

基于干扰对齐的部分连通 MIMO 干扰广播
信道线性收发机设计^①

陈宏超^②* ** *** 周一青* *** 田霖* *** 刘智国* ** ***

(* 中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

(** 中国科学院大学 北京 100049)

(*** 移动计算与新型终端北京市重点实验室 北京 100190)

摘 要 研究了多小区网络通信系统的干扰消除技术,针对部分连通多输入多输出(MIMO)干扰广播信道,提出了一种基于干扰对齐的低复杂度的线性收发机设计算法。该算法通过有效的对齐干扰,不仅能够完全消除小区间干扰,也能够完全消除小区内用户间干扰。同时为了达到每个用户 d 个系统自由度(DOF),给出了系统的基站数目、用户数目、基站和用户天线数目需要满足的条件,并且提出了一种启发式算法,用这种算法,在已知基站数目、用户数目、用户天线数目的情况下,能够得到系统基站所需的最少天线数目。仿真结果证明了上述算法的有效性。

关键词 多输入多输出(MIMO),干扰广播信道,部分连通,干扰对齐(IA),自由度(DOF)

0 引 言

在多小区蜂窝网络下行通信中,每个小区内的基站在同一资源块上同时服务多个用户,整个系统中不仅存在小区间干扰(inter-cell interference,ICI),还存在小区内用户间干扰(inter-user interference,IUI)^[1]。因此,干扰成为限制多小区蜂窝网络系统容量的一个重要因素,进行有效的干扰管理是进一步提高系统容量的有效方法。常用的干扰管理技术有干扰随机化、干扰协调/回避和干扰消除等。其中干扰对齐(interference alignment,IA)作为一种干扰消除技术,因能在高信噪比情况下获得很好的系统容量而受到广泛关注^[2],其基本思想是在接收端把

干扰信号对齐到一个限定空间,使得有用信号传输时不受到干扰。干扰对齐已被应用到多个通信场景,如 K 用户多输入多输出(multiple input multiple output,MIMO)干扰信道^[24],MIMO 干扰广播信道^[5-13]。本研究主要关注 MIMO 干扰广播信道场景,针对部分连通(partially connected)MIMO 干扰广播信道,给出了一种基于干扰对齐的低复杂度线性收发机的设计方法,而且通过仿真实验验证了该方法的有效性。

1 相关工作

文献[5,6]提出了全连通(wholly connected)MIMO 干扰广播信道满足干扰对齐可解条件下的^[7]

① 863 计划(2014AA01A705),国家自然科学基金(61201231),国家科技重大专项(2013ZX03003005),北京市自然科学基金(61222103)和北京市科技新星(xx2013052)资助项目。

② 男,1987 年生,博士生;研究方向:干扰对齐,大规模天线;联系人 E-mail: chenhongchao@ict.ac.cn
(收稿日期:2014-07-22)

两种迭代算法。相比传统的 K 用户 MIMO 干扰信道场景, MIMO 干扰广播信道场景中直接信道和干扰信道是重叠的。直接应用传统的 K 用户 MIMO 干扰信道场景的迭代算法^[3], 尽管能够消除小区间干扰和用户间干扰, 但会造成有用信号功率的降低, 导致系统自由度 (degree of freedom, DOF) 的降低。因此文献[5]通过构造中间预编码矩阵, 将抑制小区间干扰和用户间干扰分为两个步骤, 不仅能够消除小区间干扰和小区内用户间干扰, 也能得到最优的系统自由度。但是算法需要发送端和接收端同时参与迭代, 复杂度很高且可实现性差。文献[6]提出了另一种只需接收端参与的迭代算法, 该算法也能得到最优的系统自由度。文献[5, 6]提出的迭代算法复杂度很高, 且对于算法的初始值很敏感。

另一方面, 闭合算法尽管只能适应一些特殊场景, 但是算法复杂度比较低^[8-10]。文献[8]在全连通 MIMO 干扰广播信道场景中提出了一种闭合干扰对齐算法。在两小区中, 每个小区内有两个用户, 且基站的天线数目 M 和用户的天线数目 N 满足 $\lceil \frac{3}{2}N \rceil \leq M \leq 2N$ 时, 算法能够完全消除小区间干扰和用户间干扰, 达到最优的系统自由度 (DOF)—— $2N$ 。但是该算法只适用于两小区, 且每个小区只有两个用户的场景。文献[9]将文献[8]提出的算法推广到一般场景, 即有 L 个小区, 每个小区有 K 个用户。为了得到每个用户 d 个系统自由度, 基站和用户所需的最少天线数目分别为 $M = [K(L-1) + 1] \times d$ 和 $N = [(K-1)(L-1) + 1] \times d$ 。文献[10]提出的算法进一步降低了系统中基站和用户所需的天线数目, 基站的天线数目只需满足 $M_i \geq d(K_i + \sum_{(j=1, j \neq i)}^L t_{(j,i)})$, 用户的天线数目只需满足 $\{ \sum_{(i=1, i \neq j)}^L t_{(j,i)} M_i + K_j N_j \} - \{ \sum_{(i=1, i \neq j)}^L K_j M_i \} \geq d$, 其中 $t_{j,i}$ 表示从基站 i 到小区 j 中所有用户之间有效小区间干扰信道的数目, K_j 为小区 j 中的用户数目。文献[9]可看作是文献[10]的特例。

在实际系统中, 由于受路径损耗和空间相关性的影响, 某些接收端和其它小区的发送端之间并不存在干扰, 被称为部分连通 MIMO 干扰广播信道^[11]。文献[12]将文献[5]提出的干扰对齐迭代算法应用到部分连通信道中, 并且发现相比于全连通信道, 部分连通信道在基站和用户的天线数目以及基站数目和用户数目固定的情况下能够获得更多的系统自由度。文献[13]考虑了一种特殊的部分连通模型, 即把每个小区中的所有用户看作一个整体, 小区中的每个用户受到的干扰相同, 同时给出了系统为正当的充分条件。但是文献[12, 13]中的算法都是迭代算法, 且算法复杂度较高, 因而本文针对一般的部分连通 MIMO 干扰广播信道模型提出了一种低复杂度的闭合算法。本文的主要贡献在于:

(1) 基于文献[10], 提出了一种能够应用于部分连通 MIMO 干扰广播信道系统模型场景的低复杂度的干扰对齐算法。该算法考虑了一般的部分连通 MIMO 干扰广播信道模型的特点, 即每个小区中由于用户位置的不同, 每个用户受到的干扰也不同。

(2) 为了得到整个系统自由度 $\sum_{(i=1)}^L K_i d$, 给出了在部分连通 MIMO 干扰广播信道场景中基站数目、用户数目、基站天线数目和用户天线数目四者需要满足的条件, 并给出了一种启发式贪婪算法, 运用该算法, 可以得出在基站数目、用户数目、用户天线数目给定时, 系统基站所需的最少天线数目。

本文中符号的含意如下: 小写黑斜体表示矢量 $\mathbf{a}$, 大写黑斜体表示矩阵 $\mathbf{A}$, $\mathbf{A}^H$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 的共轭转置, $\text{span}(\mathbf{X})$ 表示由 $\mathbf{X}$ 的列向量张成的空间。 G^s 表示集合 G 中第 s 个元素, $|G|$ 表示集合中所有元素的个数。

2 系统模型

如图 1 所示, MIMO 干扰广播信道系统模型中包含 L 个小区, 每个小区包含一个基站 (BS) 和 K_j

个用户(UE),其中 $j=1, \dots, L$,基站在同一资源块上服务 K_j 个用户。小区 j 中基站配置 M_j 根天线,每个用户配置 N_j 根天线。根据文献[11]提出的连通模式,可用如下集合描述干扰链路的连通性:

$$J \triangleq \left\{ ([k, j], i) \mid BS_i \Rightarrow UE_{[k, j]}, \forall j \neq i \right\} \quad (1)$$

其中 BS_i 和 $UE_{[k, j]}$ 表示小区 i 中的基站和小区 j 中第 k 个用户, $k=1, \dots, K_i$ 。集合中每一个元素代表一个基站和受到该基站干扰的其它小区的一个用户。

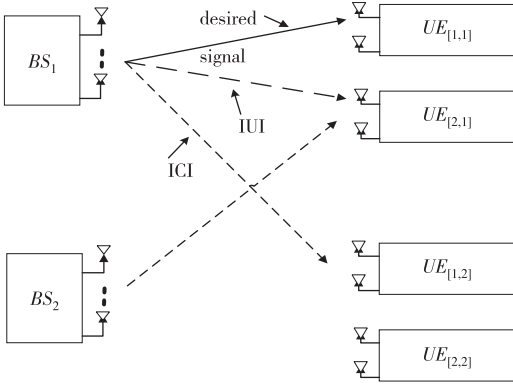


图1 部分连通 MIMO 干扰广播信道系统模型
(该模型中 $L=2, K_1=K_2=2$,小区1中只有用户 $UE_{[2,1]}$ 受到小区2中基站 BS_2 的干扰,小区2中只有用户 $UE_{[1,2]}$ 受到小区1中基站 BS_1 的干扰,因而 $J = \{([2,1], 2), ([1,2], 1)\}$)

由集合 J 可得到如下集合:

$$J_i \triangleq \{j \mid ([k, j], i) \in J, \forall i \in \{1, \dots, L\}\} \quad (2)$$

$$J_{[k, j]} \triangleq \{i \mid ([k, j], i) \in J, \forall j \in \{1, \dots, L\}, k \in \{1, \dots, K_i\}\} \quad (3)$$

$$G_j \triangleq \{J_{[1, j]} \cup J_{[2, j]} \cup \dots \cup J_{[K_j, j]}\}, \forall j \in \{1, \dots, L\} \quad (4)$$

$$G_{[k, j]} \triangleq \{i \mid ([k, j], i) \in J, \forall i, j \in \{1, \dots, L\}\} \quad (5)$$

$$C_j \triangleq \{G_{[1, j]} \cup G_{[2, j]} \dots \cup G_{[K_j, j]}\}, \forall j \in \{1, \dots, L\} \quad (6)$$

其中 J_i 和 $J_{[k, j]}$ 分别表示所有受到基站 i 干扰的小

区和所有对小区 j 中第 k 个用户产生干扰的基站, G_j 为对小区 j 中用户产生干扰的基站集合, $G_{[j, i]}$ 为小区 j 中受到基站 i 干扰的用户集合, G_j 为小区 j 中受到其它小区基站干扰的用户集合。

假设基站 j 要给本小区中第 k 个用户传输 d 个数据流,不仅会对其它小区中用户产生小区间干扰,而且会对本小区内其它用户产生用户间干扰。小区 j 中第 k 个用户接收到的信号可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^{[k, j]} = & \underbrace{\mathbf{H}_j^{[k, j]} \mathbf{V}^{[k, j]} \mathbf{x}^{[k, j]}}_{\text{desired signal}} + \underbrace{\sum_{l=1, l \neq k}^{K_j} \mathbf{H}_j^{[k, j]} \mathbf{V}^{[l, j]} \mathbf{x}^{[l, j]}}_{\text{IUI}} \\ & + \underbrace{\sum_{i \in J_{[k, j]}} \sum_{l=1}^{K_i} \mathbf{H}_i^{[k, j]} \mathbf{V}^{[l, i]} \mathbf{x}^{[l, i]}}_{\text{ICI}} + \mathbf{n}^{[k, j]} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{V}^{[k, j]} = [\mathbf{v}_1^{[k, j]}, \dots, \mathbf{v}_d^{[k, j]}] \in C^{M_j \times d}$ 是基站 j 给用户 k 传输数据流时的预编码矩阵,且矩阵中每一列都为单位列向量。 $\mathbf{x}^{[k, j]} \in C^{d \times 1}$ 是基站 j 给用户 k 传输的数据,满足约束条件 $E[\mathbf{x}^{[k, j]} \mathbf{x}^{[k, j]H}] = \mathbf{I}$ 。基站 j 总的发送功率满足约束条件 $E[\sum_{k=1}^{K_j} \|\mathbf{V}^{[k, j]} \mathbf{x}^{[k, j]}\|^2] \leq P$ 。 $\mathbf{n}^{[k, j]} \in C^{N_j \times 1}$ 是小区 j 中用户 k 接收到的加性高斯白噪声,向量中每个元素都服从复高斯分布 $CN(0, \sigma^2)$ 。 $\mathbf{H}_i^{[k, j]} \in C^{N_i \times M_j}$ 表示基站 i 到小区 j 中 k 用户间的信道矩阵,且矩阵中所有元素服从独立同分布(i.i.d)的复高斯分布 $CN(0, 1)$ ^[14,15]。假设基站和用户知道所有的信道状态信息。小区 j 中用户 k 将接收到的信号乘以接收滤波器矩阵 $\mathbf{U}^{[k, j]} = [\mathbf{u}_1^{[k, j]}, \dots, \mathbf{u}_d^{[k, j]}] \in C^{N_j \times d}$ 可得到有用信号,其中矩阵 $\mathbf{U}^{[k, j]}$ 中每一列都为单位列向量。

3 线性收发机设计

本节首先介绍文献[10]提出的在全连通 MIMO 干扰广播信道中基于干扰对齐的线性收发机设计算法,然后将其推广到部分连通干扰广播信道中,最后为得到每个用户 d 个自由度给出了基站所需的最少天线数目。

3.1 全连通 MIMO 干扰广播信道线性收发机设计方法

文献[10]首先通过设计接收滤波器使得基站 i 到小区 j 中所有用户的小区间干扰信道都对齐到 $t_{j,i}$ 个有效小区间干扰信道矩阵 $Q_{j,i}$ 中, 其中 $Q_{j,i} = [Q_{j,i}^{(1)}, \dots, Q_{j,i}^{(t_{j,i})}], Q_{j,i}^{(s)}$ 为从基站 i 到小区 j 中用户的第 s 个有效小区间干扰信道。同时令 $W_i^{[k,j]} = H_i^{[k,j]H} U^{[k,j]}$ 和 $w_{i,m}^{[k,j]} = H_i^{[k,j]H} u_m^{[k,j]}$, 并设计基站的预编码矩阵使其正交于有效 ICI 信道、IUI 信道、ISI(inter-stream interference)信道, 即

$$v_m^{[k,j]} \subset null([IUI, ICI, ISI]^H) \tag{8}$$

其中

$$\begin{aligned} IUI &= [W_i^{[1,1]}, \dots, W_i^{[k-1,1]}, W_i^{[k+1,1]}, \dots, W_i^{[K_i,1]}] \\ ICI &= [Q_{1,i}, \dots, Q_{i-1,i}, Q_{i+1,i}, \dots, Q_{L,i}] \\ ISI &= [w_{i,1}^{[k,i]}, \dots, w_{i,m-1}^{[k,i]}, w_{i,m+1}^{[k,i]}, \dots, w_{i,d}^{[k,i]}] \end{aligned}$$

3.2 部分连通 MIMO 干扰广播信道线性收发机设计方法

在部分连通 MIMO 干扰广播信道中, 由于基站 i , $i \in G_j$, 并不是与小区 j 中所有用户都存在干扰, 因而只需将小区 j 中部分用户对齐到 $t_{j,i}$ 个有效小区间干扰信道, 即:

$$\begin{aligned} span(Q_{j,i}^{(s)}) &= span(H_i^{[k,j]H} U^{[k,j]}), \forall k \in G_{[j,i]}^s \\ G_{[j,i]}^1 \cap \dots \cap G_{[j,i]}^{t_{j,i}} &= \Phi, G_{[j,i]}^1 \cup \dots \cup G_{[j,i]}^{t_{j,i}} = G_{[j,i]} \end{aligned} \tag{9}$$

其中 $G_{[j,i]}^s$ 为 $G_{[j,i]}$ 中第 s 个集合, $|G_{[j,i]}^s| = n_{j,i}^{(s)}$ 且 $\sum_{s=1}^{t_{j,i}} n_{j,i}^{(s)} = |G_{[j,i]}| \circ n_{j,i}^{(s)}$ 为从基站 i 到小区 j 中受干扰用户的小区间干扰信道对齐到 $Q_{j,i}^{(s)}$ 的数目。为了求得小区 j 中受干扰用户的接收滤波器, 需要求解方程

$$\underbrace{\begin{bmatrix} A_{j,G_j^1} & \cdots & 0 & -B_{j,G_j^1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & A_{j,G_j^{t_{j,i}}} & -B_{j,G_j^{t_{j,i}}} \end{bmatrix}}_{\triangleq F_j} \begin{bmatrix} P_{j,G_j^1} \\ \vdots \\ P_{j,G_j^{t_{j,i}}} \\ U_{C_{j,j}} \end{bmatrix} = 0 \tag{10}$$

这里 F_j 为 $\{\sum_{i \in G_j} |G_{[j,i]}| M_i\} \times \{\sum_{i \in G_j} t_{j,i} M_i + |C_j| N_j\}$ 的矩阵,

$$\begin{aligned} P_{j,i} &= \begin{bmatrix} Q_{j,i}^{(1)} \\ \vdots \\ Q_{j,i}^{(t_{j,i})} \end{bmatrix}, U_{C_{j,j}} = \begin{bmatrix} U^{[C_j^{t_{j,i}}]} \\ \vdots \\ U^{[C_j^{t_{j,i}}]} \end{bmatrix} \\ A_{j,i} &= [A_{j,i}^{(1)}, \dots, A_{j,i}^{(t_{j,i})}] \in C^{[G_{[j,i]}] M_i \times t_{j,i} M_i} \\ B_{j,i} &= \begin{bmatrix} H_i^{[C_j^{t_{j,i}}]} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & H_i^{[C_j^{t_{j,i}}]} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & H_i^{[C_j^{t_{j,i}}]} \end{bmatrix} \\ &\in C^{[G_{[j,i]}] M_i \times [C_j] N_j} \end{aligned}$$

其中

$$A_{j,i}^{(s)} = \left[\underbrace{0_{M_i}, \dots, 0_{M_i}}_{M_i \times \sum_{l=1}^{s-1} n_{j,i}^{(l)} M_i}, \underbrace{I_{M_i}, \dots, I_{M_i}}_{M_i \times n_{j,i}^{(s)} M_i}, \underbrace{0_{M_i}, \dots, 0_{M_i}}_{M_i \times (|G_{[j,i]}| - \sum_{l=1}^s n_{j,i}^{(l)} M_i)} \right]^H$$

从式(10)可知, 为了求得小区 j 中受干扰用户的接收滤波器, 有效小区间干扰信道数目、基站天线数目、用户天线数目及数据流数目之间需要满足的条件为

$$\left\{ \sum_{i \in G_j} t_{j,i} M_i + |C_j| N_j \right\} - \left\{ \sum_{i \in G_j} |G_{[j,i]}| M_i \right\} \geq d \tag{11}$$

同样设计基站 i 的预编码矩阵时需将式(8)中相应的有效小区间干扰信道更改为

$$ICI = [Q_{j,i}^{(1)}, \dots, Q_{j,i}^{(t_{j,i})}] \in C^{M_i \times (d \sum_{j \in J_i} t_{j,i})} \tag{12}$$

相应地, 为了求得基站 i 的预编码矩阵需满足

$$M_i - \{d(K_i - 1) + d \sum_{j \in J_i} t_{j,i} + (d - 1)\} \geq 1 \tag{13}$$

当小区的用户不受到来自其它小区的基站干扰时, 该用户的接收滤波器矩阵只需满足矩阵中的每一列为单位列向量即可。

3.3 部分连通 MIMO 干扰广播信道最少基站天线数目求解方法

为了得到系统自由度 $\sum_{i=1}^L K_i d$, 文献[10]解决了当系统中基站天线数目大于用户天线数目时,

如何确定有效小区间干扰信道数目的问题。但是作者并没有把求解基站天线数目和有效小区间信道数目放在一起考虑,也没给出基站所需最小的天线数目。而在实际系统中,基站数目、用户数目和用户天线数目通常是无法随意设置的,而基站的天线数目可以有一定的设置灵活度。因此,本文考虑了部分连通 MIMO 干扰广播信道中,如果要保证用户的自由度,给定系统中基站数目、用户数目和用户天线数目时,如何求得基站所需最小的天线数目及相应的有效小区间干扰信道数目的问题。该问题可以描述为

问题 1:

$$\underset{M_i, t_{j,i}}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^L M_i$$

满足式(11)和(13),并且有

$$\begin{aligned} 1 \leq t_{j,i} \leq |G_{[j,i]}|, t_{j,i}, M_i \in \mathbb{Z}^+, \\ \forall i \in \{1, \dots, L\}, j \in J_i \end{aligned} \quad (14)$$

其中式(14)表示有效 ICI 信道数目不会大于受到基站 i 干扰的小区 j 中的用户数目,且有效 ICI 信道数目和基站天线数目为正整数。

由式(11)、(13)可知,当 $M_i = d(K_i + \sum_{j \in J_i} t_{j,i})$ 时能够求得系统中基站所需的最小天线数目。该表达式代入问题 1 后就转化为求最少有效 ICI 信道数目的问题。

问题 2:

$$\underset{t_{j,i}}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^L \sum_{j \in J_i} t_{j,i}$$

满足以下条件:

$$\begin{aligned} 1 \leq t_{j,i} \leq |G_{[j,i]}|, t_{j,i} \in \mathbb{Z}^+, \forall i \in \{1, \dots, L\}, j \in J_i \\ \sum_{i \in G_j} (|G_{[j,i]}| - t_{j,i})(K_i + \sum_{l \in J_i} t_{l,i})d \leq |C_j|N_j - d \end{aligned}$$

问题 2 可以通过穷举的算法从 $\prod_{i=1}^L \prod_{j \in J_i} |G_{[j,i]}|$ 个解中选取最优的解使得目标函数最小。但是当 $L, |J_i|, |G_{[j,i]}|$ 很大时,算法复杂度很高。因而本文提出了一种启发式的贪婪算法。算法描述如下,

算法 1:

步骤 1: 初始化 $t_{j,i} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, L\}, j \in J_i$ 。

步骤 2: 判断 $t_{j,i}$ 是否满足条件 $\sum_{i \in G_j} (|G_{[j,i]}| - t_{j,i})(K_i + \sum_{l \in J_i} t_{l,i})d \leq |C_j|N_j - d$ 。如果不满足,跳入步骤 3;如果满足,令 $t_{j,i}^* = t_{j,i}$,并且结束算法。

步骤 3: 更新 $t_{j',i'} = t_{j',i'} + 1$,返回步骤 2。首先从所有基站中确定基站 i' ,其中 $i' = \underset{i}{\text{argmin}} (|G_{[j,i]}| - t_{j,i} - 1)(K_i + t_{j,i} + 1 + \sum_{(l \in J_{ij})} t_{l,i}) - (|G_{[j,i]}| - t_{j,i})(K_i + \sum_{l \in J_i} t_{l,i}) + \sum_{z \in J_{ij}} (|G_{[z,i]}| - t_{z,i})(K_i + t_{j,i} + 1) - \sum_{z \in J_{ij}} (|G_{[z,i]}| - t_{z,i})(K_i + t_{j,i}) = \underset{i}{\text{argmin}} \sum_{j \in J_i} (|G_{[j,i]}| - 2 * t_{j,i}) - K_i$ 这里 $\forall j \in J_i$ 且 $t_{j,i} + 1 \leq |G_{[j,i]}|$ 。然后从受到基站 i' 干扰的所有小区即确定小区 j' ,其中 $j' = \underset{j}{\text{argmin}} (|C_j|N_j - d - \sum_{l \in G_{j'}} (|G_{[j,l]}| - t_{j,l})M_{l'}d - (|G_{[j,i']}| - t_{j,i'})(M_{i'} + d)d)$,这里 $j \in J_{i'}$, 且 $t_{j,i'} + 1 \leq |G_{[j,i]}|$ 。

当所有的有效 ICI 信道数目确定后,可以利用 $M_i^* = d(K_i + \sum_{j \in J_i} t_{j,i}^*)$ 得出最优的基站天线数目,并用文献[10]中的算法进一步确定 $n_{j,i}^{(s)}$,使得 $\sum_{s=1}^{t_{j,i}} n_{j,i}^{(s)} = |G_{[j,i]}|$ 。

4 仿真结果

如图 2 所示 L 个基站在 $4\text{km} \times 4\text{km}$ 的范围内均匀分布, K_j 个用户均匀分布在基站 j 周围半径为 1.5km 的圆上。定义基站 i 和小区 j 中第 k 个用户之间的距离为 $R_i^{[k,j]}$ 。假设造成系统部分连通的主要原因是路径损耗:即当 $R_i^{[k,j]} > R$ 时,基站 i 和小区 j 中第 k 个用户之间距离太远,小区 j 中第 k 个用户不受到基站 i 干扰。其中 R 为距离,为小区中基站的覆盖范围,为部分连通因子。

表 1 描述了部分连通因子如何影响系统中基站的天线数目,系统参数为 $L=4, d=1, N_1=N_2=N_3=N_4=2, K=K_1=K_2=K_3=K_4$ 。从表 1 可看出,当 R

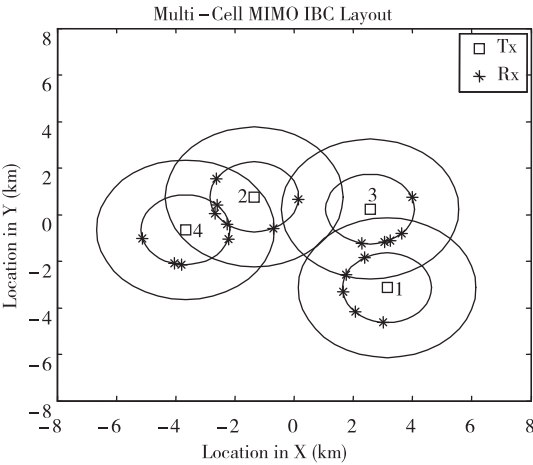


图 2 系统模型 (内层黑色圆圈的用户表示该基站的服务用户,外层黑色圆圈内的其他用户表示受到该基站干扰的用户)

较大时,基站所需天线数目之和较多。这是因为 R 较大表明基站和其他小区用户之间相互干扰较大,很多用户受到来自其他小区基站的干扰,所以基站需要很多的天线保证发送出去的信号不干扰其它小区用户。而当 R 较小时,基站所需天线数目之和较少。这是因为此时基站和其他小区用户之间相互干扰很小,基站在发送端进行预编码处理干扰时就不需要很多的天线。另外由表 1 也可看出,我们提出的贪婪算法得到的基站天线数目和通过穷举法得到的最优天线数目很接近。

表 1 系统参数 (第三列为通过穷举法得到的最优解,第四列为通过启发式贪婪算法得到的解)			
K	R	$[M_1^*, \dots, M_L^*]$	$[M_1, \dots, M_L]$
4	2	[4,5,4,7]	[4,5,4,7]
4	3	[6,6,7,6]	[7,6,7,6]
5	2	[6,6,5,7]	[6,6,5,7]
5	3	[9,7,8,8]	[9,7,8,8]

图 3 描述了部分连通 MIMO 干扰广播信道不同系统参数情况下 (即 $L=5, L=4, L=3$ 三种不同的小区数目),本文提出的干扰对齐 (IA) 算法得到的系统吞吐量。考虑如下的系统配置 $N_1 = \dots = N_L =$

$4, K_1 = \dots = K_L = 3, d = 1, R = 4$, 通过算法 1 可得到每个小区中基站的天线数目。可以看出,按照算法 1 得出的天线配置,本文提出的干扰对齐算法能够得到系统自由度 $\sum_{i=1}^L K_i d$ 。

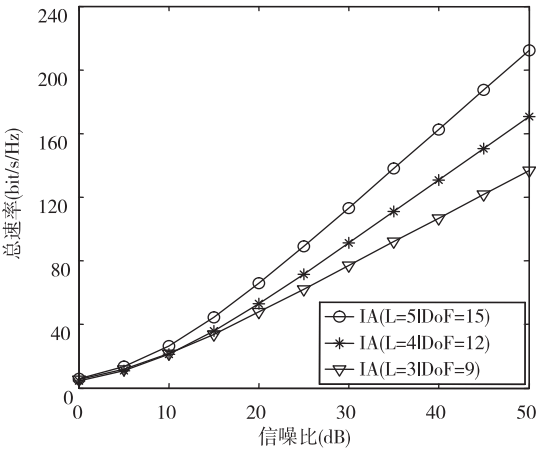


图 3 不同系统参数下的系统自由度

图 4 描述了两种算法的系统吞吐量随着信噪比变化的情况: (1) IA: 本文提出的干扰对齐算法; (2) TDMA + BD: 采用时分多址接入 (time division multiple access, TDMA) 技术,即基站只在分配的时隙内服务本小区用户,这样小区之间就不存在干扰,基站服务本小区用户时采用分块对角化 (block diagonalization, BD) 技术^[16]。

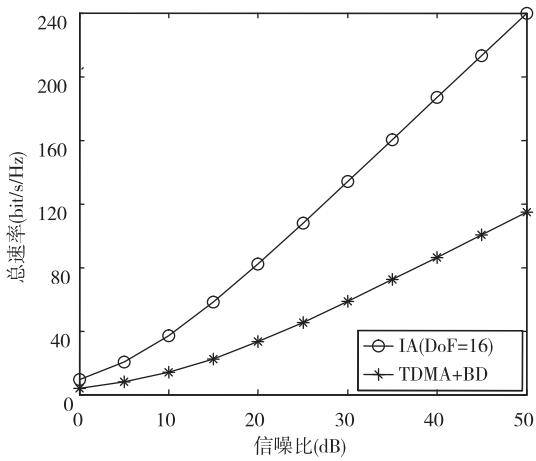


图 4 系统吞吐量 VS 信噪比

系统参数为 $L=4, N_1=N_2=N_3=N_4=4, K_1=K_2=K_3=K_4=4, d=1, R=5$, 由算法 1 可知系统中基站的天线数目。平均系统吞吐量是所有算法经过 500 次仿真后取平均值得到的。从图 4 中可看出, 在相同的天线配置情况下, 本文提出的算法能够比 TDMA + BD 算法提供更高的系统吞吐量。

5 结 论

本文提出了一种基于干扰对齐的线性收发机设计算法。与传统的干扰对齐算法相比, 本文提出的算法能够适用于更为实际的部分连通 MIMO 干扰广播信道场景, 而且算法复杂度较低。同时为了达到每个用户 d 个系统自由度, 本文给出一种启发式算法求解出系统所需的最少基站天线数目及有效小区内干扰信道数目。最后仿真结果表明, 相比于传统的算法, 本文提出的干扰对齐算法能够获得更好的系统吞吐量。

参考文献

- [1] Gesbert D, Hanly S, Huang H, et al. Multi-cell MIMO cooperative networks: a new look at interference. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal*, 2010, 28(9): 1380-1408
- [2] Cadambe V R, Jafar S A. Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel. *Information Theory, IEEE Transactions*, 2008, 54(8): 3425-3441
- [3] Gomadam K, Cadambe V R, Jafar S A. A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks. *Information Theory, IEEE Transactions*, 2011, 57(6): 3309-3322
- [4] Chen H, Zhou Y, Tian L, et al. Sum-rate improved interference alignment in wireless MIMO interference networks. In: Proceedings of the 2012 IEEE Global Communications Conference, Texas, USA, 2014
- [5] Ruan L, Lau V K N. Interference alignment algorithm for quasi-static MIMO cellular system. In: Proceedings of the 2011 IEEE Global Communications Conference, Texas, USA, 2011. 1-5
- [6] Liu T, Yang C. Interference alignment transceiver design for MIMO interference broadcast channels. In: Proceedings of the 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Paris, France, 2012. 641-646
- [7] Liu T, Yang C. On the feasibility of linear interference alignment for MIMO interference broadcast channels with constant coefficients. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 2013, 61(9): 2178-2191
- [8] Shin W, Lee N, Lim J, et al. On the design of interference alignment scheme for two-cell MIMO interfering broadcast channels. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 2011, 10(2): 437-442
- [9] Tang J, Lambotharan S. Interference alignment techniques for MIMO multi-cell interfering broadcast channels. *Communications, IEEE Transactions*, 2013, 61(1): 164-175
- [10] Lee H, Kim M, Ko Y. Transceiver design based on interference alignment for MIMO interfering broadcast channels. In: Proceedings of the 2012 IEEE Global Communications Conference, California, USA, 2012. 5044-5049
- [11] Liu T, Yang C. On the degrees of freedom of asymmetric MIMO interference broadcast channels. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications, Sydney, Australia, 2014. 1971-1976
- [12] Ruan L, Lau V K N, Rao X. Interference alignment for partially connected MIMO cellular networks. *Signal Processing, IEEE Transactions*, 2012, 60(7): 3692-3701
- [13] Guillaud M, Gesbert D. Interference alignment in partially connected interfering multiple-access and broadcast channels. In: Proceedings of the 2011 IEEE Global Communications Conference, Texas, USA, 2011. 1-5
- [14] Tian L, Zhou Y, Zhang Y, et al. Resource allocation for multicast services in distributed antenna systems with quality of services guarantees. *Communications, IET*, 2012, 6(3): 264-271
- [15] Zhou Y, Ng T, Wang J, et al. OFCDM: a promising broadband wireless access technique. *Communications Magazine*

zine, *IEEE*, 2008, 46(3):38-49

[16] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser

MIMO channels. *Signal Processing, IEEE Transactions*, 2004, 52(2):461-471

Linear transceiver design based on interference alignment for partially connected MIMO interfering broadcast channels

Chen Hongchao^{* ** ***}, Zhou Yiqing^{* ***}, Tian Lin^{* ***}, Liu Zhiguo^{* ** ***}
(^{*} Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)
(^{**} University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)
(^{***} Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190)

Abstract

The interference elimination for a multi-cell communication system was studied, and a low-complexity linear transceiver design algorithm based on interference alignment for partially connected multiple input multiple output (MIMO) interfering broadcast channels was proposed. By aligning the interference effectively, the algorithm can eliminate both the inter-cell interference and the inter-user interference. Moreover, in order to achieve the degrees of freedom of d per user, the condition for the system's base station (BS) number, user number, BS antenna number and user antenna number to meet was given, and a heuristic algorithm was put forward for obtaining the system's minimum BS antenna number under the circumstances that the BS number, user number and user antenna number are known. The effectiveness of the proposed algorithms was verified by simulation.

Key words: multiple input multiple output (MIMO), interfering broadcast channels, partially connected, interference alignment (IA), degrees of freedom (DOF)