

MIMO 多向中继信道 在完整数据交换模型下的自由度*

李勇^{1,2,3}, 袁晓军^{4†}

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2 上海科技大学信息学院, 上海 201210;

3 中国科学院大学, 北京 101408; 4 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 611731)

(2019 年 2 月 25 日收稿; 2019 年 4 月 28 日收修改稿)

Li Y, Yuan X J. Degree of freedom of MIMO multiway relay channel in full data exchange model[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(5):663-672.

摘要 多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 多向中继信道 (multiway relay channel, mRC) 的自由度 (degree of freedom, DoF) 分析是近几年的研究热点。研究半双工通信下两个用户集群, 每个用户集群中 K 个用户的 MIMO mRC 可达到的 DoF。其中, 考虑完整数据交换模型, 即用户集群中每个用户希望与此集群中其他所有用户交换信息。结合物理层网络编码, 并利用信号对齐技术设计用户端和中继端的处理矩阵, 优化系统可达到的 DoF。通过对上行和下行链路分别设计信号对齐, 并优化时隙分配, 得到半双工通信下系统可达到的 DoF。另外, 当上行和下行时隙相等时, 将结果推广到全双工通信, 并验证了该信号对齐方案可以达到全双工通信目前最优的结果。

关键词 多向中继信道; 自由度; 多输入多输出; 信号对齐; 完整数据交换模型

中图分类号: TN919.3 文献标志码: A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2020.05.011

Degree of freedom of MIMO multiway relay channel in full data exchange model

LI Yong^{1,2,3}, YUAN Xiaojun⁴

(1 Shanghai Institute of Microsystem & Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2 School of Information Science & Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 4 National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract Recently, much research interest was focused on the degree of freedom (DoF) analysis of multiple input multiple output (MIMO) multiway relay channel (mRC). In this work, we investigate the achievable DoF of the half duplex MIMO mRC with two clusters each of which contains K users. Also, we focus on full data exchange model, which means that each user in a cluster wants to exchange information with all the other users in the same cluster. To achieve efficient DoF, signal alignment techniques are developed to jointly construct the beamforming

* 国家自然科学基金(61471241)资助

† 通信作者, E-mail: xjyuan@uestc.edu.cn

matrices at the user and the relay. Also, we design signal alignments for uplink and downlink, respectively, as that the uplink and downlink are asymmetry in the full data exchange model. Combining with the optimized uplink and downlink time allocations, we derive an achievable DoF for the half duplex model. Further, we expand our analysis to full duplex model considering equal uplink and downlink time allocations, and show that one can use our signal alignment scheme to obtain the optimized achievable DoF in full duplex model.

Keywords multiway relay channel (mRC); degree of freedom (DoF); multiple input multiple output (MIMO); signal alignment; full data exchange model

多向中继信道模型(multiway relay channel, mRC)^[1-2]主要有以下两种数据交换模型:成对的数据交换模型,即两个用户相互交换信息;完整的数据交换模型,即一个用户将相同的信息广播给多个用户。此模型在实际应用中普遍存在。例如,社交网络中,多个小组的用户希望在同组中共享文件。由于网络中每个节点配置有多根天线,多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)mRC可以极大地提高复用增益。但是由于中继信道的信道容量难以刻画^[3],所以很多工作集中在模型自由度(degree of freedom, DoF)的分析上,即高信噪比下的性能特点。简单说,网络的DoF是网络中可以支持的独立数据流数目^[4]。

目前,国内外学者对于mRC的DoF分析已经有了一些结果,但是大多数研究集中在成对的数据交换模型^[5-9]中,尤其是基于成对数据交换模型的一种特殊模型,Y-信道模型^[10-11]。并且由于成对数据交换模型上行和下行链路是对称的,所以大多数工作集中在全双工通信模型。相比之下,对于完整数据交换模型的分析相对较少,并且由于完整数据交换模型上行和下行链路是非对称的,分析半双工通信下系统可达的DoF也非常重要。文献[12]给出全双工通信下有多个用户集群的完整数据交换模型一个可达的DoF。对于有多个用户集群,每个用户集群中有多个用户的信道模型,通过设计信号对齐,给出此模型一个一般化的结果。文献[13]分析半双工通信下有一个用户集群,用户集群中有多个用户的完整数据交换模型的DoF。此模型中,对于每一个用户来说,没有来自于其他用户集群的干扰信号。作者推出此模型在半双工通信下的DoF容量,即验证了此模型的割集上界是可达的。并且当上行和下行时隙相等时,作者将半双工通信的结果推广到全双

工通信。由于有多个用户集群的完整数据交换模型比较复杂,直接分析其DoF比较困难,文献[14]结合优化算法^[15]推出一个优化的结果。但是此算法仅对全双工通信有效,对于半双工通信下的DoF仍然未知。

本文研究半双工通信下两个用户集群,每个用户集群中多个用户的MIMO mRC在完整数据交换模型下可达的DoF。同时对于全双工通信,假设每个结点可以进行自干扰消除。所以当上行和下行时隙相等时,半双工通信的结果可以推广到全双工通信,即此时全双工通信的结果是半双工通信的2倍。将半双工通信下行和下行时隙相等的结果推广到全双工通信,并且验证该信号对齐方案可以达到全双工通信目前最优的结果。

1 系统模型

1.1 信道模型

本文考虑半双工通信^①的MIMO mRC。该信道包含 L 个用户集群,每个集群包含 K 个用户。考虑完整数据交换模型,即每个用户希望与同一个集群中其他所有用户交换信息。考虑对称的天线配置,假设中继端有 N 个天线,每个用户端有 M 个天线。由于集群数目较多时模型较为复杂,本文只考虑 $L=2$,即有两个用户集群的情况,模型见图1。将集群 j 中的用户 k 定义为 Γ_{jk} ,其中 $j \in I_L \triangleq \{1, 2\}$, $k \in I_K \triangleq \{1, \dots, K\}$ 。假设在第 t 个时隙,用户 Γ_{jk} 到中继的信道矩阵为 $\mathbf{H}_{jk}(t) \in \mathbb{C}^{N \times M}$,中继到用户 Γ_{jk} 的信道矩阵为 $\mathbf{G}_{jk}^T(t) \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 。假设 $\mathbf{H}_{jk}(t)$ 和 $\mathbf{G}_{jk}^T(t)$ 的所有元素独立且服从连续分布,即信道矩阵行满秩或列满秩。同时假设对于所有结点,信道状态信息是已知的。

①后文中,令上行和下行链路时隙相同,将此时半双工通信的结果推广到全双工通信系统,得到全双工通信系统可达的DoF。

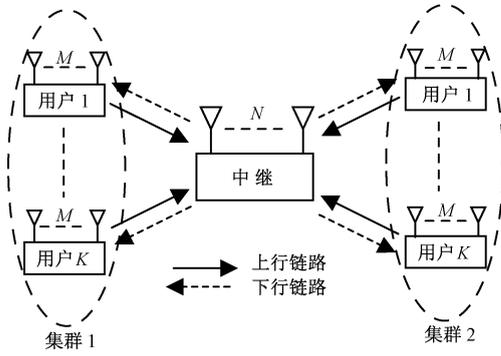


图 1 两个用户集群,每个集群中 K 个用户的 MIMO mRC 模型

Fig. 1 The MIMO mRC with two clusters each of which contains K users

考虑物理层网络编码^[16],整个数据交换包含两个传输链路,即上行链路和下行链路。上行链路所有用户将信号发送给中继,下行链路中继将信号广播给所有用户。假设上行和下行链路分别包含 T_u 和 T_d 个时隙,则在第 t 个时隙,信道模型可以表示为

$$\mathbf{y}_R(t) = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{jk}(t) \mathbf{x}_{jk}(t) + \mathbf{z}_R(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_{jk}(t) = \mathbf{G}_{jk}^T(t) \mathbf{x}_R(t) + \mathbf{z}_{jk}(t), \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}_{jk}(t) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 和 $\mathbf{y}_{jk}(t) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 分别表示用户 Γ_{jk} 发送和接收的信息; $\mathbf{x}_R(t) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 和 $\mathbf{y}_R(t) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 分别表示中继发送和接收的信息; $\mathbf{z}_R(t)$ 和 $\mathbf{z}_{jk}(t)$ 分别表示中继端和用户 Γ_{jk} 端的加性高斯白噪声,其元素独立且服从高斯分布 $CN(0, \sigma^2)$ 。

由于上行和下行链路分别包含 T_u 和 T_d 个时隙,上述信道模型简化为

$$\mathbf{y}_R = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{jk} \mathbf{x}_{jk} + \mathbf{z}_R, \quad (3)$$

$$\mathbf{y}_{jk} = \mathbf{G}_{jk}^T \mathbf{x}_R + \mathbf{z}_{jk}, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{y}_R = [\mathbf{y}_R^T(1), \dots, \mathbf{y}_R^T(T_u)]^T$, $\mathbf{x}_{jk} = [\mathbf{x}_{jk}^T(1), \dots, \mathbf{x}_{jk}^T(T_u)]^T$, $\mathbf{z}_R = [\mathbf{z}_R^T(1), \dots, \mathbf{z}_R^T(T_u)]^T$, $\mathbf{x}_R = [\mathbf{x}_R^T(1), \dots, \mathbf{x}_R^T(T_d)]^T$, $\mathbf{y}_{jk} = [\mathbf{y}_{jk}^T(1), \dots, \mathbf{y}_{jk}^T(T_d)]^T$,

$$\mathbf{H}_{jk} = \text{diag}\{\mathbf{H}_{jk}(1), \dots, \mathbf{H}_{jk}(T_u)\}$$

$$= \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{jk}(1) & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{H}_{jk}(T_u) \end{pmatrix},$$

$\mathbf{G}_{jk}^T = \text{diag}\{\mathbf{G}_{jk}^T(1), \dots, \mathbf{G}_{jk}^T(T_d)\}$ 。用户 Γ_{jk} 和中继端发送的信号分别满足功率限制 $\frac{1}{T_u} \text{tr}(\mathbf{x}_{jk} \mathbf{x}_{jk}^H) \leq$

$P_{jk}, j \in I_L, k \in I_K$ 和 $\frac{1}{T_d} \text{tr}(\mathbf{x}_R \mathbf{x}_R^H) \leq P_R$ 。其中 P_{jk} 和 P_R 分别为用户端和中继端最大的发送功率。

1.2 用户端和中继端的预处理

假设用户 Γ_{jk} 发送信号 \mathbf{W}_{jk} 给同一集群 j 中其他所有用户,并且希望收到来自集群 j 中其他所有用户发送的信号 $\mathbf{W}_{j'k'}$, 其中 $k' \in I_K \setminus \{k\}$, 本文中符号 $A \setminus B$ 表示从集合 A 中排除集合 B 。

首先考虑上行链路,假设 $\mathbf{x}'_{jk} \in \mathbb{C}^{d_u \times 1}$ 为用户 Γ_{jk} 发送的码字矩阵,它与 \mathbf{W}_{jk} 一一对应。其中 d_u 表示每个时隙 \mathbf{W}_{jk} 被编码为一个 $d_u \times 1$ 的码字,即每个用户每个时隙发送 d_u 个独立数据流。假设 $\mathbf{U}_{jk} \in \mathbb{C}^{M \times d_u}$ 为相应的预编码矩阵,那么

$$\mathbf{x}_{jk} = \mathbf{U}_{jk} \mathbf{x}'_{jk}. \quad (5)$$

接下来考虑中继端的处理。为了描述方便,引入以下符号:

$$\mathbf{M}_j = [\mathbf{H}_{j1} \mathbf{U}_{j1}, \dots, \mathbf{H}_{jK} \mathbf{U}_{jK}], j \in I_L, \quad (6a)$$

$$\mathbf{M}_{-j} = \mathbf{M}_j \setminus \{\mathbf{H}_{jk} \mathbf{U}_{jk}\}, \quad (6b)$$

$$\mathbf{M} = [\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2], \quad (6c)$$

$$\mathbf{M}_j = \mathbf{M} \setminus \mathbf{M}_j, j \in I_L. \quad (6d)$$

中继端接收到来自于两个集群的用户信息。对于集群 j 的用户来说,集群 $\bar{j}, \bar{j} \in I_L \setminus \{j\}$ 的用户发送的信号为干扰信号。为解出集群 j 的信号,中继需要从 \mathbf{y}_R 中提取出与干扰集群的信号正交的信号分量。也就是说,对于集群 j ,存在投影矩阵 $\mathbf{P}_j \in \mathbb{C}^{N \times N}$, 将 \mathbf{y}_R 投影到 $\text{null}(\mathbf{M}_j^T)$, 即

$$\mathbf{P}_j \mathbf{y}_R = \mathbf{P}_j \mathbf{M}_j \mathbf{x}'_j + \mathbf{P}_j \mathbf{z}_R, \quad (7)$$

其中 $\mathbf{x}'_j = [\mathbf{x}'_{j1}, \dots, \mathbf{x}'_{jK}]^T$ 。式中,通过投影,集群 $j' \neq j$ 中的信号被去除了。

接下来考虑下行链路。和前面类似,引入 $\mathbf{N}_j = [\mathbf{G}_{j1} \mathbf{V}_{j1}, \dots, \mathbf{G}_{jK} \mathbf{V}_{jK}], \mathbf{N} = [\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2]$ 和 $\mathbf{N}_j = \mathbf{N} \setminus \mathbf{N}_j$ 。其中 $\mathbf{V}_{jk} \in \mathbb{C}^{M \times d_d}$ 是用户 Γ_{jk} 的接收处理矩阵, d_d 表示每个用户每个时隙接收 d_d 个独立数据流。令 $\mathbf{W}_j \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示将向量投影到 $\text{null}(\mathbf{N}_j^T)$ 的投影矩阵。

考虑半双工通信,上行和下行链路时隙分配允许不同。假设 $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示中继端将上行链路接收的 T_u 个时隙的信号在下行链路使用 T_d 个时隙发送给每个用户。

因此,中继端发送的信号为

$$\mathbf{x}_R = \alpha \sum_{j=1}^L \mathbf{W}_j^T \mathbf{F} \mathbf{P}_j \mathbf{y}_R, \quad (8)$$

式中: α 为中继端满足功率限制的缩放因子。

最终, 用户 Γ_{jk} 收到的信号为

$$\mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{y}_{jk} = \alpha \mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{G}_{jk}^T \sum_{j'=1}^L \mathbf{W}_{j'}^T \mathbf{F} \mathbf{P}_{j'} \mathbf{y}_R + \mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{z}_{jk} \quad (9a)$$

$$= \alpha \mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{G}_{jk}^T \mathbf{W}_j^T \mathbf{F} \mathbf{P}_j \left(\sum_{k'=1}^K \mathbf{H}_{jk'} \mathbf{U}_{jk'} \mathbf{x}'_{jk'} + \mathbf{z}_R \right) + \mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{z}_{jk}. \quad (9b)$$

收到 $\mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{y}_{jk}$ 后, 用户 Γ_{jk} 解出信号 $\mathbf{W}_{jk'}$, 记为 $\hat{\mathbf{W}}_{jk'}^{k'}$, 其中 $k' \neq k$ 。

从式(9)看出, 集群 j 中的其他用户到用户 Γ_{jk} 的等效信道为 $\mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{G}_{jk}^T \mathbf{W}_j^T \mathbf{F} \mathbf{P}_j \mathbf{M}_{jk}^-$ 。此等效信道可以看作上行等效信道 $\mathbf{P}_j \mathbf{M}_{jk}^-$, 中继时隙分配矩阵 \mathbf{F} 和下行等效信道 $\mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{G}_{jk}^T \mathbf{W}_j^T$ 的乘积。注意文献[12]将集群 j 中其他用户 $\Gamma_{jk'}$ 到用户 Γ_{jk} 的等效信道看作两个对称等效信道的乘积。由于本文考虑半双工通信, \mathbf{F} 矩阵的引入使得上行/下行链路不再对称。因此我们考虑对上行/下行链路分别设计信号对齐。

1.3 自由度

由于 MIMO mRC 的香农容量很难刻画, 因此本文主要分析网络的 DoF。简单来说, 网络的 DoF 是网络中可以支持的独立信息流数目。

假设 $T = T_u + T_d$ 表示一次信息传输使用的总时隙^①, \mathbf{W}_{jk} 携带的信息速率为 R_{jk} 。如果 $T \rightarrow \infty$ 时, 对于任意 $k' \in I_K \setminus \{k\}$, $\Pr(\hat{\mathbf{W}}_{jk'}^{k'} \neq \mathbf{W}_{jk'})$ 总是 0, 称用户 Γ_{jk} 达到总信息速率 $C_{jk} = \sum_{k'=1, k' \neq k}^K R_{jk'}$ 。假设 $P_{jk} = \beta_{jk} P$, $j \in I_L, k \in I_K$; $P_R = \beta P$, 其中 β_{jk} 和 β 均为常系数。接下来, 定义系统可达到的总 DoF 为

$$d_{\text{sum}} \triangleq \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K C_{jk}(P)}{\log P}, \quad (10)$$

式中: $C_{jk}(P)$ 单位是 bit, \log 表示对数以 2 为底, 同时, 定义每个用户可达到的 DoF 为

$$d_{\text{user}} \triangleq \frac{1}{KL} d_{\text{sum}}. \quad (11)$$

式中: d_{user} 表示用户收到的独立的数据流数目。

注意: 考虑全双工通信时, 此信道模型的一个割集上界^[12]为 $d_{\text{sum}} \leq \min(KLM, KN)$, 即平均每个用户收到的 DoF 为

$$d_{\text{user}} \leq \min\left(M, \frac{N}{L}\right). \quad (12)$$

2 问题讨论

2.1 初期讨论

分别对上行和下行链路进行分析。

上行链路集群 j 中其他用户到用户 Γ_{jk} 的等效信道矩阵为 $\mathbf{P}_j \mathbf{M}_{jk}^-$, 其中 \mathbf{P}_j 表示将向量投影到 $\text{null}(\mathbf{M}_j^T)$ 的投影矩阵。 $\mathbf{P}_j \mathbf{M}_{jk}^-$ 与 $\mathbf{P}_j \mathbf{M}_j$ 的差别在于用户 Γ_{jk} 已知自己发送的信号。对于集群 j , 每个用户发送 $d_u T_u$ 个独立数据流, 集群中共有 $K d_u T_u$ 个数据流, 但是考虑到每个用户接收到同一个集群的数据流后可以去除自己发送的 $d_u T_u$ 个数据流, 集群 j 在中继端只需占用 $(K-1)d_u T_u$ 个无干扰的空间维度。所以, 上行链路设计信号对齐, 满足 $\text{rank}(\mathbf{P}_j \mathbf{M}_j) \geq (K-1)d_u T_u$ 。

下行链路集群 j 中其他用户到用户 Γ_{jk} 的等效信道矩阵为 $\mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{G}_{jk}^T \mathbf{W}_j^T$, 其中 \mathbf{W}_j 表示将向量投影到 $\text{null}(\mathbf{N}_j^T)$ 的投影矩阵。对于集群 j , 每个用户接收到 $d_d T_d$ 个独立数据流。所以, 下行链路中继端只需为每个集群发送 $d_d T_d$ 维度的无干扰信号。设计信号对齐, 满足 $\text{rank}(\mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{G}_{jk}^T \mathbf{W}_j^T) \geq d_d T_d$ 。

结合以上对上行和下行链路的分析, 如果设计上行预处理矩阵 \mathbf{U}_{jk} 和下行接收处理矩阵 \mathbf{V}_{jk} 满足

$$\text{rank}(\mathbf{P}_j \mathbf{M}_j) \geq (K-1)d_u T_u, \quad (13a)$$

$$\text{rank}(\mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{G}_{jk}^T \mathbf{W}_j^T) \geq d_d T_d, \quad (13b)$$

则用户 Γ_{jk} 的自由度取决于上行链路集群 j 中其他所有用户发送的数据流数目 $(K-1)d_u T_u$ 和下行链路它能接收到的数据流数目 $d_d T_d$, 即每个用户可达的 DoF 为

$$d_{\text{user}} = \frac{1}{T} \min\{(K-1)d_u T_u, d_d T_d\}. \quad (13c)$$

为描述方便, 后文分别称 d_u 和 d_d 为上行和下行链路每个用户可达的 DoF。

由于我们的信号对齐方案不考虑多个时隙之间的信号对齐, 所以接下来考虑单个时隙下(此时 $T_u = T_d = 1$)如何设计信号对齐, 使得 d_u 和 d_d 最大。

2.2 相关引理和定义

对上行和下行链路设计信号对齐时, 均使用

① 此时考虑半双工通信, 后文中令 $T_u + T_d = T$, 将结果推广到全双工通信。

了天线禁用技术和角点的概念^[12]。接下来以上行链路为例对天线禁用技术进行介绍,并且对角点进行定义。

性质 1 每个用户的上行和下行链路的 DoF 均受中继端天线 N 和用户端天线 M 的限制,也就是说, d_u 和 d_d 均为 M 和 N 的函数,即 $d_u = Nf(M/N), d_d = N\tilde{f}(M/N)$, 其中 $f(\cdot), \tilde{f}D(\cdot)$ 均为 M/N 的函数。

引理 1 (天线禁用技术) 对于所考虑的 MIMO mRC,假设上行链路 $d_u = Nf(M/N)$ 在一个固定的天线配置 ($M = M_0, N = N_0$) 时, $d_u = d_0$ 可达。那么通过在用户端禁用 $M - M_0$ 根天线, ($x = M/N_0, y = d_u$) 在线段 $x \in [M_0/N_0, \infty), y = d_0$ 上的每个点可达;通过在中继端禁用 $N_0 - (MN_0/M_0)$ 根天线, ($x = M/N_0, y = d_u$) 在线段 $x \in (0, M_0/N_0], y = (d_0N_0/M_0)x$ 上的每个点可达。

通过天线禁用技术,只需要给出可达 DoF 曲线中特定的点,即可得到整个可达 DoF 曲线。接下来,称这些特定点为角点,并给出以下定义。

定义 1 (角点) 已知上行链路一个可达的 DoF 曲线 $d_u = Nf(M/N)$, 固定中继端天线 $N = N_0$ 。对于可达 DoF 曲线中某一点 ($M_0/N_0, d_0$), 如果当 $M > M_0$ 时, ($M/M_0, d_0M/M_0$) 不可达;并且当 $M < M_0$ 时, ($M/N_0, d_0$) 不可达,则称 ($M_0/N_0, d_0$) 为可达 DoF 曲线上的一个角点。

以上对天线禁用技术的描述和角点的定义同样适用于下行链路。接下来,只需找到上行和下行链路所有的角点,并且结合天线禁用技术,即可得上行和下行链路的可达 DoF,即 d_u 和 d_d 。为描述方便,定义 g 函数

$$g_{(a,b)}(x) = \begin{cases} bx, & \text{当 } x < a \text{ 时} \\ a, & \text{当 } x \geq a \text{ 时} \end{cases}, \quad (14)$$

式中 a 和 b 是常系数。

3 信号对齐

3.1 上行链路信号对齐

上行链路设计信号对齐满足单个时隙下 $\text{rank}(\mathbf{P}_j\mathbf{M}_j) \geq (K-1)d_u$ 。接下来,给出候选角点 ($M/N, d_u$), 并结合候选角点给出相应的可达 DoF。

引理 2 对于两个用户集群,每个集群 K 个

用户的 $M \times NM$ MIMO mRC,当数据交换模型为完整数据交换模型时,对于上行链路以下候选角点 ($M/N, d_u$) 是可达的:

$$\text{角点(U1)} \quad \frac{M}{N} = \frac{1}{2K-1}, d_u = \frac{N}{2K-1}; \quad (15a)$$

$$\text{角点(U2)} \quad \frac{M}{N} = \frac{2K-1}{2K(K-1)}, d_u = \frac{N}{2(K-1)}. \quad (15b)$$

定义集合 I 包含式 (15) 中所有候选角点 ($M/N, d_u$), 则上行链路每个用户可达的一个 DoF 为

$$d_u = \max_{(a,b) \in I} g_{(a,b)}\left(\frac{M}{N}\right). \quad (16)$$

证明 已知候选角点,根据天线禁用技术,可以得到式 (16)。接下来设计信号对齐证明角点 (U1) 和 (U2) 满足 $\text{rank}(\mathbf{P}_j\mathbf{M}_j) \geq (K-1)d_u$ 。

1) 对于角点 (U1), 当 $M/N = 1/(2K-1)$ 时, 假设 $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_{11}, \dots, \mathbf{H}_{1K}, \mathbf{H}_{21}, \dots, \mathbf{H}_{2K}] \in \mathbb{C}^{N \times 2KM}$, 由于信道的随机性, $\text{null}(\mathbf{H})$ 以概率 1 是 $2KM-N$ 维。因此存在满秩矩阵 $\mathbf{U}_{jk} \in \mathbb{C}^{M \times (2KM-N)}, j \in I_L, k \in I_K$ 满足

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{jk} \mathbf{U}_{jk} = \mathbf{0}. \quad (17)$$

此时,每个用户发送 $d_u = 2KM - N = N/(2K-1)$ 个数据流。在中继端,每个集群的信号占据 $KN/(2K-1)$ 个信号维度,所以另外一个集群占据 $N-KN/(2K-1)$ 个无干扰的信号维度,即 $\text{rank}(\mathbf{P}_j\mathbf{M}_j) = \dim(\text{null}(\mathbf{M}_j^T)) = N - KN/(2K-1) = (K-1)d_u$ 。

2) 对于角点 (U2), 当 $M/N = (2K-1)/(2K(K-1))$ 时, 假设 $\mathbf{H}_j = [\mathbf{H}_{j1}, \dots, \mathbf{H}_{jk}] \in \mathbb{C}^{N \times KM}, j \in I_L$ 。由于信道的随机性, $\text{null}(\mathbf{H}_j)$ 以概率 1 是 $KM-N$ 维。因此存在 $\mathbf{U}_{jk} \in \mathbb{C}^{M \times (KM-N)}, j \in I_L, k \in I_K$ 满足

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{jk} \mathbf{U}_{jk} = \mathbf{0}, \text{其中 } j = 1, 2. \quad (18)$$

此时,每个用户发送 $d_u = KM - N = N/(2K-2)$ 个数据流。中继端,每个集群的信号占据 $(K-1)d_u = N/2$ 维,所以另外一个集群占据 $N - N/2$ 个无干扰的信号维度,即 $\text{rank}(\mathbf{P}_j\mathbf{M}_j) = \dim(\text{null}(\mathbf{M}_j^T)) = N - N/2 = (K-1)d_u$ 。证毕。

3.2 下行链路信号对齐

下行链路设计信号对齐满足单个时隙下 rank

$(\mathbf{V}_{jk}^T \mathbf{G}_{jk}^T \mathbf{W}_j^T) = \text{rank}(\mathbf{W}_j \mathbf{G}_{jk} \mathbf{V}_{jk}) \geq d_d$ 。接下来,给出候选角点 $(M/N, d_d)$,并结合候选角点给出相应的可达 DoF。

引理 3 对于两个用户集群,每个集群 K 个用户的 $M \times NM$ MIMO mRC,当数据交换模型为完整数据交换模型时,下行链路以下候选角点 $(M/N, d_d)$ 是可达的:

$$\text{角点(D1)} \quad \frac{M}{N} = \frac{1}{K+1}, d_d = \frac{N}{K+1}; \quad (19a)$$

$$\text{角点(D2)} \quad \frac{M}{N} = \frac{1}{m} \left(1 + \frac{1}{C_{K-1}^{m-1} + C_K^m(m-1)} \right),$$

$$d_d = \left(\frac{C_{K-1}^{m-1} N}{C_{K-1}^{m-1} + C_K^m(m-1)} \right), m = 2, \dots, K-1; \quad (19b)$$

$$\text{角点(D3)} \quad \frac{M}{N} = \frac{1}{K} \left(K - k + \frac{1}{k+1} \right),$$

$$d_d = \frac{N}{k+1}, k = 1, \dots, K-1. \quad (19c)$$

定义集合 J 包含 (19) 中所有候选角点 $(M/N, d_d)$,则下行链路每个用户可达的一个 DoF 为

$$d_d = \max_{(a,b) \in J} g_{(a,b)} \left(\frac{M}{N} \right). \quad (20)$$

证明 已知候选角点,根据天线禁用技术,可以得到式(20)。接下来我们设计信号对齐证明角点(D1), (D2)和(D3)满足 $\text{rank}(\mathbf{W}_j \mathbf{G}_{jk} \mathbf{V}_{jk}) \geq d_d$ 。

1)对于角点(D1),当 $M/N = 1/(K+1)$ 时,不需要设计信号对齐即可满足 $\text{rank}(\mathbf{W}_j \mathbf{G}_{jk} \mathbf{V}_{jk}) \geq d_d$ 。理由如下。假设每个用户 Γ_{jk} 端的预处理矩阵 $\mathbf{V}_{jk} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 随机,即 \mathbf{V}_{jk} 满秩。每个用户接收 $d_d = M = N/(K+1)$ 个独立的数据流。一个集群接收 $KN/(K+1)$ 个独立数据流。所以中继端发送给另一个集群的无干扰维度为 $N - KN/(K+1) = d_d$ 。即 $\text{rank}(\mathbf{W}_j \mathbf{G}_{jk} \mathbf{V}_{jk}) = N - KN/(K+1) = d_d$ 。

2)对于角点(D2),当 $\frac{M}{N} = \frac{1}{m} \left(1 + \frac{1}{C_{K-1}^{m-1} + C_K^m(m-1)} \right)$, $m = 2, \dots, K-1$ 时, $M/N > 1/m$ 。对于集群 j 中随机选取的 m 个用户,记为 $\Gamma_{jk[1]}, \Gamma_{jk[2]}, \dots, \Gamma_{jk[m]}$, 假设 $\mathbf{G}_j = [\mathbf{G}_{jk[1]}, \mathbf{G}_{jk[2]}, \dots, \mathbf{G}_{jk[m]}] \in \mathbb{C}^{N \times mM}$, 由于信道的随机性, $\text{null}(\mathbf{G}_j)$ 以概率 1 是 $mM - N$ 维。因此,存在满秩矩阵 $\mathbf{V}_{jk[t]} \in \mathbb{C}^{M \times (mM - N)}$, $t \in \{1, \dots, m\}$ 满足

$$\sum_{t=1}^m \mathbf{G}_{jk[t]} \mathbf{V}_{jk[t]} = \mathbf{0}, \text{其中 } j = 1, 2. \quad (21)$$

此时, $\text{span}(\mathbf{G}_{jk[1]} \mathbf{V}_{jk[1]}, \dots, \mathbf{G}_{jk[m]} \mathbf{V}_{jk[m]}) = \text{span}(\mathbf{G}_{jk[1]} \mathbf{V}_{jk[1]}, \dots, \mathbf{G}_{jk[m-1]} \mathbf{V}_{jk[m-1]})$, 并且以概率 1 是 $(m-1)(mM - N)$ 维度。由于从 K 个用户中选取 m 个用户共有 C_K^m 种组合,这些组合中包含用户 Γ_{jk} 的有 C_{K-1}^{m-1} 种。所以每个用户接收 $d_d = C_{K-1}^{m-1}(mM - N)$ 个独立数据流,一个集群共接收 $C_{K-1}^{m-1}K(mM - N)$ 个独立数据流。在中继端,经过信号对齐这些数据流占用 $C_K^m(m-1)(mM - N)$ 维度。所以中继端发送给另一个集群的无干扰维度为 $N - C_K^m(m-1)(mM - N) = C_{K-1}^{m-1}(mM - N) = d_d$ 。即 $\text{rank}(\mathbf{W}_j \mathbf{G}_{jk} \mathbf{V}_{jk}) = N - C_K^m(m-1)(mM - N) = d_d$ 。

$$3) \text{对于角点(D3)}, \text{当 } \frac{M}{N} = \frac{1}{K} \left(K - k + \frac{1}{k+1} \right),$$

$k = 1, \dots, K-1$ 时,假设 $\mathbf{G}_j =$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{j1} & \dots & \mathbf{G}_{jk} & \mathbf{G}_{j(k+1)} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{G}_{j1} & \dots & \mathbf{G}_{jk} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{G}_{jK} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{(K-k)N \times KM},$$

由于信道的随机性, $\text{null}(\mathbf{G}_j)$ 以概率 1 是 $KM - (K-k)N = N/(k+1)$ 维度。因此,存在满秩矩阵

$\mathbf{V}_{jk} \in \mathbb{C}^{M \times \frac{N}{k+1}}$, $j \in I_L, k \in I_K$ 满足

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{j1} & \dots & \mathbf{G}_{jk} & \mathbf{G}_{j(k+1)} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{G}_{j1} & \dots & \mathbf{G}_{jk} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{G}_{jK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{j1} \\ \vdots \\ \mathbf{V}_{jK} \end{bmatrix} = \mathbf{0}. \quad (22)$$

因此, $\text{span}(\mathbf{G}_{j1} \mathbf{V}_{j1}, \dots, \mathbf{G}_{jK} \mathbf{V}_{jK}) = \text{span}(\mathbf{G}_{j1} \mathbf{V}_{j1}, \dots, \mathbf{G}_{jk} \mathbf{V}_{jk})$, 并且以概率 1 是 $kN/(k+1)$ 维度。此时,每个用户接收 $d_d = N/(k+1)$ 个独立数据流,经过信号对齐,在中继端一个集群接收的 $KN/(k+1)$ 个数据流压缩到 $kN/(k+1)$ 个空间维度。所以中继端发送给另一个集群的无干扰信号维度为 $N - kN/(k+1) = d_d$ 。即 $\text{rank}(\mathbf{W}_j \mathbf{G}_{jk} \mathbf{V}_{jk}) = N - kN/(k+1) = d_d$ 。

证毕。

4 主要结果

引理 2 和引理 3 分别给出两个用户集群,每个集群 K 个用户的 MIMO mRC 完整数据交换模型上行链路的候选角点 $(M/N, d_u) \in I$ 和下行链路的候选角点 $(M/N, d_d) \in J$ 。并根据候选角点给出相应的可达 DoF。接下来,结合引理 2 和引

理 3, 给出此模型一个可达的 DoF。

考虑全双工通信, 假设每个结点都可以进行自干扰消除, 则以上对半双工通信的分析经过调整可以应用于全双工通信。全双工通信和半双工通信主要的区别在于, 对于全双工通信, 每个结点同时发送和接收信号, 因此上行和下行链路总是占用相同的时隙, 即 $T_u = T_d = T$ 。由于引理 2 和引理 3 均考虑单个时隙下的信号对齐, 由此, 令 $T_u = T_d = T$, 很容易推出此模型全双工通信下一个可达的 DoF。

定理 1 对于两个用户集群, 每个集群 K 个用户的 $M \times NMIMO$ mRC, 当考虑完整数据交换模型, 并且考虑全双工通信时, 每个用户可达到的一个 DoF 为

$$d_{\text{user}} = \max_{(a,b) \in J} g_{(a,b)} \left(\frac{M}{N} \right). \quad (23)$$

证明 考虑全双工通信, 即 $T_u = T_d = T$, 由式 (13c), $d_{\text{user}} = \frac{1}{T} \min \{ (K - 1) d_u T_u, d_d T_d \} = \min \{ (K - 1) d_u, d_d \}$ 。结合引理 2 和引理 3, 下行链路是网络的瓶颈, 得到 $d_{\text{user}} = d_d$ 。证毕。

令定理 1 中 $K=3$ 和 $K=4$, 给出以下结论。

推论 1 对于 $L=2, K=3$ 的 $M \times NMIMO$ mRC, 当考虑完整数据交换模型, 并且考虑全双工通信时, 每个用户可达的一个 DoF 为

$$d_{\text{user}} = \begin{cases} \min \left\{ M, \frac{N}{4} \right\}, & \frac{M}{N} \leq \frac{1}{3} \\ \min \left\{ \frac{3M}{4}, \frac{N}{3} \right\}, & \frac{1}{3} < \frac{M}{N} \leq \frac{1}{2} \\ \min \left\{ \frac{2M}{3}, \frac{2N}{5} \right\}, & \frac{1}{2} < \frac{M}{N} \leq \frac{2}{3} \\ \min \left\{ \frac{3M}{5}, \frac{N}{2} \right\}, & \frac{2}{3} < \frac{M}{N} < 1 \end{cases} \quad (24)$$

证明 当 $K=3$ 时, 下行链路存在以下候选角点 $(M/N, d_d)$:

$$\begin{aligned} (D1) & \left(\frac{1}{4}, \frac{N}{4} \right); (D2) \left(\frac{3}{5}, \frac{2N}{5} \right); \\ (D3) & k=1 \text{ 时, } \left(\frac{5}{6}, \frac{N}{2} \right); k=2 \text{ 时, } \\ & \left(\frac{4}{9}, \frac{N}{3} \right). \end{aligned}$$

由式 (23) 得到推论 1。

推论 2 对于 $L=2, K=4$ 的 $M \times NMIMO$ mRC, 当考虑完整数据交换模型, 并且考虑全双工

通信时, 每个用户可达的一个 DoF 为

$$d_{\text{user}} = \begin{cases} \min \left\{ M, \frac{N}{5} \right\}, & \frac{M}{N} \leq \frac{1}{4} \\ \min \left\{ \frac{4M}{5}, \frac{N}{4} \right\}, & \frac{1}{4} < \frac{M}{N} \leq \frac{1}{3} \\ \min \left\{ \frac{3M}{4}, \frac{3N}{11} \right\}, & \frac{1}{3} < \frac{M}{N} \leq \frac{5}{11} \\ \min \left\{ \frac{3M}{5}, \frac{N}{3} \right\}, & \frac{5}{11} < \frac{M}{N} \leq \frac{7}{12} \\ \min \left\{ \frac{4M}{7}, \frac{N}{2} \right\}, & \frac{7}{12} < \frac{M}{N} \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

证明 当 $K=4$ 时, 下行链路存在以下候选角点 $(M/N, d_d)$:

$$\begin{aligned} (D1) & \left(\frac{1}{5}, \frac{N}{5} \right); \\ (D2) & m=2 \text{ 时, } \left(\frac{5}{9}, \frac{N}{3} \right); m=3 \text{ 时, } \\ & \left(\frac{4}{11}, \frac{3N}{11} \right); \\ (D3) & k=1 \text{ 时, } \left(\frac{7}{8}, \frac{N}{2} \right); k=2 \text{ 时, } \left(\frac{7}{12}, \frac{N}{3} \right); \\ & k=3 \text{ 时, } \left(\frac{5}{16}, \frac{N}{4} \right). \end{aligned}$$

由式 (22) 得到推论 2。

图 2 和图 3 分别给出 $L=2, K=3$ 和 $L=2, K=4$ 全双工通信下系统可达到的 DoF。对于 $L=2, K=3$, 将全双工通信下的割集上界以及文献 [12], [14] 的结果加入进去比较。由于得到 2 个更优的角点 $(1/4, N/4)$ 和 $(3/5, 2N/5)$, 我们的结果在这 2 个角点附近优于文献 [12] 中的结果。同时, 此结果和文献 [14] 使用算法优化得到的结

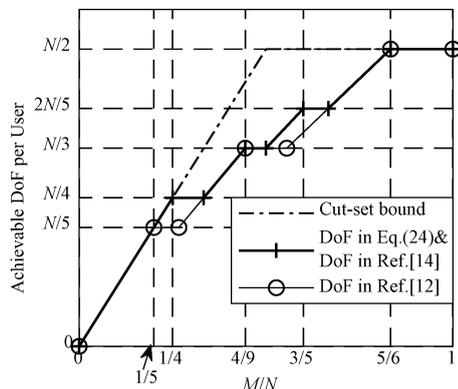


图 2 全双工通信 $L=2, K=3$ 模型可达到的 DoF
Fig. 2 Achievable DoF of MIMO mRC with $L=2$ and $K=3$ in full duplex model

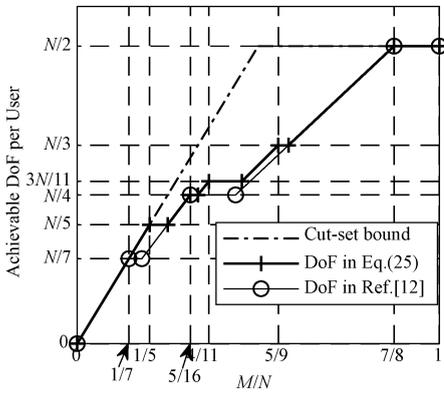


图 3 全双工通信 $L=2, K=4$ 模型可达到的 DoF

Fig. 3 Achievable DoF of MIMO mRC with $L=2$ and $K=4$ in full duplex model

果相同。而且这也是目前为止此模型最优的可达 DoF。对于 $L=2, K=4$ 将全双工通信下的割集上界以及文献[12]的结果加入进去比较。此时,得到 3 个更优的角点 $(1/5, N/5)$, $(4/11, 3N/11)$ 和 $(5/9, N/3)$, 所以在这几个角点附近我们的结果优于文献[12]中的结果。

注意:考虑全双工通信时,由于网络的瓶颈是下行链路,所以文献[12]中作者考虑上行和下行链路对称设计是足够的,同时,作者假设每个用户发送一个独立的数据流,则将一个集群的信号尽可能压缩到一维。这和我们下行链路设计信号对齐的要求(13b)是类似的。但是我们在设计下行链路信号对齐时考虑了更多的信号对齐模式,所以得到了更优化的结果。

通过定理 1 进一步验证了对于完整数据交换模型,下行链路是网络的瓶颈。所以对于半双工通信,通过优化上行和下行链路的时隙可以使系统的 DoF 进一步提高。

定理 2 对于两个用户集群,每个集群 K 个用户的 $M \times NMIMO$ mRC,当考虑完整数据交换模型,并且考虑半双工通信时,优化上行和下行链路的时隙分配为

$$\frac{T_u}{T_d} = \frac{\max_{(a,b) \in I} g_{(a,b)}\left(\frac{M}{N}\right)}{(K-1) \max_{(a,b) \in J} g_{(a,b)}\left(\frac{M}{N}\right)}. \quad (26a)$$

此时每个用户可达的一个 DoF 为

$$d_{\text{user}} = \frac{(K-1) \left(\max_{(a,b) \in I} g_{(a,b)}\left(\frac{M}{N}\right) \right)^2}{\max_{(a,b) \in I} g_{(a,b)}\left(\frac{M}{N}\right) + (K-1) \max_{(a,b) \in J} g_{(a,b)}\left(\frac{M}{N}\right)}. \quad (26b)$$

其中,集合 I 和集合 J 分别包含式(15)和式(19)中的角点, g 函数定义在式(14)中。

证明 考虑半双工通信,此时 $T = T_u + T_d$ 则由式(13c),当 $(K-1)d_u T_u = d_d T_d$ 时,即 $\frac{T_u}{T_d} =$

$$\frac{d_d}{(K-1)d_u} \text{ 时, } d_{\text{user}} \text{ 最大, 此时, } d_{\text{user}} = \frac{1}{T_u + T_d} \min\{(K-1)d_u T_u, d_d T_d\} = \frac{(K-1)d_u T_u}{T_u + T_d} = \frac{(K-1)d_u}{1 + \frac{T_d}{T_u}}.$$

结合引理 2 和引理 3,得到定理 2。

令定理 2 中 $K=3$,得到以下结果。

推论 3 对于 $L=2, K=3$ 的 $M \times NMIMO$ mRC,当考虑完整数据交换模型,并且考虑半双工通信时,优化上行/下行链路的时隙分配为

$$\frac{T_u}{T_d} = \begin{cases} \frac{1}{2}, & \frac{M}{N} \in \left(0, \frac{1}{5}\right] \\ \frac{5M}{2N}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{1}{5}, \frac{1}{4}\right] \\ \frac{5}{8}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{1}{4}, \frac{5}{12}\right] \\ \frac{3M}{2N}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{5}{12}, \frac{4}{9}\right] \\ \frac{2}{3}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{4}{9}, \frac{1}{2}\right] \\ \frac{4M}{3N}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{1}{2}, \frac{3}{5}\right] \\ \frac{4}{5}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{3}{5}, \frac{2}{3}\right] \\ \frac{6M}{5N}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{2}{3}, \frac{5}{6}\right] \\ 1, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{5}{6}, 1\right] \end{cases}, \quad (27a)$$

此时每个用户可达的一个 DoF 为

$$d_{\text{user}} = \begin{cases} \frac{2M}{3}, & \frac{M}{N} \in \left(0, \frac{1}{5}\right] \\ \min\left\{\frac{2N}{5 + \frac{2N}{M}}, \frac{2N}{13}\right\}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}\right] \\ \frac{6M}{13}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{1}{3}, \frac{5}{12}\right] \\ \min\left\{\frac{N}{2 + \frac{4N}{3M}}, \frac{N}{5}\right\}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{5}{12}, \frac{1}{2}\right] \\ \min\left\{\frac{N}{2 + \frac{3N}{2M}}, \frac{2N}{9}\right\}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}\right] \\ \min\left\{\frac{N}{2 + \frac{5N}{3M}}, \frac{N}{4}\right\}, & \frac{M}{N} \in \left(\frac{2}{3}, 1\right] \end{cases} \quad (27b)$$

证明 当 $K=3$ 时,上行链路存在以下候选角点 $(M/N, d_u)$:

$$(U1) \left(\frac{1}{5}, \frac{N}{5}\right); (U2) \left(\frac{5}{12}, \frac{N}{4}\right)。$$

因此上行链路每个用户可达的 DoF 为

$$d_u = \begin{cases} \min\left\{M, \frac{N}{5}\right\}, & \frac{M}{N} \leq \frac{1}{3} \\ \min\left\{\frac{3M}{5}, \frac{N}{4}\right\}, & \frac{1}{3} < \frac{M}{N} < 1 \end{cases} \quad (28)$$

结合推论 1 下行链路可达的 DoF 以及定理 2,得到推论 3。证毕。

注意:根据 2.1 节的讨论,当上行链路设计信号对齐满足 $\text{rank}(P_j M_j) \geq (K-1)d_u T_u$ 。下行链路采用文献[12]的结果,通过优化上行和下行链路的时隙分配,可以得到 $L \geq 2$ 个用户集群,每个用户集群中 $K \geq 3$ 个用户的 MIMO mRC 模型在半双工通信下可达的一个 DoF。但是由于文献[12]中下行链路设计信号对齐的方式并不是最优的,所以最终得到的半双工通信下的结果并非最优。

图 4 给出半双工通信下 $L=2, K=3$ 模型可达到的 DoF。对于半双工通信,当不考虑上行和下行链路时隙优化分配时,系统可达的 DoF 是全双工通信的一半,很容易得到半双工通信下两个可达的 DoF,即定理 1 中 d_{user} 的 $1/2$ 以及文献[12]结果的 $1/2$ 。在图 4 中将此不考虑时隙分配的结果加入进行比较。同时,如前所述,结合 2.1 节的讨论,文献[12]的结果经过上行和下行时隙优化

分配,很容易推广到半双工通信。对于 $L=2, K=3$,当上行链路设计信号对齐得到式(28),下行链路采用文献[12]中的信号对齐方式时,可以推出半双工通信下经过上行/下行时隙优化后一个可达的 DoF。将此结果加入图 4 进行比较。结果发现当 $M/N < 5/6$ 时,进行时隙优化分配后的结果明显优于不进行时隙分配的结果。同时,由于下行链路考虑了 2 个更优的角点 $(1/4, N/4)$ 和 $(3/5, 2N/5)$,在这 2 个角点附近可得到更优化的 DoF。

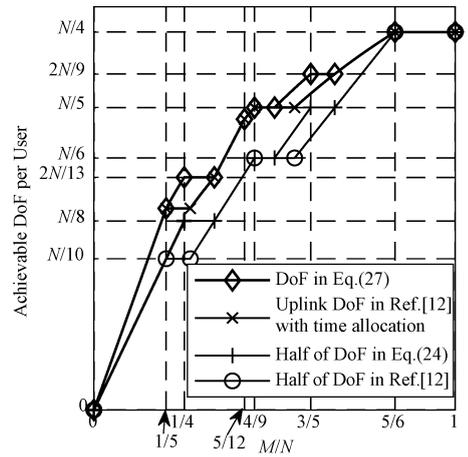


图 4 半双工通信 $L=2, K=3$ 模型可达到的 DoF
Fig. 4 Achievable DoF of MIMO mRC with $L=2$ and $K=3$ in half duplex model

注意:半双工通信时,上行和下行链路信号对齐非对称设计使得系统 DoF 进一步提高。这是因为对于一次完整的数据交换,上行链路中继端需要解出一个集群所有用户发送的信号,对应于式(13a),下行链路中继端为每个集群中的所有用户发送相同的信号,对应于式(13b)。很明显,上行链路的信号对齐要求相比下行链路降低了,这是因为如果上行链路一个集群的信息在中继端压缩得过于严重时,需要消耗多余的时隙将压缩的信息解出来。

5 总结

由于 L 个用户集群,每个集群 K 个用户的 MIMO mRC 的完整数据交换模型较为复杂,目前此模型全双工通信和半双工通信下的信道容量是未知的。本文主要对两个集群,每个集群 K 个用户的 MIMO mRC 的完整数据交换模型进行分析。由于数据交换模型的特殊性,上行和下行链路的信号对齐是不对称的,所以对上行链路和下行链

路分别设计信号对齐,得到相应的角点,并根据角点给出每个用户上行链路可以发送的独立数据流数目 d_u 和下行链路可以接收的独立数据流数目 d_d 。对于全双工通信,假设每个结点可以进行自干扰消除,通过令 $T_u = T_d = T$, 推出此模型在全双工通信下的结果。同时,由于下行链路是网络的瓶颈,通过上行和下行链路非对称设计,并且优化上行/下行链路时隙分配,得到半双工通信下一个优化的 DoF。

通过给出全双工通信下 $L=2, K=3$ 和 $L=2, K=4$ 的可达 DoF,验证了我们的结果优于目前已知的结果^[12], 并和通过算法优化得到的结果^[14]相同。同时通过优化上行/下行链路时隙分配 T_u/T_d , 半双工通信下的 $L=2, K=3$ 系统的 DoF 进一步得到提高。本文分析对于更一般的完整数据交换模型 ($L>2$) 在全双工通信和半双工通信下的 DoF 分析有参考价值。

参考文献

- [1] Gunduz D, Yener A, Goldsmith A, et al. The multiway relay channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(1): 51-63.
- [2] 王川, 邱玲. MIMO 下行多用户中继系统的线性收发处理设计 [J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(3): 378-383.
- [3] Cover T M, Thomas J A. Elements of information theory [M]. New York: Wiley, 1991.
- [4] Cadambe V R, Jafar S A. Interference alignment and degrees of freedom of the K -user interference channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3425-3441.
- [5] Wang R, Yuan X. MIMO multiway relaying with pairwise data exchange: a degrees of freedom perspective [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(20): 5294-5307.
- [6] Wang R, Yuan X, Tao M. Degrees of freedom of MIMO multiway relay channel with clustered pairwise exchange [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(2): 337-351.
- [7] Tian Y, Yener A. Degrees of freedom for the MIMO multiway relay channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(5): 2495-2511.
- [8] Wang R, Yuan X, Yeung R W. MIMO multipair two-way relaying with distributed relays: joint signal alignment and interference neutralization [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(3): 1326-1343.
- [9] Liu K, Tao M. Generalized signal alignment: on the achievable DoF for multi-user MIMO two-way relay channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(6): 3365-3386.
- [10] Liu K, Tao M. On the sum DoF of the asymmetric four-user MIMO Y channel [C] // IEEE International Conference on Communications. IEEE, Kuala Lumpur, 2016: 1-6.
- [11] Ding T, Yuan X, Liew S C. On the degrees of freedom of the symmetric multi-relay MIMO Y channel [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(9): 5673-5688.
- [12] Yuan X. MIMO multiway relaying with clustered full data exchange: signal space alignment and degrees of freedom [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(12): 6795-6808.
- [13] Huang T, Yuan X, Yuan J. Degrees of freedom of half-duplex MIMO multi-way relay channel with full data exchange [C] // IEEE Global Communications Conference. Austin. IEEE, 2014: 4336-4341.
- [14] Ding T, Yuan X, Liew S C. Algorithmic beamforming design for MIMO multiway relay channel with clustered full data exchange [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 10081-10086.
- [15] Zhang S, Liew S C, Lam P P. Hot topic: physical-layer network coding [C] // Proc ACM MobiCom, Los Angeles. ACM Sigmoblie, 2006: 358-365.
- [16] Papailiopoulos D S, Dimakis A G. Interference alignment as a rank constrained rank minimization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(8): 4278-4288.