

基于轮询机制的公平高效机会干扰对齐算法

谢显中¹, 卢华兵¹, 施赵媛²

(1. 重庆邮电大学宽带接入网络研究所, 重庆 400065; 2. 安庆师范大学安徽省智能感知与计算重点实验室, 安徽 安庆 246011)

摘 要: 针对干扰对齐的实际应用提出的机会干扰对齐算法(OIA)存在通信资源分配不公平、所需用户基数大等问题。为此, 提出一种基于轮询机制的公平高效机会干扰对齐算法。首先确定协作处理簇, 并基于轮询机制在主小区中选择信道质量最优的通信用户, 然后通过设计次基站的有用信号空间完全消除主小区用户对次基站的干扰, 进一步在次小区中以干扰泄露最小化为原则选择通信用户, 最后从理论上分析证明了公平性和最小传输块数等性能。仿真结果表明, 与原始机会干扰对齐算法相比, 所提算法在提升公平性的同时, 有效降低干扰泄露和提升系统容量, 并且可减少传输块数和实现用户通信接入快速响应。

关键词: 机会干扰对齐; 轮询机制; 公平性; 快速接入; 灵活性

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Fair and efficient opportunistic interference alignment algorithm based on round-robin scheduling

XIE Xian-zhong¹, LU Hua-bing¹, SHI Zhao-yuan²

(1. Institute of Broadband Access Network, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Perception and Computing of Anhui Province, Anqing Normal University, Anqing 246011, China)

Abstract: Opportunistic interference alignment (OIA) algorithm was proposed for the practical implementation of interference alignment (IA). A fair and efficient OIA algorithm was presented for the unfairness in resource allocation and high dependence of tremendous users in the existing OIA algorithms. Firstly, the users with the best channel was selected in the primary cell based on round-robin scheduling after the coordinate cluster was determined. Then, the interference from the primary users was eliminated by skillfully designing the useful signal spaces in the subordinate cells. Furthermore, the users with the minimum interference leakage was selected in the subordinate cells. Finally, the fairness performance was theoretically analyzed. Simulation results show that both the sum-rate and fairness of the proposed algorithm are significantly higher than that of the conventional algorithm with less interference leakage. Besides, the users can achieve a quick access.

Key words: opportunistic interference alignment (OIA), round-robin scheduling, fairness, quick access, flexibility

1 引言

在蜂窝移动通信系统中, 干扰一直是影响系统容量的主要因素, 严重制约着整个系统的性能提

升。近些年, 提出的干扰对齐算法^[1]通过统一设计发送端的发送信号使每个接收端的干扰尽可能重叠, 在极限情况(如无限的频域或时域扩展)下, 无论系统中有多少对相互干扰的用户, 每对用户均

收稿日期: 2016-09-12; 修回日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61271259, No.61301123, No.61471076); 重庆市教委科学技术研究基金资助项目(No.KJ130536); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(No.IRT1299); 重庆市科委重点实验室专项基金资助项目(CSTC); 安徽省教育厅基金资助项目(No.AQKJ2015B008)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61271259, No.61301123, No.61471076), The Science and Technology Research Project of Chongqing Education Commission (No.KJ130536), The Changjiang Scholars and Innovative Research Team Plan (No.IRT1299), The Special Fund of Chongqing Key Laboratory (CSTC), The Project of Anhui Education Department (No.AQKJ2015B008)

可获得其在无干扰环境下发送时的一半自由度，极大地提高了系统容量和频谱效率。

干扰对齐技术要在通信系统中实现运用，需要大量的频域或时域扩展^[1,2]，并且每个发送端需要知道全局信道状态信息（系统中的所有信道状态信息）。在实际系统中，需要付出很大代价来满足这些要求，这抵消了干扰对齐技术带来的好处，因此，部分学者专注于研究以最小代价实现干扰对齐技术的实用化问题，文献[3]针对信道状态信息非理想的认知网络提出了一种顽健干扰对齐算法，文献[4]则提出了一种时频联合干扰对齐方案，文献[5~7]对此做了较好的总结分析。但是，这些研究仅解决了干扰对齐技术某方面的实用性问题。

文献[8,9]中引入了机会干扰对齐（OIA, opportunistic interference alignment）算法，通过利用多用户分集将用户调度和空域干扰对齐结合，不需要时域或频域扩展，不需要全局信道状态信息，也不需要大量的迭代，获得了不错的性能。OIA 能同时解决几个限制干扰对齐实现运用的关键问题，近几年备受瞩目^[10~18]。

文献[10~12]将 OIA 引入上行蜂窝系统中，其中，文献[10]研究了单入多出蜂窝系统的 OIA 问题，每个基站随机产生干扰信号空间并广播给所有用户，然后每个用户仅根据本地信道状态信息（只与自己相关的信道状态信息）计算出干扰泄露值并反馈给基站，最后每个基站选择干扰泄露最小的几个用户进行通信。在单入多出 OIA 系统中，每小区需要很大的用户基数来保证系统容量性能，为降低用户数要求，文献[11]将其扩展到 MIMO 系统中，通过设计发送矢量，最小化干扰泄露。文献[12,13]进一步考虑了 OIA 系统中获得的自由度与每小区所需用户数之间的数量关系，并指出满足条件后 OIA 能获得最优的自由度。文献[14]研究了在有限反馈时 OIA 要获得完美反馈下的自由度，以及需要满足的条件，另外，作者还将功率控制引入 OIA^[15]。文献[16]将 OIA 与连续干扰消除结合，利用基站间的骨干网络将已解码的符号共享给其他基站，从而消除部分干扰，提升系统性能，但该算法需要基站间协作。文献[17]中的 OIA 算法将波束赋形和机会随机接入技术结合，运用于随机接入网络，但其需要物理层和介质访问控制层的联合优化。文献[18]将有效信号强度和干扰泄露同时作为用户选择条件，并引入了小区内能量转移，获得了

不错的性能提升。

在现有 OIA 算法中，基站以干扰泄露最小化为主原则进行通信用户选择，其计算过程中涉及的有用信号空间是随机选取的，由于信道系数矩阵是随机变化的，因此，每个用户获得的通信机会是随机的。而在移动通信中，每个用户的通信请求具有突发性和随机性，且通信时长不固定，如果系统对通信资源的分配是完全随机的，在短时间内可能无法满足某些用户的通信需求，甚至无法及时接入急需通信的用户，影响接入性能和用户体验。

基于上述分析，本文提出一种基于轮询机制的公平高效 OIA 算法。为此，将多个相互干扰的小区构成一个协作处理簇，簇内所有基站的有用信号空间由一个基站统一设计（称这个基站为主基站，该基站所属小区为主小区）；为保障通信机会的公平性，主小区及主小区中的通信用户均是基于轮询机制确定的，系统可根据用户的通信需求将其及时接入网络，避免被动等待资源的随机分配。进一步，本文算法通过设计次基站的有用信号空间完全消除主小区用户对次基站的干扰，并在次小区中以干扰泄露最小化为原则选择通信用户。仿真结果表明，与已有 OIA 算法相比，本文算法在提升公平性的同时，有效地减少了传输块数，增强了系统容量，并且可灵活满足用户通信需求。

在本文中， \mathbf{A}^T 、 \mathbf{A}^H 、 $\text{null}(\mathbf{A})$ 分别表示矩阵 \mathbf{A} 的转置、共轭转置和 \mathbf{A} 的列矢量空间的零空间的标准正交基。

2 系统和信道模型

考虑时分双工（TDD, time-division duplex）MIMO 上行蜂窝系统，一个包括 G 个相互干扰小区的协作处理簇按如下方式形成：设重点关注小区为主小区，选择与主小区相互干扰的 $G-1$ 个小区，则该 G 个小区构成一个协作处理簇，一个三小区组成的协作处理簇如图 1 所示。

假设每小区共有 K 个用户，所有用户均有数据待发送，在同一时刻只选择其中 S 个用户传输数据，第 g 个小区的基站表示为 BS_g ，第 g 个小区中的第 s 个用户表示为 $\text{MS}_{g,s}$ ，图 1 标识了三小区协作簇中每小区选择 2 个通信用户的情况，左端给出了每个用户的发送信号设计，右端以基站 2 为例展示了干扰对齐示意，在接收端使干扰尽可能重叠并与有用信号正交。

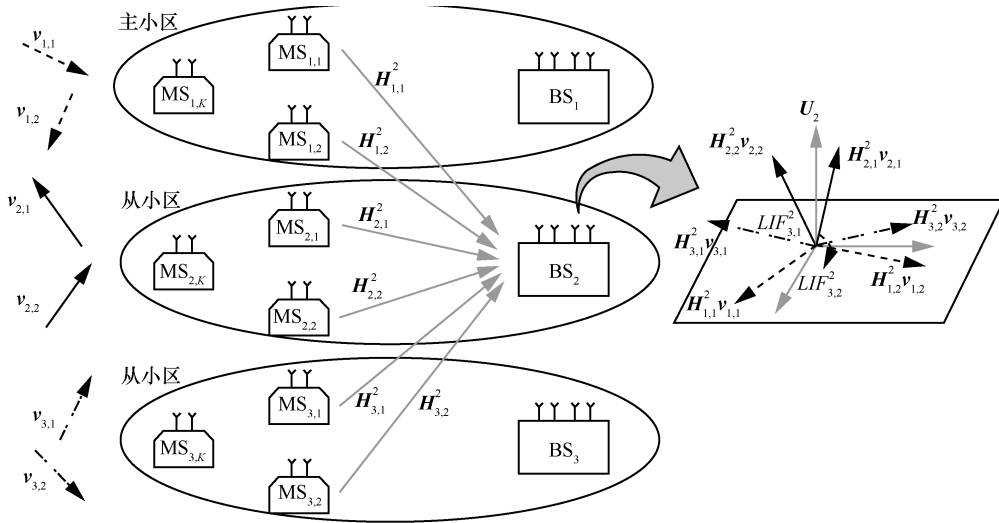


图 1 系统模型和干扰对齐示意 ($G=3, S=2, N_t=2, N_r=4$)

将每个用户的发送天线数表示为 N_t ，基站接收天线数表示为 N_r ，用户 $MS_{g,s}$ 发送的数据符号和用于发送此符号的单位发送矢量分别表示为 $x_{g,s}$ 和 $v_{g,s}$ 。设每个用户均以功率 P 发送一个数据流，用户 $MS_{g,s}$ 到基站 BS_i 的信道表示为 $H_{i,s}^g$ ，且在一个传输块内信道系数是不变的，连续的传输块间信道系数的变化相互独立，信道系数服从独立复高斯分布，即 $\mathcal{CN}(0,1)$ 。则 BS_g 接收到的信号可以表示为

$$y_g = \sum_{s=1}^S H_{g,s}^g v_{g,s} x_{g,s} + \sum_{i=1, i \neq g}^G \sum_{s=1}^S H_{i,s}^g v_{i,s} x_{i,s} + n_g \quad (1)$$

其中， $n_g \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 表示 BS_g 处的加性高斯白噪声矢量，其元素均值为 0，方差为 σ^2 。基站 BS_g 用接收矢量 $q_{g,s}$ 来处理接收到的信号，获得用户 $MS_{g,s}$ 发送的符号，于是有

$$\hat{y}_{g,s} = q_{g,s}^H y_g = q_{g,s}^H H_{g,s}^g v_{g,s} x_{g,s} + IUI_{g,s} + ICI_{g,s} + q_{g,s}^H n_g \quad (2)$$

其中， $IUI_{g,s} = \sum_{i=1, i \neq s}^S q_{g,s}^H H_{i,s}^g v_{i,s} x_{i,s}$ 和 $ICI_{g,s} =$

$\sum_{i=1, i \neq g}^G \sum_{s=1}^S q_{g,s}^H H_{i,s}^g v_{i,s} x_{i,s}$ 分别表示用户 $MS_{g,s}$ 的小区内干扰和小区间干扰。

在每个传输块中，系统根据用户通信需求和反馈信息，为每小区选择 S 个用户进行通信，并为他们设计恰当的发送矢量 $v_{g,s}$ 和接收矢量 $q_{g,s}$ ，使每个用户的小区内干扰和小区间干扰尽量小，从而最大化系统容量，用户 $MS_{g,s}$ 的容量可表示为

$$\mathfrak{R}_{g,s} = \text{lb} \left(1 + \frac{P |q_{g,s}^H H_{g,s}^g v_{g,s}|^2}{\sigma^2 \|q_{g,s}\|^2 + P |ICI_{g,s}|^2 + P |IUI_{g,s}|^2} \right) \quad (3)$$

这样，协作簇的总容量为

$$\mathfrak{R} = \sum_{g=1}^G \sum_{s=1}^S \mathfrak{R}_{g,s} = \sum_{g=1}^G \sum_{s=1}^S \text{lb} \left(1 + \frac{P |q_{g,s}^H H_{g,s}^g v_{g,s}|^2}{\sigma^2 \|q_{g,s}\|^2 + P |ICI_{g,s}|^2 + P |IUI_{g,s}|^2} \right) \quad (4)$$

3 传统机会干扰对齐算法存在的不足

为便于介绍本文算法，本节先对传统的 OIA 算法^[10-15]进行分析，其总体流程如下。

1) 信道估计：所有基站发送导频信号，每个用户估计出与之相关的下行信道，利用信道互惠性，用户 $MS_{g,k}$ 获得上行信道 $H_{i,g}^k$ ($i, g \in (1 \sim G), k \in (1 \sim K)$)。

2) 基站广播有用信号空间：每个基站随机产生一个 $N_r \times S$ 维的西矩阵 U_g ($g \in (1 \sim G)$) 作为有用信号空间， U_g 的所有列构成 N_r 维向量空间中的一组标准正交基，然后每个基站将其广播给所有用户。

3) 用户反馈干扰泄露值：用户 $MS_{g,k}$ ($g \in (1 \sim G), k \in (1 \sim K)$) 根据估计出的所有干扰信道 $H_{i,g}^k$ 和每个基站的有效信号空间 U_g ，计算出自己的最小干扰泄露值 $LIF_{g,k} = \sum_{i=1, i \neq g}^G LIF_{g,k}^i = \sum_{i=1, i \neq g}^G \|U_i^H H_{i,g}^k v_{g,k}\|^2$ ，并反馈给本小区基站 BS_g ，其中， $v_{g,k}$ 为矩阵

$\left[\left(\mathbf{U}_1^H \mathbf{H}_{g,k}^1 \right)^T, \dots, \left(\mathbf{U}_{g-1}^H \mathbf{H}_{g,k}^{g-1} \right)^T, \left(\mathbf{U}_{g+1}^H \mathbf{H}_{g,k}^{g+1} \right)^T, \dots, \left(\mathbf{U}_G^H \mathbf{H}_{g,k}^G \right)^T \right]^T$
的最小奇异值对应的右奇异矢量。

4) 用户选择: 基站 BS_g 从本小区用户中选出对其他基站干扰泄露值最小的 S 个用户进行通信。

5) 上行通信: 每个小区被选出的 S 个用户发送信号, 每个基站利用自己的有用信号空间 \mathbf{U}_g 消除小区间干扰, 获得本小区用户发送的信号。

从上述步骤可以看出, 传统机会干扰对齐算法存在以下不足。

1) 完全依赖信道随机性选择通信用户, 导致系统性能完全取决于每小区的用户基数 K , 只有在 K 值较大时才能获得不错的系统容量。

2) 系统仅以用户 $\text{MS}_{g,k}$ 对其他基站的干扰泄露值 $LIF_{g,k} = \sum_{i=1, i \neq g}^G \left\| \mathbf{U}_i^H \mathbf{H}_{g,k}^i \mathbf{v}_{g,k} \right\|^2$ 为选择条件, 即只考虑干扰信道 $\mathbf{H}_{g,k}^i (i \neq g)$, 未考虑用户自身的有用信道 $\mathbf{H}_{g,k}^g$ 。

3) 基站以干扰泄露为原则进行用户选择, 未考虑用户通信需求, 若某用户的干扰泄露值短时间内持续较大, 无论是否有通信需求, 其在该段时间内将无法接入网络, 系统资源分配不合理。

4 基于轮询机制的机会干扰对齐算法

4.1 算法描述

针对第 3 节总结的传统机会干扰对齐算法的不足之处, 本文在公平性、系统性能提升和用户通信需求快速响应 3 方面做出了改进。

为便于对比公平性, 本文以系统中所有用户至少通信一次所需传输块数 T 为 OIA 通信系统的公平性衡量标准, T 越小表示系统中所有用户获得传输机会所需等待的时间越短, 即公平性越高; 反之, T 越大公平性越差。为了提升系统性能, 本文不再以干扰泄露最小为选择通信用户的唯一准则, 而是综合考虑干扰泄露和有用信道质量 2 个因素。进一步, 在一个传输块中, 本文算法选出的通信用户分为 2 部分, 一部分由系统自主确定, 另一部分根据算法准则确定, 因此, 系统可灵活选择急需通信的用户, 快速响应用户通信需求, 用户不必被动等待通信机会的随机分配。

在传统 OIA 算法中, 每个基站随机产生自己的有用信号空间, 而本文算法中每个基站的有用信号空间由一个基站集中设计, 称该基站为主基

站, 其所属小区为主小区, 系统中的其他基站为从基站, 从基站所属小区为从小区。图 1 展示了本文算法在三小区每小区选择 2 个用户, 天线配置 $N_t=2, N_r=4$, 以小区 1 为主小区时基站 2 的 OIA。算法总体流程如图 2 所示, 以下是本文算法的总体步骤介绍 (不失一般性, 以小区 1 为主小区进行介绍)。

1) 信道估计: 所有基站发送导频信号, 每个用户估计出与其相关的下行信道, 利用信道互惠性, 用户 $\text{MS}_{g,k}$ 获知其上行信道矩阵 $\mathbf{H}_{g,k}^i (i, g \in (1 \sim G), k \in (1 \sim K))$ 。

2) 主小区用户信息反馈: 系统首先确认主小区中是否有急需通信的用户, 若没有, 主小区中所有用户 $\text{MS}_{1,k}$ 对自己的有用信道 $\mathbf{H}_{1,k}^1 (k \in (1 \sim K))$ 进行奇异值分解, 即 $\mathbf{H}_{1,k}^1 = \mathbf{P}_{1,k}^1 \mathbf{A}_{1,k}^1 \mathbf{Q}_{1,k}^{1H}$, 为最大化系统性能, 选取有用信道矩阵最大奇异值对应的右奇异矢量作为用户 $\text{MS}_{1,k}$ 的预编码矢量 $\mathbf{v}_{1,k}$, 然后, 所有用户 $\text{MS}_{1,k}$ 将其最大奇异值、等效有用信道 $\mathbf{H}_{1,k}^1 \mathbf{v}_{1,k}$ 和等效干扰信道 $\mathbf{H}_{1,k}^g \mathbf{v}_{1,k} (g \neq 1)$ 反馈给主基站 BS_1 ; 若有急需通信的用户, 则只需要这些用户进行反馈。

3) 主基站进行用户选择: BS_1 根据反馈信息, 选择奇异值最大的 S 个用户进行通信, 记这些用户的序号为 $1, 2, \dots, S$ 。

4) 主基站广播有用信号空间: 主基站 BS_1 根据选择的 S 个用户反馈的等效有用信道 $\mathbf{H}_{1,s}^1 \mathbf{v}_{1,s} (s \in (1 \sim S))$ 计算出它的有用信号空间为

$$\mathbf{U}_1 = \left(\text{pinv} \left(\mathbf{H}_{1,1}^1 \mathbf{v}_{1,1}, \dots, \mathbf{H}_{1,S}^1 \mathbf{v}_{1,S} \right) \right)^H \quad (5)$$

其中, $\text{pinv}(\mathbf{A})$ 表示矩阵 \mathbf{A} 的伪逆。主基站 BS_1 根据这 S 个用户反馈的等效干扰信道 $\mathbf{H}_{1,s}^g \mathbf{v}_{1,s} (g \neq 1)$ 计算出从基站的有用信号空间为

$$\mathbf{U}_g = \text{null} \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{1,1}^g \mathbf{v}_{1,1} \\ \vdots \\ \mathbf{H}_{1,S}^g \mathbf{v}_{1,S} \end{pmatrix}, g \neq 1 \quad (6)$$

最后, 主基站 BS_1 将所有基站的有用信号空间 \mathbf{U}_g 广播给从基站和系统中所有用户。

5) 从小区用户信息反馈: 从小区用户 $\text{MS}_{g,k} (g \neq 1)$ 根据步骤 1) 中估计出的干扰信道 $\mathbf{H}_{g,k}^i (i \neq g)$ 和接收到的每个基站的有用信号空间 \mathbf{U}_g 计算出自己

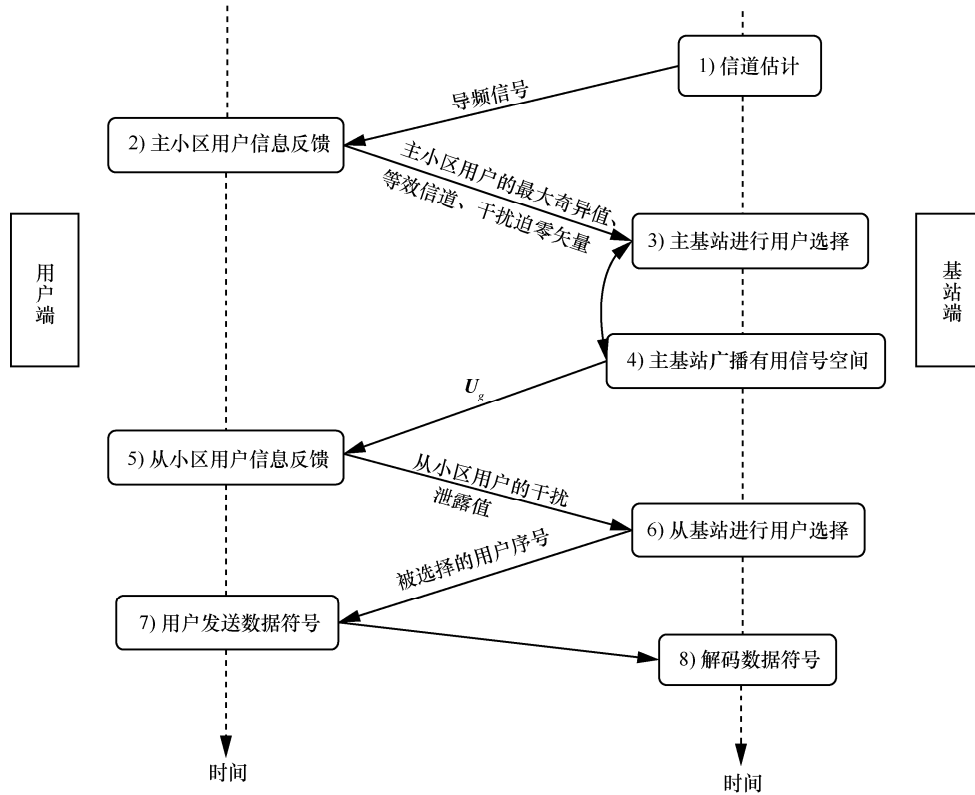


图 2 本文算法总体流程

的最小干扰泄露值 $LIF_{g,k} = \sum_{i=1, i \neq g}^G LIF_{g,k}^i = \sum_{i=1, i \neq g}^G \|U_i^H H_{g,k}^i v_{g,k}\|^2$ ，并反馈给本小区基站 BS_g ，其中， $v_{g,k}$ 为矩阵 $\left[(U_1^H H_{g,k}^1)^T, \dots, (U_{g-1}^H H_{g,k}^{g-1})^T, (U_{g+1}^H H_{g,k}^{g+1})^T, \dots, (U_G^H H_{g,k}^G)^T \right]^T$ 的最小奇异值对应的右奇异矢量。

6) 从基站进行用户选择：从基站 BS_g ($g \neq 1$) 从本小区中选出对其他基站干扰最小，即干扰泄露值最小的 S 个用户进行通信。

7) 上行通信：每小区被选出的 S 个用户发送信号，每个基站利用自己的有用信号空间 U_g 处理接收到的信号，去除小区间干扰，获得本小区用户发送的信号。最后，基站 BS_g 运用迫零算法得到矢量 $f_{g,s}$ ，消除小区内干扰，获得用户 $MS_{g,s}$ 发送的信号， $f_{g,s}$ 为矩阵 F 的第 s 列

$$F = \left(\left[U_g^H H_{g,1}^g v_{g,1}, \dots, U_g^H H_{g,S}^g v_{g,S} \right]^{-1} \right)^H \quad (7)$$

在系统没有急需通信的用户时，为了让通信资源的分配相对公平，采用轮询调度 (round-robin

scheduling) 的方式确定主小区，即从第 1 个传输块到第 G 个传输块依次确定小区 1 到小区 G 为主小区，依次循环轮转；主小区通信用户的选择也采用轮询调度的方式。例如，第 1 个传输块，主基站 BS_1 从 K 个用户中选择信道质量最好的 S 个用户，第 $G+1$ 个传输块从剩下的 $K-S$ 个用户中进行选择，直到所有用户都完成了一次通信。因此，在本文中，轮询主要指：1) 每个小区依次轮流作为“主小区”；2) “主小区”中的用户根据有用信道质量轮流通信。

4.2 最小传输块数分析

为便于对公平性进行比较，本文以系统中所有用户至少通信一次所需传输块数 T 为衡量标准， T 越小表示公平性越高， T 越大公平性越差。为对传输块数进行分析对比，下面给出本文算法所需传输块数和传统算法所需传输块数的期望值。

本文算法基于轮询机制选择通信用户，因此，本文算法所有用户至少通信一次所需传输块数 T 为 $\frac{GK}{S}$ 。由于传统算法中通信用户是随机选择的，故分析所需传输块数的期望值，现给出一个小区所需传输块数期望值。

定理 1 在一个包含 K 个用户的小区中，当每

个传输块选择一个通信用户，即 $S=1$ 时，传统 OIA 算法要实现每个用户至少通信一次，需要的传输块数 T 的期望值为

$$E\{T_1\} = K \ln K + K\gamma + \frac{1}{2} \quad (8)$$

其中， $\gamma \approx 0.5772$ 为欧拉常数。

以下为详细证明过程，其中， $E(i)$ 表示为使小区中第 i 个不同用户通信所需传输块数的期望值。

证明

1) 共 K 个用户，为使其中一个用户通信一次，只需一个传输块，故 $E(1)=1$ 。

2) 由于每个用户信道系数矩阵在传输块间的变化是相互独立的，因此，每次通信用户的选择是相互独立的，在已经有一个用户通信的情况下，为了让第 2 个不同的用户获得通信机会，有

$$\begin{aligned} P(1) &= \frac{K-1}{K} \\ P(2) &= \frac{1}{K} \times \frac{K-1}{K} \\ P(3) &= \left(\frac{1}{K}\right)^2 \times \frac{K-1}{K} \\ &\vdots \end{aligned}$$

其中， $P(i)$ 表示需要 i 个传输块才能让第 2 个不同用户获得通信机会的概率。

因此，有

$$\begin{aligned} E(2) &= 1 \times P(1) + 2 \times P(2) + 3 \times P(3) \dots \\ &= 1 \times \frac{K-1}{K} + 2 \times \frac{1}{K} \times \frac{K-1}{K} + 3 \times \left(\frac{1}{K}\right)^2 \times \frac{K-1}{K} \dots \end{aligned}$$

将 $E(2)$ 左右同时乘以 $\frac{1}{K}$ 得

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} \times E(2) &= 1 \times \frac{1}{K} \times \frac{K-1}{K} + 2 \times \left(\frac{1}{K}\right)^2 \times \\ &\frac{K-1}{K} + 3 \times \left(\frac{1}{K}\right)^3 \times \frac{K-1}{K} \dots \end{aligned}$$

将以上两式左右相减得

$$\begin{aligned} \frac{K-1}{K} \times E(2) &= \frac{K-1}{K} + \frac{1}{K} \times \frac{K-1}{K} + \\ &\left(\frac{1}{K}\right)^2 \times \frac{K-1}{K} + \left(\frac{1}{K}\right)^3 \times \frac{K-1}{K} \dots \end{aligned}$$

$$\frac{K-1}{K} \times E(2) = \frac{\frac{K-1}{K} \times \left(1 - \left(\frac{1}{K}\right)^n\right)}{1 - \frac{1}{K}}, n \rightarrow \infty$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时， $\left(\frac{1}{K}\right)^n \rightarrow 0$ ，故可得 $E(2) = \frac{K}{K-1}$ 。

3) 用同样的计算方式，可得 $E(3) = \frac{K}{K-2}$ 。

4) 因此，为了使小区中的 K 个用户都至少通信一次，需要的传输块数的数学期望为

$$\begin{aligned} E\{T_1\} &= E(1) + E(2) + E(3) + \dots + E(K) \\ &= 1 + \frac{K}{K-1} + \frac{K}{K-2} + \dots + \frac{K}{1} \\ &\approx K \ln K + K\gamma + \frac{1}{2} \end{aligned}$$

证毕。

在每个传输块中，由于系统中所有用户的信道系数矩阵是相互独立的，因此，每个小区的通信用户选择是相互独立的。在每个传输块，系统分别从 G 个小区中选择一个通信用户，由于任何一个小区的 K 个用户至少通信一次所需传输块数的数学期望为 $E\{T_1\}$ ，而 G 个小区中的所有用户至少通信一次所需传输块数的数学期望 $E\{T_G\} \geq E\{T_1\}$ 必然成立。

下面将进一步通过仿真验证，同等条件下本文算法所需传输块数明显少于现有文献。

4.3 算法性能分析

从 4.1 节和 4.2 节的讨论可以看出，本文算法中每个基站的有效信号空间不再是随机的，而是由协作簇中的主小区统一设计；在用户选择中，综合考虑用户通信需求、有用信道质量和干扰泄露，在获得更好系统性能的同时，用户选择也更为灵活，算法性能总结如下。

1) 用户通信需求快速响应：在系统中没有急需通信的用户时，主小区及其通信用户的选择采用公平的轮询机制，每个用户平等对待，用户不会因系统的随机选择长时间不能通信，通信资源分配相对公平；在系统中有急需通信的用户时，本文算法可以灵活调度，提升用户满意度。

2) 提升主小区容量性能：在系统中没有急需通信的用户时，主小区选择信道质量最好的用户进行通信；在系统中有急需通信的用户时，设计发送矢量为有用信道系数矩阵最大奇异值对应的右奇异

矢量, 均能提升主小区容量性能。

3) 减少次小区干扰: 由于算法将每个次基站的有效信号空间设计为主小区通信用户的等效干扰信道的零空间, 主小区用户对次基站的干扰信号被对齐到次基站的干扰空间中, 次基站可完全消除来自主小区的干扰, 从而减少次小区干扰。例如, 当 $G=3$ 时, 次基站的干扰减少了一半。

4) 提升系统公平性: 本文算法所有用户至少通信一次需要的传输块数目明显小于传统 OIA 算法, 例如, 当 $S=1$ 时, 本文算法所有用户至少通信一次需要的传输块数目最多为 GK , 由定理 1 可知, 当 $K > e^{(G-1)}$ 时, 所需传输块数目即少于传统 OIA 算法, 而 OIA 算法是以较大的用户基数 K 来保障性能的, K 越大, 本文算法优势越大, 即系统公平性越高。例如, 当 $G=3$ 时, 只需 $K > 11$, 本文算法所需传输块数即少于传统 OIA 算法。

综上所述, 本文算法较传统 OIA 算法在通信需求快速响应、提升系统容量和系统公平性等方面均有改善, 但这些性能的提升需要增加系统的部分反馈量。传统 OIA 算法中每个用户需要反馈干扰泄露给所属基站, 而在本文算法中, 由于所有基站的有效信号空间由主基站根据主小区用户的信道质量统一设计, 因此, 需要主小区的 K 个用户额外反馈自己的等效信道给主基站, 但相对于总的性能提升, 这部分反馈量是可以承受的。

5 性能仿真与分析

为对本文算法进行验证, 利用 Matlab 软件进行了仿真, 仿真中假设信道均为瑞利快衰落信道, 且各分量服从均值为 0、方差为 1 的高斯分布, 系统中的噪声服从均值为 0, 方差 $\sigma^2=1$ 的复高斯分布, 每个用户均以最大功率 P 发送信号, 仿真结果取自 10^5 次仿真实现的平均。

仿真中主要将本文算法与文献[13]和文献[18]算法进行对比, 选择对比的 SVD-OIA 算法和 R-ICAP-OIA 算法均是这 2 篇文献中性能最好的算法, 对比的性能包括系统容量、干扰泄露和公平性。本文将 3 种算法在不同小区数和不同通信用户数的情况下进行仿真对比, 其中, 当 $G=3, S=2$ 时, $N_t=2, N_r=4$, 当 $G=4, S=3$ 时, $N_t=3, N_r=6$ 。为保证对比的公平性, 将 R-ICAP-OIA 算法中权重系数 α 和路径损耗系数 β 均设置为 1。

图 3 为 3 种算法在 $G=3, S=2, N_t=2, N_r=4$ 、

K 分别为 20 和 100 时的系统总容量对比。从图中可以看出, 本文算法较 SVD-OIA 算法和 R-ICAP-OIA 算法性能更优, 且在 $K=20$ 时的容量比 SVD-OIA 算法在 $K=100$ 时的容量更优, 接近于 R-ICAP-OIA 算法在 $K=100$ 时的容量。其容量提升一部分来源于有用信号空间 U_g 的设计, 如图 1 所示, 在基站 2 处, 来自小区 1 的干扰信号 $H_{1,1}^2 v_{1,1}$ 和 $H_{1,2}^2 v_{1,2}$ 被完全对齐到基站 2 的干扰信号空间 U_2 中, 因此, 来自主小区 1 的小区间干扰被完全消除, 从而提升了次小区容量; 此外, 由于主小区用户不用考虑对次基站的干扰, 因此, 主基站在未通信的主小区用户中选择信道质量最好的用户进行通信, 也提升了主小区容量。

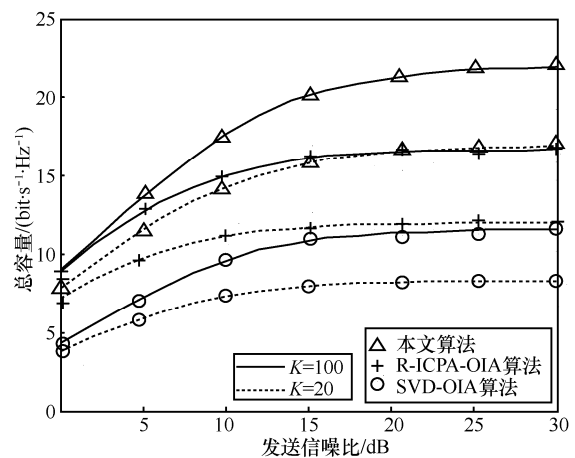


图 3 3 种算法在 $G=3, S=2, N_t=2, N_r=4, K$ 不同时总容量

图 4 是 3 种算法在小区数 $G=4, S=3$ 、每小区用户基数 K 分别为 20 和 100 时的系统总容量对比, 仿真中发送天线数 $N_t=3$, 接收天线数 $N_r=6$ 。可以看出随着发送信噪比和每小区总用户数的增加, 3 种算法系统容量均不断升高, 在发送信噪比大于 3 dB 后, 本文算法的容量明显优于另外 2 种算法。另外, 与图 3 相比, 在相同信噪比时图 4 的容量性能更差, 其原因在于用户基数很小时四小区的干扰更大。

图 5 为 3 种算法随每小区用户数 K 的增加, 系统的总干扰泄露变化对比。仿真中, 横纵坐标均进行了对数处理, 设置发送信噪比为 0 dB, 当 $G=3$ 时, $S=2, N_t=2, N_r=4$; 当 $G=4$ 时, $S=3, N_t=3, N_r=6$ 。从图中可以看出, 随着 K 的增加, 3 种算法的干扰泄露均不断减小, 小区数 $G=3$ 时的干扰泄露明显低于 $G=4$ 时, 且下降速度更快, 这是因为通信用户越

多, 干扰越强, 越需要更大的用户基数来对齐干扰, 减小干扰泄露。而在通信用户数 S 不同的 2 种情况下, 本文算法的干扰泄露均比 SVD-OIA 算法和 R-ICAP-OIA 算法更小, 验证了图 3 和图 4 的仿真结果和第 4 节的理论分析。

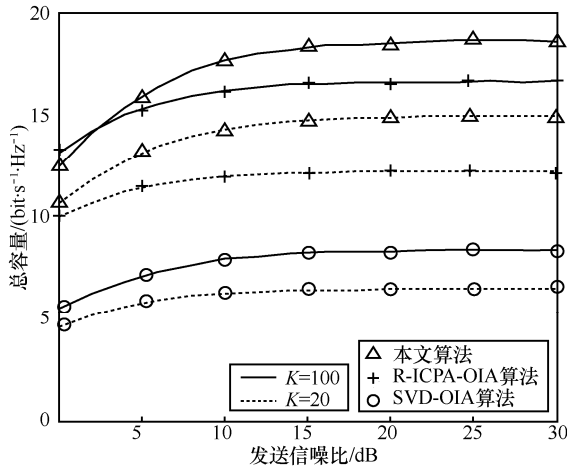


图 4 3 种算法在 $G=4, S=3, N_t=3, N_r=6, K$ 不同时总容量

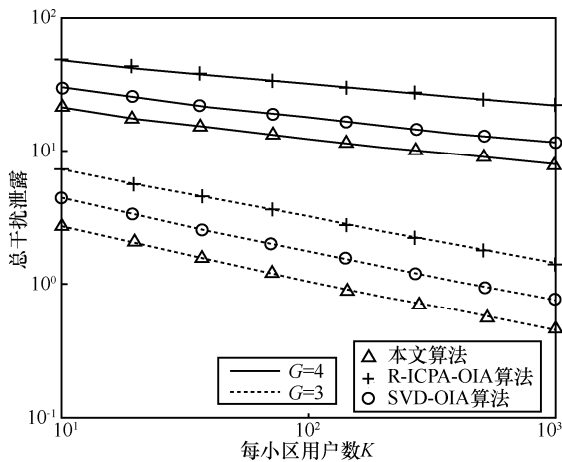


图 5 3 种算法在总干扰泄露随 K 变化时的对数坐标

为对比 3 种算法的公平性, 图 6 给出了当 $G=3, S$ 分别为 1 和 2 时, 3 种算法随每小区用户数 K 的增加, 所有用户至少通信一次系统所需传输块数对比。当每小区选择用户数 $S=1$ 时, $N_t=N_r=2$; 当 $S=2$ 时, $N_t=2, N_r=4$ 。由图中可以看出, 随着每小区用户数 K 增加, 所有用户至少通信一次所需传输块不断增加, 而本文算法所需传输块数量明显少于 SVD-OIA 算法和 R-ICAP-OIA 算法, 且随着用户数增大, 这种优势更为明显, 体现出本文算法公平性更优。另外, 可以看出 SVD-OIA 算法和 R-ICAP-OIA 算法的仿真结果几乎重合, 其原因在于这 2 种算法中通信用户的选择均是完全随机的。

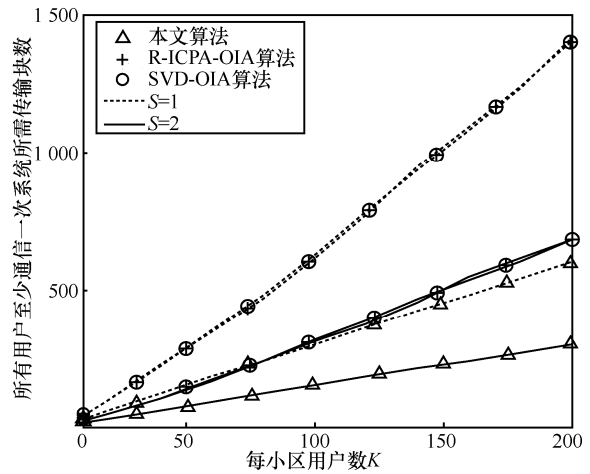


图 6 所有用户至少通信一次所需传输块数随 K 变化的对比

6 结束语

本文主要针对目前机会干扰对齐算法存在的问题, 提出了一种基于轮询机制的公平高效机会干扰对齐算法。首先, 基于轮询机制在主小区中选择信道质量最佳的用户通信, 然后通过设计从小区的有用信号空间完全消除主小区用户的干扰, 最后从小区选择干扰泄露最小的用户通信。通过理论分析和仿真表明, 较传统机会干扰对齐算法, 本文算法在公平性、系统容量等均有明显提升, 并可通过灵活调度, 实现用户通信接入快速响应。

参考文献:

- [1] CADAMBE V R, JAFAR S A. Interference alignment and degrees of freedom of the user interference channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3425-3441.
- [2] MADDAAH-ALI M A, MOTAHARI A S, KHANDANI A K. Communication over MIMO X channels: interference alignment, decomposition, and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3457-3470.
- [3] 景振海, 白宝明, 马啸. 频率选择性高干扰信道中的时频联合干扰对齐方案[J]. 通信学报, 2011, 32(9): 161-166.
JING Z H, BAI B M, MA X. Joint time-frequency interference alignment in the frequency-selective Gaussian interference channel[J]. Journal on Communications, 2011, 32(9): 161-166.
- [4] 朱世磊, 周游, 任修坤, 等. 认知 MIMO 干扰网络的顽健干扰对齐算法[J]. 通信学报, 2016, 37(3): 157-164.
ZHU S L, ZHOU Y, REN X K, et al. Robust interference alignment algorithm for cognitive MIMO interference network[J]. Journal on Communications, 2016, 37(3): 157-164.
- [5] EL AYACH O, PETERS S W, HEATH R W. The practical challenges of interference alignment[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(1): 35-42.

- [6] YU H. A review on interference alignment in multiuser interference channels[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 83(3): 1751-1764.
- [7] ZENG H, TIAN F, HOU Y T, et al. Interference alignment for multi-hop wireless networks: challenges and research directions[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(2): 74-80.
- [8] LEE J H, CHOI W. Opportunistic interference aligned user selection in multiuser MIMO interference channels[C]//*Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*. 2010: 1-5.
- [9] LEE J H, CHOI W. Interference alignment by opportunistic user selection in 3-user MIMO interference channels[C]//*2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2011: 1-5.
- [10] JUNG B C, SHIN W Y. Opportunistic interference alignment for interference-limited cellular TDD uplink[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(2): 148-150.
- [11] WANG L F, LI Q, LI S Q, et al. A general algorithm for uplink opportunistic interference alignment in cellular network[C]//*2011 IEEE GLOBECOM Workshops*. 2011: 436-440.
- [12] JUNG B C, PARK D, SHIN W Y. Opportunistic interference mitigation achieves optimal degrees-of-freedom in wireless multi-cell uplink networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(7): 1935-1944.
- [13] YANG H J, SHIN W Y, JUNG B C, et al. Opportunistic interference alignment for MIMO interfering multiple-access channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5): 2180-2192.
- [14] YANG H J, JUNG B C, SHIN W Y, et al. Codebook-based opportunistic interference alignment[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(11): 2922-2937.
- [15] YOON J, SHIN W Y, LEE H S. Energy-efficient opportunistic interference alignment[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(1): 30-33.
- [16] LIU G Q, SHENG M, WANG X J, et al. Opportunistic interference alignment and cancellation for the uplink of cellular networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(4): 645-648.
- [17] JIN H, JEON S W, JUNG B C. Opportunistic interference alignment for random access networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(12): 5947-5954.
- [18] REN Y, LV T J, GAO H, et al. Wireless information and energy transfer in multi-cluster MIMO uplink networks through opportunistic interference alignment[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 3100-3111.

作者简介:



谢显中 (1966-), 男, 四川通江人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为干扰对齐、MIMO 传输、认知无线电等。



卢华兵 (1987-), 男, 重庆人, 重庆邮电大学博士生, 主要研究方向为干扰对齐、绿色通信、5G 等。



施赵媛 (1987-), 女, 安徽安庆人, 安庆师范大学讲师, 主要研究方向为干扰对齐、联合传输、5G 等。