

一种低复杂度非正交多址接入功率分配算法*

谭 歆, 肖 杰, 高 翔, 吴广富

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘 要: 功率分配是非正交多址系统(NOMA)资源分配中的一个重要研究问题。最优迭代注水功率分配算法能提高系统性能,但是算法复杂度较高。提出一种低复杂度的功率分配算法,首先对子载波采用注水原理得到总的复用功率,然后在单个子载波上叠加用户间采用分数阶功率分配方法进行功率再分配。通过仿真分析,与最优迭代注水功率分配算法相比,该算法在性能损失不超过3%的情况下,大幅减低了计算复杂度。

关键词: 非正交多址;功率分配;注水;分数阶功率分配方法

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.2017.04.032

中文引用格式: 谭歆,肖杰,高翔,等. 一种低复杂度非正交多址接入功率分配算法[J].电子技术应用,2017,43(4):126-128,132.
英文引用格式: Tan Xin, Xiao Jie, Gao Xiang. A low computational complexity power allocation algorithm for non-orthogonal multiple access systems[J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(4): 126-128, 132.

A low computational complexity power allocation algorithm for non-orthogonal multiple access systems

Tan Xin, Xiao Jie, Gao Xiang, Wu Guangfu

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Post and Telecommunications of China,
Chongqing 400065, China)

Abstract: Power allocation is an important research issue of resource allocation in non-orthogonal multiple access system. Optimal water-filling power allocation algorithm can improve the system performance, but the complexity of the algorithm is relatively high. This paper presents a low complexity power allocation algorithm. Firstly, the algorithm uses water-filling principle to subcarriers in order to get the total multiplexed power. Then the fractional transmission power allocation algorithm is used to reallocate the total multiplexed power for multiplexed users on single subcarrier. The simulation result shows that the proposed algorithm can obviously reduce the computational complexity under the circumstance of the performance loss of less than 3% compared with the optimal water-filling transmission power allocation.

Key words: NOMA; power allocation; water-filling; fractional transmit power allocation

0 引言

高速增长的无线应用促使了第五代移动通信系统的研究热潮。IMT-2020(5G)推进组在《5G 愿景与需求白皮书》中提出 5G 对未来无线网络更高要求,即用户体验速率要达到 0.1~1 Gb/s,设备连接承受能力要达到 $10^6/\text{km}^2$,频谱效率要比 4G 提升 5~15 倍^[1]。为了满足人们日益增长的移动业务需求,迫切需要改进现有的多址接入技术。在这种背景下 SAITO Y 等人提出了非正交多址接入技术^[2](Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)。

NOMA 系统的功率分配问题目前得到初步的关注^[3-5]。文献[4-5]研究了总功率约束下系统吞吐量最大化的功率分配问题,其中文献[4]将功率分配作两步完成,先将

功率平均分配给每个子载波,然后在单个子载波上采用分数阶功率分配方法(Fractional Transmit Power Allocation, FTPA)进行功率再分配。这种方法在初次分配中忽视了信道的时变特性,是一种次优的功率分配方法。文献[5]提出了一种最优迭代注水功率分配算法。该算法虽然可以获得更好的系统吞吐量,但是迭代过程中考虑了子载波上所有用户,算法复杂度很高。

本文在研究上述功率分配算法基础上,提出一种改进的功率分配算法,首先对所有子载波进行注水,得到各子载波的总复用功率;然后在单个子载波上采用 FTPA 进行功率再分配。

1 系统建模

1.1 NOMA 下行链路模型

假设小区中用户数为 K ,子载波数为 N ,总带宽为

* 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划)(2015AA01C303);长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1299)

B , 总发射功率为 P_{tot} , 第 n 个子载波上叠加的用户数为 k_n , 基站和接收端天线数都为 1。

在发送端, 子载波 n 上的叠加信号 s_n 可表示为:

$$s_n = \sum_{i=1}^{k_n} \sqrt{p_{i,n}} x_{i,n} \quad (1)$$

其中, $x_{i,n}$ 表示在子载波 n 上第 i 个用户的发送信号, $p_{i,n}$ 代表第 i 个用户在子载波 n 上分配的功率。

在接收端, 用户 UE_k 在子载波 n 上的接收信号为:

$$y_{k,n} = h_{k,n} s_n + w_{k,n} \\ = \sqrt{p_{k,n}} h_{k,n} x_{k,n} + \sum_{i=1, i \neq k}^{k_n} \sqrt{p_{i,n}} h_{k,n} x_{i,n} + w_{k,n} \quad (2)$$

其中, $h_{k,n}$ 和 $w_{k,n}$ 分别表示在子载波 n 上基站到接收端 k 的信道增益和噪声, 假设噪声的均值为零, 方差为 σ_n^2 。

UE 接收机采用串行干扰消除技术 (Successive Interference Cancellation, SIC)^[6] 进行检测。不同 UE 接收机的检测过程有所不同, 对所有 UE 接收机而言, 正常解码顺序为载波干扰噪声比 (CINR) 升序^[7]。假设在第 n 个子载波上功率域叠加用户根据载波干扰噪声比从大到小排序为: $\Gamma_{1,n} \geq \Gamma_{2,n} \geq \dots \geq \Gamma_{m,n} \geq \Gamma_{m+1,n} \geq \dots \geq \Gamma_{k_n,n}$, 其中 $\Gamma_{m,n} = |h_{m,n}|^2 / \sigma_n^2$ 。UE_{*m*} 接收机进行 SIC 检测处理时, 其依次消除叠加用户 UE_{*k_n*}, UE_{*k_n-1*}, ..., UE_{*m+1*} 信号的影响, 之后将用户 UE₁, UE₂, ..., UE_{*m-1*} 信号都当成干扰处理。UE_{*m*} 接收机的 SIC 检测处理流程如图 1 所示。

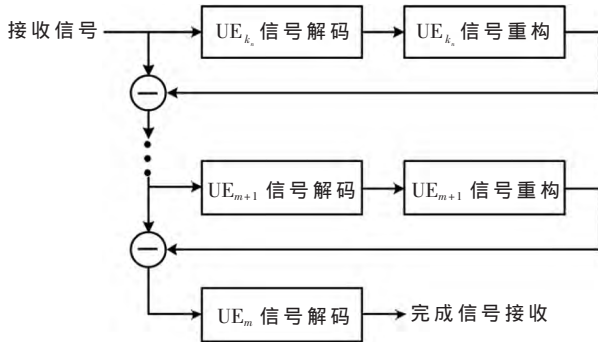


图 1 UE_{*m*} 接收机的 SIC 检测处理流程

在经过 SIC 检测处理后, 用户 UE_{*m*} 在第 n 个子载波上的吞吐量为:

$$R_{m,n} = \frac{B}{N} \log_2 \left(1 + \frac{p_{m,n} \Gamma_{m,n}}{1 + \sum_{i=1}^{m-1} p_{i,n} \Gamma_{m,n}} \right) \quad (3)$$

从式(3)可以看到, 子载波上用户组合和用户功率分配都显著影响用户的吞吐量, 因此用户组合的选择和功率分配是重要的研究方向。

1.2 问题描述

NOMA 系统采用比例公平调度算法完成子载波上用户组合的选择, 该算法兼顾了系统吞吐量和用户公平性^[8]。假设 NOMA 系统中功率域叠加用户数为 2 个, NOMA 功率分配的优化问题可描述如下:

《电子技术应用》2017 年 第 43 卷 第 4 期

$$\max_{p_{k,n}} \sum_{n=1}^N \sum_{k \in \Omega_n} R_{k,n} \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad p_{k,n} \geq 0; \forall k, n \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k \in \Omega_n} p_{k,n} \leq P_{\text{tot}} \quad (6)$$

其中 Ω_n 表示子载波 n 上复用的用户集合。式(5)代表复用到第 n 个子载波上的用户功率不小于 0。式(6)表示所有子载波上用户的功率总和不大于 P_{tot} 。

2 改进的功率分配算法

式(4)是一个最优化问题, 可以采用最优迭代注水功率分配算法解决, 但该算法是一种全范围内的迭代注水功率分配算法, 随着功率域叠加用户数的增加, 算法复杂度急剧增加。通过减少迭代注水时的用户数, 能大幅减低功率分配复杂度。在此基础上, 本文提出了一种改进的功率分配算法。该算法把注水原理^[9]和 FTPA 分配方式结合, 将功率分配作两步进行: 第一步, 采用注水原理完成子载波功率分配 p_n ; 第二步, 进行单个子载波上功率再分配。在第一步中, 可以将目标函数(即式(4))改写成:

$$\max_{p_n} \sum_{n=1}^N \frac{B}{N} \log_2(1 + p_n H_n) \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{n=1}^N p_n \leq P_{\text{tot}} \quad (8)$$

其中 $H_n = h_n'^2 / (N_0 B / N)$, N_0 表示加性高斯白噪声的功率谱密度, h_n' 表示第 n 个子载波的注水等效信道增益。

根据式(7)和(8), 利用拉格朗日算法, 构造拉格朗日函数:

$$\Psi = \sum_{n=1}^N \log_2(1 + H_n p_n) - \lambda \left(\sum_{n=1}^N p_n - P_{\text{tot}} \right) \quad (9)$$

其中, λ 为拉格朗日乘子。

式(9)两边分别对 p_n 、 λ 求导, 则有:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial p_n} = \frac{1}{\ln 2} \frac{H_n}{1 + H_n p_n} - \lambda = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} = \sum_{n=1}^N p_n - P_{\text{tot}} = 0 \quad (11)$$

令 $\alpha = \lambda \ln 2$, 则:

$$\alpha = H_n / (1 + H_n p_n) \quad (12)$$

从而可以推出:

$$p_n = 1 / \alpha - 1 / H_n \quad (13)$$

此时式(13)并不能直接计算得到最优的子载波功率 p_n , 需要通过多次迭代完成。在迭代过程中, 注水水位 α 的初始值及每次迭代中调整为^[10]:

$$\alpha_0 = \frac{1}{N} \left(P_{\text{tot}} + \sum_{n=1}^N \frac{1}{H_n} \right) \quad (14)$$

$$\alpha \leftarrow \alpha + \mu \frac{1}{N_{\text{on}}} \left(P_{\text{tot}} - \sum_{n=1}^N p_n \right) \quad (15)$$

其中 $0 < \mu < 1$ 为调整步长, N_{en} 代表每次迭代中实际进行功率分配的子载波数。

在对所有子载波执行注水功率分配后,得到了每个子载波的功率 p_n ; 然后进行子载波上复用用户的功率再分配。子载波上功率再分配按下式进行:

$$p_{i,n} = \frac{h_{i,n}^{-2\alpha_{\text{FTP}}}}{\sum_{j \in \Omega_n} h_{j,n}^{-2\alpha_{\text{FTP}}}} p_n \quad (16)$$

其中, $\alpha_{\text{FTP}} (0 \leq \alpha_{\text{FTP}} \leq 1)$ 表示 FTPA 方式的功率衰减因子, 当 $\alpha_{\text{FTP}}=0$ 时表示用户等功率分配。随着 α_{FTP} 的增加, 低信道增益的用户获得更多的功率。

基于上述分析, 功率分配算法具体步骤如下:

- (1) 利用式(14)计算初始注水水位 α_0 , 初始化参数;
- (2) 根据式(13)得到本次实际分配的所有子载波功率

p_n ;

- (3) 若某一子载波的功率 $p_n < 0$, 将其置为零, 且把该子载波从剩余的迭代过程中剔除;

- (4) 如果步骤(2)中所有子载波的功率 p_n 都非负, 则转至步骤(5); 否则, 根据式(15)更新注水水位, 并返回步骤(2);

- (5) 利用式(16)计算子载波上复用用户的功率 $p_{i,n}$, 至此整个功率分配完成。

3 仿真与分析

3.1 复杂度分析

最优迭代注水功率分配算法考虑了子载波上所有复用用户的信道增益, 属于大范围的功率注水; 而改进的功率分配算法考虑子载波上等效注水信道增益, 属于小范围的功率注水。本文功率分配算法过程中: 在第一步子载波功率分配时, 每次迭代过程需要 $2N$ 次加法和 $N+2$ 次乘法, 其运算量为 $O(N)$, 整个子载波功率分配中的运算量为 $O(kN)$, 其中 N 为每次注水的子载波个数, k 为迭代次数; 第二步子载波上复用用户功率再分配中, 总共需要 N 次加法和 $2N$ 次乘法。而最优迭代注水功率分配算法在每次迭代中考虑的信道增益要比本文算法多一倍, 因此在一次迭代中改进的功率分配算法复杂度可以降低一半。

3.2 仿真分析

仿真参数如表 1 所示。在仿真中, 功率域叠加用户数为 2 个, 最大多普勒频移为 30 Hz, 时延扩展为 5 μs , 理想的信道估计。

功率分配中, 注水等效信道增益的选取非常重要, 仿真模拟了 3 种等效信道增益 h_n 情况。其中情况 1 将功率域复用用户组中较好的信道增益作为等效信道增益 h_n , 情况 2 将复用用户信道增益的算术平均作为等效信道增益 h_n , 情况 3 将功率域复用用户组中较差的信道增益作为等效信道增益 h_n 。

图 2 是等效信道增益在不同取值情况下, 本文算法

表 1 仿真参数

| 参数类型 | 参数值 |
|---------------------|------------------------|
| 子载波数 | 128 |
| 基站发射功率/W | 1 |
| 系统带宽/MHz | 1 |
| 叠加用户数 | 2 |
| 时延扩展/ μs | 5 |
| 噪声功率谱密度/(W/Hz) | 1.156×10^{-8} |
| 信道模型 | 6 径频率选择性瑞利衰落信道 |
| 最大多普勒频移/Hz | 30 |
| 信道估计 | Ideal |

得到的总吞吐量。当等效信道增益为复用用户中较好的信道增益时, 本文算法能够获得最大的总吞吐量。从图 3 中可以看出, 随着 α_{FTP} 的递增, 系统的总吞吐量呈下降趋势, 当 α_{FTP} 从 0.1 增加到 0.9 时, 系统的总吞吐量下降了约 0.5 bit/s/Hz。主要是因为 α_{FTP} 越大, 更多的功率将分配给信道增益差的用户, 虽然牺牲了部分系统吞吐量, 但降低了接收端串行干扰, 消除检测误码率。

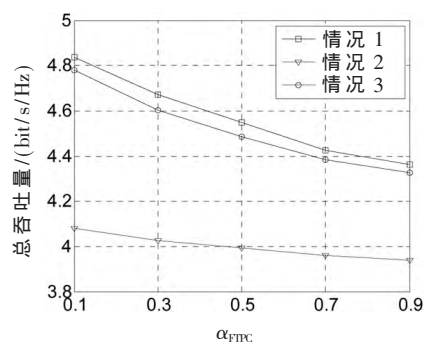


图 2 $K=10$, 3 种情况获得系统吞吐量

图 3 和图 4 分别是 $\alpha_{\text{FTP}}=0.2$ 和 0.4 时, 本文算法与文献[4]的算法、文献[5]的算法的吞吐量的比较。由图 3 可知, 当 $K=20$ 时, 本文算法的吞吐量比文献[4]的算法提高约 7.2%, 比文献[5]的算法略低 2.5% 左右。由图 4 可知, 当 $K=20$ 时, 本文算法的吞吐量比文献[4]的算法提高约 6.1%, 比文献[5]的算法略低 1.9% 左右。

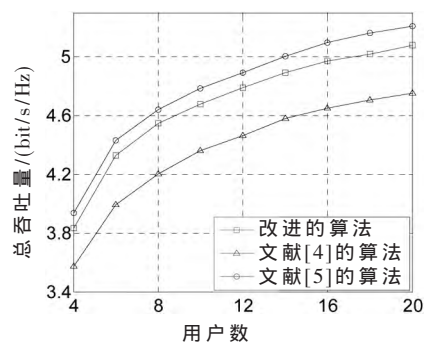


图 3 $\alpha_{\text{FTP}}=0.2$, 3 种算法获得系统吞吐量

4 结论

最优迭代注水功率分配算法能获得较好的系统吞

(下转第 132 页)

《电子技术应用》2017 年 第 43 卷 第 4 期

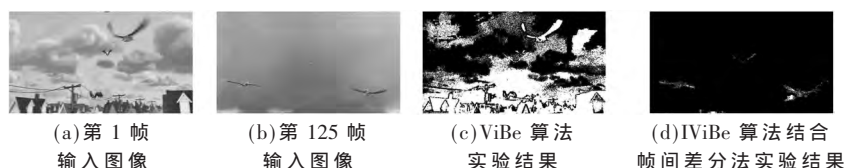


图7 Bird1 视频序列的运动目标检测结果比较

Ghost 区域, 本文采用了 IViBe 算法和帧间差分法的结合, 通过前景点检测结果相“与”去除了 Ghost 区域。对于动态背景, 本文采用了样本集的标准差作为该像素点的背景动态程度度量方式, 利用此度量值实时地更新距离阈值和更新率, 并测试了对于动态背景的鲁棒性, 取得了良好的效果。最后, 本文利用 LK 光流法进行全局运动补偿, 并使用改进的 ViBe 算法和帧间差分法进行结合取代并不适用于摄像机运动情况下的 ViBe 算法, 取得了良好效果。

参考文献

- [1] KANATANI K. Statistical optimization for geometric computation: Theory and practice[J]. University Japan, 1996, 32(6): 646.
- [2] YILMAZ A, JAVED O, SHAH M. Object tracking: a survey[J]. Acm Computing Surveys, 2006, 38(4): 81-93.
- [3] 甘明刚, 陈杰, 刘劲, 等. 一种基于三帧差分法和边缘信息的运动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 894-897.
- [4] PAUL M, HAQUE S M E, CHAKRABORTY S. Human detection in surveillance videos and its applications—a review[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing,

(下转第 137 页)

(上接第 128 页)

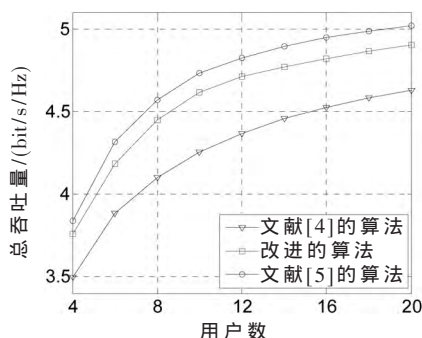


图4 $\alpha_{\text{FPA}}=0.4$, 3 种算法获得系统吞吐量

吐量, 但是复杂度较高。本文提出了一种低复杂度的功率分配算法, 通过在小范围注水的基础上利用分数阶发送功率分配方法, 从而保证系统总吞吐量略降的前提下, 大幅降低最优迭代注水功率分配算法复杂度。仿真结果表明, 对比最优功率分配算法, 本文算法在并未损失较多系统性能的基础上, 大大降低了算法复杂度; 对比文献[4]的算法, 提高了 7% 左右的系统总吞吐量。

参考文献

- [1] IMT-2020(5G)推进组. 5G 概念白皮书[R]. 北京:《5G 概念白皮书》发布会, 2015.
- [2] SAITO Y, KISHIYAMA Y, BENJEBBOUR A, et al. Non-orthogonal multiple access(NOMA) for cellular future radio access[C]. Vehicular Technology Conference(VTC Spring), 2013 IEEE 77th. Dresden, Germany: IEEE, 2013: 1-5.
- [3] BENJEBBOUR A, SAITO Y, KISHIYAMA Y, et al. Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access(NOMA) for future radio access[C]. Intelligent Signal Processing and Communications Systems(ISPACS), 2013 International Symposium On. Okinawa, Japan: IEEE, 2013: 770-774.
- [4] BENJEBBOUR A, LI A, SAITO Y, et al. System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhance-

ments[C]. Globecom Workshops(GC Wkshps), 2013 IEEE. IEEE, 2013: 66-70.

- [5] HOJEI M R, FARAH J, NOUR C A, et al. Resource allocation in downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access[C]. Vehicular Technology Conference(VTC Spring), 2015 IEEE 81st. IEEE, 2015: 1-6.
- [6] 毕奇, 梁林, 杨珊, 等. 面向 5G 的非正交多址接入技术[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 14-21.
- [7] SAITO Y, BENJEBBOUR A, KISHIYAMA Y, et al. System-level performance of downlink non-orthogonal multiple access(NOMA) under various environments[C]. Vehicular Technology Conference(VTC Spring), 2015 IEEE 81st. IEEE, 2015: 1-5.
- [8] OTAO N, KISHIYAMA Y, HIGUCHI K. Performance of non-orthogonal access with SIC in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation[C]. 2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). IEEE, 2012: 476-480.
- [9] KOBAYASHI M, CAIRE G. An iterative water-filling algorithm for maximum weighted sum-rate of Gaussian MIMO-BC[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2006, 24(8): 1640-1646.
- [10] JANG J, LEE K B, LEE Y H. Transmit power and bit allocations for OFDM systems in a fading channel[C]. Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM'03. IEEE. IEEE, 2003, 2: 858-862.

(收稿日期: 2016-07-06)

作者简介:

谭歆(1974-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 无线通信。

肖杰(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 非正交多址接入。

高翔(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 非正交多址接入。

《电子技术应用》2017年 第43卷 第4期