

7-2-2020

Novel Access Control and Interference Alignment Based MIMO Link Scheduling Algorithm

Zui Xiong

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Keren Wang

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Jin Hu

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Xu Yun

Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Novel Access Control and Interference Alignment Based MIMO Link Scheduling Algorithm

Abstract

Abstract: Interference alignment (IA) attracts global attention for its capability of improving the throughput of MIMO systems. To ensure the system stability, researchers proposed access control and IA combined in link scheduling. *In order to compensate for the deficiency of minimum interference leakage IA (MinL-IA) algorithm in terms of the expected signal gain, an alternative IA algorithm named MaxSINR-IA combined with access control was applied, and a novel semi-distributed scheduling algorithm (SDSIA-MaxSINR) algorithm was proposed. The theoretical analysis and simulation results demonstrate that SDSIA-MaxSINR algorithm is evidently superior to SDSIA-MinL algorithm in a higher SINR requirement, although MaxSINR-IA is inferior to the MinL-IA in terms of computational complexity.*

Keywords

link scheduling, access control, interference alignment, MIMO network

Recommended Citation

Xiong Zui, Wang Keren, Jin Hu, Xu Yun. Novel Access Control and Interference Alignment Based MIMO Link Scheduling Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 907-913.

基于接入控制与干扰对齐的 MIMO 链路调度算法

熊最, 王可人, 金虎, 徐云

(电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要: 干扰对齐(Interference Alignment, IA)因其能提升 MIMO(Multiple Input Multiple Output)系统性能受到了广泛关注。现有链路调度将接入控制与最小干扰泄露准则(Minimum Interference Leakage, MinL)的 IA 相结合以保证系统稳定性, 但 MinL 准则下 IA 获取的期望信号增益较弱。为了弥补这一不足, 提出将基于 MaxSINR 准则的 IA 算法, 提出了一种基于 IA-MaxSINR 的半分布式调度算法 SDSIA-MaxSINR。理论分析和仿真实验表明, MaxSINR-IA 算法的计算复杂度比 MinL-IA 算法高, 但在高 SINR 需求下, SDSIA-MaxSINR 算法所获取的吞吐量明显高于 SDSIA-MinL 算法。

关键词: 链路调度; 接入控制; 干扰对齐; MIMO 网络

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 04-0907-07

Novel Access Control and Interference Alignment Based MIMO Link Scheduling Algorithm

Xiong Zui, Wang Keren, Jin Hu, Xu Yun

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Interference alignment (IA) attracts global attention for its capability of improving the throughput of MIMO systems. To ensure the system stability, researchers proposed access control and IA combined in link scheduling. In order to compensate for the deficiency of minimum interference leakage IA (MinL-IA) algorithm in terms of the expected signal gain, an alternative IA algorithm named MaxSINR-IA combined with access control was applied, and a novel semi-distributed scheduling algorithm (SDSIA-MaxSINR) algorithm was proposed. The theoretical analysis and simulation results demonstrate that SDSIA-MaxSINR algorithm is evidently superior to SDSIA-MinL algorithm in a higher SINR requirement, although MaxSINR-IA is inferior to the MinL-IA in terms of computational complexity.

Keywords: link scheduling; access control; interference alignment; MIMO network

引言

MIMO(Multiple Input Multiple Output)无线通信系统因其在提高系统空间频谱利用率上的强大优势, 在近些年来受到了广泛的关注。但由于在多用户 MIMO 系统中并发通信链路之间的干扰问题,

MIMO 通信系统的设计面临着严峻的挑战。2008 年, Syed Jafar 提出了一种称为干扰对齐(IA, Interference Alignment)的干扰管理方法^[1], 用以解决多用户间干扰严重的问题。现有的研究成果^[1]表明, 对未使用干扰对齐的 K 用户干扰信道, 每个用户的和速率可达 $(1/K)\log(SNR) + o(\log(SNR))$, 其中, SNR 表示信噪比(Signal to Noise Ratio), 而使用干扰对齐后, 每个用户可达到的和速率可表示为 $(1/2)\log(SNR) + o(\log(SNR))$ 。

目前干扰对齐的研究主要包括不同信道下干



收稿日期: 2014-12-15 修回日期: 2015-04-16;
作者简介: 熊最(1988-), 男, 湖北黄冈, 博士生, 研究方向为干扰对齐; 王可人(1957-), 男, 江苏镇江, 教授, 博导, 研究方向为通信信号处理; 金虎(1973-), 男, 安徽潜山, 博士, 副教授, 研究方向为通信信号处理等。

<http://www.china-simulation.com>

• 907 •

扰对齐能获取的系统性能^[2-4]、不同干扰连接方式下的干扰对齐可行性条件^[5-6]以及低复杂度的干扰对齐算法^[7-8]等等。很多学者针对干扰对齐的实用化进行了探究^[9-11]。但由于用户数目 K 较小, 所有用户均在同一时隙内进行通信, 并未涉及到链路调度。当用户数目增加时, 干扰对齐的设计将更加复杂。因此, 对于干扰用户较多的情况, 亟需一种能够保证干扰对齐可行的调度策略。文献[12]提出了一种采用干扰对齐的调度策略, 即通过选择用户以达到每个传输时隙内的最大和速率。但是, 这种策略是基于穷尽搜索的方法, 对于用户数目较大的情况并非良策。文献[13-14]提出了一种针对蜂窝上行系统的机会干扰对齐策略, 该策略中每个基站机会式地选取对其他基站产生最小干扰的用户用以调度, 因而不需要在发射端获取全局的信道状态信息, 但并未考虑系统的稳定性。文献[15]中提出了一种针对多蜂窝网络的动态调度策略, 能够在保证系统稳定性的条件下使得公平性函数最大化。但忽视了可能会影响系统稳定性的接入控制问题。为了解决系统稳定性的问题, 文献[16]提出了一种联合干扰对齐和接入控制的调度算法, 并将李雅普诺夫稳定理论应用到算法中, 但所采用的最小干扰泄露 (Minimal Interference Leakage, MinL) 准则的干扰对齐算法并未使得期望信号子空间内的期望信号功率最大, 而且上述准则未充分利用期望信号的信道信息。因此, 这种情况下, 尽管期望信号子空间内的干扰被消除, 但未获得期望信号的合并增益。

因此, 本文考虑在文献[16]的基础上, 将最大信干噪比(maximal signal to interference plus noise ratio, MaxSINR)准则的干扰对齐算法与接入控制相结合, 提出了一种适用于 MIMO 网络的半分布式调度算法(SDSIA-MaxSINR), 该算法能在保证系统稳定的条件下, 能提高期望信号功率和平均吞吐量。

1 系统模型

考虑一个 MIMO 网络, 每条链路为一个用户, 且都对应着一对发射端和接收端。令 $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ 表示用户的集合。假设每个用户的接收端节点能够侦听到其它任何一个用户的信号发射。网络的传输时间划分为等长的时隙, 且令 $\mathcal{T} = \{0, \dots, T-1\}$ 表示时隙的集合。对于每个用户 $k \in \mathcal{K}$, 引入一个调度参数 $\rho_k(t) \in \{0, 1\}$, 当用户 k 在时隙 t 内发送数据时 $\rho_k(t) = 1$, 反之, $\rho_k(t) = 0$ 。假设每个时隙内, 一个用户最多只能发送一个数据包。

如图 1 所示, 用户 k 的发射端和接收端分别配置 M_k 和 N_k 根天线。在每一个传输时隙 $t \in \mathcal{T}$ 内, 如果用户 k 被调度, 那么其发送的数据包 $\mathbf{x}_k(t)$ 为 $d_k \times 1$ 的符号向量。用户 k 的发送节点利用预编码矩阵 $\mathbf{V}_k(t) \in \mathbb{C}^{M_k \times d_k}$ 对数据包进行预编码, 将编码后的 $M_k \times 1$ 发送向量发送到对应的 M_k 根天线。

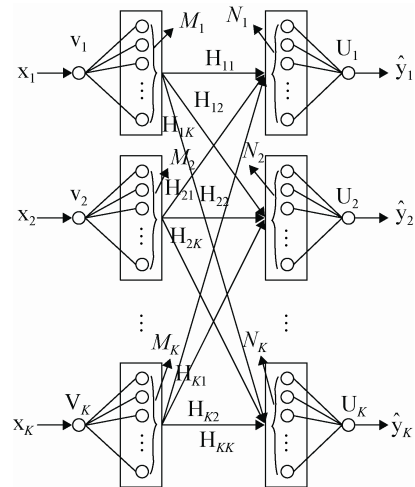


图 1 K 用户 MIMO 干扰信道模型

对于任意的两个用户 $k, l \in \mathcal{K}$, 在时隙 t 内, 用户 k 的发射节点和用户 l 的接收节点间的信道矩阵为 $\mathbf{H}_{lk}(t) \in \mathbb{C}^{N_l \times M_k}$ 。用户 l 接收端接收到的数据包为 $N_l \times 1$ 的向量, 通过接收矩阵 $\mathbf{U}_l(t) \in \mathbb{C}^{N_l \times d_l}$ 进行解预编码后, 所得到的数据包可表示为

$$\mathbf{y}_l(t) = \sum_{k \in \mathcal{K}} \rho_k(t) \mathbf{U}_l^*(t) \mathbf{H}_{lk}(t) \mathbf{V}_k(t) \mathbf{x}_k(t) + \mathbf{U}_l^*(t) \mathbf{n}_l(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{U}_l^*(t)$ 为 $\mathbf{U}_l(t)$ 的共轭转置; $\mathbf{n}_l(t)$ 为加性高斯白噪声。

1.1 干扰对齐模型

对于理想的干扰对齐而言, 其旨在尽可能消除干扰信号在用户接收端无干扰子空间内的投影, 只须满足以下可行性条件即可:

$$\mathbf{U}_l^*(t)\mathbf{H}_{lk}(t)\mathbf{V}_k(t) = 0, \quad \forall k, l \in \mathcal{K}, k \neq l \quad (2)$$

$$\text{rank}(\mathbf{U}_k^*(t)\mathbf{H}_{kk}(t)\mathbf{V}_k(t)) = d_k \quad (3)$$

但是, 求解上述等式是一个 NP-hard 问题。为了衡量干扰对齐的实现程度, 令 $I_l(t) = \sum_{k \in \mathcal{K} \setminus \{l\}} I_{lk}(t)$ 表示任意用户 $l \in \mathcal{K}$ 的干扰总泄露, 其中

$$I_{lk}(t) = \frac{1}{d_k} \text{tr}(\mathbf{U}_l^*(t)\mathbf{H}_{lk}(t)\mathbf{V}_k(t)\mathbf{V}_k^*(t)\mathbf{H}_{lk}^*(t)\mathbf{U}_l(t)) \quad (4)$$

表示用户 k 的发送端在用户 l 的接收端泄露的干扰, $\text{tr}(\cdot)$ 表示括号内矩阵的迹。

文献[16]使用了基于最小干扰泄露准则作为干扰对齐优化问题的约束条件, 即任意一个调度用户 $k \in \mathcal{K}$ 的 $I_k(t)$ 低于一个指定的门限值 ε :

$$\rho_k(t)I_k(t) \leq \varepsilon \quad (5)$$

另外, 每个调度用户 k 的接收信号功率必须大于一个接收门限值 P_{th} , 即:

$$I_{kk}(t) \geq P_{th}\rho_k(t), \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (6)$$

由于 MinL 准则下的干扰对齐算法仅仅是为了尽可能消除干扰泄露, 并未充分利用期望信号的信道信息, 因而无法获得期望信号在接收端的合并增益, 因此, 本节考虑使用文献[8]中提出的 MaxSINR 准则来选取接收矩阵使得接收端的 SINR 最大化。在考虑干扰对齐时, 尽管每个发送端发出的数据流所采用的预编码向量是正交的这一假设并不失一般性, 但在 SINR 最优化过程中, 正交的预编码向量却是次优的^[8]。因此, 对于第 k 个接收端的第 p 条数据流上的 SINR 可表示为

$$\text{SINR}_{kp}(t) = \frac{[\mathbf{U}_k^{*p}(t)]^H \mathbf{H}_{kk}(t) \mathbf{V}_k^{*p}(t) [\mathbf{H}_{kk}^*(t) \mathbf{V}_k^{*p}(t)]^H \mathbf{U}_k^{*p}(t)}{[\mathbf{U}_k^{*p}(t)]^H \mathbf{B}_{kp}(t) \mathbf{U}_k^{*p}(t)} \times \frac{1}{d_k} \quad (7)$$

$$\mathbf{B}_{kp}(t) = \sum_{j=1}^K \frac{1}{d_j} \sum_{d=1}^{d_j} \mathbf{H}_{kj}(t) \mathbf{V}_j^{*d}(t) [\mathbf{H}_{kj}(t) \mathbf{V}_j^{*d}(t)]^H - \frac{1}{d_k} \mathbf{H}_{kk}(t) \mathbf{V}_k^{*p}(t) [\mathbf{H}_{kk}(t) \mathbf{V}_k^{*p}(t)]^H + \mathbf{I}_N^k \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)得到接收向量为

$$\mathbf{U}_k^{*p} = \frac{(\mathbf{B}_{kp}(t))^{-1} \mathbf{H}_{kk}(t) \mathbf{V}_k^{*p}(t)}{\|(\mathbf{B}_{kp}(t))^{-1} \mathbf{H}_{kk}(t) \mathbf{V}_k^{*p}(t)\|} \quad (9)$$

为了满足最大 SINR 准则, 用户 k 的接收端上所有数据流的 SINR 必须满足式(10)的要求

$$\text{SINR}_{kp}(t) \geq \rho_k(t) \Gamma_{th}, \quad p \in \{1, \dots, d_k\} \quad (10)$$

式中: Γ_{th} 表示接收端的 SINR 门限。

1.2 接入控制模型

考虑在每个用户的发射端执行接入控制, 并保持一个 backlog 队列。假设 $Q_k(t)$ 表示时隙 t 内用户 k 的发射队列中等待发送的数据包个数, 令 $\alpha_k(t)$ 表示时隙 t 内用户 k 的发射队列中允许发送的数据包个数。假设每个时隙内允许发送的数据包个数有限, 最大为 α_{\max} , 即 $\alpha_k(t) \leq \alpha_{\max}$ 。因此, 用户 k 处的 backlog 可建模为一个带有到达参数 $\alpha_k(t)$ 和服务参数 $\rho_k(t)$ 的队列, 即

$$Q_k(t+1) = \max\{Q_k(t) - \rho_k(t), 0\} + \alpha_k(t), \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (11)$$

该网络强稳定的条件为

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbb{E}\{Q_k(t)\} < \infty \quad (12)$$

式中: 期望运算 \mathbb{E} 针对所有可能的信道状态。

如果网络是稳定的, 那么每个用户 $\forall k \in \mathcal{K}$ 发送端的许可率 $\alpha_k(t)$ 也即是相应的接收端的吞吐量。因此, 每个用户 $\forall k \in \mathcal{K}$ 在时隙 T 内的平均吞吐量可表示为

$$\bar{\alpha}_k = \frac{1}{T} \sum_{t \in \mathcal{T}} \mathbb{E}\{\alpha_k(t)\} \quad (13)$$

整个网络的总吞吐量可表示为

$$\bar{\alpha} = \sum_{k \in \mathcal{K}} \bar{\alpha}_k = \frac{1}{T} \sum_{t \in \mathcal{T}} \mathbb{E}\{\alpha(t)\} \quad (14)$$

式中: $\alpha(t) = \sum_{k \in \mathcal{K}} \alpha_k(t)$ 表示在时隙 t 内上层控制允许的总的数据包个数。假设所有的许可率形成的集合表示为 $\bar{\alpha} = (\bar{\alpha}_1, \dots, \bar{\alpha}_K)$, 并且定义集合 Π 为满足稳定条件的 $\bar{\alpha}$ 的集合。即当 $\bar{\alpha} \in \Pi$ 时, 网络是稳定的。

1.3 问题优化模型

根据第 1.1 节和第 1.2 节的分析, 本文可以给出基于干扰对齐和接入控制的调度优化模型和算法, 其优化的目的在于保证系统稳定性的前提下, 使得网络的吞吐量最大化。因此, 基于 MaxSINR 准则的优化问题可表示为

$$\underset{\mathbf{a}(t), \mathbf{p}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{V}(t), t \in \mathcal{T}}{\text{maximize}} \quad \bar{\alpha}$$

满足约束条件为:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &\in \Pi, & k &\in \mathcal{K}, \\ \text{SINR}_{kp}(t) &\geq \rho_k(t)\Gamma_{th}, & k &\in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, p \in \{1, \dots, d_k\}, \\ \rho_k(t) &\in \{0, 1\}, & k &\in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \\ 0 &\leq \alpha_k(t) \leq \alpha_{\max}, & k &\in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{a}(t) = (\alpha_1(t), \dots, \alpha_K(t))$ 表示在时隙 t 内被许可的数据包向量, $\mathbf{p}(t) = (\rho_1(t), \dots, \rho_K(t))$ 表示调度参数向量, $\mathbf{U}(t)$ 和 $\mathbf{V}(t)$ 分别表示所 $\mathbf{U}_k(t)$ 和 $\mathbf{V}_k(t)$ 的集合。

在上述优化问题中, 目标函数为网络总吞吐量。在解决优化问题前, 首先介绍李雅浦诺夫稳定理论的相关内容。令李雅浦诺夫函数 $L(\mathbf{Q}(t))$ 是关于向量 $\mathbf{Q}(t) = (Q_1(t), \dots, Q_K(t))$ 的非负函数。定义 $\Delta(\mathbf{Q}(t)) \triangleq \mathbb{E}\{L(\mathbf{Q}(t+1)) - L(\mathbf{Q}(t)) | \mathbf{Q}(t)\}$ 为李雅浦诺夫平移。

定理 1: (Lyapunov Optimization) 令 $\alpha(t)$ 为时刻 t 的效用函数, A , ε 和 Z 在所有的时隙内均为正常数, $\mathbf{Q}(t)$ 为队列向量, 那么,

$$\Delta(\mathbf{Q}(t)) - Z\mathbb{E}\{\alpha(t) | \mathbf{Q}(t)\} \leq A - \varepsilon \sum_{k \in \mathcal{K}} Q_k(t) - Z\alpha^* \quad (16)$$

其中, α^* 为效用函数的任意一个目标值。可得

$$\alpha_{\inf} \geq \alpha^* - A/Z \quad (17)$$

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbb{E}\{Q_k(t)\} \leq \frac{A + Z(\alpha_{\sup} - \alpha^*)}{\varepsilon}$$

$$\alpha_{\sup} = \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t \in \mathcal{T}} \mathbb{E}\{\alpha(t)\}, \quad \alpha_{\inf} = \liminf_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T}$$

$\sum_{t \in \mathcal{T}} \mathbb{E}\{\alpha(t)\}$ 证明详见文献[17]。当给定 $\mathbf{a}(t)$ 、调度参数 $\mathbf{p}(t)$ 以及编解码矩阵 $\mathbf{U}(t)$ 和 $\mathbf{V}(t)$, 优化问题(15)可等价于

$$\underset{\mathbf{a}(t), \mathbf{p}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{V}(t), t \in \mathcal{T}}{\text{maximize}} \quad \sum_{k \in \mathcal{K}} (Q_k(t)\rho_k(t) + \alpha_k(t)(Z - Q_k(t)))$$

满足约束条件为:

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{kp}(t) &\geq \rho_k(t)\Gamma_{th}, & k &\in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, p \in \{1, \dots, d_k\}, \\ \rho_k(t) &\in \{0, 1\}, & k &\in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \\ 0 &\leq \alpha_k(t) \leq \alpha_{\max}, & k &\in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T} \end{aligned} \quad (18)$$

优化问题(18)等效于问题(15)的证明见文献[16]。

由于优化问题(18)中目标函数的第一项和第二项之间相互独立, 从而可将该优化问题划分为两个部分。第一部分主要考虑链路调度与干扰对齐的问题, 即

$$\underset{\mathbf{a}(t), \mathbf{p}(t), \mathbf{U}(t), \mathbf{V}(t), t \in \mathcal{T}}{\text{maximize}} \quad \sum_{k \in \mathcal{K}} Q_k(t)\rho_k(t)$$

满足约束条件为:

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{kp}(t) &\geq \rho_k(t)\Gamma_{th}, & k &\in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, p \in \{1, \dots, d_k\}, \\ \rho_k(t) &\in \{0, 1\}, & k &\in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \end{aligned} \quad (19)$$

第二部分主要考虑接入控制的问题, 可表示为

$$\underset{\mathbf{a}(t), t \in \mathcal{T}}{\text{maximize}} \quad \sum_{k \in \mathcal{K}} \alpha_k(t)(Z - Q_k(t)) \quad (20)$$

满足约束条件为: $0 \leq \alpha_k(t) \leq \alpha_{\max}$, $\forall k \in \mathcal{K}$, $t \in \mathcal{T}$ 。当 $Q_k(t) \leq Z$ 时, $\alpha_k(t) = \alpha_{\max}$; 反之, $\alpha_k(t) = 0$ 。

2 算法描述

本文提出一种半分布式的调度算法, 主要包含 2 个部分。如图 2 所示, 第 1 部分中, 主要包括 3 个过程: (1) 传输调度: 待调度用户集合 \mathcal{S} 表示在当前时隙内有至少一个数据包需要发送的用户集合。选取当前时隙内队列中待发数据包最大的用户作为调度用户, 将其对应的调度参数设置为 1, 并将该用户从待调度用户集合 \mathcal{S} 中剔除。通过干扰对齐计算处理后, 判定当前调度用户是否满足干扰对齐的可行性。若不可行, 将最新加入的调度用户 $\rho_k(t) = 0$ 。上述过程一直重复, 直到待调度用户集合 \mathcal{S} 为空集为止。在这一传输调度过程中, 本文采用的是最常见的 Longest-Queue-First 调度算法。(2) 干扰对齐的信号设计与参数计算: 该过程是采用基于 MaxSINR 准则的迭代干扰对齐算法进行处理, 其详细处理步骤见文献[8]。(3) 可行性检验: 在 SDSIA-MaxSINR 算法的每一次迭代中, 通过获取的每个调度用户接收端对应的 SINR, 按照问题(18)中给出的约束条件, 判定当前调度用户是否满

足干扰对齐的可行性。第 2 部分中, 主要包括 2 个过程: (1) 根据当前调度用户的队列长度, 确定该队列的接入速率; (2) 结合每个用户对应的队列

接入速率, 依据式(11)对自身的队列长度进行更新。

SDSIA-MaxSINR算法: 该算法在每个传输时隙内运行。

输入参数: 当前时隙内的队列长度 $Q(t)$, 信道状态矩阵 $H(t)$

预设参数: $\alpha_{\max}, Z, \Gamma_{th}$

输出参数: 下一时隙的队列长度 $Q(t+1)$, 调度参数 $\rho(t)$, 接入控制向量 $\alpha(t)$

Part I: 干扰对齐与链路调度

1、初始化:

预编码矩阵 $V(t)$, 调度参数 $\rho(t)=0$, 待调度用户集合 S

2、调度处理:

while $S \neq \emptyset$ **do**

 令 $k' := \underset{k \in S}{\operatorname{argmax}} Q_k(t), \rho_{k'}(t) := 1$

 更新待调度用户集: $S := S \setminus \{k'\}$

 更新调度用户集: $S_d := \{l \in \mathcal{K} \mid \rho_l(t) = 1\}$

 计算调度用户的期望信号功率和SINR:

$[SINR_{S_d}, P_{S_d}] = \max SINR_output(H(t), V_{S_d}(t), d_{S_d})$

 令 feasibility = 1

for each $\{l \in S_d\}$ **do**

if $SINR_l < \Gamma_{th}$ **then**

 feasibility = 0

end if

end for

if feasibility $\neq 1$ **then**

$\rho_{k'}(t) := 0$

end if

end while

Part II: 接入控制

1、判别当前队列长度

if $Q_k(t) \leq Z$ **then**

$\alpha_k(t) = \alpha_{\max}$

else

$\alpha_k(t) = 0$

end if

2、更新队列信息

$Q_k(t+1) = \max\{Q_k(t) - \rho_k(t), 0\} + \alpha_k(t)$

maxSINR_output: 基于MaxSINR准则的
| 干扰对齐算法对应的计算函数。 |

| 输入参数: |

| 信道状态矩阵: $H(t)$ |

| 调度用户对应的预编码矩阵: $V_{S_d}(t)$ |

| 调度用户期望获取的DoF: d_{S_d} |

| 输出参数: |

| 调度用户接收端对应的SINR: $SINR_{S_d}$ |

| 调度用户期望信号功率P: P_{S_d} |

图 2 MaxSINR-SDSIA 算法流程

根据第 1 节中给出的 MaxSINR-IA 算法与上述算法的运算步骤, 可得出, 在用户数 K 、每个用户配置的天线数 M (收发天线数取相同)以及期望信号 DoF 为 d 等参数均设置相同时, MinL-IA 算法一次迭代复杂度约为

$$O(2K^2M^3 + 2K^2M^2d - 2KM^2d + 4K^2)$$

而 MaxSINR-IA 算法一次迭代复杂度约为

$$O(2K^2M^4d^2 + 2M^4 + 4M^3 + 2Kd + 2K + 2K^2d + 2K^2d^2)$$

因此, 单次迭代条件下, MaxSINR-IA 算法的计算复杂度高于 MinL-IA 算法。

3 仿真实验

第 2 节中针对 SDSIA 算法作了详细的描述, 本节将对 SDSIA 算法的性能进行仿真。本节主要进行 4 轮实验:

实验 1: 考虑迭代条件下 IA 算法的收敛性对比

该实验中, 设用户数为 5, 每个用户收发两端

均配置 3 根天线, 且每个用户期望自由度为 1。为了便于观察, MinL-IA 与 MaxSINR-IA 算法均迭代 100 次。为了保证该算法对不同信道条件的适应性, 本文将随机生成的 100 种信道条件下的结果进行平均, MaxSINR-IA 迭代算法的收敛残差量级为 $1e-11$, MinL-IA 迭代算法的收敛残差量级为 $1e-12$ 。

实验 2: 考虑 SINR 需求对 SDSIA 算法性能影响

设用户数为 5, 每个用户收发两端均配置 3 根天线, 且每个用户期望自由度为 1, 初始队列长度为 10, 调度总时隙长度为 50, SINR 需求范围为 1:0.5:5。为了便于观察, MinL-IA 与 MaxSINR-IA 算法均迭代 100 次。同时, 为了保证该算法对不同信道条件的适应性, 本文将随机生成的 100 种信道条件下的实验结果进行平均, 如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 随着 SINR 需求的提高, SDSIA-MaxSINR 算法与 SDSIA-MinL 算法的性能均在降低。但同时, SDSIA-MaxSINR 算法所获取

的吞吐量明显高于 SDSIA-MinL 算法。这是因为, 根据 $\Gamma_{th} = P_{th}/(\sigma^2 + I_{\varepsilon})$ (其中, P_{th} 为期望信号功率, σ^2 为噪声功率, I_{ε} 为干扰泄露功率) 可知, 当 SINR 需求提高时, 若保持干扰泄露不变, 那么, 算法对期望信号功率的需求相应增加。而 MinL-IA 算法相比 MaxSINR-IA 算法则明显不足。

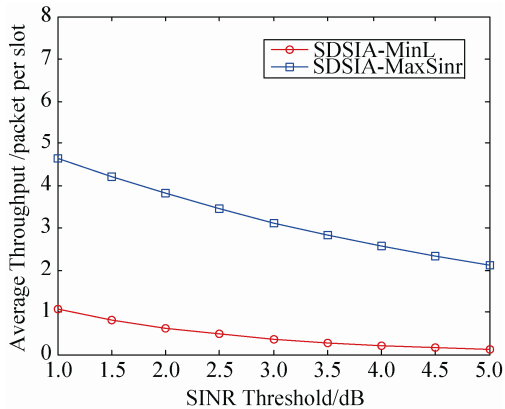


图 3 SINR 需求对 SDSIA 算法的性能影响对比

实验 3: 不同用户数条件下 SINR 需求对 SDSIA-MaxSINR 算法性能的影响

该实验中, 设用户数分别为 1, 4, 7, 10, 13, 每个用户收发两端均配置 3 根天线, 且每个用户期望自由度为 1, 初始队列长度为 10, 调度总时隙长度为 50, SINR 需求范围为 1:0.5:5。为了便于观察, MaxSINR-IA 算法均迭代 100 次。同时, 为了保证该算法对不同信道条件的适应性, 本文将随机生成的 100 种信道条件下的实验结果进行平均, 得出如图 4 所示仿真结果。

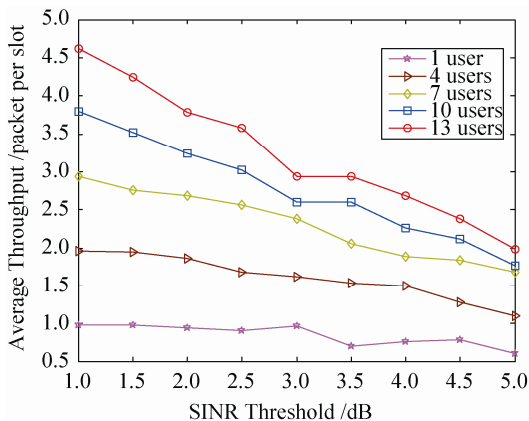


图 4 SINR 需求对 SDSIA-MaxSINR 算法影响

从图 4 中的仿真结果可以看出, 随着 SINR 需求的不断提高, 不同用户数的 SDSIA-MaxSINR 算法性能均随之下降。这是因为, 在多个用户同时采用 MaxSINR 准则下的 IA 算法时, 每个用户均能在当前条件下获得最大的迭代 SINR, 但这些 SINR 不尽相同。当 SINR 需求发生变化时, 势必会造成部分用户无法在同时时隙内被调度, 因而造成同一时隙内的并行传输链路数降低。在总的链路数一定条件下, 系统所需的调度时隙必然增加, 从而导致系统平均吞吐量的下降。

实验 4: 考虑不同用户数条件下 SDSIA 算法性能

该实验中, 用户数从 1 到 15, 天线数分别取 2 和 3, 期望自由度为 1, 调度总时隙长度为 50, 初始队列长度为 0, 队列饱和门限为 10, SINR 需求值设为 2.5, 为了便于观察, MinL-IA 与 MaxSINR-IA 算法均迭代 100 次。同时, 为了保证该算法对不同信道条件的适应性, 本文将随机生成的 100 种信道条件下的实验结果进行平均, 得出如图 5 所示仿真结果。

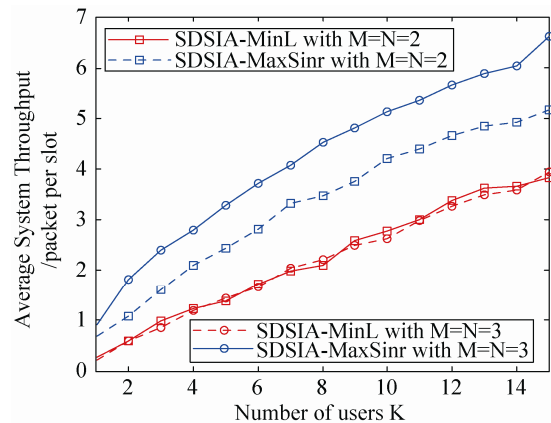


图 5 不同用户数条件下 SDSIA 算法性能对比

如图 5 中的仿真结果所示, 在给定的 SINR 需求下, 随着用户数量的增加, SDSIA-MaxSINR 算法所获得的系统平均吞吐量均高于 SDSIA-MinL 算法。由于 SDSIA-MinL 算法无法满足高 SINR 需求, 因而, 在算法判决过程中, MinL-IA 算法得到的可行的链路数量低于 MaxSINR-IA 算法。当每个

用户配置的天线数增加时, SDSIA-MaxSINR 算法的性能得到进一步提高。这是因为当天线数增加时, 每个用户可以通过干扰对齐来调度更多的链路同时通信。与之不同的是, SDSIA-MinL 算法的性能却未明显改变。这是由于 MinL-IA 算法无法获得有效的期望增益以满足 SINR 需求造成的。

4 结论

针对基于 MinL 准则的 IA 算法无法获取较好的期望信号增益这一不足, 本文提出将 MaxSINR 准则的 IA 算法与接入控制相结合, 用于 MIMO 链路调度问题中。通过构建链路调度优化问题模型, 设计了一种 SDSIA-MaxSINR 算法对该优化问题进行实现。由于干扰对齐理论在链路调度中的研究才刚刚起步, 诸如 CSI 获取、信道估计精度、网络拓扑结构设计、通信开销等问题还有待进一步解决。

参考文献:

- [1] V Cadambe, S Jafar. Interference Alignment and the Degrees of Freedom of the K User Interference Channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory (S0018-9448), 2008, 54(8): 3425-3441.
- [2] L Li, H Jafarkhani. Maximum-Rate Transmission with Improved Diversity Gain for Interference Networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory (S0018-9448), 2013, 59(9): 5313-5330.
- [3] M Razaviyayn, G Lyubeznik, Z Q Luo. On the Degrees of Freedom Achievable through Interference Alignment in a MIMO Interference Channel [J]. IEEE Transactions on Signal Processing (S1053-587X), 2012, 60(2): 812-821.
- [4] Y H Jong, S W Yong, J B Chul, et al. Opportunistic Interference Alignment for MIMO Interfering Multiple-Access Channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications (S1536-1276), 2013, 12(5): 2180-2192.
- [5] Y C M, G T Gao, S Jafar. On Feasibility of Interference Alignment in MIMO Interference Networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing (S1053-587X), 2010, 58(9): 4771-4782.
- [6] T Liu, C Yang. On the Feasibility of Linear Interference Alignment for MIMO Interference Broadcast Channels with Constant Coefficients [J]. IEEE Transactions on Signal Processing (S1053-587X), 2013, 61(9): 2178-2181.
- [7] D S Papailiopoulos, A G Dimakis. Interference Alignment as a Rank Constrained Rank Minimization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing (S1053-587X), 2012, 60(8): 4278-4288.
- [8] K Gomadam, V R Cadambe, S A Jafar. Approaching the Capacity of Wireless Networks through Distributed Interference Alignment [J]. IEEE Transactions on Information Theory (S0018-9448), 2011, 57(6): 3309-3322.
- [9] O E Ayach. Interference Alignment from Theory to Practice [D]. USA: University of Texas at Austin, 2013.
- [10] O E Ayach, S W Peter, R W Jr. The Practical Challenges of Interference Alignment [J]. IEEE Wireless Communications (S1536-1284), 2013, 20(1): 35-46.
- [11] H S Razghi. Study of Interference Alignment [D]. Stockholm, Sweden: University of KTH, 2013.
- [12] H Park, S H Park, H Sung, et al. Scheduling Methods with MIMO Interference Alignment for Mutually Interfering Broadcast Channels [C]// Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (S1930-529X), Miami, USA. USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [13] B C Jung, W Y Shin. Opportunistic Interference Alignment for Interference-Limited Cellular TDD Uplink [J]. IEEE Communications Letters (S1089-7798), 2011, 15(2): 148-150.
- [14] H J Yang, W Y Shin, B C Jung, et al. Opportunistic Interference Alignment for Interference-Limited Cellular TDD Uplink [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications (S1536-1276), 2013, 12(5): 2180-2192.
- [15] B Niu, V W S Wong, R Schober. Downlink Scheduling with Transmission Strategy Selection for Multi-cell MIMO Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications (S1536-1276), 2013, 12(2): 736-747.
- [16] K Ronasi, B Niu, V W Wong, et al. Throughput Efficient Scheduling and Interference Alignment for MIMO Wireless Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications (S1536-1276), 2014, 13(3): 1568-1581.
- [17] L Georgiadis, M J Neely, L Tassiulas. Resource Allocation and Cross Layer Control in Wireless Networks [J]. Foundations and Trends in Networking (S1554-057X), 2006, 1(1): 50-57.