

一种过载系统下的非正交多用户检测方法^①

陈 敏^{1,2}, 丁 洁¹, 杨永钦^{1,2}

1. 海南大学 信息科学技术学院, 海口 570228;

2. 海南大学 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海口 570228

摘要: 为了提高系统容量、频谱效率和传输速率, 可以允许接收端的天线数小于发送端的天线数, 即所谓的系统过载情况. 而业界提出的针对第五代通信网络的功率域非正交多址接入(PDNOMA, Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access)方式, 通过功率域叠加复用可以增加用户接入数量. 该研究结合系统过载和用户非正交叠加复用, 介绍了过载的非正交多用户系统的基本原理, 并在接收端提出一种多用户检测方法, 基于迭代干扰消除的串行干扰消除算法(IICSIC, Iterative Interference Cancellation based Successive Interference Cancellation). 仿真表明: 与 PDNOMA 系统的串行干扰消除(SIC, Successive Interference Cancellation)算法和过载系统的迭代干扰消除(IIC, Iterative Interference Cancellation)方法相比较, 所提的方法性能明显较好.

关键词: 过载系统; 非正交多址接入; 多用户检测

中图分类号: TN911.23

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)02-0134-06

与传统的多输入多输出(MIMO, Multiple Input Multiple Output)技术相比, 多用户 MIMO 可以显著提高吞吐量, 尤其是在非对称系统中, 当发送端的天线数目远超过接收端的天线数目, 即所谓的过载系统. 过载情况发生在用于发送独立数据的发射机的时空自由度的数目超过了接收机的自由度数目. 在没有扩频的系统中, 这意味着从所有用户终端发送的独立数据流的总数超过基站接收天线的数目. 过载系数是发送天线数 K 与接收天线数 M 之比, 即 K/M , 过载的含义就是接收到的信号相关的矩阵是非满秩, 因此不能求逆. 对于有扩频的系统(如码分多址), 过载系统的定义是当使用扩频后, 频谱的扩展小于用户的数量. 如果接收天线数为 1(为了不失一般性, 如果没有具体说明, 接收天线都默认为 1), 那么过载系数是用户数 K 与扩频增益 M 之比, 也是 K/M .

为了适应高速增长无线网络应用需求, 支持海量设备连接, 达到更高的频谱效率、更快的数据速率和更大的信道容量, 新型的非正交多址接入技术成了下一代移动通信系统 5G 网络研究的热点和挑战之一^[1-2]. 其中, Higuchi 等提出的功率域非正交多址接入^[3-7](PDNOMA, Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access)是一种基于功率域复用的多址技术, 在发送端给多个用户信号分配不同的功率, 叠加后非正交发送, 接收端通过信号功率来区分各用户, 通过干扰消除检测技术获得各用户信号.

对于过载系统的多用户检测, 由于信号相关矩阵非满秩, 线性算法虽然复杂度低却无法在这种情况下获得较好的性能. 最优算法虽然性能好, 但其复杂度却随用户数量 K 呈指数增长. Chen 等提出的迭代干扰消除^[8-10](IIC, Iterative Interference Cancellation)技术虽然可以获得接近最优算法的性能, 且复杂度也较低, 但用户数量多的时候会出现所谓的误差层, 性能受信道条件制约. PDNOMA 虽然可以通过串行干扰消

① 收稿日期: 2017-08-30

基金项目: 海南省自然科学基金项目(20166215); 国家自然科学基金项目(61501151, 61661018); 海南省教育厅高等学校科学研究项目(Hnky2016ZD-5); 海南省重点研发计划项目(ZDYF2016010).

作者简介: 陈 敏(1987-), 男, 福建莆田人, 讲师, 博士研究生, 主要从事信道估计和信号检测方面的研究.

通信作者: 杨永钦, 讲师, 博士研究生.

除(SIC, Successive Interference Cancellation)技术进行逐用户检测,包括基于硬判决的^[3-4, 6]、基于软判决的^[11]和基于软解调联合检测算法^[12],其性能仍有进一步提高的空间.

本文结合 PDNOMA 技术和系统过载技术,在发送端实现系统过载的非正交多用户同时发送信号,而在接收端,结合 IIC 和 SIC,提出一种新的快速迭代检测算法,不但充分利用信道信息,同时利用功率信息,有效地将各用户识别检测出来.

1 过载的非正交多用户系统

PDNOMA 是集频域、时域、功率域为一体的多址技术,其主要思想是在发送端引入可检测的干扰信息,采用非正交方式发送,在接收端通过干扰消除技术进行检测,此技术可以在同一载波、同一时隙上同时承载多个信号功率不同的用户.图 1 为下行链路模型,发送端根据各个用户信道增益给各个用户分配不同的功率,将信号叠加后进行正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing)调制后发送.接收端将接收到的信号进行 OFDM 解调,按功率的大小进行排序,先检测信号功率最强的信号,再检测功率强度次一级的信号,以此类推,直到检测出最后一个信号.如图 1 所示,基站端 N 个用户通过不同功率(用户 1 分配的功率最小,用户 N 分配的功率最大)叠加后发送出去,如果接收端是要检测用户 1 的信号,那么需要先检测出信号功率最大的用户 N 的信号,再把用户 N 的信号从接收信号中消除掉,这样用户 $N-1$ 的信号功率成了最大的,检测此信号,再把其从接收信号中也消除掉,依次进行直到检测出用户 1 的信号,这正是 SIC 技术.已有研究表明,当叠加用户个数为 $2 \sim 3$ 时,系统可以获得最大性能增益^[5-6].为了方便比较,这里我们取用户个数为 3.

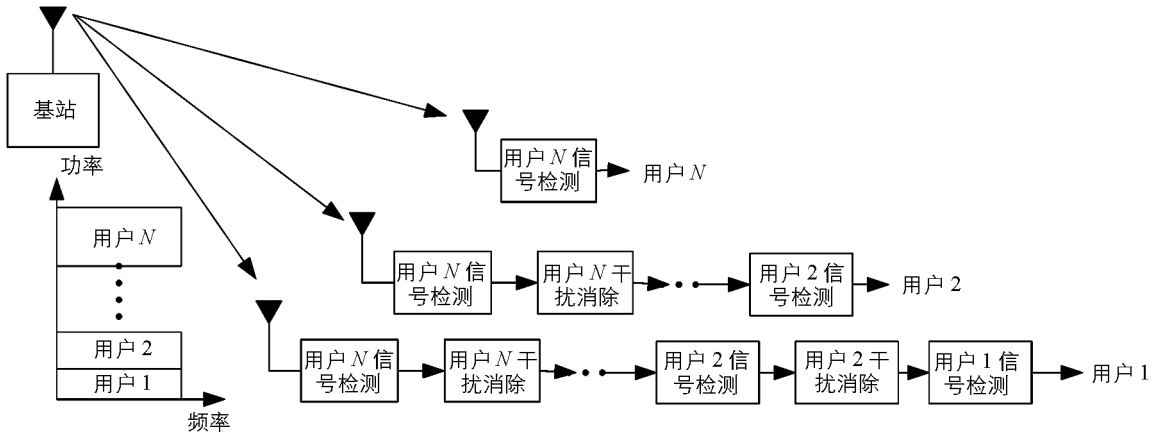


图 1 PDNOMA 下行链路模型

图 2 是上行过载多用户系统,发送端有 $N=3$ 个用户同时进行通信,接收端的接收天线数为 1,过载系数为 3,检测算法为 IIC^[3].在 OFDM 解调后,通过 RAKE 技术进行初始检测,检测结果通过对数似然比(LLR, Log-likelihood Ratio)转换器转换成解码器的输入软信息,解码器的输出用来进行干扰信号重构,反馈给 RAKE 检测器进行并行干扰消除,此时 RAKE 输出的结果比初始检测结果精度有所提高.再通过 LLR 转换得到精度较好的软信息,解码、干扰重构、干扰消除、LLR 转换、解码,如此进行迭代检测,随着干扰信号的不断消除,检测的结果精度不断提高,最终可以获得与最优检测性能接近的结果^[3].

该研究将过载系统与功率域非正交多址接入技术结合起来,以 3 个用户的下行链路为例进行分析,如图 3 所示,过载系数为 3.在基站端,把发送给用户 1 的信息 m_1 先进行编码(c_1)和二进制相移键控(BPSK, Binary Phase Shift Keying)调制后再通过 OFDM 调制到达发送天线 1,把发送给用户 2 的信息 m_2 和用户 3 的信息 m_3 先进行各自编码(c_2, c_3)和 BPSK 调制,通过分配不同的功率比($P_1 + P_2 = 1, P_1 > P_2$)后进行线性叠加,再经过 OFDM 调制到达发送天线,如此基站端可以通过 $N_T = 2$ 根发送天线同时发送 3 个用户的信号,而接收端的用户设备假设只有 $N_R = 1$ 根接收天线,这样就构成了接收天线数小于发送天线数,形成过载系统.假设信道是频率选择性衰落信道,且在一个数据帧长度中信道衰减系数保持不变,那么对于第 k 个子载波,接收信号可以表示为

$$Z_k = H_k X_k + N_k \quad (1)$$

其中, Z_k 表示用户接收到的频域信号, $X_k = [x_1^k, x_2^k]^T$ 表示发送信号, x_1^k 对应用户 1 的信号, x_2^k 是用户 2 和用户 3 的信号线性叠加 ($x_2 = \sqrt{P_1}c_2 + \sqrt{P_2}c_3$, $P_1 > P_2$), N_k 是均值为零、方差为 σ_N^2 的高斯白噪声, $H_k = [h_{11}, h_{12}]$ 是一个 $N_R \times N_T$ 的等效频域信道矩阵。

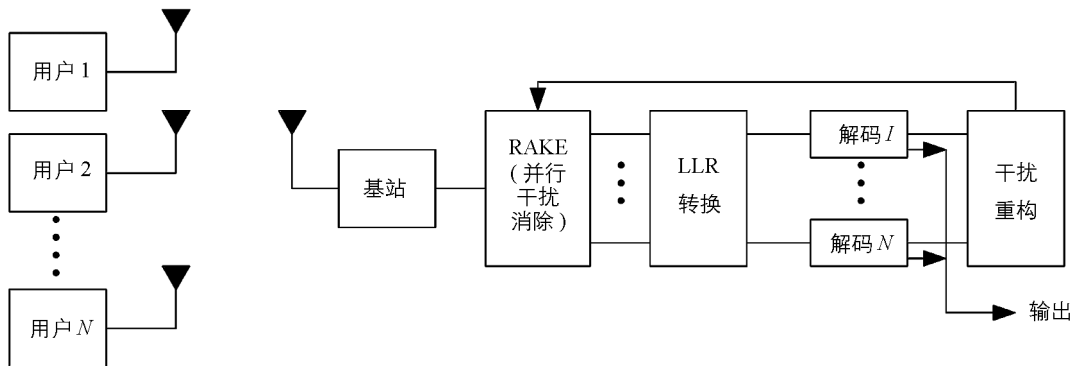


图 2 过载多用户系统结构示意图

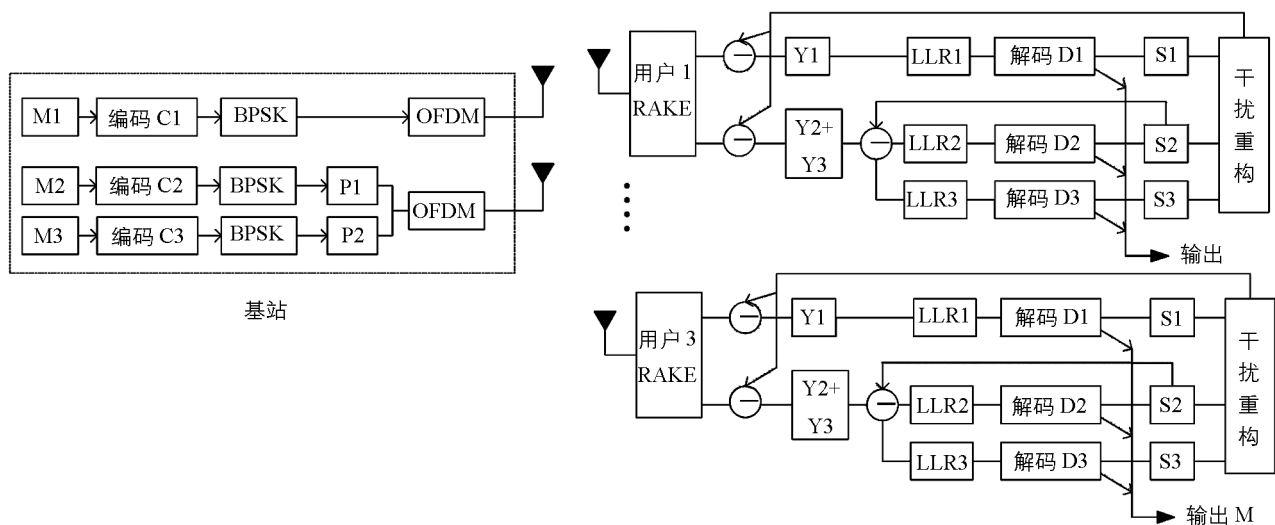


图 3 过载的非正交多用户系统结构

2 接收端检测技术

对于过载的非正交多用户系统, 结合图 1 所示的 SIC 算法和图 2 所示的 IIC 算法, 我们提出了如图 3 所示的检测算法——基于迭代干扰消除的串行干扰消除 (IICSIC, Iterative Interference Cancellation based Successive Interference Cancellation)。以用户 3 为例进行说明, 用户 3 需要从接收到的信号中检测出 m_3 。假设接收端完全知道信道信息, 首先将接收到的信号通过 OFDM 解调, 经过 RAKE 接收机进行初始检测,

$$Y_{\text{RAKE}}^k = H_k^H Z_k = \begin{bmatrix} h_{11}^* h_{11} x_1^k + h_{11}^* h_{12} x_2^k + h_{11}^* n_1^k \\ h_{12}^* h_{11} x_1^k + h_{12}^* h_{12} x_2^k + h_{12}^* n_2^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 + Y_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

RAKE 接收机的输出结果第一项对应的是用户 1 的初始检测信号, 第二项对应的是用户 2 的初始检测信号, 因为用户 2 的信号功率大于用户 3 的信号功率。将此信号通过 LLR 转换器转换成 LLR 值, 一个有效的 LLR 值其概率密度函数应该是接近高斯分布的^[8], 也就是其均值 μ_L 和方差 σ_L^2 应该满足:

$$\mu_L = \sigma_L^2 / 2$$

为了满足这一关系, 需要在 LLR 转换器中提供一个缩放系数

$$\alpha_k = 2\mu_{Y,k} / \sigma_{Y,k}^2 \quad (3)$$

$$\mu_{Y,k} = [\text{diag}(H_k^H H_k)]^T = [h_{11}^* h_{11}, h_{12}^* h_{12}]^T \quad (4)$$

$$\sigma_{Y,k,i}^2 = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_T} h_{ij}^* h_{ij} x_i^k + \sum_{l=1}^{N_R} h_{li}^* h_{li} \sigma_N^2 \quad i = 1, \dots, N_T \quad (5)$$

其中式(5)中的前一项来自干扰信号的, 后一项来自噪声. LLR转换器的输出为 $\alpha_k Y_{\text{RAKE}}^k$, 将其送入解码器, 输出结果 L_{dec}^k 可以用来计算用户数据的软估计值(s_1^k, s_2^k), 其中, 对于BPSK调制来说, 软估计值 $s^k = \tanh(L_{\text{dec}}^k/2)$, QPSK调制则是对于实部和虚部分别利用此式子计算. 将 s_1^k, s_2^k 反馈到RAKE接收机的输出端处, 通过信道重建接收信号, 利用式(2)进行干扰消除, 得到用户3的初始检测信号 Y_3^k ,

$$Y_3^k = h_{12}^* h_{11} x_1^k + h_{12}^* h_{12} x_2^k + h_{12}^* n_2^k - h_{12}^* h_{11} s_1^k - \sqrt{P_1} h_{12}^* h_{12} s_2^k \quad (6)$$

将 Y_3^k 通过LLR转换器、解码器, 得到用户3数据的软估计值 s_3^k , 利用用户数据的软估计值重构干扰信号, 反馈到RAKE接收机处, 消除干扰信号, 得到较为精确的检测信号 Y_{IC}^k ,

$$Y_{\text{IC}}^k = Y_{\text{RAKE}}^k - (H_k^H H_k - \text{diag}(H_k^H H_k)) \hat{x}_k \quad (7)$$

$$\hat{x}_k = [s_1^k, \sqrt{P_1} s_2^k + \sqrt{P_2} s_3^k]^T \quad (8)$$

较为精确的 Y_{IC}^k 进入LLR转换器、解码器、干扰重构、干扰消除, 如此迭代循环, 随着干扰信号的消除, LLR值会越来越精确, 通过若干循环后, 干扰信号会被完全消除, 此时式(5)会变成

$$\sigma_{Y,k,i}^2 = \sum_{l=1}^{N_R} h_{li}^* h_{li} \sigma_N^2 \quad (9)$$

最后, 精确的检测结果会从解码器输出, 如图3所示.

3 性能分析

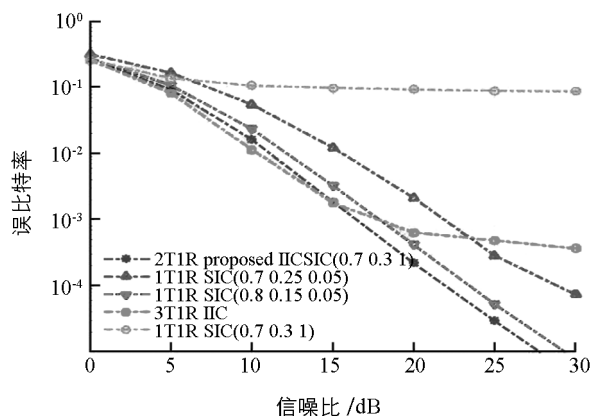
对于下行过载非正交多用户系统, 基站将3个用户的数据分成两组发送: 用户1单独一组, 用户2和用户3通过不同的功率比(0.9, 0.1)线性叠加成一组, 3个用户都是通过1根天线接收. 接收端采用IICSIC算法进行迭代检测, 迭代次数4次; 对于PDNOMA系统, 基站将3个用户通过不同的功率比(0.8, 0.15, 0.05或0.7, 0.25, 0.05)线性叠加后通过一根天线发送, 用户利用1根天线进行接收, 接收端采用SIC算法进行检测; 对于过载系统, 基站通过3根天线分别发送对应3个用户的数据, 用户利用1根天线进行接收. 接收端采用IIC算法进行迭代检测, 迭代次数4次.

3种系统的收发天线间假设是无关联的, 且假设收发天线之间的信道都是瑞利信道, 信道衰落系数在一个数据帧里保持不变, 即分组衰落信道. 信道估计是理想的, 即信道系数在接收端是完美已知的. 基站向每个用户发送10 000个数据帧, 1 024比特/帧, BPSK调制, 32子载波的OFDM调制, 卷积译码.

图4给出了4种系统下的对应的检测方法的性能, 初始检测都是采用RAKE技术. 当基站同时发送3个用户的数据时, 在信噪比为15dB时, 过载非正交多用户系统下的IICSIC的性能与过载系统下的IIC性能相当, 而PDNOMA系统下的SIC性能较差; 在信噪比为25dB时, 过载非正交多用户系统下的IICSIC的性能最好, PDNOMA系统下的SIC性能则与功率比有关; 过载系统下的IIC性能出现误差层, 这是由于单纯的过载系统3T1R在接收端要同时分离出3个用户的数据, 只靠信道的信息是不够的, 在某些信道条件下, 不管信噪比高低, 都是会导致接收端无法正确消除用户间的干扰而出现误差层. 另外, 过载系统下的PDNOMA对应的SIC性能非常差, 这是由于在过载情况下, 初始检测无法有效地检测出有用信号, 导致SIC的反馈出现误差传播, 最终检测结果出现严重误差.

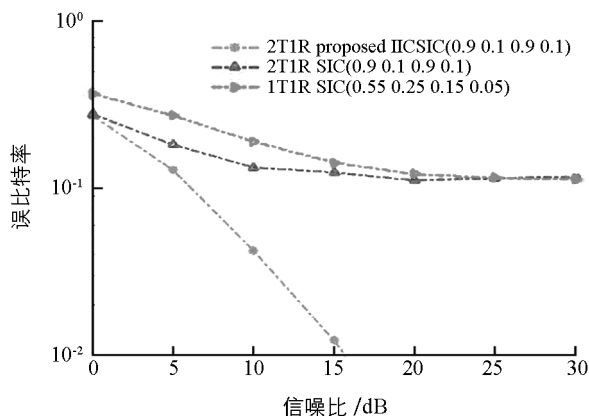
PDNOMA系统利用SIC虽然可以正确分离出3个用户的数据, 但受功率比分配影响, 性能会有所不同, 且叠加的用户越多, SIC的性能会越差. 如图5所示, 4个用户叠加时, 性能大大下降. 对于本文所提的IICSIC, 由于系统是过载非正交多用户系统, 不但利用了信道的信息, 且通过功率分配, 使得接收端可以通过功率分配正确地还原干扰信号, 因此检测结果最佳. 图5是4个用户时, 过载非正交多用户系统与过载PDNOMA系统(收发天线都是2和1)及PDNOMA系统之间的性能比较. 对于过载非正交多用户系统来说, 基站将4个用户分成两组: 用户1与用户2通过不同的功率比(0.9, 0.1)线性叠加后经1根天线发送; 用户3和用户4通过不同的功率比(0.9, 0.1)线性叠加后经1根天线发送. 4个用户都是通过1根天线

进行接收, 接收端采用 IICSIC 算法进行检测, 迭代次数 4 次. 对于过载的 PDNOMA 系统, 4 个用户也分成两组, 每组通过分配不同的功率比(如 0.9, 0.1)进行线性叠加后各经 1 根天线进行发送, 用户也通过 1 根天线进行接收, 接收端采用 SIC 算法进行检测. 而对于 PDNOMA 系统, 4 个用户通过不同的功率比(0.55, 0.25, 0.15, 0.05)进行线性叠加后经 1 根天线发送, 用户也通过 1 根天线进行接收. 如图 5 所示, 过载非正交多用户系统下的 IICSIC 的性能仍是优于 PDNOMA 系统下的 SIC 的性能, 因为这是随用户数的增加, PDNOMA 系统的性能严重下降, 出现很高的误差层.



(1) 过载 2T1R 非正交多用户系统下的 IICSIC 性能; (2) PDNOMA 1T1R 系统下的 SIC 性能; (3) 过载 3T1R 系统下的 IIC 性能; (4) PDNOMA 过载 2T1R 系统下的 SIC 性能.

图 4 3 个用户时 4 种系统与对接收机的性能对比



(1) 2T1R 过载非正交系统下的 IICSIC 性能; (2) 2T1R PDNOMA 系统下的 SIC 性能; (3) 1T1R PDNOMA 系统下的 SIC 性能.

图 5 4 个用户时 3 种系统与对接收机的性能对比

4 小 结

本文首先介绍了 PDNOMA 系统的基本原理及其对应的 SIC 检测技术, 其次介绍了过载系统的基本原理及其对应的 IIC 检测技术, 接着结合二者的特点提出了过载非正交多用户系统及其对应的 IICSIC 检测算法, 介绍并分析其基本原理, 最后通过仿真分析比较, 过载非正交多用户下的 IICSIC 算法的性能比 PDNOMA 下的 SIC 和过载系统下的 IIC 性能更优.

参考文献:

- [1] DAI L, WANG B, YUAN Y, et al. Non-Orthogonal Multiple Access for 5G: Solutions, Challenges, Opportunities, and Future Research Trends [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74–81.
- [2] DING Z, LIU Y, CHOI J, et al. Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 185–191.
- [3] ENDO Y, KISHIYAMA Y, HIGUCHI K. Uplink Non-Orthogonal Access with MMSE-SIC in the Presence of Inter-Cell Interference [C]//IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems. Paris: IEEE, 2012: 261–265.
- [4] HIGUCHI K, KISHIYAMA Y. Non-Orthogonal Access with Random Beamforming and Intra-Beam SIC for Cellular MIMO Downlink [C]//IEEE 78th Vehicular Technology Conference (Fall). Las Vegas: IEEE, 2013: 1–5.
- [5] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access [C]//IEEE 77th Vehicular Technology Conference (Spring). Dresden: IEEE, 2013: 1–5.
- [6] HIGUCHI K, BENJEBBOUR A. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) with Successive Interference Cancellation for Future Radio Access [J]. IEICE Transactions on Communication, 2015, 98(3): 403–414.
- [7] ISLAM S, AVAZOV N, DOBRE O, et al. Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 721–742.
- [8] CHEN M, BURR A. Low-Complexity Iterative Detection for Overloaded Uplink Multiuser MIMO OFDM System [C]//International ITG Workshop in Smart Antennas. Dresden: IEEE, 2012: 338–342.
- [9] CHEN M, BURR A. Low-Complexity Iterative Interference Cancellation Multiuser Detection Based on Channel Selection

- and Adaptive Transmission [J]. IET Communications, 2014, 8(11): 1988–1995.
- [10] CHEN M, BURR A. Comparative Study of ESE and IIC for OFDM-IDMA Systems [C]//IEEE International Conference on Computer and Communications. Chengdu: IEEE, 2016: 1569–1574.
- [11] 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.
- [12] 王茜竹, 唐 超, 吴广富, 等. 一种非正交多址接入下行链路信号检测方法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016, 28(5): 686–693.

A Non-Orthogonal Multiuser Detection Method for Overloaded Systems

CHEN Min^{1,2}, DING Jie¹, YANG Yong-qing^{1,2}

1. College of Information Science and Technology, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract: In order to improve the system capacity, spectrum efficiency and transmission rate, the number of antennas at the receiver end can be smaller than that at the transmitter end, which is called “overloaded system”. The power domain non-orthogonal multiple access (PDNOMA) proposed for the fifth generation communication network can increase the number of user access by power domain multiplexing. Taking into consideration the overloaded system and the PDNOMA, this paper introduces the basic principles of an overloaded PDNOMA and proposes an iterative interference cancellation based the successive interference cancellation (IICSIC) method for multiuser detection. A simulation experiment has shown that compared with SIC (successive interference cancellation) or IIC (iterative interference cancellation) of the overloaded system, the proposed scheme performs better.

Key words: overloaded system; non-orthogonal multiple access; multiuser detection

责任编辑 汤振金

