



一种兼顾速率公平的多用户子载波功率联合分配算法

章坚武, 金 露, 许晓荣

(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

摘 要:随着无线通信技术的迅猛发展,无线资源的需求量越来越大,用户对服务质量的要求也越来越高,因此,未来通信系统需要智能地在用户服务质量(QoS)需求和无线资源限制间进行一个有效的折中。为了提高认知无线网络频谱利用率,在可用子载波、次级用户功率预算及公平性等约束条件下,基于速率自适应(RA)准则,提出了在认知正交频分复用(OFDM)系统中兼顾速率公平的多用户子载波功率联合分配算法。该算法将子载波和功率分配分为两步,在兼顾各次级用户速率公平性的同时,最大化链路容量。仿真结果表明,该联合分配算法在系统吞吐量与次级用户速率公平性之间可以取得有效的折中。

关键词:认知无线网络;公平性;子载波分配;功率分配;速率自适应

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.04.012

A Multi-User Subcarrier Power Joint Allocation Algorithm Based on Rate Fairness

Zhang Jianwu, Jin Lu, Xu Xiaorong

(College of Telecommunication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: With the rapid development of wireless communication technology, the demand for wireless resources increases quickly, and to improve the quality of service are required by users. Therefore, the intelligence is needed to carry out an effective compromise between user quality of service(QoS) requirements and wireless resource constraints in future communication systems. In order to enhance the spectral efficiency in cognitive radio network(CRN), multi-user subcarrier power joint allocation algorithm based on rate adaptive(RA) criterion in cognitive orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) system was proposed in the constraint conditions of available subcarrier, secondary user(SU) power budget and rate fairness, with the consideration of rate fairness between SUs. This algorithm was separated into two steps with subcarrier and power allocation respectively. The proposed scheme could maximize link capacity with the consideration of the fairness among all SUs. Simulation results show that the joint allocation algorithm can get effective tradeoff between system throughput and the rate fairness of SU.

Key words: cognitive radio network, fairness, subcarrier allocation, power allocation, rate adaptive

1 引言

认知无线电通过感知周围的频谱环境发现频谱空洞,在不影响主用户正常通信的前提下,及时调整系统参数,以便次级用户合理接入已授权的频段^[1],对授权频

谱进行再利用。因此,认知无线电技术被认为是能有效解决当前无线频谱稀缺的最佳候选方案之一。OFDM(orthogonal frequency division multiplexing,正交频分复用)技术具有抗频率选择性信道衰落、高频谱利用率、高传输速率、强抗码间干扰能力等优点,因此可以认为,该技



术与认知无线电具有天然的结合优势。在认知网络中, 认知频谱可能不规则、非连续, 采用 OFDM 技术进行频谱组合或者频谱剪裁, 能有效节约零星频谱, 充分利用频谱资源^[2]。认知用户使用 OFDM 方式进行传输, 能够灵活地分配子载波及功率。子载波分配算法的研究重点是如何有效地保证次级用户间的公平性和各用户的 QoS (quality of service, 服务质量), 并且利用用户的信道差异获得尽可能大的系统总吞吐量^[3]。子载波分配算法的选取主要是在满足系统要求的条件下, 在系统吞吐量与用户公平性间取得有效折中^[4]。目前, 国内外关于多用户认知 OFDM 系统资源分配算法已有较多的研究。参考文献[5]以最大化系统容量为目标, 依照“贪婪”原理将信道状况最好的子载波分配给相应的次级用户, 再以最优的迭代注水算法完成各次级用户的功率分配。其算法偏向于满足信道条件好的用户, 忽略了网络的“边缘”用户, 因而无法保证次级用户的公平性。参考文献[6]中对子载波分配给出了理论上最优的解决方案, 该算法取得了接近理论最优的分配结果, 但未能较好地兼顾用户之间的公平性。参考文献[7,8]提出的 WSA (worst subcarrier avoiding, 避免最差子载波) 算法能使系统的容量达到较大, 但没有考虑用户间传输速率的不同, 也未兼顾用户公平性。参考文献[9]提出的 SAE 算法以及参考文献[10]中提出的算法虽然考虑了用户间的公平性, 但其系统容量却低于同类算法。基于上述算法思想, 本文提出了一种新的子载波功率联合分配算法, 不仅考虑了用户的公平性, 而且在系统容量方面也有了较大的改进和

提高。

首先, 给出了多用户认知 OFDM 系统模型; 其次, 给出了 RA (rate adaptive, 速率自适应) 准则下多用户资源分配数学模型; 然后, 给出了兼顾次级用户公平性的子载波功率联合分配算法; 最后, 给出了数值仿真。仿真结果表明, 本文所提算法在增大系统容量的同时, 也兼顾了次级用户公平性, 是一种较好的折中算法。

2 系统模型

多用户 OFDM 系统模型如图 1 所示。

在图 1 中, 假设系统中有 K 个认知用户, 第 k 个用户的传输速率为 R_k bit/符号。在认知 OFDM 发射端, K 个用户的数据被送到子载波和功率分配模块, 而后各用户在不同的子载波上进行功率分配。假设发射机已知用户所有子载波上的信道信息, 根据这些信息, 发射机为不同的用户分配不同的子载波以及每个子载波上传送的功率, 自适应调制器可以采用相应的调制方案。这些子载波和功率分配信息通过单独的控制信道传给 OFDM 接收机。

多用户 OFDM 系统的动态资源分配可分为 RA 准则和 MA (margin adaptive, 裕量自适应) 准则^[9]。本文讨论的是 RA 准则下的多用户资源分配, 即在发送功率和系统传输性能一定的前提下, 实现信息传输速率的最大化。其优化目标函数如下:

$$Cap = \max_{\rho_{k,n}, P_{k,n}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \rho_{k,n} \log \left(1 + \frac{P_{k,n} |h_{k,n}|^2}{N_0 B \Gamma / N} \right) \quad (1)$$

约束条件为:

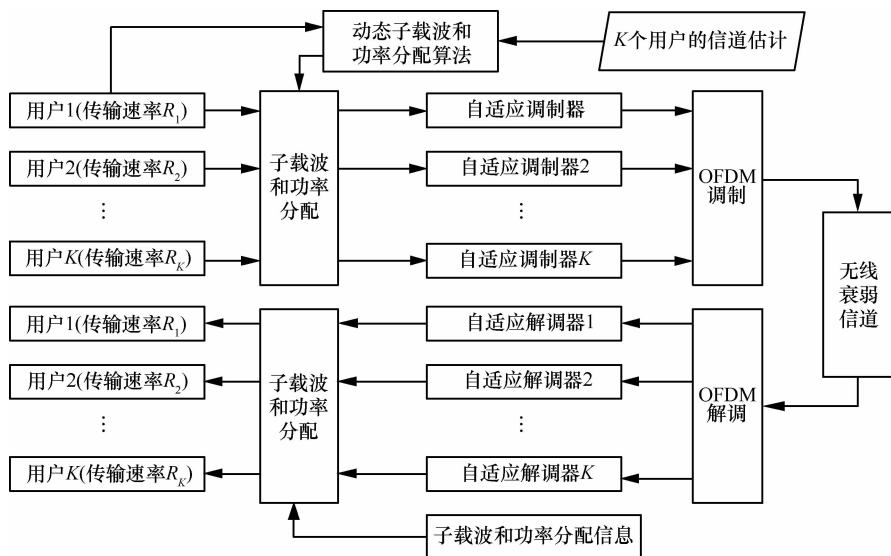


图 1 多用户 OFDM 系统模型

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} P_{k,n} \leq P_T \\ \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} = 1, \rho_{k,n} \in \{0,1\}, n \in \{1,2,\dots,N\} \\ R_1 : R_2 : \dots : R_K = r_1 : r_2 : \dots : r_K \end{cases} \quad (2)$$

在式(1)、式(2)中, Cap 表示系统传输速率(系统容量); K 表示次级用户数; N 表示一个符号可用的子载波数; N_0 是加性高斯白噪声的功率谱密度; Γ 表示与物理层编码调制关联的冗余量, 当传输误码率为 BER 、物理层编码调制方式为 MQAM 与格雷编码联合时, $\Gamma = -\ln(5BER)/1.5$; B 表示可用带宽; $P_{k,n}$ 表示用户 k 在子载波 n 上加载的功率; $h_{k,n}$ 表示用户 k 在子载波 n 上的信道增益; $\rho_{k,n}$ 的值为 1 或 0, 表示用户 k 是否占用子载波 n 。式(2)中的第 1 个约束条件表示所有载波上的发射功率之和在给定的认知用户总发射功率之内; 第 2 个约束条件表示多个用户不能共享同一个子载波, 即对于每个载波 n , 如果 $\rho_{k,n}=1$, 则 $\rho_{l,n}=0, l \neq k$; 第 3 个约束条件表示用户的传输速率之比, 以保证次级用户速率公平性。

用户 k 的速率 R_k 表述如下:

$$R_k = \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \lg \left(1 + \frac{P_{k,n} |h_{k,n}|^2}{N_0 B \Gamma / N} \right) \quad (3)$$

3 多用户子载波功率联合分配算法

本文所提的联合分配算法分为子载波分配算法和功率分配算法两步。在子载波分配算法中, 利用 WSA 算法提高系统容量, 其中速率小的用户优先分配信道条件好的子载波, 以兼顾公平性; 在功率分配算法中, 采用一种可修正注水水面且计算复杂度相对较低的功率分配算法。

为讨论方便, 在下文描述中, 将式(3)中的 $\frac{|h_{k,n}|^2}{N_0 B \Gamma / N}$ 用 $H_{k,n}$ 代替。

3.1 子载波分配算法

子载波分配算法大致可分为 4 个步骤: 第 1 步, 初始化变量; 第 2 步, 调整信道增益矩阵 H , 按每列的最小值从小到大进行调整; 第 3 步, 将调整后的信道增益矩阵分为两部分, 选择前半部分采用 WSA 算法, 避免用户使用最差子载波; 第 4 步, 按照速率小的用户优先分配信道条件好的子载波的原则, 对剩余部分进行分配, 这样就保证了次级用户的公平性。算法具体过程如下所述。

(1) 初始化: 设子载波集合 $A = \{1, 2, \dots, N\}$ 。

(2) $H_n^{\min} = \min_k H_{k,n}$, $H_n^{\min}$ 为第 n 列的最小值, 按照每列最

小值从小到大的顺序进行排列 $H_1^{\min} \leq H_2^{\min} \leq \dots \leq H_N^{\min}$, 并且调整 $H = [H_1, H_2, \dots, H_N]$ 。

(3) 对于调整后的 H 矩阵选取前 $\text{fix}(N/K/2)$ 列作为前半部分。从第一列开始, 找出该列最大值的用户下标 k^* , 若子载波数还未满足 S_k , 即 $\text{fix}(N/K/2)$, 则把该子载波分配给用户 k^* , 然后接着分配下一个子载波; 若子载波数已满足 S_k , 则寻找该列的次最大值判断是否可以分配。

For ($n=1: \text{fix}(N/K/2) \times K$)

$k^* = \arg \max |H_{k,n}|$

While $\sum_n \rho_{k,n} = S_k$

$|H_{k,n}| = 0$

$k^* = \arg \max |H_{k,n}|$

End

$\rho_{k^*,n} = 1$

End

(4) 令 $A = \{\text{fix}(N/K/2) \times K + 1, \text{fix}(N/K/2) \times K + 2, \dots, N\}$, 即取矩阵剩下部分的列下标。 Ω_k 是 ρ 矩阵中第 k 行的非零项下标的集合。

While $A \neq \Phi$

找出 $\frac{R_k}{r_k} = \min \frac{R_i}{r_i}$

对于指定的 $k, j \in \{\text{fix}(N/K/2) \times K + 1, \text{fix}(N/K/2) \times K + 2, \dots, N\}$, 找出 $|H_{k,j}| = \max |H_{k,j}|$, 对于已经确定的 k 和 n , 令 $\Omega_k = \Omega_k \cup$

$\{n\}$, $A = A - \{n\}$, $\rho_{k,n} = 1$ 并更新 $R_k, R_k = \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \lg(1 + P_{k,n} H_{k,n})$ 。

End

3.2 功率分配算法

子载波分配完毕后, 每个认知用户在已分配的子载波上进行功率分配, 将未被分配到的子载波功率设置为 0, 这样使得每个认知用户内的功率分配不会对其他用户的传输产生影响。多用户 OFDM 系统子载波功率分配就转化成了单用户子载波功率分配。快速迭代注水分配算法^[11]描述如下。

利用拉格朗日算法, 构造如式(4)所示的拉格朗日函数。

$$L = \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \lg(1 + P_{k,n} H_{k,n}) + \lambda_1 \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega} P_{k,n} - P_T \right) + \sum_{k=2}^K \lambda_k \left(\sum_{n \in \Omega_k} \lg(1 + P_{1,n} H_{1,n}) - \frac{r_1}{r_k} \sum_{n \in \Omega} \lg(1 + P_{k,n} H_{k,n}) \right) \quad (4)$$

分别对 $P_{k,n}, P_{k,m}$ 求导得:



$$\frac{\partial L}{\partial P_{1,n}} = \frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{H_{1,n}}{1 + P_{1,n}H_{1,n}} + \lambda_1 + \lambda_k \sum_{k=2}^K \frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{H_{1,n}}{1 + P_{1,n}H_{1,n}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{k,n}} = \frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{H_{k,n}}{1 + P_{k,n}H_{k,n}} + \lambda_1 - \lambda_k \cdot \frac{r_1}{r_k} \cdot \frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{H_{k,n}}{1 + P_{k,n}H_{k,n}} \quad (6)$$

令式(5)和式(6)所得导数都等于0,可以得出:

$$\frac{H_{k,m}}{1 + H_{k,m}P_{k,m}} = \frac{H_{k,n}}{1 + H_{k,n}P_{k,n}} \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^{N_k} P_{k,n} = N_k P_{k,m} + \frac{N_k}{H_{k,m}} - \sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{H_{k,n}} \leq \frac{\sum_{n=1}^{N_k} H_{k,n}}{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} H_{k,n}} P_T \quad (8)$$

$$P_{k,m} \leq \frac{1}{N_k} \left(\frac{\sum_{n=1}^{N_k} H_{k,n}}{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} H_{k,n}} P_T - \frac{N_k}{H_{k,m}} + \sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{H_{k,n}} \right) \quad (9)$$

若式(9)中右端小于0,则 $P_{k,m}=0$, 并且用 $\sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{H_{k,n}} -$

$\frac{1}{H_{k,m}}$ 代替 $\sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{H_{k,n}}$ 。

对于用户 k , 假设 $H_{k,1} \leq H_{k,2} \leq \dots \leq H_{k,N_k}$, 则分配给该用户的第1个子载波的功率为:

$$P_{k,1} = \frac{1}{N_k} \left(\frac{\sum_{n=1}^{N_k} H_{k,n}}{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} H_{k,n}} P_T - \frac{N_k}{H_{k,1}} + \sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{H_{k,n}} \right) \quad (10)$$

若 $P_{k,1} \leq 0$, 令 $P_{k,1}=0$, 分配给该用户的第2个子载波的功率为:

$$P_{k,2} = \frac{1}{N_k} \left(\frac{\sum_{n=1}^{N_k} H_{k,n}}{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} H_{k,n}} P_T - \frac{N_k - 1}{H_{k,2}} + \sum_{n=2}^{N_k} \frac{1}{H_{k,n}} \right) \quad (11)$$

直到算出 P_{k,N_k} , P_{k,N_k} 就是第 k 个用户的第 N_k 个子载波上分配的功率。

与传统的注水算法相比,该算法不需要计算所有载波上分配的功率,可以自适应地修正注水水面值,从而减小计算复杂度。

4 仿真结果与分析

将本文所提的联合分配算法与 WSA、SAE 算法进行仿真对比。图2给出了不同子载波数下不同算法的系统容量比较。参数设置为:次级用户数 $K=8$, 子载波数为 $N=16/32/$

48/64/128/256, $P_T=10$ dB, $r_1:r_2:\dots:r_K=1:1:1:\dots:1$ 。假设每个子载波的噪声功率相同,都为 $N_0=1$, $BER=10^{-5}$, 采用100次 Monte-Carlo 仿真。从图2中可以看出,在不同子载波数下,本文所提算法得到的系统容量十分接近于 WSA 算法。联合分配算法在子载波分配部分剔除了最差信道,故其系统容量会得以提升。当子载波数大于50时,本文算法得到的系统容量远远大于 SAE 算法得到的系统容量。子载波数越大,越能体现本文算法的优越性。

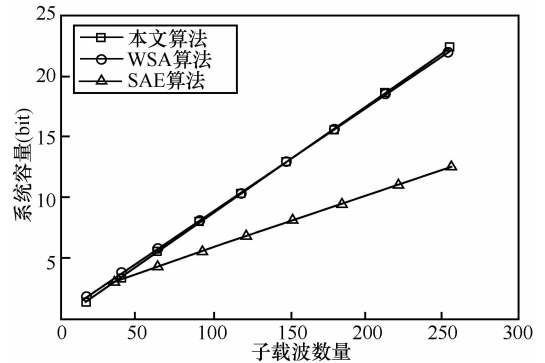


图2 不同子载波数下不同算法的系统容量

图3给出了不同算法下,系统容量随次级用户数改变的情况。其参数设置为: $K=4/6/8/10/12$, $N=64$, $P_T=10$ dB, $r_1:r_2:\dots:r_K=1:1:1:\dots:1$ 。假设每个子载波的噪声功率相同为 $N_0=1$, $BER=10^{-5}$, 采用100次 Monte-Carlo 仿真。从图3中可以看出,不同次级用户数下,由于兼顾公平性,牺牲了部分系统容量,本文所提算法稍差于 WSA 算法,但是较之 SAE 算法,有了明显的提高。

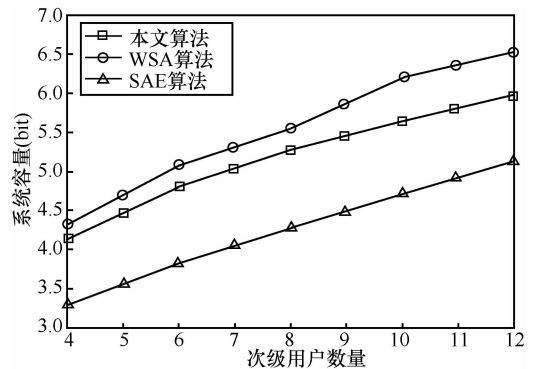


图3 不同次级用户数时不同算法的系统容量

根据方差公式 $\delta = \sum_{m=1}^M \frac{(R_m - \bar{R})^2}{M}$, 计算次级用户各自速率

R_m 与平均速率 $\bar{R}$ 的偏差。方差值越小,次级用户的公平

性越好^[12]。本文所提算法在子载波分配时,速率小的用户优先分配信道条件好的子载波,由此保证了算法的公平性。图4给出了各算法的公平性比较,本文所提算法具有折中的公平性指标,其方差性能较好。

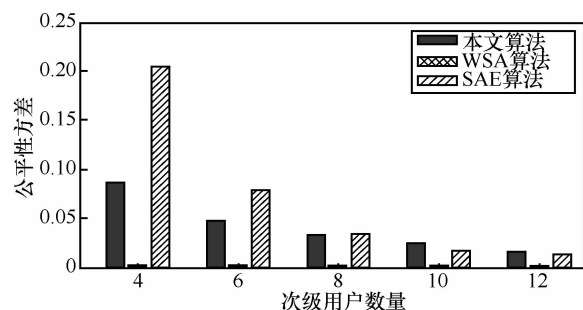


图4 各算法的公平性比较

从图2~图4的3个仿真结果中可以看出,WSA算法牺牲了公平性以获得较大的系统容量;SAE算法公平性能好,但是系统容量偏低;本文提出的算法不但兼顾公平性,而且大大提高了系统的容量。因此,可以考虑将此算法应用于认知OFDM系统中的多用户子载波功率联合分配。

5 结束语

本文主要研究了认知OFDM中兼顾用户速率公平性的多用户子载波功率联合分配问题。根据RA准则的数学模型,提出了一种子载波和功率联合分配算法。该算法兼顾各次级用户间的速率公平性,并且剔除了最差子载波,能够获得较大的系统容量。同时,功率分配采用的快速注水算法能进一步最大化系统链路容量。算法分析和仿真结果表明,本文所提算法能获得较大的系统容量且不失次级用户的公平性,可在两者之间获得有效的折中。联合分配算法适用于认知OFDM系统中进行多用户子载波功率的联合优化分配,将有较好的应用前景。

参考文献

- 1 Kang X, Liang Y C. Optimal power allocation for fading channels in cognitive radio networks: ergodic capacity and outage capacity. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(2): 940~950
- 2 周鹏. 认知无线电中基于OFDM的频谱分配方法研究. *数字通信*, 2009(4):35~38
- 3 Sun D W, Zhang B Y. A novel sub-carrier and power joint allocation algorithm for multi-user cognitive OFDM. *Proceedings of IEEE 10th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, Beijing, China, 2010:1458~1462

China, 2010:1458~1462

- 4 张冬梅,徐友云,蔡跃明. OFDMA系统中线性注水功率分配算法. *电子与信息学报*, 2007,29(6): 1286~1289
- 5 Jang J, Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(2): 171~178
- 6 Wong C Y, Tsui C Y, Cheng R, *et al.* A real-time sub-carrier allocation scheme for multiple access downlink OFDM transmission. *Proceedings of IEEE 50th Vehicular Technology Conference*, Amsterdam, 1999:1124~1128
- 7 Zhang J W, Chi J X, Xv X R. Worst subcarrier avoiding water-filling subcarrier allocation scheme for OFDM-based CRN. *Journal of Electronics (China)*, 2012,3(29): 204~210
- 8 Liu T T, Yang C Y, Yang L L. A low-complexity subcarrier-power allocationscheme for frequency-division multiple-access systems *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010,9(5): 1571~1576
- 9 薛晓洁. 多用户OFDM系统动态资源分配算法的研究及其应用. 西安电子科技大学硕士学位论文, 2008
- 10 侯利明,林孝康. 基于OFDM技术的多用户子载波分配算法. *清华大学学报*, 2009,49(4): 528~531
- 11 Sun D W, Zhang B Y, Xv X R. Multi-user cognitive OFDM with adaptive sub-carrier and power allocation. *Proceedings of 2nd International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC)*, Wuhan, China, 2010:159~163
- 12 毛旭,纪红. 认知OFDM系统的一种公平有效的多用户资源分配方案. *高技术通讯*, 2011,21(9): 910~915

[作者简介]



章坚武,男,博士后,杭州电子科技大学教授,主要研究方向为无线通信与网络信号处理等。



金露,女,杭州电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为基于CS的认知无线网络中的多用户资源分配等。

许晓荣,男,博士,杭州电子科技大学讲师,主要研究方向为认知无线网络中的资源分配与资源共享等。

(收稿日期:2013-02-27)