

MIMO-pipe 模型下基于干扰对齐的链路调度算法

熊 最 王可人 金 虎
(电子工程学院, 合肥 230037)

摘 要: 尽管干扰对齐 (Interference Alignment, IA) 能从信息论的角度提升系统的频谱利用率, 但其在链路调度方面的性能发挥仍然受到干扰模型的限制。与常用的协议干扰模型、物理干扰模型相比, MIMO-pipe 模型更能够反映 MIMO 链路分集增益与复用增益的折中关系。因此, 为了研究 IA 对 MIMO-pipe 模型下链路调度性能的影响, 本文在现有 MIMO-pipe 模型的基础上, 进一步推导了 IA 条件下的等效 MIMO-pipe 模型, 给出了干扰对齐条件下每条 MIMO 链路对应的可行传输速率与信干噪比需求之间的折衷关系集, 并提出了一种基于 IA 等效 MIMO-pipe 模型的分布式算法。理论分析和仿真结果表明, 等效 MIMO-pipe 模型能较好的反映出 IA 的特点。同时, 在吞吐量略有降低的条件下, 基于该 IA 等效模型的链路调度算法所需的调度时隙数明显少于未采用 IA 的链路调度算法。

关键词: 链路调度; 物理干扰模型; 干扰对齐; MIMO 网络

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2015)05-0621-09

Interference Alignment Based Link Scheduling Algorithm under MIMO-pipe Model

XIONG Zui WANG Ke-ren JIN Hu

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Although interference alignment (IA) is capable of enhancing the spectrum utility from the aspect of information theory, its performance adopted in link scheduling was limited by interference model. Compared with the commonly used interference model such as protocol interference model and physical interference model, the newly proposed 'MIMO-pipe' model was developed to describe the tradeoff between multiplexing gain and diversity gain in MIMO communication systems. For the purpose of considering the effect of IA on the performance of link scheduling with MIMO-pipe model, the equivalent form of MIMO-pipe model under the IA circumstance was derived. A set of pairs between feasible transmission rate and the requirement of signal to interference and noise ratio (SINR) for each MIMO link was extracted, and a link scheduling optimization problem was formulated. In order to solve such an optimization problem, a novel distributed algorithm based on the equivalent model was proposed. The theoretic analysis and simulation results demonstrate that the equivalent MIMO-pipe model was propitious to reveal the characteristic of IA. What's more, the total number of scheduling time slots obtained by the distributed link scheduling algorithm with IA is obviously less than that without IA while the throughput decreases a little.

Key words: link scheduling; physical interference model; interference alignment; MIMO network

1 引言

无线网络中的一个基本问题就是链路调度问题。传统的链路调度均采用干扰避免 (Interference

Avoidance) 的方式来确保每条链路上的信干噪比超过所设阈值。在这种情况下, 相邻链路都必须在时间或者空间上避免强烈的相互干扰才得以成功传输。

为了解决干扰只能被避免,而未能加以利用这一问题,2008年,Syed Jafar提出了一种称为干扰对齐^[1](IA, Interference Alignment)的干扰管理方法。这种方法的主要思路是通过设计发送和接收的预编码矩阵,将用户所接收到的干扰信号(非期望信号)对齐到一个与期望信号正交的子空间内,从而消除干扰信号对期望信号的干扰。由于IA依赖于协作链路端节点间的信道信息(盲干扰对齐的相关研究工作也已经开展,但在本文讨论范围内),因而,IA只能应用到相邻的链路之间。文献[2-4]针对IA的算法进行了相关研究。当MIMO网络中分布较多链路时,若采用IA,必然同时存在着适合采用IA的链路和不适合采用IA的链路。而这两种类型的链路之间干扰关系过于复杂,传统的协议干扰模型和物理干扰模型均无法直接解决这个问题。

考虑到链路调度问题与反映干扰关系的干扰模型密切相关,选择一种合适的干扰模型为IA的实施提供条件显得尤为重要。协议干扰模型由于其简单易行受到了广泛应用,但其并不能反映出网络中真实的叠加干扰,因而,物理干扰模型弥补了协议干扰模型的缺陷。在物理干扰模型下,每条链路接收端上的干扰等于网络中所有并行传输的链路造成的干扰总和。由于该模型下的链路调度问题已经被证实为NP-hard问题,因此,近些年来,研究者们主要着手在基于物理干扰模型的分布式调度方案^[5-14]上开展研究。但现有分布式调度方案中的干扰模型均未能较好地抽象出底层性能。文献[15]在MIMO系统中研究了分集增益与复用增益之间的关系,但其仅停留在研究这种关系本身,并未涉及具体的链路调度问题。文献[16]在物理干扰模型的基础之上提出了一种MIMO-pipe模型。该模型充分考虑到MIMO网络中给定每个通信节点上的天线数量和传输功率,总结出每条链路上传输的不同数据流越多,其干扰容忍性能越差这一结论。与只把物理层当作单一的数据提供给上层优化的物理干扰模型相比,MIMO-pipe模型提供给上层的是可行传输速率与SINR需求的对应关系集。在此之后,文献[17]将MIMO-pipe模型运用到了分布式CSMA链路调度中,但其对于如何消除链路间干扰并未

做深入研究。

公开文献表明,仅有文献[18-19]试图将IA与MIMO-pipe模型相结合,来解决链路调度问题。但其只是粗略地将IA传输模式等效为多个单条链路的叠加。正基于这一点,本文将IA与MIMO-pipe模型相结合,分析推导出IA条件下的等效MIMO-pipe模型,并考虑在该等效MIMO-pipe模型下的链路调度问题。

2 MIMO-pipe 模型

每一条MIMO链路均可以通过在同频信道上开辟多条空间数据管道,获得数据流的空间复用增益。但是,当给定每个链路端节点上的天线数目和总发射功率时,每条MIMO链路上的数据流越多,相应地每条数据流上传数据的可靠性就越低。MIMO-pipe模型不仅考虑了网络中所有并行链路造成的累加干扰,还考虑了每条链路的复用增益和分集增益之间的折中关系。

设每条链路的发射功率为 P ,通信距离为 D_{ij} (D_{ij} 表示从发射节点 i 到接收节点 j 的距离),衰减因子为 α ,每个节点配置的天线数为 N ,那么,第 i 条链路接收端的信号可表示为

$$\mathbf{y}_i = \sqrt{\frac{P}{ND_{ii}^\alpha}} \mathbf{H}_{ii} \mathbf{x}_i + \sum_{j \neq i} \sqrt{\frac{P}{ND_{ji}^\alpha}} \mathbf{H}_{ji} \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_i \quad (1)$$

其中, \mathbf{x}_i 为第 i 个发射端发送的 $N \times 1$ 维信号,且归一化发射功率为1, \mathbf{H}_{ji} 表示发射节点 j 到接收节点 i 的 $N \times N$ 维信道矩阵,且矩阵元素均满足方差为1的高斯分布。 \mathbf{n}_i 为加性高斯白噪声,方差 $\sigma^2 = E[\|\mathbf{n}_i\|^2] / N$ 。

对于任意链路 l_i 而言,若其发射天线发射全不相同的数据流时,其对应的接收端节点上每根接收天线的平均信干噪比可表示为

$$\text{SINR}_i = \frac{PD_{ii}^{-\alpha}}{\sum_{j \neq i} PD_{ji}^{-\alpha} + \sigma^2} \quad (2)$$

由此可见,同一链路的任意一条数据流所受到的干扰和噪声影响是一致的。

为了更直观的描述MIMO-pipe模型,下文以每条链路的端节点均配置5条天线为例,来分析MIMO-pipe模型下所获取的可行传输速率与干扰容限之间的对应关系,如图1所示:

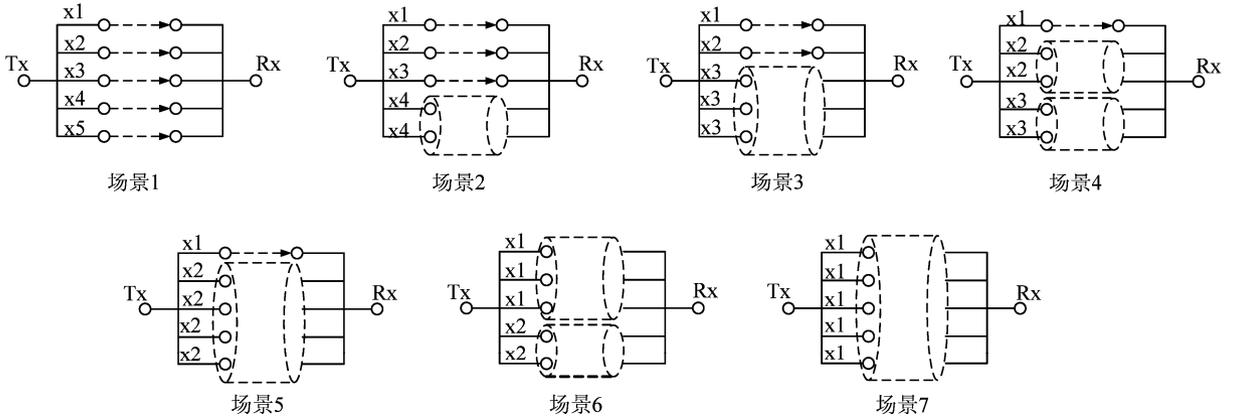


图 1 MIMO-Pipe 模型示意(5 天线)

Fig. 1 Sketch of MIMO-pipe model (5 antennas)

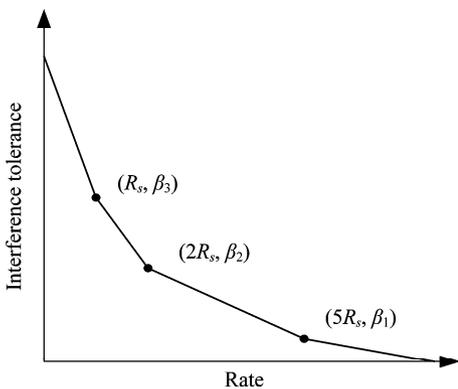


图 2 可行速率与干扰容限的折衷(5 天线)

Fig. 2 Tradeoff between rate and interference tolerance

表 1 不同天线数时的 no-IA 链路可选模式

Tab. 1 Available mode for no-IA links with variant antenna number

天线数 N	no-IA 模式参数配置
2	$\omega_2 = \{(2R, \beta_1), (R, \beta_2)\}$
3	$\omega_3 = \{(3R, \beta_1), (R, \beta_3)\}$
4	$\omega_4 = \{(4R, \beta_1), (2R, \beta_2), (R, \beta_4)\}$
5	$\omega_5 = \{(5R, \beta_1), (2R, \beta_2), (R, \beta_5)\}$
6	$\omega_6 = \{(6R, \beta_1), (3R, \beta_2), (2R, \beta_3), (R, \beta_6)\}$
7	$\omega_7 = \{(7R, \beta_1), (3R, \beta_2), (2R, \beta_3), (R, \beta_7)\}$
8	$\omega_8 = \{(8R, \beta_1), (4R, \beta_2), (2R, \beta_4), (R, \beta_8)\}$
9	$\omega_9 = \{(9R, \beta_1), (4R, \beta_2), (3R, \beta_3), (2R, \beta_4), (R, \beta_9)\}$
10	$\omega_{10} = \{(10R, \beta_1), (5R, \beta_2), (3R, \beta_3), (2R, \beta_5), (R, \beta_{10})\}$

场景 1 当 5 条天线发送互不相同的数据流时,所有的天线均用于获取复用增益。因此,总的速率数据速率为 $5R$,其中 R 表示每条数据流的速率。此

时每条接收天线上的 SINR 需求 β_1 将会很高,也即是意味着干扰的容限很低。

场景 2 当 5 条天线中有 2 条天线发送相同的数据流,其他 3 条均各自发送不同的数据流,此时总的速率数据速率为 $4R$ 。由于 MIMO 链路上来自其他用户的干扰在所有的四条数据流上均相同,因此,每条接收天线上的 SINR 需求仍为 β_1 。相比场景 1 而言,该场景由于数据速率更低,可不作考虑。

场景 3 当 5 条天线中有 3 条天线发送相同的数据流,另外 2 条均发送不同的数据流,此时总的速率数据速率为 $3R$ 。该场景下,每条接收天线上的 SINR 需求仍为 β_1 ,亦可不作考虑。

场景 4 和场景 5 由于存在单条数据流孤立传输,其每条数据流上的 SINR 需求与场景 3 情况类似,均可不作考虑。

场景 6 当 5 条天线中有 3 条天线发送相同的数据流,另外 2 条均发送相同的数据流,此时总的速率数据速率为 $2R$ 。该场景下,每条接收天线上的 SINR 需求为 β_2 ,且满足 $\beta_2 < \beta_1$ 。

场景 7 当 5 条天线均发送相同的数据流,此时总的速率数据速率为 R 。该场景下,每条接收天线上的 SINR 需求为 β_3 ,且满足 $\beta_3 < \beta_2 < \beta_1$ 。

综上所述,当每个用户配置 5 条天线时,共有三种可行的参数配置方式,即 $(5R, \beta_1)$ 、 $(2R, \beta_2)$ 、 (R, β_3) ,如图 2 所示。设 $\omega_N = \{(mR, \gamma_n), mn \leq N\}$ 表示链路配置 N 条天线时对应的可行传输参数配置集合,其中, m 表示 N 条天线同时传输 m 种不同数据流, γ_n 表示与 mR 相对应地 SINR 需求,表示至少有

n 条相同数据流。上文中所提到的 MIMO-pipe 模型,是将 MIMO 链路的可行传输速率与对应的 SINR 需求等效为一组参数集,为上层的调度和其他应用提供简便的底层支撑。表 1 给出了 MIMO 链路收发两端配置不同天线数时的可行参数配置可选模式。

3 MIMO-pipe 的 IA 等效模型

如图 3 所示,在采用 IA 的 MIMO 网络中,IA 链路与 no-IA 链路共存。本文将采用 IA 的链路称为一个 IA-Group。此时,尽管 IA 链路能够通过 IA 消除同一 IA Group 中其他 IA 链路的干扰,但来自于其他 IA Group 以及 no-IA 链路的干扰仍将对 IA 链路形成叠加干扰。

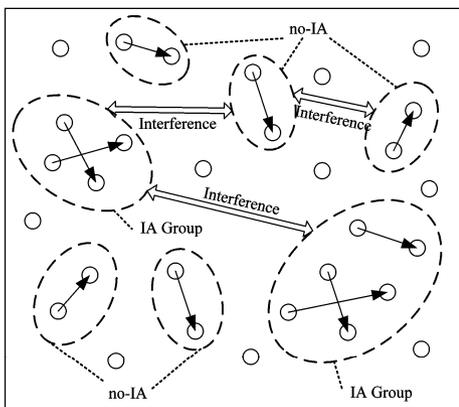


图 3 MIMO 网络链路态势示意图

Fig. 3 Sketch of links in MIMO network

同时,正是由于单个 IA-Group 内部的干扰已经消除,可以将其视为速率为 R_{IA} , SINR 需求为 β_{IA} 的整体。那么,采用 IA 的 MIMO 网络态势可以等效为如图 4 所示。

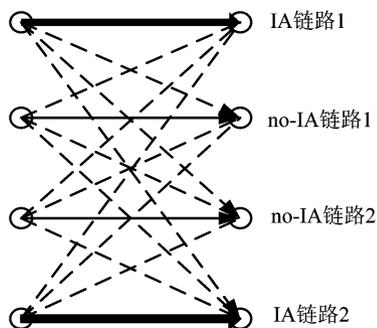


图 4 MIMO 网络等效态势示意图

Fig. 4 Equivalent sketch of links in MIMO network

假设 IA 链路的最大流数目为 d ,那么,IA 链路上的可行传输模式等效为天线数为 d 的 no-IA 链路传输模式 ω_d 。设干扰网络中链路数为 $M(M \geq 2)$,每条链路收发两端均配置 N 条天线,那么,当干扰网络处于全连接状态时,即每个用户对其他所有用户均会产生干扰,此时,IA 链路的最大流数目 d 满足

$$d \leq 2N / (M + 1) \tag{3}$$

根据以上分析,可将不同用户数和不同天线数条件下的 IA 等效 MIMO-pipe 模型可行传输模式总结归纳如表 2 所示。

表 2 IA 等效 MIMO-pipe 模型可行传输模式列表¹

Tab. 2 Available transmission mode for IA based equivalent MIMO-pipe model

天线数 N	链路数 M					
	2	3	4	5	6	7
2	ω_1	ω_1				
3	ω_2	ω_1	ω_1	ω_1		
4	ω_2	ω_2	ω_1	ω_1	ω_1	ω_1
5	ω_3	ω_2	ω_2	ω_1	ω_1	ω_1
6	ω_4	ω_3	ω_2	ω_2	ω_1	ω_1
7	ω_4	ω_3	ω_3	ω_2	ω_2	ω_1
8	ω_5	ω_4	ω_3	ω_3	ω_2	ω_2
9	ω_6	ω_4	ω_3	ω_3	ω_2	ω_2
10	ω_6	ω_5	ω_4	ω_3	ω_2	ω_2

4 链路调度优化模型

由于 IA 的优势在于提供网络中链路并行传输机会,因此,本文中的优化目标即是在每个时隙内找出并行传输的链路集,以实现网络传输总时隙数最小。假定网络中的节点位置在一个调度间隔内保持不变,网络中的通信以一个调度间隔为单位重复执行。每个调度间隔包含 T 个传输时隙,且一般认为在 T 个传输时隙内,网络中的 L 条链路均能完成通信。

与不采用 IA 的链路调度问题中仅考虑单个链路不同,当链路调度过程中考虑 IA 时,首先要解决

¹表 2 中未标注部分表明当用户数较大,天线数较小时,由于没有足够的天线既用于接收信号,又用于消除干扰,IA 无法有效实现。

的就是 IA-Group 的分组问题。当明确了 IA-Group 的归属问题后,即可采用前文第 3 节中的式(3)对 IA-Group 进行调度。因此,主要从节点半双工模式约束、IA 可行性条件约束、IA-Group 干扰模型约束等三个方面进行建模。

4.1 节点半双工约束

本文假设在同一时隙内,同一节点只能处于发送状态,或者只能处于接收状态。对于任意节点 p , $p \in \mathcal{N}$, 设 $x_p(t) = \{0, 1\}$ ($1 \leq t \leq T$) 表示节点 i 在时隙 t 是否处于发射状态,即当 $x_p(t) = 1$ 时,节点 i 处于发射状态,反之不处于发射状态。设 $y_p(t) = \{0, 1\}$ ($1 \leq t \leq T$) 表示节点 i 在时隙 t 是否处于接收状态,即当 $y_p(t) = 1$ 时,节点 i 处于接收状态,反之,不处于接收状态。因此,节点半双工约束可表示为

$$x_p(t) + y_p(t) \leq 1, p \in \mathcal{N} \quad (4)$$

4.2 IA 可行性约束

本文假设归属于同一 IA-Group 内的每条链路所能发送的数据流条数受到其自身配置的天线数和所属 IA-Group 内链路总数的约束。设任意 IA-Group 用 G_m 表示, $K_m = |G_m|$ 表示该 IA-Group 中的链路总数。若任意链路 $l \in G_m$ 期望传输的最大数据流条数为 d_l , 那么,该条链路必须满足

$$d_l \leq 2M / (K_m + 1), l \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (5)$$

4.3 IA-Group 干扰模型约束

在多种链路共存于网络中时,每条链路 l 的接收端的 SINR 可表示为

$$\text{SINR}_{l_i} = \frac{PD_{ii}^{-\alpha}}{\sum_{l_j \in \mathcal{I}(l_i)} PD_{ji}^{-\alpha} + \sigma^2} \quad (6)$$

式(6)中,对于 IA 链路而言, $\mathcal{I}(l_i)$ 表示除去与 l_i 处于同一 IA Group 的 IA 链路外所有的并行传输链路集合,对于 no-IA 链路而言, $\mathcal{I}(l_i)$ 表示所有与其并行传输链路集合。

文献[16]为了方便起见,定义以下两个参数 $\{Z_{ji} \mid i, j = 1, 2, \dots, M\}$ 和 $\{c_i \mid i, j = 1, 2, \dots, M\}$

$$Z_{ji} = \begin{cases} \left(\frac{D_{ji}}{D_{ii}} \right)^{-\alpha}, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}, c_i = \frac{\sigma^2}{P(d_{ii})^{-\alpha}} \quad (7)$$

令当链路 l_i 在时隙 t 选择第 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 种参数配置时, $r_{ik}(t) = 1$, 反之, $r_{ik}(t) = 0$ 。那么, SINR

约束条件的表达式可等效改写为

$$\text{SINR}_{l_i} = \frac{PD_{ii}^{-\alpha}}{\sum_{j \neq i} PD_{ji}^{-\alpha} + \sigma^2} = \frac{1}{\sum_{j \neq i} \left(\frac{D_{ji}^{-\alpha}}{D_{ii}^{-\alpha}} \right) + \frac{\sigma^2}{PD_{ii}^{-\alpha}}} \geq \beta_i \quad (8)$$

将式(7)带入式(8),可得

$$\sum_{j \in \mathcal{S}} Z_{ji} (\sum_k r_{jk}(t)) + c_i \leq \sum_k r_{ik}(t) / \beta_k \quad (9)$$

对于式(9)中,不等号左侧第一项为干扰项,第二项为期望信号项。这个等式成立的条件之一是每个用户在同一时隙内仅能选择一种参数配置模式。

因此,基于 IA 等效 MIMO-pipe 模型的链路调度问题可建模为一个整数线性规划问题,如式(10)所示:

$$\begin{aligned} & \text{P1 minimize } T \\ \text{s.t. } & \sum_j Z_{ji} (\sum_k r_{jk}(t)) + c_i \leq \sum_k r_{ik}(t) / \beta_k, \\ & i, j \in \{1, 2, \dots, M\}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \\ & \sum_k r_{ik}(t) \leq 1, i \in \{1, 2, \dots, M\}, \\ & k \in \{1, 2, \dots, K\}, 1 \leq t \leq T \\ & r_{ik}(t) = \{0, 1\}, i \in \{1, 2, \dots, M\}, \\ & k \in \{1, 2, \dots, K\}, 1 \leq t \leq T \\ & x_p(t) + y_p(t) \leq 1, p \in \mathcal{N}, 1 \leq t \leq T \\ & d_l \leq 2N / (K_m + 1), l \in \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned} \quad (10)$$

5 算法描述

由于第 4 节的链路调度优化问题 P1 是 NP-hard 问题,因此,本文提出了一种遍历的分布式算法以实现 MIMO-pipe 模型下的链路调度,具体算法流程如图 5 所示。该算法主要包括两部分:

(1) 传输调度:待调度用户集合 \mathcal{S} 表示在当前时隙内未被调度的用户集合。设 $\rho_k(t)$ 表示当前用户 k 的调度状态。选取当前时隙内任一待调度用户作为调度用户,将其对应的调度状态参数 $\rho_k(t)$ 设置为 1,并将该用户从待调度用户集合 \mathcal{S} 中剔除。通过基于 MIMO-pipe_LinkScheduling 算法的计算处理后,判定当前调度用户是否满足调度可行性,若不满足调度条件,将最新加入的调度用户状态参数设为 0,即 $\rho_k(t) = 0$ 。上述过程一直重复,直到待调度用户集合 \mathcal{S} 为空集为止。

(2) MIMO-pipe 的 IA 等效模型运算。根据链路配置天线数 N , 设计 MIMO-pipe 模型下的参数配置表。结合 IA-Group 内的链路数, 来计算当前 IA-Group 中每条链路的最大数据流数 d , 通过查表 2 得出当前 IA-Group 内链路所能采用的传输模式配置。

MIMO-pipe_LinkScheduling 算法

输入参数: 待调度链路集合 S 、链路总集合 S_0 、MIMO-pipe 模型参数集 R

输出参数: 链路调度状态 ρ 、链路传输速率 r 、调度总时隙数 T

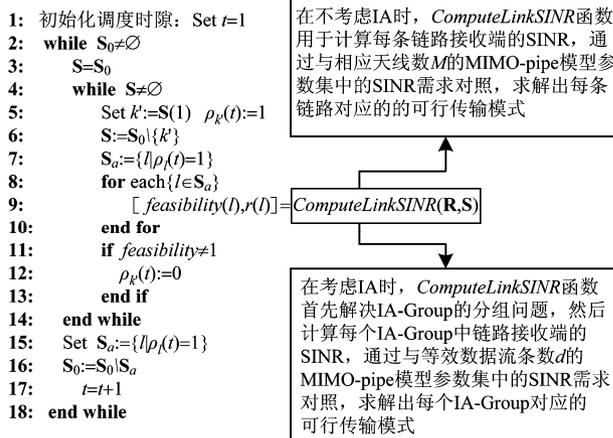


图 5 链路调度算法

Fig. 5 Flow chart of link scheduling algorithm

6 仿真实验

6.1 参数设置与仿真流程

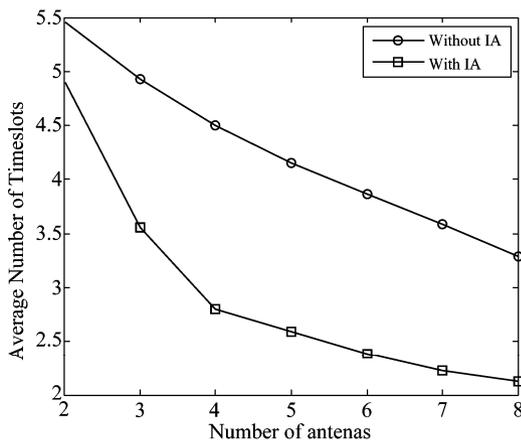
仿真场景为在一个面积为 $300\text{km} \times 300\text{km}$ 的方形区域内, 20 个通信节点随机分布在该区域中。假设每个节点的传输功率 P 为 10dBm, 噪声功率设为 -80dBm, 每条数据流的标准传输速率为 2Mbps。设不同传输模式对应的 SINR 需求为 $\{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7\} = (12, 10, 8, 6, 4, 2, 0)$ dB。路径衰落系数 α 设为 3.5, 对应的传输距离设为 100km。

6.2 仿真结果分析

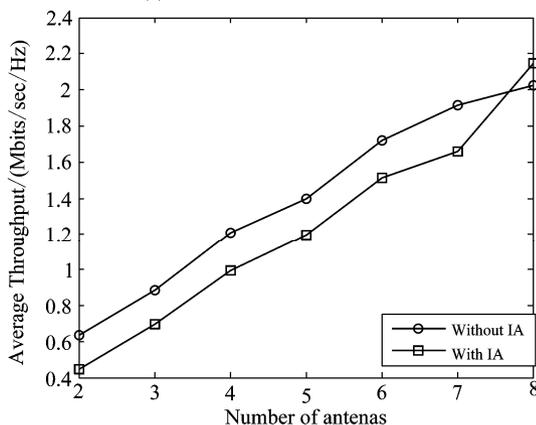
为了充分体现 IA 对 MIMO-pipe 模型下的链路调度性能的影响, 本文主要从以下几个方面进行对比: (1) 节点配置的天线数对算法性能的影响; (2) 网络中待调度链路数对算法性能的影响; (3) SINR 需求对算法性能的影响。因此, 本文分别进行了三组实验。

实验 1 考虑网络中链路总数相同, 天线数配置不同条件下, 有无 IA 时的算法性能对比。设网络

中链路总数为 20, 节点配置天线数分别为 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 单条数据流的 SINR 需求为 12dB, 每增加一条数据流, SINR 需求递减 2dB。仿真结果如图 6 所示。



(a) 天线数对平均调度时隙数的影响



(b) 天线数对系统平均吞吐量的影响

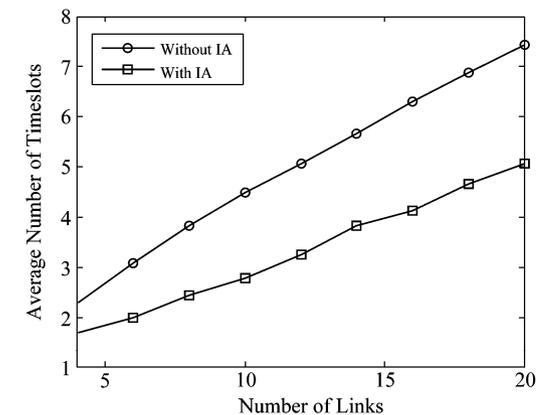
图 6 天线数对算法性能的影响

Fig. 6 Effect of antenna number on algorithm performance

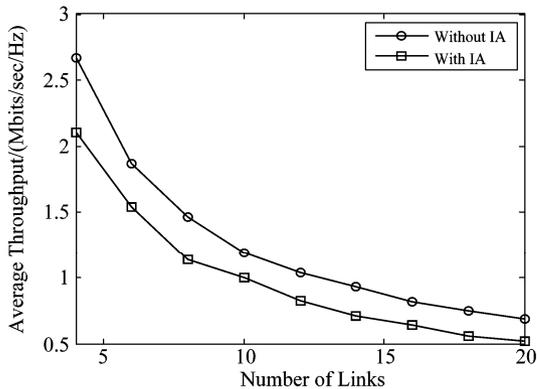
从图 6(a) 中的仿真结果可以看出, 当每个节点所配置的天线数增加时, 采用 IA 的链路调度算法能够大大减少网络中的调度所需时隙, 且明显低于未采用 IA 的链路调度算法, 同时, 如图 6(b) 中所示, 采用 IA 的链路调度算法所获取的系统平均吞吐量能逐步增加, 却在少数目天线条件下, 比未采用 IA 的链路调度算法稍逊一筹。这是因为, 当天线数的增加使得 IA 能够同时消除更多地 IA-Group 内的干扰, 支持更多链路并行传输。也正因如此, 当天线数较少时, IA 链路自身用于通信的天线数降低, 造成其所能选择的传输模式下数据传输速率较低, 从而造成在系统平均吞吐量方面稍弱; 当天线数增加到一定数目时, IA 用于自身传输的天线数增加, 其

获取的系统平均吞吐量能够超过未采用 IA 的链路调度算法。

实验 2 考虑链路天线配置数相同, 不同链路总数条件下, 有无 IA 时的算法性能对比。设网络中链路总数分别为 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 节点配置天线数为 4, 单条数据流的 SINR 需求为 12dB, 每增加一条数据流, SINR 需求递减 2dB。仿真结果如图 7 所示。



(a) 链路数对平均调度时隙数的影响



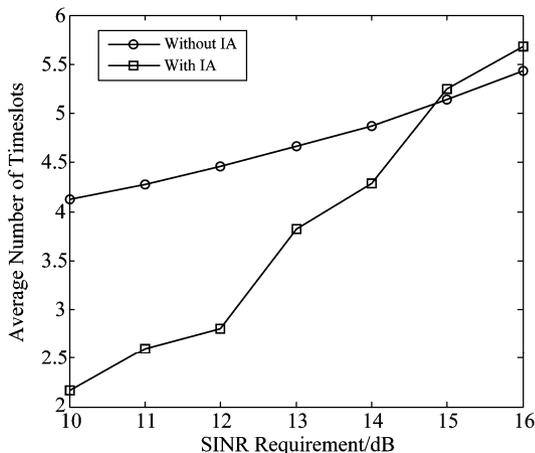
(b) 链路数对系统平均吞吐量的影响

图 7 链路数对算法性能的影响

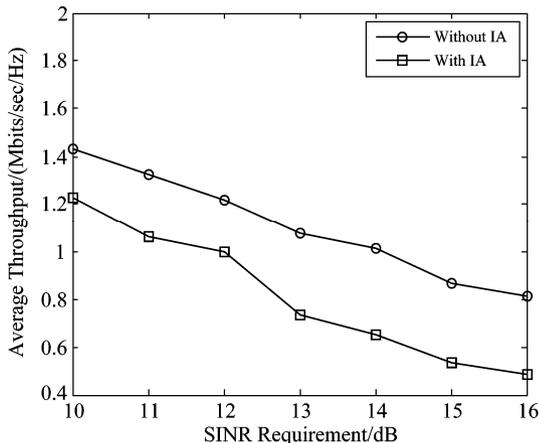
Fig. 7 Effect of link number on algorithm performance

从图 7(a) 中的仿真结果可以看出, 当网络中的通信链路增加时, 两种链路调度算法所需的总调度时隙数均在增加, 但采用 IA 的算法所需相对较少。这是因为 IA 能够通过消除多链路间的干扰, 支持更多并行链路的传输。从图 7(b) 中的仿真结果可以看出, 当链路数增加时, 两种算法所获得的系统吞吐量均在下降。与实验 1 中相似, 由于支持其他更多并行链路的成功传输, 而使得每条 IA 链路用于自身传输的天线数较少, 造成吞吐量相对未采用 IA 的算法更低。

实验 3 考虑网络中链路总数和天线配置数均相同条件下, SINR 需求有无 IA 时的算法性能对比。设网络中链路总数为 12, 节点配置天线数为 4, 单条数据流的 SINR 需求分别为 10dB, 12dB, 14dB, 16dB, 每增加一条数据流, SINR 需求递减 2dB。仿真结果如图 8 所示。



(a) SINR 需求对平均调度时隙数的影响



(b) SINR 需求对系统平均吞吐量的影响

图 8 SINR 需求对算法性能的影响

Fig. 8 Effect of SINR requirement on algorithm performance

如图 8(a) 中所示, 当 SINR 需求相对低时, IA 能够消除相邻并行链路之间的干扰, 因而所需的调度时隙数相对较少。随着 SINR 需求的提高, 每条链路对其受到的干扰要求更小。而当 SINR 需求提高到一定门限时, IA 尽管也能消除干扰, 但不同 IA-Group 间的干扰仍然无法得到有效消除, 从而导致部分 IA-Group 无法在同一时隙内同时传输, 因而需要更多时隙来保证网络中所有链路的调度。如图 8(b) 中所示, 由于 SINR 需求的提高, 两种算法所获得的系统吞吐量均在下降, 这是

SINR 需求的提高使得每个时隙内成功传输的链路数下降造成的。

7 结论

本文将干扰对齐引入到链路调度问题中,在现有 MIMO-pipe 模型的基础上,给出了基于 IA 等效 MIMO-pipe 模型下的链路调度优化问题模型,提出了一种分布式的链路调度算法。IA 能够有效消除并行传输链路间的相互干扰,从而增加同一时隙内并行传输链路的数量,使得总调度时隙相对较少。但同时,在天线数较少时,用于数据传输的天线数相对较少,所获得的吞吐量性能相对未采用 IA 的链路调度算法较弱。基于这一现实,如何在充分利用 IA 优势的同时,进一步提升系统吞吐量,成为后期链路调度算法研究工作中的重点。

参考文献

- [1] Cadambe V R, Jafar S A. Interference Alignment and the Degrees of Freedom of the K User Interference Channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54 (8): 3425-3441.
- [2] 王存祥, 邱玲. 协作多点传输中一种基于特征子信道的干扰对齐预编码矩阵优化方案[J]. 信号处理, 2011, 27(3): 395-399.
Wang C X, Qiu L. An Optimized Pre-coding Scheme based on Eigen-Channel in Interference Alignment for Coordinated Multi-point Transmission Systems [J]. Signal Processing, 2011, 27(3): 395-399. (in Chinese)
- [3] 徐冰, 谢显中, 马彬, 等. MIMO 干扰信道下的协作干扰对齐优化算法[J]. 信号处理, 2012, 28(2): 220-225.
Xu B, Xie X Z, Ma B, et al. An Optimized Cooperative Interference Alignment for MIMO Interference channel [J]. Signal Processing, 2012, 28(2): 220-225. (in Chinese)
- [4] 朱政宇, 王忠勇, 高向川, 等. MIMO 干扰信道下低复杂度的分布式干扰对齐算法[J]. 信号处理, 2013, 29(3): 400-404.
Zhu Z Y, Wang Z Y, Gao X C, et al. Low Complexity Distributed Interference Alignment for MIMO Interference Channel [J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(3): 400-404. (in Chinese)
- [5] Wan P J, Jia X, Yao F. Maximum Independent Set of Links under Physical Interference Model [C] // 2009 International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications, Boston, MA, USA, 2009: 169-178.
- [6] Xu X, Tang S, Wan P J. Maximum Weighted Independent Set of Links under Physical Interference Model [C] // 2010 International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications, Beijing, China, 2010: 68-74.
- [7] Le L B, Modiano E, Joo C H, et al. Longest-Queue-First Scheduling under SINR Interference Model [C] // 11th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, New York, USA, 2010: 41-50.
- [8] Kompella S, Wieselthier J E, Ephremides A, et al. On Optimal SINR-Based Scheduling in Multi-hop Wireless Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18 (6): 1713-1724.
- [9] Wan P J, Frieder O, Jia X, et al. Wireless Link Scheduling under Physical Interference Model [C] // 30th IEEE International Conference on Computer Communications, Shanghai, China, 2011: 838-845.
- [10] 樊帅, 张林, 冯伟, 等. 基于物理干扰模型的分布式传输调度算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(11): 1631-1636.
Fan S, Zhang L, Feng W, et al. Distributed Link Scheduling Algorithm with a Physical Interference Model [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011, 51(11): 1631-1636. (in Chinese)
- [11] Su J Z, Cao J, Wu W. Gray Physical Interference Model based Link Scheduling Algorithm [J]. Science China (Information Science), 2012, 55(6): 1337-1350.
- [12] Ryu J, Joo C H, Kwon T T, et al. DSS: Distributed SINR-Based Scheduling Algorithm for Multi-hop Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12 (6): 1120-1132.
- [13] Dong S, Yang Q, Feng F L, et al. Distributed Link Scheduling for Congestion Control in Multi-hop Wireless Network [C] // IEEE International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, Hangzhou, China, 2013: 1-5.
- [14] Zhou Y Q, Li X Y, Liu M, et al. Throughput Optimizing Localized Link Scheduling for Multi-hop Wireless Networks under Physical Interference Model [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed System, 2013, 25(10): 2708-2720.
- [15] 黄丘林, 史小卫. MIMO 系统中分集增益和空间复用增益的折衷关系[J]. 电子与信息学报, 2007, 29

- (3): 681-685.
- Huang Q L, Shi X W. Trade-off between Diversity Gain and Multiplexing Gain in MIMO Systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29 (3): 681-685. (in Chinese)
- [16] Ge W Y, Zhang J S, Xue G L. MIMO-Pipe Modeling and Scheduling for Efficient Interference Management in Multi-Hop MIMO Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59 (8): 3966-3978.
- [17] Qian D J, Zheng D, Zhang J S., et al. Distributed CS-MA Algorithms for Link Scheduling in Multi-Hop MIMO Networks under SINR Model[C] // 29th IEEE International Conference on Computer Communications, San Diego, CA, USA, 2010: 1-14.
- [18] Ao X, Yu F R, Jiang S, et al. On Throughput Gain of Interference Alignment in Multi-Hop MIMO Networks[C] // IEEE International Conference on Communications, Sydney, NSW, 2014: 59-64.
- [19] 敖欣. 基于干扰管理的无线自组织网性能优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 博士论文, 2012.
- Ao X. Performance Optimization for Wireless Ad Hoc Networks based on Interference Management [D]. Doctor's Dissertation, Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)

作者简介

熊 最 男, 1988 年生, 湖北黄冈人, 电子工程学院博士研究生, 主要研究方向为通信信号处理、干扰对齐等。

E-mail: lidaysue@126.com

王可人 男, 1957 年生, 江苏镇江人, 电子工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、信号处理等。

金 虎 男, 1974 年生, 安徽潜山人, 电子工程学院副教授, 博士, 主要研究方向为无线通信、通信信号处理等。