126-127.
- [16] YATES R D. A framework for uplink power control in cellular radio system [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1995, 13:1341-1347.

(编辑 侯 湘)

~~~~~

(上接第 129 页)

- [12] HAN D S, YANG W, ZHANG Y, et al. Antenna selection in coordinated multi-cell MIMO system[C]// Proceedings of 2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR). Wuhan: IEEE, 2010: 346-348.
- [13] GOROKHOV A, GORE D A, PAULRAJ A J. Space-time processing for MIMO communications [M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [14] GORE D, GOROKHOV A, PAULRAJ A. Joint MMSE versus V-Blast and antenna selection[J], Signal Systems and Computers, 2002, 1(11): 505-509.
- [15] SHIM S, KWAK J S, HEATH R W, et al. Block diagonalization for multi-user MIMO with other-cell interference[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2008, 7(7):2671- 2681.
- [16] SHEN Z, CHEN R, ANDREWS J G, et al. Low complexity user selection algorithms for multiuser MIMO systems with block diagonalization [J]. IEEE Trans Signal Process, 2006, 54(9): 3658-3663.
- [17] HOM R A, JOHNSON C R. Matrix analysis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.
- [18] GOLUB G H, VAN LOAN C F. Matrix Computations (3rd ed) [M]. Baltimore, MD: the John Hopkins University Press, 1996.

(编辑 侯 湘)