

5G 非正交接入系统 PF 调度策略研究

Research on the PF Scheduling Algorithm for Non-orthogonal Multiple Access System of 5G

王茜竹,高亚龙(重庆邮电大学,重庆 400065)

Wang Qianzhu, Gao Yalong(Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

摘要:

为了应对未来通信系统在吞吐量和接入数量等方面更高的需求,非正交多址接入(NOMA)技术作为5G的候选技术得到广泛的关注。在LTE中广泛使用的比例公平(PF)调度策略,可以在用户接入公平性和吞吐量之间达到良好的折中,已被考虑在NOMA系统中使用。主要分析了基于PF调度准则的NOMA系统的实现原理和基本的调度流程,然后对比分析了NOMA多用户调度中的用户MCS选择和功率分配算法的实现方式以及所存在的问题。最后进行NOMA链路仿真分析,给出未来NOMA调度研究的主要方向。

关键词:

5G; NOMA; PF调度; 功率分配; 用户匹配
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2017.03.005
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
文章编号:1007-3043(2017)03-0020-06

Abstract:

In order to respond to the challenge of providing significantly higher system capacity in the upcoming decade, non-orthogonal multiple access (NOMA) has been investigated as one of the candidate multi-user access technologies for 5G. Proportional fair scheduling can be increased in the performance between system capacity and user fairness in LTE system, it had been considered for user in NOMA systems. It mainly analyzes the implementation principle and basic scheduling procedure of PF scheduling criterion in NOMA system, and then compares and analyzes the key technologies and existing problems of scheduling. Finally, the simulation results are verified and introduce the main research direction of future NOMA.

Keywords:

5G; NOMA; PF scheduling; Power allocation; User pair

引用格式:王茜竹,高亚龙. 5G 非正交接入系统PF调度策略研究[J]. 邮电设计技术,2017(3):20-25.

1 概述

随着物联网、D2D等新型通信技术和通信业务的发展,未来5G通信系统对设备接入数量、频谱使用效率、新型业务支持等方面有了更高的需求。传统的多址接入方式已不能满足未来的需求。因此,业界正在研究非正交多址接入技术以作为传统正交传输体制的一种有力补充^[1]。在这种背景下,NTT DOCOMO提

出的非正交多址接入(NOMA)^[2-8],可以在相同的带宽下提高接入数量、频谱效率和系统容量,NOMA被认为是未来5G移动通信网络的候选技术之一^[4-6]。

NOMA系统的主要原理是以功率来区分非正交的用户。在发送端通过控制叠加用户的匹配和叠加用户之间功率分配比例来控制用户之间的传输,在接收端NOMA主要通过连续干扰消除接收机(SIC)实现多用户信号的分离和正确接收。NOMA技术不仅增加了频谱效率和系统吞吐量性能,也提高了用户之间的公平性(通过小区中心用户与边缘用户的叠加),特别是小区边缘用户的接入性能。因此,在NOMA研究中发送端的多用户调度和接收端的SIC接收机是两大关键

基金项目:863计划(2015AA01A709);国家科技重大专项(2013ZX03001004)

收稿日期:2017-01-22

研究方向。

NOMA发送端的多用户调度直接影响系统的传输效率,也在一定程度上决定了接收端正确解码的复杂度。比例公平调度(PF)已在LTE中得到广泛的应用,可以在用户吞吐量和接入公平方面获得良好的折中,已被考虑应用于NOMA系统之中。但由于非正交接入用户叠加的特点,PF调度将会与正交系统的调度有很大的差别。本文将分析PF调度在NOMA系统中的应用原理和主要流程以及关键技术,并分析其在应用中所存在的问题以及可能的解决方向。

2 NOMA系统模型

在NOMA系统中,假设在子带 s 上的叠加用户数为 m ,每个用户信号经过独立的编码和调制后进行叠加,在子带 s 上的传输信号可以表示为:

$$x_s = \sum_{k=1}^m \sqrt{\alpha_k P_s} d_s(k) \quad (1)$$

式中:

α_k ——第 k 个用户的功率因子

$d_s(k)$ ——第 k 个用户的调制符号

假设 $E[|d_s(k)|^2] = P_s$,则叠加用户共享子带 s 上的全部功率比例为:

$$\sum_{k=1}^m \alpha_k = 1 \quad (2)$$

叠加用户信号经过信道传输到达用户 k 的接收端可以表示为:

$$y_s(k) = h_s(k)x_s + w_s(k) \quad (3)$$

式中:

$h_s(k)$ ——基站到用户接收端的信道矩阵,包括距离衰落、阴影衰落

$n_s(k)$ ——信道高斯噪声和小区干扰

如果接收端采用多天线接收,经过最大比合并(MRC)后的信号可以表示如下:

$$\tilde{y}_s(k) = \frac{h_s^H(k)y_s(k)}{\|h_s(k)\|} = \frac{\|h_s(k)\| \sqrt{\alpha_k P_s} x_s + h_s^H(k)w_s(k)}{\|h_s(k)\| \sqrt{\alpha_k P_s} x_s + n_s(k)} \quad (4)$$

式中:

$n_s(k) = \frac{h_s^H(k)w_s(k)}{\|h_s(k)\|}$ ——MRC后的噪声干扰和小区内干扰

假设 $N_s(k) = E[|n_s(k)|^2]$ 表示 $|n_s(k)|$ 的平均功率,则

用户 k 的信道增益可以表示为 $\frac{|h_s(k)|^2}{n_s(k)}$ 。

若叠加用户的信道增益按降序排列,则在接收端由于 k 用户的信道增益最小,由NOMA的基本特征可知用户 k 所分配的功率最大,则用户 k 可以不需要SIC,直接将其他用户信号当作干扰^[4-5]。因此,在接收端,用户 k 在子带 s 上的信干噪比可以表示为:

$$\text{SINR}_s(k) = \frac{|h_s(k)|^2 \alpha_k P_s}{|h_s(k)|^2 \sum_{i=1}^{k-1} \alpha_i P_s + N_s(k)} \quad (5)$$

利用香农公式,NOMA叠加用户 k 的容量可以表示为:

$$R_s^{\text{NOMA}}(k) = \log_2 \left(1 + \frac{|h_s(k)|^2 \alpha_k P_s}{|h_s(k)|^2 \sum_{i=1}^{k-1} \alpha_i P_s + N_s(k)} \right) \quad (6)$$

从式(5)可以看出,用户的功率比例直接影响接收端信干噪比(SINR),进而影响调度中瞬时速率的计算,因此基站可以通过控制用户的功率分配来影响用户的吞吐量,包括系统总的吞吐量以及小区中心用户和边缘用户的吞吐量,进而影响用户的公平性。因此功率分配算法是NOMA调度算法研究的重点,也是NOMA研究的重要方向。

3 NOMA系统PF调度策略

3.1 比例公平调度算法

在功率域NOMA中,允许多个用户同时在相同子带上叠加传输,多用户调度准则直接影响到叠加信号的传输效率、用户间的公平性以及接收性能。在调度过程中需要遍历所有可能匹配的叠加组合,包括用户匹配组合和功率因子分配,然后进行PF准则计算并选择最大的PF计算值的组合,然后进行信号叠加传输。NOMA系统PF准则计算公式可以表示为:

$$Q_s(U) = \sum_{k \in U} \left(\frac{R_s(k|U, t, p)}{L(k, t)} \right) \quad (7)$$

$$U_s = \max_U Q_s(U)$$

式中:

$Q_s(U)$ ——子带 s 上每一个候选用户的PF准则值

U_s ——所有的叠加用户组合中,选择PF值之和最大的用户匹配组合

R_s —— t 时刻功率分配为 p 时,用户 k 在子带 s 上的

瞬时速率,可由式(8)计算得到,如果用户 k 未在子带 s 上调度,则 R_k 为0

$$L(t+1) = (1 - \frac{1}{t_c})L(t) + \frac{\sum_{s=1}^{N_s} R_s(k, t)}{t_c N_s} \quad (8)$$

$L(t)$ ——子带 s 上的候选用户 k 在 t 时刻之前一段时间内的平均吞吐量

N_s ——NOMA 系统调度的所有子带(若干个RB的组合)资源的总数,若用户 k 在子带 s 上调度,则 R_k 为非零值

PF 调度可以获得良好的性能和公平性的折中,该算法的复杂度主要取决于 NOMA 叠加用户的匹配和功率因子分配的复杂度,这两个方向也是优化调度算法的关键点。根据 NOMA 的基本原理和基于 PF 调度的 NOMA 多用户叠加流程如图 1 所示,具体过程描述如下。

a) 确定选定子带 s 候选用户空间。

b) 确定预定义候选用户功率分配空间, k 个用户的功率因子分别为 $(\alpha_1, \alpha_2 \cdots \alpha_k)$,且满足 $\alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_k = 1$,若2个用户叠加则为 $(\alpha, 1-\alpha)$ 。

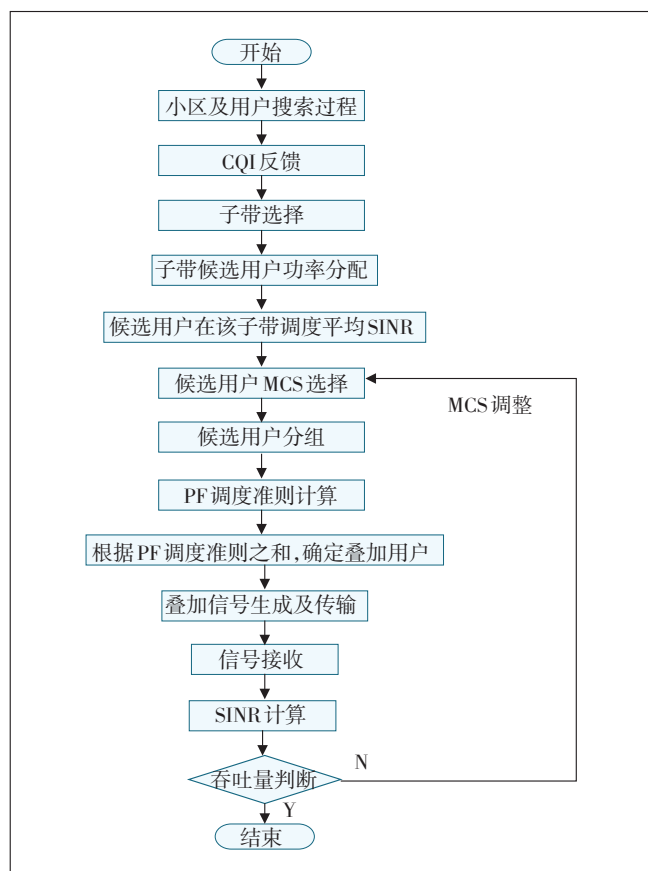


图 1 基于功率分配和用户匹配的 PF 调度的过程

c) 对候选用户进行功率分配,并根据用户端反馈的 CQI $_k$,并计算 NOMA 中用户近似的 SINR。并为候选用户选择最佳的 MCS。

d) 根据步骤 c) 的 MCS 选择和步骤 b) 中的功率分配因子,对可能候选的叠加组合,计算对应组合的 PF 准则值 Q_s 。遍历所有候选用户和功率分配因子,并确定子带 s 上最佳的叠加用户组合: $U_s = \max_U Q_s(U)$ 。

e) 经过调度后,根据选定的用户组合和功率组合以及 MCS 组合,进行 NOMA 信号叠加传输。

f) 接收端根据叠加信号的解码性能,经过反馈对 MCS 进行自适应调整,如果达到接收端的速率需求则算法结束。

由 NOMA 的 PF 调度过程可以看到,基于多用户非正交叠加,不同的用户可能分配不同的调制编码方式(MCS),从而产生很多不同的 MCS 叠加组合。这些不同组合的传输效率和叠加后的复杂度各有不同,从而影响系统传输速率和接收端解调复杂度^[10]。怎样简单、高效地从中为叠加用户找到性能最好的用户组合方式是研究的重点。对于叠加用户功率因子分配,用户不同的功率比例将会影响接收端用户干扰消除的复杂度,同时单个用户的功率大小对用户信号噪声容忍度也有很大影响,进而影响用户信号的解码。功率因子的分配复杂度优化也是用户调度优化的重点,降低功率分配算法复杂度在很大程度上会影响系统效率。用户选择和功率分配是非正交用户调度的关键技术,研究功率分配和用户匹配有着重要的意义。

3.2 多用户叠加功率分配策略

NOMA 引入了功率域,主要通过对不同用户分配不同的功率,以此来区分用户,发送端功率分配直接影响用户的传输速率和接收端用户译码的性能,因此,用户功率分配方案在调度过程中就显得十分重要,直接影响用户的信道容量,如何进行功率分配使小区的吞吐量最大化是 NOMA 研究的重点。文献[6-8]研究了非正交的功率分配算法,按照功率分配方式的不同可分为固定和动态分配。现阶段最优的 NOMA 功率分配算法主要包括基于全空间遍历搜索的功率分配算法、次优的分数功率分配算法和分组固定功率分配方案^[8]。

3.2.1 固定功率分配

固定分配方式(FPA——Fixed Power Allocation)就是根据 NOMA 的基本原理,按照叠加用户的信道增益,给信道增益较差的用户分配固定的较多的功率,

相反, 给信道增益较好的用户分配更少的功率。且叠加用户的总功率恒定, 以此来得到叠加用户之间的功率比例。

$$P_s(k) = \alpha_{FPA} P_s(k+1) \quad (9)$$

固定功率分配由于采用固定的功率因子, 不能最大化 NOMA 系统叠加用户的最大化传输性能, 但是由于采用固定的功率因子, 接收端用户可以很容易知道功率比例因子, 可以减少接收机的复杂度。

3.2.2 穷尽搜索功率分配算法

穷尽搜索功率分配算法 (FSPA——Full search Power Allocation) 是一种最优的 NOMA 功率分配方案, 主要思想是基于预定义的功率分配空间, 穷尽遍历空间中所用功率分配因子, 结合 PF 准则计算确定最佳的功率分配因子。也就是在发送端每一个候选用户的所有分配方案都要被考虑, 比较所有的可能性方案, 选择最有利的分配方案^[3]。这种遍历算法虽然可以达到最佳的传输性能, 但是会带来接收端 SIC 解码和功率分配的信令消耗复杂度线性提高。所以遍历搜索算法研究重点是通过优化叠加用户之间的功率比例和性能的关系, 减少搜索空间中的候选功率因子, 以减少 PF 准则比较的迭代次数。

3.2.3 分式传输功率分配

分式传输功率分配 (FTPA——Fractional transmit power allocation) 方式如下:

$$P_s(k) = \frac{P}{\sum_{j \in U_s} (G_s(j)/N_s(j))^{-\alpha_{FTPC}}} \left(\frac{G_s(k)}{N_s(k)} \right)^{-\alpha_{FTPC}} \quad (10)$$

式中:

α_{FTPC} ——衰减因子, 取值为 0~1。当其值为 0 时表示用户间将平均分配功率, 当 α_{FTPC} 的值增加时, 将会分配更多的功率给信道增益小的用户, 信道增益为 $G_s(k)/N_s(k)$ 。相同的 α_{FTPC} 值将会在发送时间内应用于所有的子信道。

分式功率分配方式是次优的功率分配方式, 根据用户的信道增益动态的分配功率, 在一定程度上降低了功率分配的复杂度, 但它只考虑单个用户的功率分配, 没有考虑到多用户之间的功率分配关系, 在最大化 NOMA 系统的多用户叠加的优势性能上不够理想^[13]。

3.3 PF 调度候选用户选择

在 NOMA 系统中, 由于叠加传输的使用, 拥有不同信噪比的多用户匹配组合, 因此不仅要考虑单个用

户的调制编码方式 (MCS) 选择, 还需要考虑多用户的 MCS 选择之间的影响以及叠加后的传输性能和接收端的解码性能^[10]。

假设用户 k 的基于 LTE 正交传输的 CQI^[14] 反馈信息表示为 CQI_k , 其表示的是当用户 k 独占子带的时频资源且获得子带全部功率时的 CQI 信息。为了适应 NOMA 系统, 则在 NOMA 中经过功率分配后用户 k 在子带 s 上调度的信干噪比可以由以下公式近似计算:

$$SINR_k = \frac{\alpha_k}{\sum_{i=1}^{k-1} \alpha_i + \frac{1}{CQI_k}} \quad (11)$$

式中:

α_k ——第 k 个用户功率分配的比例

SINR——接收端解码误码率不超过 10% 时, 通过 EESM 映射 (误码率与信噪比映射曲线) 获得, 然后进行 CQI 计算并反馈最佳的 MCS 给基站端

在 t 时刻, 考虑到 MCS 选择对接收性能的影响, 候选用户 k 的 MCS 选择可以表示为:

$$SE_k = SE_k^{MCS} \times \left(1 - BLER_k^{MCS} \Big|_{SINR_t} \right) \quad (12)$$

式中:

SE_k ——用户 k 当前选择的 MCS 所能达到的频谱效率

SE_k^{MCS} ——当前 MCS 下的频谱效率

$BLER_k^{MCS}$ ——在信噪比为 $SINR_k$ 时用户 k 在当前 MCS 下所能达到的块误码率。对每一个候选用户, 需要检查每一个候选 MCS 所能达到的频谱效率, 选择最大频谱效率的 MCS

同时 PF 调度关注用户在子带上的平均吞吐量的最大和用户公平性, 子带所有用户分配相同的 MCS, 没有更多地考虑多用户的不同的 MCS 的匹配, 所以多用户的 MCS 的确定和匹配值得进一步研究。

由于系统是根据 CSI 反馈选择用户即时最佳 MCS, 同时由于考虑 MCS 叠加限制, 可能会降低用户匹配的可能性, 进而影响系统性能。所以要考虑自适应 MCS 选择, 根据系统接收端的解码性能, 自适应的调整发送端的 MCS 选择, 从而增强用户的匹配性能。

4 仿真与分析

4.1 NOMA 仿真链路的建立

本节主要对 NOMA 系统的下行共享信道进行仿真, 同时验证了所提用户匹配算法的性能。由于 NO-

MA 是在 LTE 系统的基础上实现多用户叠加, NOMA 系统与现今 LTE 有很大的联系, 所以可以采用传统 LTE 的仿真参数结合 NOMA 原理来进行 NOMA 的实验仿真。主要的仿真参数如表 1 所示。

表 1 主要的仿真参数

系统带宽/MHz	10	功率分配方式	FPA, FSPA, FTPA, PFPA
载波频率/GHz	2	信道编码	Turbo Coding
资源块带宽/kHz	180	发送天线数	1
接收机类型	CWIC, SWIC	接收天线数	2
信道模型	3GPP EVA -5 Hz	MCS	QPSK, 1/3, 16QAM, 1/2, 64QAM, 3/4
固定功率分配	0.1, 0.2	HARQ	Off
调度方式	PF		

仿真实验实现了 2 个用户叠加 NOMA 系统的基站和用户之间的 PDSCH 信道, 基站发送天线数为 1, 用户接收天线数为 2。2 个用户 (UE_{far} , UE_{near}) 分配相同的 RNTI (临时网络 ID), 假设接收端可以获得发送端所使用的 MCS 以及功率分配信息。

NOMA 发送和接收的主要实现原理是在 UE_{near} 接收端的叠加信号分离, 采用码字级的干扰消除接收机 (SIC), UE_{far} 接收端信号分配更多的功率, 从而可以达到更好的信噪比, 所以在远用户接收端可以将 UE_{near} 的信号当作是干扰直接进行解调^[13]。

由上述过程可知, 接收端必须获得发送端用户的 MCS 和功率分配信息, 才能进行叠加用户的 SIC 分离。发送端的叠加参数可以由 PDCCH 信道传输或者采用网络辅助信息 (NAIC)^[15]。

4.2 NOMA 调度关键技术的仿真分析

实验仿真两用户 NOMA 系统在不同 MCS 组合情况下的误码性能。图 2 给出了通过 NOMA 链路的仿真, 得到的不同 MCS 组合的叠加方式下的误码性能。

由图 2 可以看到, (MCS2, MCS2) 与 (MCS12, MCS2) 解码性能相差 3 dB, (MCS12, MCS2) 与 (MCS19, MCS2) 相差将近 5 dB。说明当固定远用户的 MCS, 叠加用户随着近用户 MCS 的调制阶数增加解调性能逐渐降低。

当 UE_{near} 选择调制阶数为 4 时, UE_{far} 调制阶数为 6 和 4 的解调性能最差, 当信噪比为 18 dB 时才能满足误码小于 10% 的门限。这是由于在 UE_{near} 的接收端首先要解调干扰用户, 再从总的接收信号中减去干扰信号, 从而进行期望用户的信号解调, 因此干扰信号的解码效果将会直接影响期望信号的解码。干扰信号

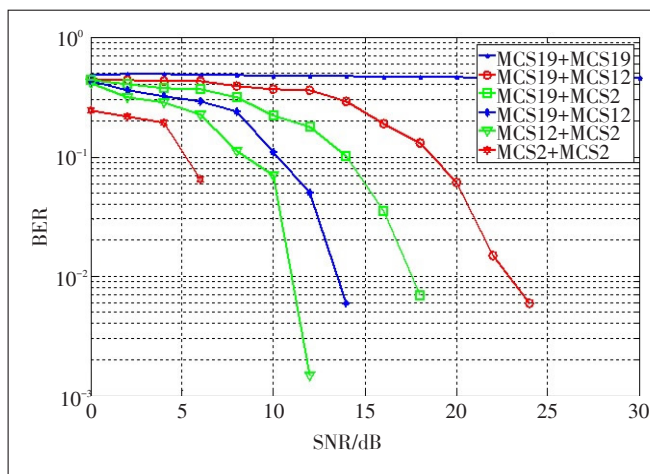


图 2 功率比例为 0.2 时采用 CWIC 接收机误码性能

的误解码将产生错误传播, 所以当两个用户都采用较高的 MCS 时, 叠加信号的解码效果较差。

通过实验仿真, 对比了不同的功率分配方式下, NOMA 多用户叠加所能达到的平均吞吐量。图 3 给出了不同功率分配算法传输性能。从图 3 可以看出采用 FSPA 虽然可以达到比 FPA 更好的传输性能, 但是复杂度也是最高的。因此怎样权衡算法复杂度和传输性能, 是目前功率分配算法的主要研究方向。

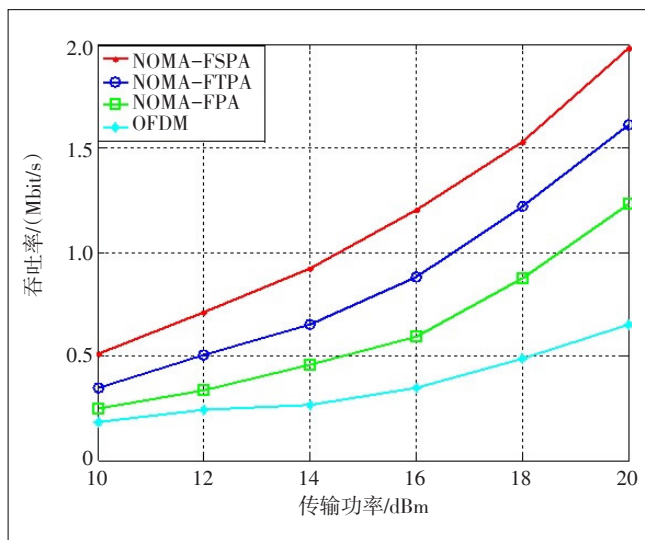


图 3 不同功率分配算法传输性能对比

图 4 对比了在功率分配因子为 0.2 时, UE_{near} 和 UE_{far} 分别采用 MCS2、MCS12、MCS19 时, 2 种接收机的性能, 图 4 仿真结果显示了不同 MCS 组合的吞吐量, 随着用户 MCS 的增加用户吞吐量也随之增加, 但是需要的接收信噪比也同样增加, 特别是当叠加用户 UE_{near} 和 UE_{far} 都采用 64QAM 的 MCS 是解码信噪比在 15 dB 时才

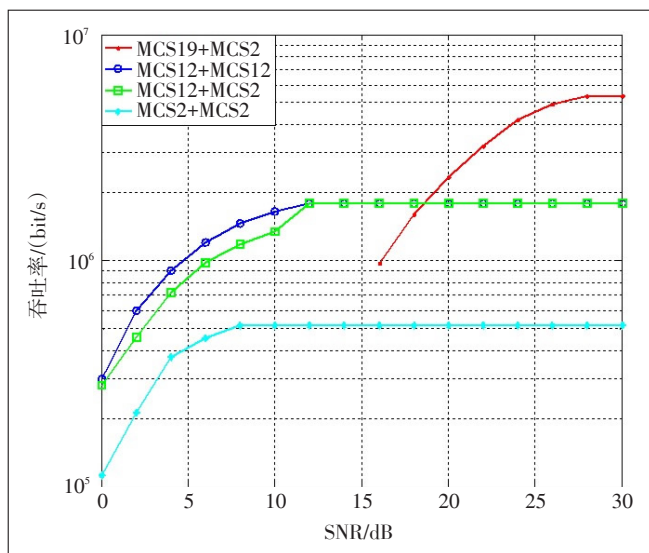


图4 固定功率分配下不同用户MCS组合叠加传输性能

能达到误码小于10%的门限。所以选择合适的MCS组合,对NOMA系统的传输性能有很大影响,当近用户和远用户都采用较大MCS时,对接收信噪比要求远远高于采用较低的MCS的组合。由图3和图4可以看出,选择合适的MCS,可使传输吞吐率性能和解码性能达到良好的折中,这也是下一步研究的方向。

5 结束语

本文首先研究分析了功率域NOMA实现的基本原理,重点分析了2个用户叠加NOMA系统采用PF调度的实现过程,并分析NOMA系统调度算法的主要研究的难点和算法优化的方向。然后比较了调度过程中的NOMA关键技术功率分配算法的优缺点及性能,并提出了对应的优化方向,即优化减少动态功率分配的搜索空间和叠加用户自适应的MCS选择等。为了进一步提高NOMA的性能和竞争力,未来将会进一步研究NOMA用户自适应的功率分配策略以及完善NOMA系统HARQ重传中的调度策略的调整,包括功率因子和叠加用户的重新选择以及重传中的用户MCS的重新配置。

参考文献:

- [1] 5G Vision and Requirements [EB/OL]. [2016-10-29]. <http://doc.mbalib.com/view/7fb300dec8f3617bbc4fedd4191c634c.html>.
- [2] LIU F, MAHONEN P, PETROVA M. Proportional fairness-based user pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access [C]// IEEE, International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, IEEE, 2015.

- [3] BENJEBBOUR A, LI A, SAITO Y, et al. System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements [C]// IEEE GLOBE-COM Workshops, 2013: 66-70.
- [4] 3GPP TR 36.859 Study on Downlink Multiuser Superposition Transmission (MUST) for LTE [EB/OL]. [2016-10-29]. <ftp://ftp.3gpp.org/>.
- [5] 唐超. 一种基于SIC的NOMA下行链路信号检测方法[J]. 邮电设计技术, 2016(4): 41-44.
- [6] LIU S, ZHANG C, LYU G. User selection and power schedule for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) system [C]// IEEE International Conference on Communication Workshop, IEEE, 2015.
- [7] KANEKO M, YAMAURA H, KAJITA Y, et al. Fairness-Aware Non-Orthogonal Multi-User Access With Discrete Hierarchical Modulation for 5G Cellular Relay Networks [J]. Access IEEE, 2015(3): 1-1.
- [8] 张德坤. 非正交多址系统功率分配及干扰消除算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [9] SAITO Y, BENJEBBOUR A, KISHIYAMA Y, et al. System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) [C]// 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013: 611-615.
- [10] DING Z, FAN P, POOR V. Impact of User Pairing on 5G Non-Orthogonal Multiple Access Downlink Transmissions [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 65(8).
- [11] 徐晋. 非正交多址接入中的若干关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [12] CHEN S, PENG K, JIN H, et al. Analysis of outage capacity of NOMA: SIC vs. JD [J]. Tsinghua Science and Technology, 2016, 21(5): 538-543.
- [13] TAKASHI S, TAKASHI D, HIROYUKI S. Efficient selection of user sets for downlink non-orthogonal multiple access [C]// Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on, 2015: 1062-1066.
- [14] KAWSER M T, HAMID N I B, HASAN M N, et al. Downlink SNR to CQI Mapping for Different Multiple Antenna Techniques in LTE [J]. International Journal of Information and Electronics Engineering, 2012, 2(5).
- [15] Study on Network-Assisted Interference Cancellation and Suppression (NAIC) for LTE: 3GPP TR 36.866 [EB/OL]. [2016-10-29]. <ftp://ftp.3gpp.org/>.

作者简介:

王茜竹, 硕士研究生导师, 高级工程师, 主要研究方向为信号处理和移动通信传输技术; 高亚龙, 硕士, 主要研究方向为移动通信传输技术。

