# 基于干扰效率的认知OFDMA网络功率分配算法

张功国1,2，吴翠先1，徐勇军1,3

（1. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065；2. 重庆信科通信工程有限公司 通信工程应用新技术研究所，重庆401121；

3. 山东大学 山东省无线通信技术重点实验室，济南 250100）

摘 要：为了提高认知无线电网络的系统能量效率，同时减小对频谱授权者主用户的干扰，提出了一种新的下行传输干扰效率最大的认知正交频分多址接入(orthogonal frequency division multiplexing access, OFDMA)网络功率分配算法。干扰效率定义为次用户总的传输速率与对主用户总干扰功率的比值。由于原资源分配问题是一个非凸形式的分式规划问题，难以获得功率分配问题的解析解。利用Dinkelbach方法将原问题转换为一个凸优化问题；并利用拉格朗日对偶原理和次梯度更新算法来获得解析解。最后，仿真结果表明，该算法具有较好的收敛性能，并且在干扰效率、对主用户的干扰控制方面都优于传统能效最大的功率分配算法。

关键词：认知OFDM网络；功率分配；拉格朗日对偶；干扰效率

中图分类号：TN929 文献标志码：A

# **Interference efficiency-based power allocation for cognitive OFDMA network**

ZHANG Gongguo1,2, WU Cuixian1, XU Yongjun1,3

（1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China;

2. Chongqing Information Technology Communication Engineering Co. Ltd, Chongqing 401121, P. R. China;

3. Shandong Provincial Key Lab. of Wireless Communication Technologies, Shandong University, Jinan 250100, P. R. China）

**Abstract:** In order to improve the energy efficiency of cognitive radio networks and reduce the total interference to the primary users, this paper proposed a new interference efficiency-based maximization power allocation algorithm for downlink cognitive orthogonal frequency division multiplexing access (OFDMA) networks. Interference efficiency is defined as the total rate of secondary users over the total interference to the primary users. Since the original problem is a non-convex fractional programming problem, thus it is difficult to obtain the analytical solution for power allocation. Based on the Dinkelbach method, the original problem is firstly converted into a convex optimization problem. Then it is solved by using Lagrange dual methods and the subgradient updating methods. Lastly, simulation results show that the proposed algorithm has good convergence, and it outperforms the traditional energy efficiency maximization-based power allocation algorithm in terms of interference efficiency and the protection for primary users.

**Keywords:** cognitive OFDM networks; power allocation; Lagrange dual method; interference efficiency

**收稿日期**：2019-07-24 **修订日期**：2019-09-18 **通讯作者**: 徐勇军 xuyj@cqupt.edu.cn

**基金项目**：国家自然科学基金(61601071)；重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN201800606)； 山东省无线通信技术重点实验室开放课题(SDKLWCT-2019-04)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61601071)；The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJQN201800606)；The open research fund from Shandong Provincial Key Lab. of Wireless Communication Technologies (SDKLWCT-2019-04)

## 0 引 言

近年来，随着智能终端和无线设备的快速增长，原本稀缺的频谱资源变得越来越紧张。因此，认知无线电作为一种非常有前景的技术被提出来。该技术允许非授权用户(或称之为次用户)采用机会式方式来使用授权用户(或称为主用户)的频谱。因此，通信网络中空闲的频谱资源可以得到充分有效的再次利用，从而提高了频谱效率，解决频谱短缺问题。在认知无线电网络中，通常有三种频谱共享方式：下垫式、交织式和叠加式[1]-[3]。其中下垫式频谱共享可以允许次用户与主用户同时存在于共享频谱中，不需要感知和随机接入授权频谱。因此，下垫式频谱共享模式提高了网络传输效率，从而被广泛应用到认知无线电网络各类研究问题当中。在该模式下，其关键点在于需要保证次用户发射机到任意主用户接收机端的干扰功率满足干扰温度门限[4]。

正交频分多址接入技术(orthogonal frequency division multiplexing access ，OFDMA)是一种适合于多载波传输技术，其中可用的频带资源被划分为一系列的正交载波资源块[5]。由于该技术可以灵活的分配载波并重构载波结构，因此，将OFDMA引入到传统认知无线电网络具有非常大的优势。基于OFDMA的认知网络既可以提高频谱资源的利用率，又可以提高系统吞吐量和用户的灵活接入。但是功率控制是实现上述目标的关键。基于合作博弈理论，文献[6]提出了一种一致性功率分配算法，次用户作为中继节点帮助主用户进行传输信号。基于纳什均衡博弈论，文献[7]研究了认知OFDMA网络的信道分配和功率分配问题，使得认知无线电系统的总吞吐量最大。但是上述工作只考虑单一优化目标，没有考虑如何提高单位功率消耗下的传输速率问题。随着用户量数量的增加，如何降低功率消耗，并维持一定的性能(如，用户速率)是认知无线电领域的一个重要研究方向。为了提高系统能量效率(即，单位功率消耗下的速率)，文献[8]研究了载波分配和功率分配的次用户能效最大化的资源分配问题。文献[9]研究了基于定价策略的多资源分配问题来提高次用户的能效。文献[10]研究了考虑数据速率需求和功率约束的能效最大化问题。文献[11]利用强化学习研究了次用户网络能效最大的资源分配问题。虽然，上述工作研究了如何使得网络性能最大，但是只考虑了如何控制次用户的发射功率在干扰温度约束下，而并没有一种有效方式来如何减小对主用户的干扰。传统的能效最大优化算法虽然可以提高单位功率消耗的速率，但是没有平衡对主用户干扰功率的大小。由于基站的最大发射功率门限通常要远大于干扰温度门限，从而使得传统算法对主用户带来更多的干扰。为了平衡主用户接收到总的干扰功率与次用户总的数据速率之间的关系，基于干扰效率(即，总速率/总干扰)的优化问题在多层异构无线网络[12]和认知蜂窝网络[13]中进行了研究。然而上述方法并不能直接应用到本文所考虑的系统模型中。

为了解决上述问题，本文提出了一种新的基于干扰效率最大的功率控制算法，来提高次用户的传输速率同时，降低次用户系统总的能量消耗和减小对任意主用户接收机的干扰功率，同时保证发射功率控制在干扰温度门限值以下。本文考虑多用户下行传输的认知OFDMA网络频谱共享模型，将多用户资源分配模型描述为干扰效率最大的功率分配问题，同时考虑主用户干扰温度约束和次用户基站最大发射功率约束。基于Dinkelbach方法和拉格朗日对偶原理，将原非凸优化问题转换为凸优化问题并获得其解析解。仿真结果验证了本文算法的有效性。

## 1 系统模型

考虑一个下行传输多用户认知OFDMA网络，该网络中基站和用户都只含有单根天线。假设该认知OFDMA网络中有1个主用户基站服务M个主用户，1个次用户基站服务N个次用户，K个子载波，且。基站采用集中式频分复用的方式来对用户传输信号。次用户随机分布于主用户覆盖的网络范围内。每个载波上最多只能被一个用户所占用。次用户采用下垫式频谱共享方式来使用主用户的频谱资源，保证对主用户的干扰控制在一定的干扰温度门限下。

为了保证主用户一定的通信质量，就需要严格控制次用户所有发射机对某一个主用户接收机的干扰限定在一定的门限值下，因此满足如下约束

 (1)

（1）式中：为次用户基站分配给次用户的发射功率；表示次用户与主用户之间的信道增益；为每个主用户接收机处的干扰温度门限值。如果次用户的发射功率满足上述约束，那么主用户的通信质量将得到保护。

由于基站发射功率无法提供无穷大的能量，因此次用户的发射功率应该满足如下2个约束条件

 (2)

 (3)

（2）-（3）式中：为次用户发射功率的最大值；为子载波上的峰值发射功率门限。

根据香农容量定理，次用户的数据速率可以描述为

 (4)

（4）式中：表示次用户基站到用户的信道增益；表示接收机端的背景噪声。

 因此，基于干扰效率最大的功率分配优化问题可以描述为

 (5)

由于分式目标函数的影响，该优化问题显然是一个非凸优化问题。该分式非线性规划问题可以等价转换为一个参数辅助的非分式的形式，即



 (6)

（6）式中，可以考虑成对总干扰功率的代价因子。对于给定的，目标函数可以重新定义为如下函数

 (7)

从(7)中可以看出，当，；当，；因此很容易得到是一个关于变量的凸函数，而且在任意空间内，是一个关于的严格单调递减函数。定义最优功率为，根据分式规划最优值定理[14]，最大干扰效率满足如下关系



 (8)

因此最大干扰效率可以定义为

 (9)

显然，从(9)中式可以看出，当获得最优发射功率时，最优干扰效率也同时可以得到。

## 2 功率分配算法设计

### 2.1 小节标题

根据上述分析，问题(5)可以转换为如下凸优化问题



 (10)

因此，可以利用拉格朗日对偶分解方法来求解该问题。问题(10)的拉格朗日函数可以描述为



 (11)

（11）式中，和表示发射功率和干扰温度约束对应的拉格朗日乘子(或称之为对偶变量)。该拉格朗日函数可以写成如下分解形式



 (12)

（12）式中



 (13)

当给定确定的，问题(10)的对偶问题为



 (14)

（14）式中，对偶函数为

 (15)

显然，问题(15)成为一个两层优化问题，内层求解最优功率，外层求解拉格朗日乘子。根据Karush-Kuhn-Tucker条件[15]，最优功率可以通过求得，即

 (16)

（16）式中，。基于次梯度更新算法，拉格朗日乘子可以描述为

 (17)

 (18)

（17）-（18）式中：；表示迭代次数；和表示迭代步长。当选择合适的步长，可以保证算法快速收敛到最优值。

## 3 仿真分析

为了验证算法的有效性，本文将与传统能效最大的功率分配算法[8]对比，来验证本文算法的有效性。本文通过Matlab7.0软件对算法进行蒙特卡洛数值仿真实现。假设网络中有1个主用户基站服务2个主用户，1个次用户基站服务*N*个次用户，且次用户随机分布在主网络覆盖范围内。总子载波数量*K*=128，每个OFDM符号为1微秒长，子载波带宽为1 MHz[17]。不失一般性，采用归一化信道参数[0,1][18]，次用户基站发射功率最大值为 W，载波峰值功率门限定义为，干扰功率门限值为 W，背景噪声 W。

图1给出了在不同用户下干扰效率的收敛性能。在该场景中考虑不同数量次用户下的干扰效率性能。从图中可以看出，次用户总的干扰效率很快能达到收敛，从而验证本文算法具有很好的收敛性能。并在不同用户数量下，随着用户数量的增加，系统总的干扰效率增加。因为随着用户数量增加，总的有效数据速率和增加。另外，由于干扰门限的约束，用户数量成倍增加，使得总的系统效率并不能成倍增加。

图2给出了不同算法的干扰效率对比。在该情况下考虑含有两个次用户下的性能对比情况。从图2(a)中可以看出，本文算法在干扰效率性能方面，优于传统的能效最大的功率分配算法。因为本文算法目标函数为最大化总的干扰效率，从而在减小对主用户的干扰同时，保证用户在速率方面有所提升。而传统能效最大化算法集中在牺牲功率来提高速率，从而追求较大的能效性能。而从图2(b)中可以看出，基于能效最大的功率分配算法能够保证系统能效处于最优状态，但是本文算法同样能获得较好的能效性能，并减小对主用户的干扰。



**图1 干扰效率收敛性能**

Fig.1 Convergence performance of interference efficiency



**图2 不同算法干扰效率与能量效率对比**

Fig.2 Interference efficiency and energy efficiency under different schemes

图3给出了不同算法对主用户的干扰。从图3中可以看出，本文算法对主用户具有较小的干扰功率，而传统基于能效最大的算法具有较大的干扰功率，从而使得主用户的性能有所降低，也就是说本文算法以牺牲少量能效性能来减小对主用户的干扰，从而避免中断概率的发生。

为了验证不同用户数量对系统性能的影响，图4给出了不同用户数量下对主用户接收到的干扰功率的影响。从图中可以看出，随着次用户数量的增大，两种算法下对主用户接收机端的干扰功率随之增加。因为接入更多的用户，提高了频谱效率但是同时对当前网络存在的主用户的性能带来更多的影响。且从图中可以发现，本文算法对主用户的干扰功率要小于传统的基于能效的算法。其原因是本文所提出的基于干扰效率为目标函数的最优资源分配算法可以平衡用户传输速率的同时，尽可能的降低对主用户干扰的影响，从而有效抑制不同网络共存下跨层干扰的影响。且两种算法都不超过干扰温度门限值。



**图3 不同算法对主用户接收的干扰功率大小**

Fig.3 Received interference power at the primary receiver



**图4 不同用户数量对系统干扰功率的影响**

Fig. 4 Received interference power versus the number of secondary users

图5给出了不同用户数量下次用户网络总的干扰效率的影响。从图中可以看出，随着次用户

数量的增加，总的干扰效率增大。因为随着用户数量的增加，使得次用户网络总的传输速率增大，从而提升了干扰效率。另外由于干扰信道增益耦合和多径衰落影响，使得目标函数增加不会随着用户数量呈现线性增长关系。同时可以看出，本文所提出的算法的总的干扰效率高于传统能效的资源分配算法。因为从图4中可以看出，本文算法对主用户的干扰较小，结合(5)可知，次用户总的干扰效率随着用户数量的增加而增大。



**图5 不同用户数量对系统干扰效率的影响**

Fig.5 Total interference efficiency versus the number of secondary users

## 4 结 论

本文以提高认知网络系统能量利用率、减小对主用户的干扰角度出发，研究了认知OFDMA网络干扰效率最大目标函数下的功率分配问题。考虑主用户干扰功率约束和次用户基站发射功率约束，建立了非凸、分式优化的功率分配问题。利用Dinkelbach方法，将原问题转换为凸优化问题，并利用拉格朗日对偶分解方法获得了低计算复杂度的功率分配的解析解。仿真结果验证本文算法具有较好的收敛性能，并对主用户具有较小的干扰功率和较好的干扰效率性能。

## 致谢

## 附录

表1 系统的主要参数

Table .1 Main parameters of the system

|  |  |
| --- | --- |
| 参数符号 | 含义 |
|  | MEC服务器的最大CPU频率 |
|  | 分配给任务的CPU频率 |
|  | 处用户与之间的信道增益 |
|  | 用户的发射功率 |
|  | 基站的发射功率 |
|  | 用户与BS之间的信道带宽 |
|  | 噪声功率 |
|  | 小区间干扰功率 |

##

图1 选择性内核卷积混合连接编解码网络结构

Fig.1 Selective-kernel convolution mixed link encoder-decoder network structure



## 参考文献

[1] XU Y J, ZHAO X H, LIANG Y C. Robust power control and beamforming in cognitive radio networks: a survey[J].IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 1834-1857.

[2] ZHANG M, CUMANAN K, BURR A. Energy efficiency optimization for secure transmission in miso cognitive radio network with energy harvesting[J]. IEEE Access, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2938874, 2019.

[3] MANSUKHANI J, RAY P. Censored spectrum sharing strategy for mimo systems in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019，18（12）：5500-5510.

[4] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.

[5] XU Y J, HU Y, CHEN Q B, et al. Optimal power allocation for multiuser OFDM-based cognitive heterogeneous networks[J]. China Communications, 2017, 14(9): 52-61.

[6] XU H, LI B. Resource allocation with flexible channel cooperation in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(5): 957-970.

[7] NI Q, ZARAKOVITIS C C. Nash bargaining game theoretic scheduling for joint channel and power allocation in cognitive radio systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(1): 70-81.

[8] ILLANKO K, NAEEM M, ANPALAGAN A, et al. Energy efficient frequency and power allocation for cognitive radios in television systems[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(1): 313-324.

[9] XU C, SHENG M, YANG C, et al. Pricing-based multi resource allocation in OFDMA cognitive radio networks: an energy efficiency perspective[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(5): 2336-2348.

[10] GAO S, QIAN L, VAMAN D R. Distributed energy efficient spectrum access in cognitive radio wireless Ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10): 5202-5213.

[11] PAUL A, BANERJEE A, MAITY S P. Residual energy maximization in cognitive radio networks with Q-routing[J]. IEEE Systems Journal, doi: 10.1109/JSYS T.2019.2926120, 2019.

[12] XU Y J, LI G Q. Optimal and robust interference efficiency maximization for multicell heterogeneous networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 102406-102416.

[13] MILI M R, MUSAVIAN L. Interference Efficiency: a new metric to analyze the performance of cognitive radio networks[J] IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(4): 2123-2138.

[14] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. Management Science, 1967, 13: 492-498.

[15] XU Y J, ZHAO X H. Robust power control for underlay cognitive radio networks under probabilistic quality of service and interference constraints[J]. IET Communications, 2014, 8(18): 3333-3340.

[16] 徐勇军,胡圆,李国权,等.异构携能通信网络顽健资源分配算法[J]. 通信学报, 2019, 40(7):186-196.

XU Y J, HU Y, LI G Q, et al. Robust resource allocation algorithm for heterogeneous wireless networks with SWIPT[J]. Journal on Communications, 2019, 40(7):186-196.

[17] OLFAT M, FARROKHI R F, LIU K J. Power allocation for OFDM using adaptive beamforming over wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(3): 505-514.

[18] SETOODEH P, HAYKIN S. Robust transmit power control for cognitive radio[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(5): 915-939.

附：文献著录要求

[1] 作者.题名[C]//编者.会议文集名.出版地：出版者，出版年.起止页码.
EBERHART R C,SHI Y,WU Han-guang. Particle swarm optimization: Developments applications and resources[C]// Soul. Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation. New York: IEEE Press,2001:81-86.

[2] 著者.书名[M].版次.出版地：出版者，出版年：起止页码.
郑君里，应启珩，杨为理. 信号与系统(上册)[M].2版.北京：高等教育出版社, 2004：88-92.

[3] 作者.题名[D].保存地：保存单位，年份.

马书惠. 无线传感器网络中基于能量的关键算法研究[D].北京：北京邮电大学，2007.

[4] 责任者.标准代号，标准名称[S]. 出版地：出版者，出版年：起止页码.

全国信息与文献标准化技术委员会.文献著录：第4部分 非书资料：GB/T 3792.4—2009[S].北京：中国标准出版社，2010:3.

[5] 专利申请者.专利题名：专利国别，专利号[P].专利申报日期或公开日期.
田增山.直放站环境下蜂窝网定位方法：中国，ZL200510057365.9[P]. 2008-06-12.

[6] 作者.题名[EB/OL].（更新日期）[引用日期].获得或访问路径.

PETER Small. Stigmergic Systems[EB/OL].（2002-10-22)[2009-02-12]. http://www.Stigmergicsystems.com.

 [作者简介]

姓名（出生年− ），性别，籍贯（例如河南郑州人），博士，单位职称（例如：清华大学教授、博士生导师），主要研究方向为认知无线电、异构无线网络传输技术等。E-mail：

作者一寸免冠蓝底彩色标准照片