

5G MU-MIMO 关键技术和性能研究

Key Technology and Performance in 5G MU-MIMO System

李新玥, 杨 艳, 张 涛 (中国联通网络技术研究院, 北京 100048)

Li Xinyue, Yang Yan, Zhang Tao (China Unicom Network Technology Research Institute, Beijing 100048, China)

摘 要:

对5G的MU-MIMO技术和性能进行了分析,并与SU-MIMO做对比。首先介绍了MU-MIMO的关键技术,包括系统模型、预编码技术和用户配对算法,并结合系统模型推导出用户在2种传输模式下的SINR。其次通过仿真分析,得出信道相关性和SINR对系统吞吐量的影响。最后以系统吞吐量增益为原则,找到了2种传输模式合理切换门限,为5G的调度算法提供参考。

关键词:

MU-MIMO;信道相关性;SINR;吞吐量增益
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2019.12.009
文章编号:1007-3043(2019)12-0046-06
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Abstract:

5G MU-MIMO technologies and performance are analyzed and compared with SU-MIMO. Firstly, the key technologies of MU-MIMO are introduced, including system model, precoding technology and user pairing algorithm. According to the system model, the user's SINR in both modes is derived. Secondly, through simulation analysis, the influence of channel correlation and SINR on system throughput are obtained. Finally, based on the principle of system gain, reasonable thresholds for two transmission mode switching are obtained, which provides a reference for 5G scheduling algorithm.

Keywords:

MU-MIMO; Channel correlation; SINR; Throughput gain

引用格式:李新玥,杨艳,张涛. 5G MU-MIMO关键技术和性能研究[J]. 邮电设计技术,2019(12):46-51.

1 概述

早期MIMO主要用在SU-MIMO系统中。在SU-MIMO中,占用相同时频资源的多个并行的数据流发给同一个用户或从同一个用户发给基站,仅用于增加一个用户的速率,即相比未使用MIMO技术的蜂窝系统来说,用于资源分配的空间的维度可以得到明显的提高,可以更好地利用空间信道。但在实际运用中,一个基站通常同时支持多个用户进行通信,研究逐渐

转向多个用户通过空分方式共享同一时频资源的MU-MIMO技术,系统可以通过空间维度的多用户调度获得额外的多用户分集增益。

无线通信技术发展到5G阶段,采用大规模天线,垂直和水平排列的大量天线阵子可获得更窄、能量更集中的波束,使5G的波束赋形更加灵活,减少MU-MIMO用户间的干扰。在5G中不再有类似于4G的多种传输模式,下行固定TM1传输模式,通过端口的配置,实现预编码的配置、不同流数的自适应切换。并且通过基站的用户选择和配对算法,实现用户SU-MIMO和MU-MIMO的自适应切换,以达到小区的最大容量。

收稿日期:2019-09-18

2 系统模型

MU-MIMO 模式下, 系统模型如图 1 所示。假设多用户系统包括一个基站发射天线和 K 个用户接收端, 其中基站发射天线为 N 根, 第 i 个用户接收天线为 M_i 根。

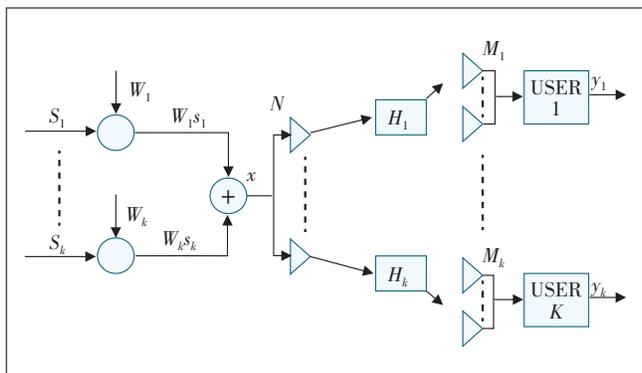


图 1 MU-MIMO 的系统模型

在任意时刻, 假设发射端准备向第 i 个用户发送 m_i 路独立的数据流, 用矢量 $[s_{i_1}, s_{i_2}, s_{i_3}, \dots, s_{i_{m_i}}]$ 来表示。为了有足够的空间自由度以保证各用户数据信号的发送与接收, 应当满足 $N \geq \sum_{i=1}^K m_i$ 与 $M_i \geq m_i$, 之后该用户的数据流 s_i 又通过某种线性预编码算法处理, 转换为 N 维矢量信号 $x_i, x_i = W_i s_i$ 。随后将 K 个用户端的 N 维矢量信号对应相加, 通过基站的 N 根天线发射送入信道。信号经过不同的信道 $H_i (1 \leq i \leq K)$ 后到达相应的用户端。

可得, 在任意时刻, 基站发射端实际发射的信号都可表示为 N 维矢量:

$$x = \sum_{i=1}^K W_i x_i \quad (1)$$

第 i 个用户接收到的 $M_i \times 1$ 维的信号可表示为:

$$y_i = H_i W_i s_i + H_i \sum_{k=1, k \neq i}^K W_k s_k + n_i \quad (2)$$

式中:

$H_i W_i s_i$ ——用户 i 的有用信号

$H_i \sum_{k=1, k \neq i}^K W_k s_k$ ——其他用户对于用户 i 的干扰

n_i ——用户 i 接收端的白噪声

如果是 SU-MIMO 的传输方式, 则上述噪声和用户间干扰就可以等效为高斯白噪声, 此时最佳的预编码向量就是该用户的信道相关矩阵的特征向量。如

果采用 MU-MIMO 的传输方式, 则预编码矩阵的设计目标一般是最大化配对用户总的系统容量, 此时需要利用所有配对用户的信道信息来联合计算每一个用户的预编码矩阵, 得到每个用户的波束。

3 预编码技术

5G Massive MIMO 中 MU-MIMO 技术关键要素是信道估计。5G 中信道估计由 CSI-RS 和信道互易性 (SRS) 来完成。在 TDD 系统中, 基站可以利用信道互易性通过上行信道获得下行信道信息, 通过基站测量终端上行发送的 sounding 信号获得信道状态。CSI-RS 的方式是通过测量基站下发的信道状态参考信号, 即 CSI-RS 信号, 获得下行信道状态, 再经过上行反馈发送给基站, 根据信道状态计算预编码矩阵。

基于 CSI-RS 的信道估计方式采用基于码本的预编码方式, 5G 标准中规定了 Type1 和 Type2 这 2 种方式。基于预先设定的码本, UE 可以按照某种优化准则, 从码本中选择与当前信道条件最为匹配的预编码矩阵, 并通过反馈链路将其标号反馈给 gNB。Type1 主要适用于 SU-MIMO, Type 2 对信道信息反馈更全, 适用于 MU-MIMO。

基于 sounding 的信道估计方式根据上行发送的 sounding 信号获得上行信道信息, 通过信道互易性获得下行信道信息, 计算得出预编码矩阵, 使赋形波对准用户。根据预编码的方式不同, 预编码可分为非线性预编码和线性预编码。非线性预编码例如脏纸编码 (DPC)、THP (Tomlinson-Harashita Precoding) 等有良好的性能, 但是计算复杂度高不易实现。线性预编码算法在基站天线个数增多的情况下可以近似 DPC 容量性能。线性预编码算法常见的有破零 (ZF)、最小均方误差 (MMSE)、匹配滤波 (MF)、块对角化 (BD) 等预编码算法。基于 sounding 的信道估计方式对信道信息反馈更全, 适用于 MU-MIMO。

4 用户选择算法

在 5G 中, 用户存在 SU-MIMO 和 MU-MIMO 2 种传输方式。MU-MIMO 重要的过程是用户配对, 即根据一定的配对准则选择小区中 2 个或 2 个以上的用户使用相同的 RB 资源块, 当用户不满足与其他用户共享 RB 资源块条件时, 该用户采用 SU-MIMO 的方式进行业务。

MU-MIMO 用户配对的基本算法, 包括随机配对、

信道增益强度配对、信道容量配对、正交配对、行列式配对、简化的基于迫零预编码的用户配对。随机配对没有考虑信道信息,因此其性能在6种配对方法中是最差的;信道增益强度配对用到信道强度信息,在使用SIC接收机时的性能比随机配对好;信道容量配对使得估算的信道容量最大,它的性能比前面2种配对方法好;正交配对的性能不如信道容量配对,但是计算复杂度较低;行列式配对的性能是6种基本用户配对方法中最好的,但是计算复杂度也是其中最高的;简化的基于迫零预编码的用户配对的性能比随机配对好一点,仅用于下行MU-MIMO传输。在5G中,当用户处于较好的无线环境下,并且用户之间的正交性较高,将这些用户进行配对完成MU-MIMO传输,从而最小化用户配对带来的用户间的干扰,提高配对后的频谱利用效率,最终保证配对后的吞吐量大于使用SU-MIMO传输得到的吞吐量。

5 容量数学建模

在实际应用场景中,配对用户数目越多对无线环境的要求越高,配对的成功率越低。因此,本文研究的MU-MIMO用户配对模式是两用户配对,主要研究MU-MIMO会相对于采用SU-MIMO模式产生多少增益,并找到合理的门限值使系统性能更优,保证SU-MIMO与MU-MIMO切换能带来系统增益。

通过数学模型,计算SU-MIMO的容量与MU-MIMO的容量。根据信号传播公式,推出同一用户使用SU-MIMO和MU-MIMO前后SINR的关系,再根据SINR与速率的关系,比较2种传输模式的容量差异。

对于SU-MIMO

$$\text{SINR}_{\text{SU}_i} = \frac{P_T \times \left\| H_i W_{\text{SU}_i} \right\|_F^2 \times N_{rb}}{N_{\text{noise}} \times N_{rb}} = \frac{P_T \times \left\| H_i W_{\text{SU}_i} \right\|_F^2}{N_{\text{noise}} \times N_{\text{RB}}} \quad (3)$$

式中:

P_T ——总发射功率

H_i ——用户*i*的信道矩阵

W_{SU_i} ——SU-MIMO模式下的预编码矩阵

N_{rb} ——用户使用的RB数

N_{RB} ——全带宽总RB数

N_{noise} ——每RB的噪声功率

$\|\cdot\|_F^2$ ——矩阵二范数运算

根据式(1)和式(2),MU-MIMO下的SINR可表示

为:

$$\text{SINR}_{\text{MU}_i} = \frac{\left\| H_i W_{\text{MU}_i} \right\|_F^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^K \left\| H_i W_{\text{MU}_k} \right\|_F^2 + N_i} \quad (4)$$

式中:

N_i ——噪声功率

W_{MU_i} ——MU-MIMO模式下的预编码矩阵
考虑到发射功率,式(4)可以转化为

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{\text{MU}_i} &= \frac{p_i \left\| H_i W_{\text{MU}_i} \right\|_F^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^K p_k \left\| H_i W_{\text{MU}_k} \right\|_F^2 + N_i} = \\ &= \frac{\frac{P_T}{K} \frac{N_{rb'}}{N_{\text{RB}}} \left\| H_i W_{\text{MU}_i} \right\|_F^2}{\frac{P_T}{K} \frac{N_{rb'}}{N_{\text{RB}}} \sum_{k=1, k \neq i}^K \left\| H_i W_{\text{MU}_k} \right\|_F^2 + N_i} = \\ &= \frac{\frac{P_T}{K} \frac{N_{rb'}}{N_{\text{RB}}} \left\| H_i W_{\text{MU}_i} \right\|_F^2}{\frac{P_T}{K} \frac{N_{rb'}}{N_{\text{RB}}} \sum_{k=1, k \neq i}^K \left\| H_i W_{\text{MU}_k} \right\|_F^2 + N_{\text{noise}} N_{rb'}} = \\ &= \frac{\left\| H_i W_{\text{MU}_i} \right\|_F^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^K \left\| H_i W_{\text{MU}_k} \right\|_F^2 + N_{\text{noise}} N_{rb'}} \frac{K}{P_T} \frac{N_{\text{RB}}}{N_{rb'}} = \\ &= \frac{\left\| H_i W_{\text{MU}_i} \right\|_F^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^K \left\| H_i W_{\text{MU}_k} \right\|_F^2 + \frac{KN_{\text{noise}} N_{\text{RB}}}{P_T}} \end{aligned}$$

根据SU-MIMO的SINR公式

$$\frac{N_{\text{noise}} N_{\text{RB}}}{P_T} = \frac{1}{\text{SINR}_{\text{SU}_i}}, \text{因此:}$$

$$\text{SINR}_{\text{MU}_i} = \frac{\left\| H_i W_{\text{MU}_i} \right\|_F^2}{\frac{K \left\| H_i W_{\text{SU}_i} \right\|_F^2}{\text{SINR}_{\text{SU}_i}} + \sum_{k=1, k \neq i}^K \left\| H_i W_{\text{MU}_k} \right\|_F^2} \quad (5)$$

6 仿真结果

对2用户同SINR时的配对情况进行分析,在不同信道相关程度、不同终端SINR的情况下,验证使用MU-MIMO后,相比于SU-MIMO吞吐量是否产生增益及增益大小。仿真中条件设置如表1所示。

对大量信道环境进行仿真,对每种信道均有两配对用户SU-MIMO时,SINR为20、15、10、5、0 dB 5种情

表1 仿真系统的参数配置

参数	配置	参数	配置
系统带宽	100 MHz	单用户下行最大流数	4 流
业务类型	Full buffer 业务	小区下行最大流数	16 流
基站天线配置	64T64R	用户数	2 个
终端天线配置	2T4R	MU-MIMO 预编码	BD 预编码
帧结构	2.5 ms 双周期	SU-MIMO 预编码	SVD 预编码
下行调制方式	最大 256QAM	传输模式	SU-MIMO、MU-MIMO
单用户下行实际流数	信道矩阵的秩		

况,图2是相关系数与MU-MIMO相对于SU-MIMO的速率增益的散点图。

仿真结果统计如表2所示。

结合散点图和统计结果可知,随着 SINR 降低,信道相关系数与增益的散点图越发散,信道带来的增益越不稳定,增益的均值随着降低。当 SINR 为 0 时,增益的均值接近 1,说明整体来说当 SINR 低到一定程度 MU-MIMO 整体上已经不能产生增益。

对散点图进行拟合,结果如图3所示。

可见,在相同的信道条件下,随着 SINR 的降低,

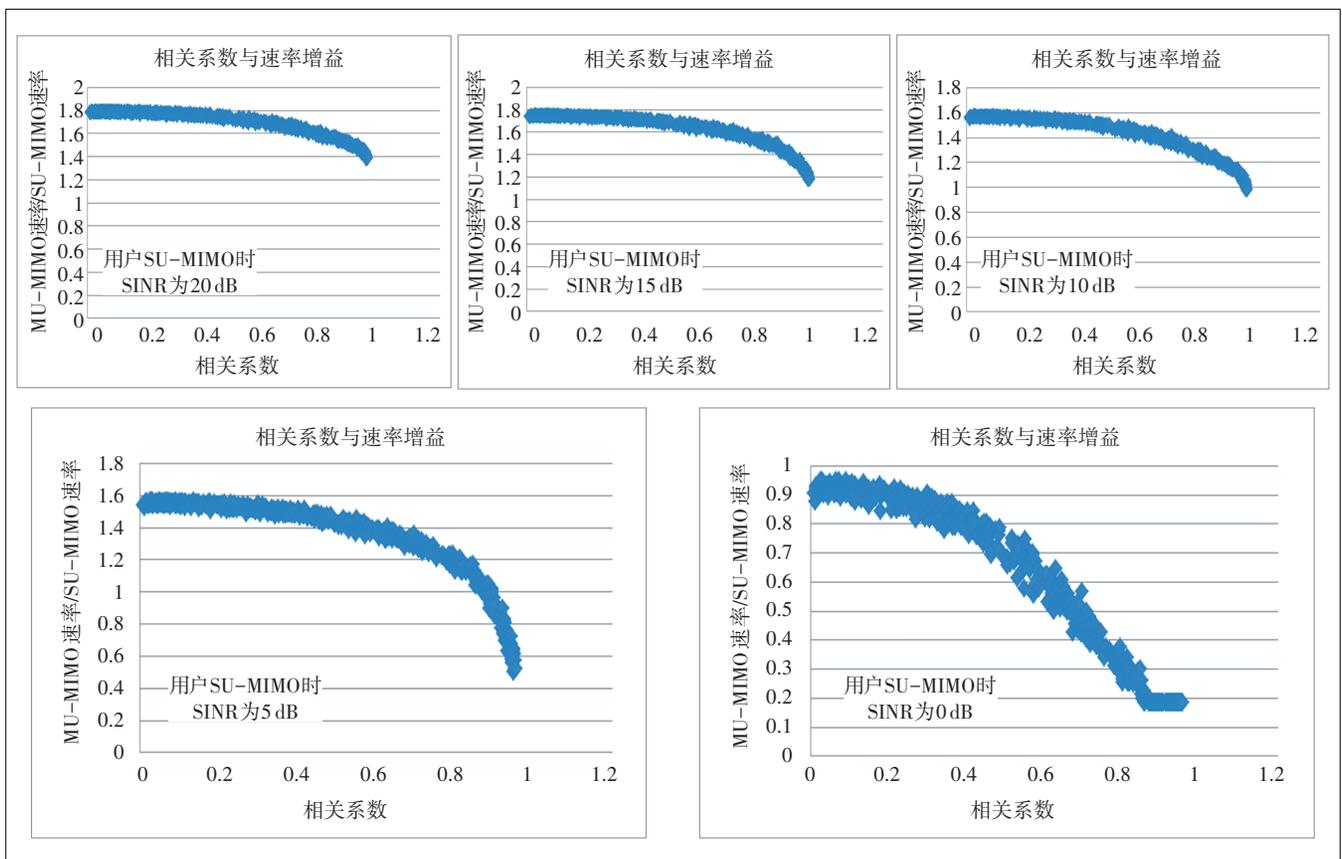


图2 不同信道相关程度、不同SINR的下MU-MIMO相对于SU-MIMO的增益

表2 仿真结果统计表

SU-MIMO时 SINR/ dB	SU-MIMO 吞吐量/ (Mbit/s)	MU-MIMO 增益均值/ (Mbit/s)
20	133.66	1.63
15	100.55	1.53
10	69.18	1.39
5	41.13	1.21
0	20.00	1.06

相关系数在 0.3 之前较平稳,当相关系数大于 0.3 后,增益的下降速度加大。

当 SINR 为 20 和 15 dB 时,即使在高相关的信道下仍能产生增益;当 SINR 为 10 dB 时,在相关系数大于 0.95 时,无增益产生;当 SINR 为 5 dB 时,在相关系数大于 0.87 时,无增益产生;当 SINR 为 0 dB 时,即使相关性很小,仍无增益产生。相比于 SINR 为 0 和 5 dB 时, SINR 为 20、15、10 dB 时,信道容忍性比较好,增益高,使用 MU-MIMO 后速率也较高,所以建议在 SINR 达到 10 dB 以上时采用 MU-MIMO。

MU-MIMO 的增益也会降低。保持用户 SINR 不变的情况下,随着信号相关程度的增加,增益呈下降趋势,

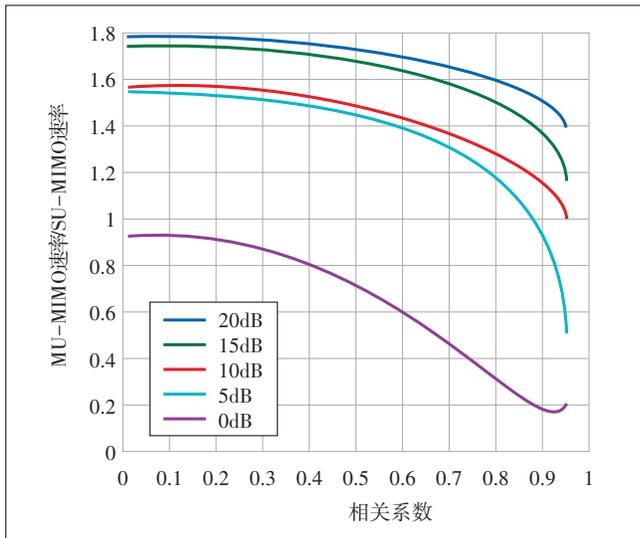


图3 MU-MIMO增益与相关系数的关系

此外,仿真了在相同信道条件下,SU-MIMO SINR

由0 dB以1 dB为步长增长到20 dB时,SU-MIMO和MU-MIMO速率的变化情况,研究SINR与增益的对应关系。分别仿真了2终端之间信道相关系数为0.04、0.29、0.4、0.9 4种信道条件,SINR与速率的关系如图4所示。

当信道之间相关系数为0.04时,认为两信道不相关,当SINR为0 dB时,MU-MIMO无增益,随着SINR的升高,增益越来越明显,当SINR为5 dB时,增益达到1.5,最大增益可达1.79;当信道相关系数为0.29时,认为2信道弱相关,此时当SINR为0 dB时,MU-MIMO无增益,随着SINR的提高,增益逐步提升,当SINR为5 dB时,增益达到1.5,最大增益达到1.77;当信道相关系数为0.4时,认为2信道中等相关,此时当SINR为0 dB时,MU-MIMO无增益,随着SINR的提高,增益逐步提升,当SINR为6 dB时,增益达到1.5,最大增益达到1.76;信道相关性进一步提高达到0.9,认为2信道强相

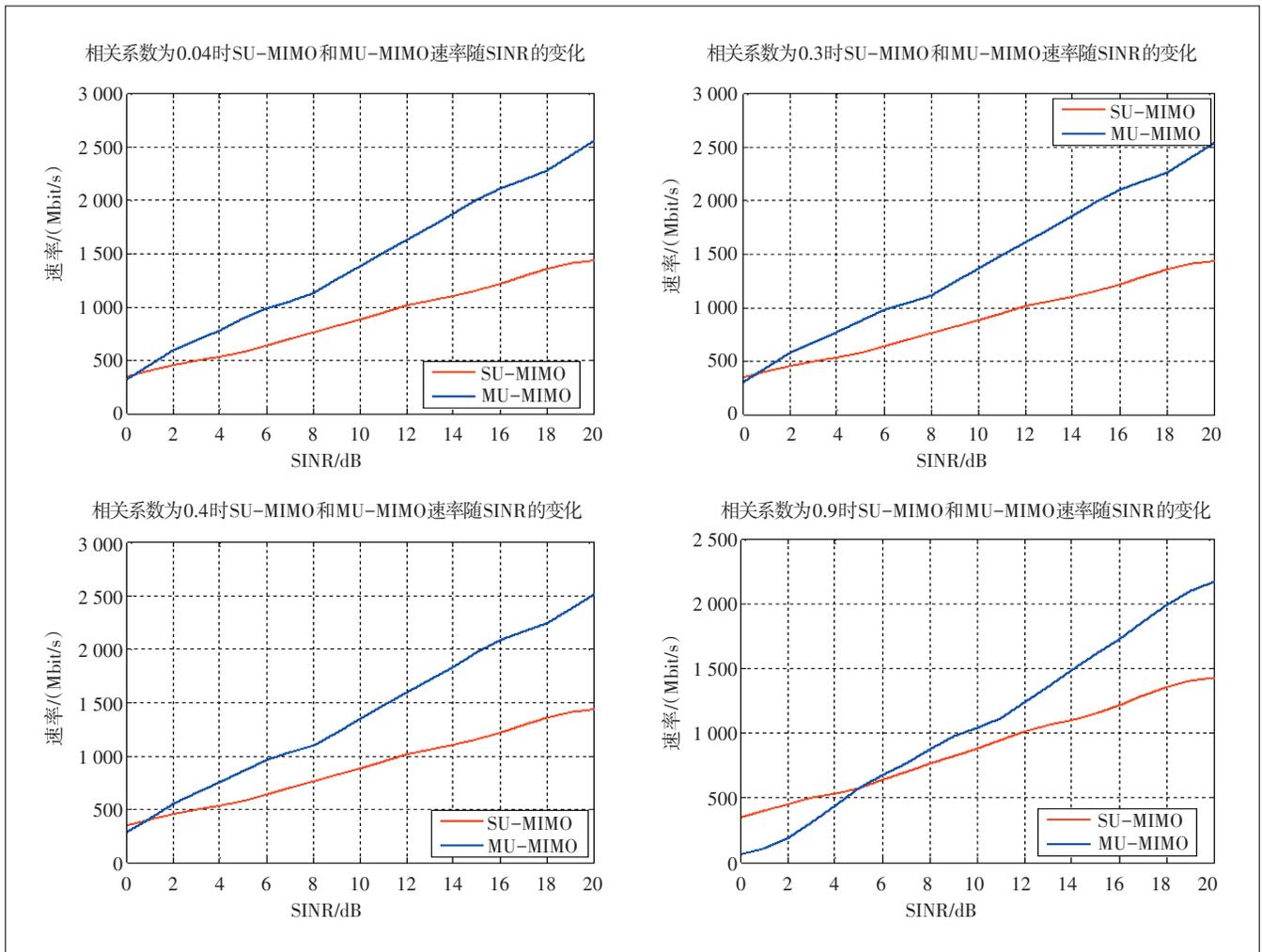


图4 在某信道相关性下,SU-MIMO和MU-MIMO吞吐量随SINR变化

关,只有 SINR 大于 5 dB 时, MU-MIMO 才有增益,当 SINR 为 10 dB 时,增益为 1.2,最大增益为 1.5。可见信道低相关性,对 SINR 的容忍度较高,即使在 SINR 很低的情况下仍能带来增益。

综上所述,只要 SINR 达到一定水平,或 2 用户之间信道处于较好的条件, MU-MIMO 就能发挥出优势,产生增益。如果配对时将配对原则定为 MU-MIMO 相对于 SU-MIMO 产生增益才配对,则通过以上 2 种维度的仿真分析,如果 2 用户 SINR 大于 10 dB,在相关系数小于 0.95 时 MU-MIMO 均有增益,如果相关系数小于 0.3,在用户 SINR 大于 1 dB 时 MU-MIMO 有增益产生。建议在配对策略中将门限定为 2 个,即 SU-MIMO 时 $\text{SINR} \geq 10$ dB 且相关系数 ≤ 0.95 ,或 SU-MIMO $\text{SINR} \geq 1$ dB 且相关系数 ≤ 0.3 ,当 2 用户无线环境满足 2 个条件之一时配对, MU-MIMO 可以带来不同程度的增益。当然,该门限不能包含所有 MU-MIMO 相对于 SU-MIMO 产生增益的情况,该判断标准可以简化运算和调度策略,同时保证系统容量增益。

7 结束语

本文研究了多用户 MU-MIMO 的系统模型、预编码算法和用户选择算法,又进一步利用数学方法推导出 MU-MIMO 和 SU-MIMO 2 种传输模式下 SINR 的关系,旨在研究 2 种传输模式下吞吐量的关系,找到合理的切换门限值使系统性能更优,为系统带来吞吐量增益。用仿真的方法研究了影响 MU-MIMO 增益的 2 个因素,分别为信道相关性和 SINR,结果显示只要当两用户之间信道处于较好的条件, SINR 达到一定水平, MU-MIMO 就能发挥出优势,产生增益。

参考文献:

[1] 许泉欣,张志敏. MIMO 相关信道建模[J]. 民营科技, 2016(1): 51-51.
 [2] 任彦. 大规模 MIMO 预编码算法的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
 [3] 王伟达. 多用户 MIMO 下行链路预编码和用户调度技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009.
 [4] 王笑天. 多用户 MIMO(MU-MIMO)系统下行链路预编码和调度算法研究[D]. 南京:东南大学, 2010.
 [5] 孟凯凯. 多用户 MIMO 预编码和用户调度算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.
 [6] 李世霞. 多用户 MIMO 下行链路用户选择算法研究[D]. 济南:山东大学, 2011.
 [7] 李曼潇. LTE 系统 MU-MIMO 用户配对技术的研究[D]. 广州:华

南理工大学, 2016.
 [8] 韩瑜. 基于 3D 信道的多用户 MIMO 传输技术研究[D]. 南京:东南大学, 2015.
 [9] 武龙. 随机波束赋形在 MIMO 中的应用研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
 [10] 李金兴. 大规模天线系统信道测量方法与空间相关性研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
 [11] 罗宁. 空间相关性对 MIMO 通信的影响分析[J]. 电子技术应用, 2014, 40(10): 117-119.
 [12] 姚永奇. 5G 移动通信系统的 3D MIMO 波束分析[J]. 中国新通信, 2018(6).
 [13] 李敏捷. 大规模 MU-MIMO 系统下的预编码技术研究[J]. 电视技术, 2017(11).
 [14] 赵昆. LTE 中下行 MU-MIMO 的物理层技术分析[J]. 邮电设计技术, 2015(4): 5-8.
 [15] 李苑平. LTE 下行资源调度算法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2016.
 [16] XIN W, HOU X, JIANG H, et al. An enhanced Tomlinson-Harashima precoding scheme for high-order MU-MIMO transmissions in 5G networks [C]// IEEE International Conference on Communications Workshops. 2017.
 [17] ABDO A M A, ZHAO X, RUI Z, et al. MU-MIMO Downlink Capacity Analysis and Optimum Code Weight Vector Design for 5G Big Data Massive Antenna Millimeter Wave Communication [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018: 1-12.
 [18] 翟曼. 面向 5G 的 3D MIMO 信道特性及建模研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2017.
 [19] YE X, WU Z, YANG J, et al. Adaptive Preconditioned Iterative Linear Detection and Architecture for Massive MU-MIMO Uplink [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2017, 90(1): 1-15.
 [20] NA C, JING X, SUN S, et al. An effective MIMO detection scheme for future wireless HetNet based on MU-MIMO [C]// International Symposium on Communications & Information Technologies. 2015.
 [21] FIGUEIREDO F A P D, CARDOSO F A C M, LOPES R R, et al. On the application of massive MU-MIMO in the uplink of machine type communication systems [C]// International Workshop on Telecommunications. 2015.
 [22] KUNDU S, GUPTA S, ALLSTOT D J, et al. Frequency-Channelized Mismatch-Shaped Quadrature Data Converters for Carrier Aggregation in MU-MIMO LTE-A [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2017, PP(99): 1-11.
 [23] 谢武生,董帝焱. FDD Massive MIMO 技术中多用户空分复用的研究[J]. 移动通信, 2018, 42(4): 12-16.

作者简介:

李新玥,工程师,硕士,主要从事移动通信无线技术研究工作;杨艳,工程师,博士,主要从事移动通信无线技术研究工作;张涛,高级工程师,硕士,主要从事移动通信无线技术研究工作。