

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201703024



能量有效的多小区 OFDMA 下行链路资源分配算法

杨清晓, 陈东华

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了实现多小区正交频分多址(OFDMA)下行链路资源动态分配,采用非合作博弈给出多小区 OFDMA 子信道分配和功率分配的联合博弈模型,各小区以最大化能量效率为目标实现资源动态分配.由于最优子信道和功率联合分配是 NP-hard 问题,为了求解联合博弈问题,首先,将其分解为子信道分配和功率分配 2 个子问题,然后,采用干扰信道增益比最小准则实现子信道分配,在此基础上,利用非合作博弈实现功率分配.理论分析显示:该博弈模型可表达为潜在博弈,从而保证了非合作博弈收敛于纳什均衡解.仿真结果表明:算法性能良好,虽然一定程度上降低了传输速率,但获得了较高的能量效率,实现了能量效率和传输速率折中.

关键词: 能量效率; 正交频分多址; 纳什均衡; 潜在博弈; 资源分配

中图分类号: TN 92 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2017)03-0419-05

Energy Efficient Resource Allocation Algorithm for Multi-Cell OFDMA Downlink Systems

YANG Qingxiao, CHEN Donghua

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to achieve the downlink dynamic resources allocation of multi-cell OFDMA systems, the joint sub-channel allocation and power allocation are modeled as a non-cooperative game, with each cell aiming at maximizing energy efficiency to realize dynamic resource allocation. However, the problem of joint sub-channel allocation and power allocation is NP-hard, in order to solve this problem, we firstly decouple it into two sub-problems: sub-channel allocation and power allocation, and then we designate sub-channels to minimize the ratio of interference to channel gain, and allocate the power using the non-cooperative game model, respectively. The theoretical derivation show that the game can be expressed as a potential game, thus ensuring the non-cooperative game converges to the Nash equilibrium. Simulation results show that the proposed resource allocation algorithms are effective in increasing the network energy efficiency. Although there is a little reduction in the transmission rate, a tradeoff between energy efficiency and transmission rate is achieved.

Keywords: energy efficiency; orthogonal frequency division multiple access; nash equilibrium; potential game; resource allocation

在多用户多小区系统中,对正交频分多址(OFDMA)进行合理的子信道和功率分配能协调小区间干扰,进一步提高系统容量.目前,已有大量文献研究了单小区 OFDMA 系统的资源分配算法^[1-2],且多数采用集中式算法进行资源调度.但对于频率复用因子为 1 的多小区 OFDMA 系统,由于同频干扰的

收稿日期: 2014-07-21

通信作者: 陈东华(1977-),男,副教授,博士,主要从事宽带无线通信、无线网络资源管理的研究. E-mail: dhchen@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J05119); 华侨大学高层次人才科研启动项目(12BS230)

存在,采用集中式算法不仅计算复杂度高且系统开销大.而在分布式算法中,资源调度由各小区独立完成,更适用于多小区 OFDMA 系统.博弈论^[3]在分布式资源管理方面有着优越的性能,已成为一大研究热点^[4-5].针对多信道系统的资源分配问题,La 等^[6]提出了在最大传输功率约束下,最小化用户总干扰的资源分配算法.随着绿色通信的兴起,Buzzi 等^[7]研究了多小区 OFDMA 系统上行链路的能量效率最大化问题,并用潜在博弈理论为其建模. Xu 等^[8]研究了 OFDMA 认知无线网络的资源分配问题,在最大化能量效率的同时保证了主用户的 QoS. 本文研究了多小区 OFDMA 系统下行链路的能量效率最大化问题,采用非合作博弈模型为该问题建模,并将该博弈模型表达为潜在博弈.

1 系统模型

多小区 OFDMA 网络中有 N 个小区,每个小区有 1 个基站位于其中心位置,且其服务的用户随机地分布在小区中,如图 1 所示.对于小区 $n \in \varphi, \varphi = \{1, \dots, N\}$,定义 Ω_n 为小区 n 中的用户集合.系统总带宽为 B ,划分为 M 个正交的子信道,每个子信道有相同的带宽为 $\bar{\omega} = B/M, m \in \psi, \psi = \{1, \dots, M\}$.

在多小区 OFDMA 系统中,频率复用因子 $f = 1$. 定义子信道分配矩阵 $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_N]$,其中, $\mathbf{A}_n = [a_{n,k_n}^m]_{M \times K}$.若基站 n 通过子信道 m 传输数据给用户 $k_n \in \Omega_n$,则 $a_{n,k_n}^m = 1$;反之, $a_{n,k_n}^m = 0$.为了避免小区内用户间的干扰,同一小区内各子信道之间相互正交,即满足 $\sum_{k_n \in \Omega_n} a_{n,k_n}^m \leq 1, \forall n \in \psi$.

假设各基站能准确地获取信道状态信息.定义信道增益矩阵 $\mathbf{G} \in \mathcal{R}^{K \times M \times N}, g_{n,k_n}^m = (\rho_{n,k_n}^m)^2 \cdot |h_{n,k_n}^m|^2$ 为 \mathbf{G} 中的元素.其中, ρ_{n,k_n}^m 和 h_{n,k_n}^m 分别为相应的大尺度衰落和小尺度衰落.定义传输功率矩阵为 $\mathbf{P} = [\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_N]$,其中, $\mathbf{P}_n = [P_n^1, \dots, P_n^M]$ 为小区 n 的功率分配矢量, P_n^m 表示基站 n 在子信道 m 上的传输功率.定义各子信道上的传输功率约束为 $0 \leq P_n^m \leq P_{\max}$,其中, P_{\max} 为子信道上的最大传输功率.根据文献[6]定义小区 n 中的用户 k_n 在子信道 m 上的接收信干噪比(SINR)为

$$\gamma_{n,k_n}^m = P_n^m g_{n,k_n}^m / (\sum_{j=1, j \neq n}^N P_j^m g_{j,k_n}^m + \sigma^2). \tag{1}$$

式(1)中: σ^2 为噪声功率.根据香农容量公式,用户 k_n 可达的总数据传输速率为

$$R_{k_n} = \bar{\omega} \sum_{m=1}^M a_{n,k_n}^m \log_2(1 + \gamma_{n,k_n}^m). \tag{2}$$

采用与文献[7]相同的目标函数,定义基站 n 的能量效率函数为

$$EE_n = \sum_{m=1}^M \sum_{k_n \in \Omega_n} a_{n,k_n}^m r \frac{D}{Q} \frac{f(\gamma_{n,k_n}^m)}{P}. \tag{3}$$

式(3)中: r 为数据的传输速率; Q 为数据包的长度; $D \leq Q$ 为每个数据包包含的信息符号数; $f(\gamma) = (1 - \exp(-\gamma))^Q$ 表示当 SINR 为 γ 时,正确接收一个长度为 Q 的数据包的近似概率^[7].

定义能量有效的多小区 OFDMA 系统下行链路资源分配问题,即

$$\left. \begin{aligned} &\max_{\mathbf{A}, \mathbf{P}} \quad \sum_{n=1}^N EE_n, \\ &\text{s. t.} \quad \left\{ \begin{aligned} &\sum_{k_n \in \Omega_n} a_{n,k_n}^m \leq 1, && \forall m \in \psi, \quad \forall n \in \varphi, \\ &0 \leq P_n^m \leq P_{\max}, && \forall m \in \psi, \quad \forall n \in \varphi. \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

2 非合作博弈模型与资源分配

2.1 非合作博弈模型

定义非合作博弈为 $\mathbf{G} = [\varphi, \{\mathbf{P}_n\} \times \{\mathbf{A}_n\}, \{u_n\}]$, $n \in \varphi$. 其中,博弈者集合 φ 为各小区基站; $\{\mathbf{P}_n\}$ 和

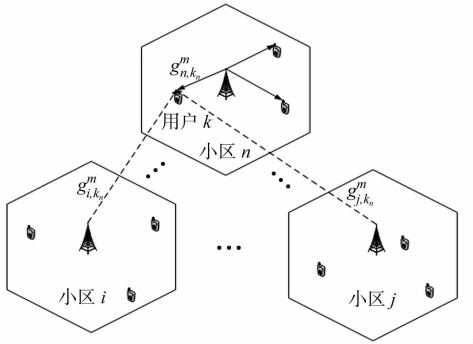


图 1 多小区 OFDMA 下行链路系统框图
Fig. 1 Frame of multi-cell OFDMA downlink systems

$\{A_n\}$ 为博弈者 n 的策略集合; $u_n=EE_n$ 为博弈者 n 的效用函数. 则非合作能量效率资源分配博弈模型为

$$\left. \begin{array}{l} \max_{A_n, P_n} u_n, \\ \text{s. t.} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k_n \in \Omega_n} a_{n,k_n}^m \leq 1, \quad \forall m \in \psi, \quad \forall n \in \varphi, \\ 0 \leq P_n^m \leq P_{\max}, \quad \forall m \in \psi, \quad \forall n \in \varphi. \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad (5)$$

由于最优子信道和功率联合分配是 NP-hard 问题^[9],为了求解联合博弈问题,将其分解为子信道分配和功率分配 2 个子问题.

2.2 子信道分配

在多小区环境下,由于同信道用户相互干扰,为了高效地利用资源,子信道分配方案应尽可能地减少小区间干扰. 另一方面,为了避免小区内干扰,每个子信道在同一小区内只能分配给一个用户.

目前,常用的子信道分配有 SINR 最大准则^[10]和干扰信道增益比最小准则^[11]. 基于干扰信道增益比最小准则,若用户 k_n 满足式(7),则将子信道 $m \in \psi$ 分配给用户 k_n ,即

$$k_n = \arg \min_{k_n \in \Omega_n} \left(\sum_{j=1, j \neq n}^N P_j^m g_{j,k_n}^m + \sigma^2 \right) / g_{n,k_n}^m, \quad \forall n \in \varphi. \quad (6)$$

2.3 功率分配

通过式(6)对子信道进行分配,获得子信道分配矩阵 A_n ,设 $k_{n,m} \in \Omega_n$ 为小区 n 在子信道 m 上进行数据传输的用户. 因此,简化为非合作功率博弈. 但是,并不是每次博弈的结果都能收敛于纳什均衡点. 为了保证算法的收敛性,文献[7]利用潜在博弈的博弈解必定收敛于纳什均衡点这一特性^[3],以 $\hat{f}(\gamma) = (\exp(-\eta/\gamma))^Q$ 为效率函数,把功率分配博弈表达成潜在博弈,并指出当 $\gamma > 0$ 时, $\hat{f}(\gamma)$ 等效于 $f(\gamma)$.

同样以 $\hat{f}(\gamma)$ 为效率函数,定义基站 n 的能量效率函数为

$$\hat{E}E_n = \sum_{m=1}^M (\exp(-\eta/\gamma_{n,k_{n,m}}^m))^Q / P_n^m. \quad (7)$$

式(7)中: $\eta = \gamma^* / Q$. 同时,定义潜在函数为

$$V = \ln \left(\prod_{n=1}^N \prod_{m=1}^M \hat{E}E_n^m \right) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (\eta Q / \gamma_{n,k_{n,m}}^m + \ln P_n^m). \quad (8)$$

将式(8)改写成 $V = \zeta_n + \xi_n$ 的形式, ζ_n 和 ξ_n 分别为与博弈者 n 的策略相关和不相关的部分,即

$$\begin{aligned} \zeta_n = & -\eta Q \left(\sum_{m=1}^M ((\sigma^2 + \sum_{j=1, j \neq n}^N P_j^m g_{j,k_{n,m}}^m) / P_n^m g_{n,k_{n,m}}^m) + \right. \\ & \left. \sum_{i=1, i \neq n}^N \sum_{m=1}^M (P_n^m g_{n,k_{i,m}}^m / P_i^m g_{i,k_{i,m}}^m) \right) - \sum_{m=1}^M (\ln P_n^m), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\xi_n = -\eta Q \left(\sum_{i=1, i \neq n}^N \sum_{m=1}^M ((\sigma^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j^m g_{j,k_{i,m}}^m) / P_i^m g_{i,k_{i,m}}^m) \right) - \sum_{i=1, i \neq n}^N \sum_{m=1}^M (\ln P_i^m). \quad (10)$$

通过式(8)~(10),把功率分配博弈表达为潜在博弈 $\hat{G} = [\varphi, \{P_n\}, \{\hat{u}_n\}]$, $n \in \varphi$,从而保证了纳什均衡解的唯一性. 该博弈的效用函数为

$$\hat{u}_n = \zeta_n = - \sum_{m=1}^M (\eta Q \beta_n^m / P_n^m + \eta Q \alpha_n^m / P_n^m + \ln P_n^m). \quad (11)$$

式(11)中: $\alpha_n^m = \sum_{i=1, i \neq n}^N g_{n,k_{i,m}}^m / P_i^m g_{i,k_{i,m}}^m$; $\beta_n^m = (\sigma^2 + \sum_{j=1, j \neq i, j \neq n}^N P_j^m g_{j,k_{n,m}}^m) / g_{n,k_{n,m}}^m$. 定义函数为

$$\omega_n^m = -\eta Q \beta_n^m / P_n^m - \eta Q \alpha_n^m P_n^m - \ln P_n^m. \quad (12)$$

则 $\hat{u}_n = \sum_{m=1}^M \omega_n^m$,由于各子信道相互正交,因此,式(11)可分解为 M 个子问题. 对于子信道 $n \in \psi$,其功率 P_n^m 通过最大化 ω_n^m 求取,结合功率约束得到小区 n 在子信道 m 上的功率为

$$P_n^m = \min(P_{\max}, (-1 + \sqrt{1 + 4\eta^2 Q^2 \alpha_n^m \beta_n^m}) / 2\eta Q \alpha_n^m). \quad (13)$$

通过各小区独立地进行子信道和功率分配联合博弈,从而实现了整个网络能量效率的最大化.

需要说明的是,尽管文中目标函数和文献[7]相同,但是文中与文献[7]存在如下本质区别. 1) 应用

环境不同. 文献[7]研究的是多小区 OFDMA 系统上行链路的能量效率最大化问题;文中研究的是下行链路的能量效率最大化问题. 2) 子信道分配准则不用. 文献[7]采用穷举法遍历了所有子信道分配的可能情况, 计算量非常庞大;文中子信道分配基于干扰与信道增益比最小的原则, 降低了小区间的同信道干扰. 3) 博弈模型不同. 文献[7]以系统内的所有用户为博弈者, 对子信道和功率联合分配进行博弈, 计算量大且复杂度高;文中以各小区基站为博弈者, 以小区为单位进行博弈, 并把子信道与功率联合分配问题分解成两个子问题, 降低了复杂度.

3 算法复杂度分析

假设网络中有 N 个小区共享 M 个子信道, 每个小区中有 K 个用户. 由式(7)可知: 文中算法需计算各个用户在各子信道的干扰信道增益比, 通过 $(K-1)$ 次比较获得当前子信道干扰信道增益比最小的用户, 然后各小区通过式(13)完成功率分配. 因此, 文中算法的算法复杂度为 $O(NMK(K-1)+NM)$. 文献[7]采用穷举法, 遍历所有信道分配的可能情况, 并计算出每个信道集合的功率分配, 其算法复杂度为 $O(NKC_M^L \cdot (C_M^L-1))$. 其中, $L \leq M$ 为每个用户的子信道数; C_M^L 为在 M 个子信道中选取 L 个子信道.

综合上述分析可知: 当小区个数、子信道数和每个小区的用户数较小时, 文中算法与文献[7]的算法复杂度相近; 但是随着小区个数、子信道数和用户数增加, 文中算法的算法复杂度远远小于文献[7]的算法复杂度.

4 仿真与数值分析

仿真通过 Matlab 软件实现, 考虑 3 小区六边形蜂窝 OFDMA 下行链路系统, 小区半径为 500 m. 可用子信道数 $M=12$; 每个子信道的带宽和最大传输功率分别为 $\bar{\omega}=1$ MHz 和 $P_{\max}=0.1$ W; 每个小区的用户数相同, 即 $|\Omega_n|=K, \forall n \in \varphi$; 传输速率 $r=100$ kbit \cdot s $^{-1}$; 数据包长度 $Q=D=100$; 噪声方差 $\sigma^2=10$ pW \cdot Hz $^{-1}$. 基站与用户之间的信道考虑路径损耗和瑞利衰落, 且信道模型基于 3GPP SCM 城市微小区场景下的衰落模型, 路径损耗因子为 3.

为了验证在算法中效率函数 $\hat{f}(\gamma)$ 能够等价于传统的效率函数 $f(\gamma)$, 在 $N=3, M=6, K=3$ 条件下, 仿真了当博弈解收敛于纳什均衡点时, 各小区基站在所有子载波上的 SINR, 如图 2 所示. 由图 2 可知: 各小区每个子载波上的 SINR 均大于 0, 效率函数 $\hat{f}(\gamma)$ 等价于传统的效率函数 $f(\gamma)$.

为了验证文中算法的性能, 仿真了各小区两种算法分别消耗的总传输功率(P)和获得的传输速率(R), 如图 3 所示. 作为比较, 图 3 同时给出了注水算法所消耗的总功率和获得的传输速率.

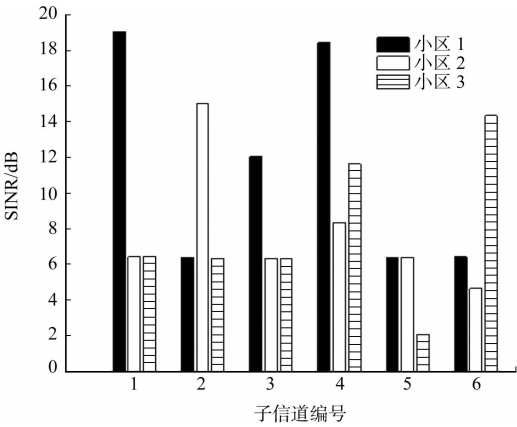


图 2 各小区基站在所有子载波上的 SINR
Fig. 2 SINR of each cell base station on all sub-channels

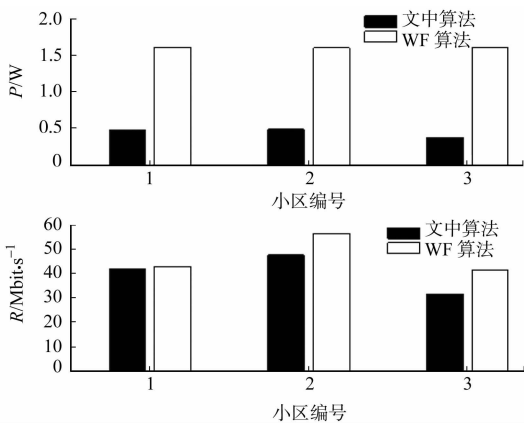


图 3 两种算法消耗的总传输功率和获得的传输速率
Fig. 3 Total power and transmission rate of two algorithms

由图 3 可以看出: 文中算法所消耗的功率远远小于注水算法所消耗的功率, 但是其获得的传输速率与注水算法相差无几. 这是因为注水算法以牺牲更多功率为代价换来个别用户的高速性, 加大对异己小区同信道用户的干扰, 使系统的整体性能下降.

图 4 仿真了文中算法、注水算法和等功率分配算法的能量效率(EE). 由图 4 可知: 文中算法的能量效率好于注水算法和等功率分配算法, 能够高效地利用资源.

综合上述图表分析可知: 文中算法有较好的性能, 突出了无线资源分配的高能效, 但是在传输速率方面有一定的减缓, 总的来说本方案是对资源分配的能量效率和传输速率的一个折中.

5 结束语

研究多小区 OFDMA 系统下行链路能量效率最大化的动态资源分配问题. 首先, 将子信道分配给其对应干扰与信道增益比最小的用户, 获得子信道分配矩阵; 然后, 根据所得的子信道分配矩阵对各子信道进行功率分配, 给出了子信道分配和功率分配联合博弈框架. 同时, 为了保证博弈解能够收敛于纳什均衡点, 引入潜在博弈的概念, 将功率分配问题建模成潜在博弈模型, 确保了纳什均衡解的收敛性. 仿真结果表明: 所提算法性能良好, 虽然一定程度上降低了传输速率, 但获得了较高的能量效率, 从而实现了能量效率和传输速率折中.

参考文献:

[1] CHARILAOS C,ZARAKOVITIS,QIANG Ni. Energy efficient designs for communication systems: Resolutions on inverse resource allocation principles[J]. IEEE Communications Letters,2013,17(12):2264-2267.

[2] WANG Yan,XU Wenjun,YANG Kewen,*et al.* Optimal energy-efficient power allocation for OFDM-based cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters,2012,9(16):1420-1423.

[3] FUDENBERG D,TIOLE J. Game theory[M]. Cambridge:MIT Press,1991:1-44.

[4] BACCI G,SANGUINETTI L,LUISE M,*et al.* A game-theoretic approach for energy-efficient contention-based synchronization in OFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2013,61(5):1258-1271.

[5] SHEN Siduo,LOK T M. Dynamic power allocation for downlink interference management in a two-tier OFDMA network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2013,62(8):4120-4125.

[6] LA Q D,CHEW Y H,SOONG B H. Performance analysis of downlink multi-cell OFDMA systems based on potential game[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2012,11(9):3358-3367.

[7] BUZZI S,COLAVOLPE G,SATURNINO D,*et al.* Potential games for energy-efficient power control and subcarrier allocation in uplink multicell OFDMA systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing,2012,6(2):89-103.

[8] XU Chao,SHENG Min,YANG Chungang,*et al.* Pricing-based multiresource allocation in OFDMA cognitive radio networks: An energy efficiency perspective[J]. Transactions on Vehicular Technology,2014,63(5):2336-2348.

[9] GAREY M R,JOHNSON D S. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness[M]. San Francisco: Bell Telephone Laboratories,1979:14-44.

[10] LIU Hui,ZHENG Wei,ZHANG Haijun,*et al.* An iterative two-step algorithm for energy efficient resource allocation in multi-cell OFDMA networks[C]// Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai: IEEE Press,2013:608-613.

[11] ZHANG Zhicai,ZHANG Haijun,LU Zhaoming,*et al.* Energy-efficient resource optimization in OFDMA-based dense femtocell networks[C]// 20th International Conference on Telecommunications. Casablanca: IEEE Press,2013:1-5.

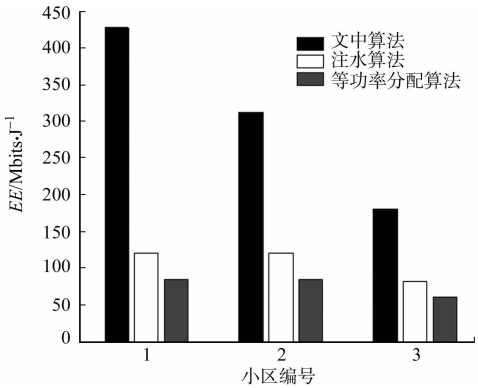


图 4 三种算法的能量效率

Fig. 4 Energy efficient of three algorithms

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)