

认知无线电中考虑公平性的 OFDMA 资源分配策略

杨守义, 郝万明

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对认知无线电资源分配过程中出现的多认知用户资源分配不公平的问题, 提出了在保证各认知用户速率公平分配前提下实现吞吐量最大的资源分配算法. 该算法分为各认知用户子载波分配和子载波功率分配两步, 在第一步中提出了两种子载波分配方案, 两种方案根据各认知用户所要求的速率比进行子载波分配, 不同的是方案二把所有的子载波进行了分类, 从而使子载波分配更加公平; 在第二步中采用了子载波功率注水方案以实现认知用户吞吐量的最大化. 仿真结果表明了所提算法的有效性.

关键词: 认知无线电; 资源分配; 公平性

中图分类号: TN929.52 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.03.014

0 引言

随着人们对无线通信技术支持的数据传输速率要求越来越高, 根据香农信息理论^[1], 适用于无线通信的频谱资源变得日益紧张. 另一方面, 已经分配给现有很多无线系统的频谱资源却在时间和空间上存在不同程度的闲置. 基于此, MITOLA^[2]在软件无线电技术基础上提出了认知无线电技术, 认知用户(Second User; SU)可能对授权用户(Primary User; PU)存在干扰, 但只要在授权用户的干扰门限范围内, 认知用户就可以利用那些空闲的频谱, 从而有效解决频谱浪费的问题. 正交频分多址(OFDMA)系统将传输带宽划分成一系列正交的互不重叠的子载波, 把不同的子载波集分配给不同的用户实现多址, 从而实现系统资源的优化利用^[3].

多用户多载波的功率分配问题已经做了大量的研究. 文献[4]在 OFDMA 系统中放宽了各用户的公平性, 采用了非迭代算法分配子载波, 使得所有用户总的吞吐量得到最大. 文献[5]优先考虑了用户的公平性, 提出了两种算法对用户的子载波进行分配, 而后对每个子载波采用了平均功率分配. 文献[6]在认知无线电的基础上, 采用比特加载的方法实现了对各认知用户子载波的公平分配. 文献[7]在各认知用户的公平性、载波及其功

率分配上做了更细致的研究. 笔者在基于 OFDMA 的认知无线电系统中, 保证各认知用户公平性时, 提出了两种方案对认知用户的子载波进行分配, 然后采用注水算法对子载波进行功率分配, 使得认知用户吞吐量得到最大. 仿真结果表明, 所提算法使认知用户速率公平性得到了保证, 并实现了吞吐量的最大化.

1 系统的频谱模型

考虑基于 OFDMA 的认知无线电下行信道, 一个基站(Base Station; BS)给一个 PU 和多个 SU 提供服务. 频带分布如图 1 所示, PU 和 SU 频带相邻, PU 的频带宽度为 W_p Hz, 其两边各有 $N/2$ 个子载波, 每个子载波的带宽为 W_s Hz. 假设共有 M 个 SU, PU 能够承受的最大干扰容限为 I_{th} . 基站到 PU 的信道增益为 h^{BU} , 第 m 个 SU 的第 n 个子载波信道增益为 $h_{m,n}$.

2 系统的数学模型

2.1 认知用户对授权用户的干扰

假设子载波发射信号为矩形 NRZ 信号, 则第 n 个子载波的功率谱密度为^[8]

$$\varphi_{m,n}(f) = P_{m,n} T_s \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 \quad (1)$$

式中: $P_{m,n}$ 表示第 m 个 SU 中第 n 个子载波的发射

收稿日期: 2013-11-16; 修订日期: 2013-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271421)

作者简介: 杨守义(1962-), 男, 河南民权人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为信源编码、宽带无线通信(OFDM, MIMO)及图像数字水印等, E-mail: iesyyang@zzu.edu.cn.

功率; T_s 表示 OFDM 符号周期.

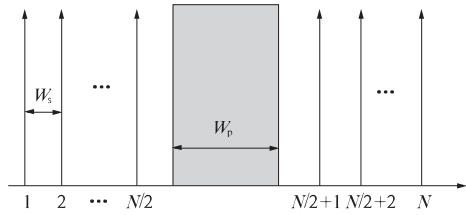


图1 基于 OFDMA 的认知无线电系统的频带分布

Fig.1 Spectrum in an OFDMA-based CR system

则此 SU 频带中第 n 个子载波上的信号对 PU 产生的干扰为^[8]

$$I_{m,n}(d_{m,n}, P_{m,n}) = P_{m,n} T_s |h^{\text{BU}}|^2 \cdot \int_{d_{m,n}-\frac{W_p}{2}}^{d_{m,n}+\frac{W_p}{2}} \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 df = P_{m,n} F_{m,n}. \quad (2)$$

式中: $d_{m,n}$ 表示第 m 个 SU 的第 n 个子载波与 PU 频带间最近的频谱距离; $F_{m,n} = T_s |h^{\text{BU}}|^2$

$\int_{d_{m,n}-\frac{W_p}{2}}^{d_{m,n}+\frac{W_p}{2}} \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 df$ 表示第 n 个子载波的干扰因子.

2.2 授权用户对认知用户的干扰

PU 信号对第 m 个 SU 频带中第 n 个子载波的干扰功率为^[8]

$$Q_{m,n}(d_{m,n}, P_{m,n}) = \int_{d_{m,n}-\frac{W_s}{2}}^{d_{m,n}+\frac{W_s}{2}} |h_{m,n}|^2 \varphi_{\text{PU}}(f) df. \quad (3)$$

式中: $\varphi_{\text{PU}}(f)$ 为 PU 信号的功率谱密度.

2.3 认知用户的传输容量

假设基站到每个 SU 的信道特性已知, 且每个子载波已获得相应的信道增益. 则第 m 个 SU 的第 n 个子载波传输速率为

$$r_{m,n} = W_s \log_2 \left(1 + \frac{P_{m,n} |h_{m,n}|^2}{\Gamma(\delta_{m,n}^2 + Q_{m,n})} \right). \quad (4)$$

式中: $\delta_{m,n}^2$ 表示加性高斯白噪声功率; Γ 为调制编码参数, 该参数表示了实际系统容量与理想容量的差距. 每个 SU 总的传输容量为

$$R_m = \sum_{n \in \Omega_m} r_{m,n}. \quad (5)$$

式中: Ω_m 表示第 m 个 SU 分配到的子载波集合.

最优目标是在 PU 允许干扰范围内, 同时各 SU 满足速率公平性的条件下, 使得 SU 总的吞吐量最大, 要解决的最优问题如下:

$$\max \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_{m,n} r_{m,n}.$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} c_{m,n} \in \{0, 1\}, \forall m, n, \\ \sum_{m=1}^M c_{m,n} = 1, \forall n, \\ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_{m,n} P_{m,n} \leq P_{\text{total}}, \\ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_{m,n} P_{m,n} F_{m,n} \leq I_{\text{th}}, \\ R_1 : R_2 : \dots : R_M = \phi_1 : \phi_2 : \dots : \phi_M, \\ P_{m,n} \geq 0, \forall m, n. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $c_{m,n}$ 为用户选择载波指数, 当其取 1 时表示第 n 个子载波分配给第 m 个 SU; 当其取 0 时则相反. 为了避免 SU 间的干扰, 每个子载波只能分配给一个 SU, 且所有的子载波必须进行分配. ϕ_m 表示第 m 个 SU 所占的归一化速率比率; P_{total} 表示 SU 所允许发射的最大总功率.

3 载波分配和功率分配优化算法

3.1 SU 子载波分配

文献[4]研究了 OFDMA 多用户资源分配问题, 给出了在保证各用户速率公平条件下其分配的子载波数目, 即每个用户分配的子载波数尽量按照它所占的速率比率进行分配:

$$N_m = \lfloor N \phi_m \rfloor. \quad (7)$$

则分配结束后剩余子载波数目为 $N_0 = N -$

$\sum_{m=1}^M N_m$. 为了使总的传输容量尽可能大, SU 应该选择所它所对应增益最大的子载波. 在具体分配时, 笔者提出了两种方案算法对子载波进行分配.

第一种: 子载波分配分为若干轮, 在每轮分配中, 所有认知用户依次分配子载波, 第 m 个认知用户分配子载波数为

$$N_m^* = \lfloor \phi_m / \phi_{\min} \rfloor. \quad (8)$$

其中, ϕ_{\min} 表示所有用户中的最小速率比率, 则在第 $K = \lfloor N_m / N_m^* \rfloor$ (m 为任意一用户即可, K 值均相同) 轮分配结束后第 m 个认知用户仍需分配的子载波数目为 $\hat{N}_m = N_m - KN_m^*$, 而后第 m 个认知用户在剩余的子载波中分配 \hat{N}_m 个子载波. 为了使总速率尽可能大, 最后剩余的 N_0 个子载波分配给它所对应的增益最大的用户. 具体的分配算方法如下:

1) Initialize:

$$\text{user}(m) = \Phi, N2(m) = \lfloor N \phi_m \rfloor, \forall m;$$

$$N1(m) = \lfloor \phi_m / \phi_{\min} \rfloor \quad \forall m, W = \sum_{m=1}^M N2$$

(m);

```

N0 = N - W, K = ⌊ N2(1)/N1(1) ⌋;
N*(m) = N2(m) - KN1(m), ∀ m;
O = {1, 2, ..., N};
2) while K > 0
    form = 1 to M
        while N1(m) > 0
            n = argmaxn ∈ O |hm,n|;
            user(m) = user(m) ∪ {n};
            O = O \ {n}, K = K - 1;
            N1(m) = N1(m) - 1;
        end
    end
end
3) form = 1 to M
    while N*(m) > 0
        n = argmaxn ∈ π |hm,n|;
        user(m) = user(m) ∪ {n};
        O = O \ {n}, N*(m) = N*(m) - 1;
    end
end
if ||O|| = 0
    break;
else
    for i = 1 to ||O||
        m = argmax |hm,0(i)|, ∀ m;
        user(m) = user(m) ∪ O(i);
    end
end
end

```

在上述算法中, $\|\cdot\|$ 表示集合 \cdot 中元素个数, $O \setminus \{\cdot\}$ 表示从集合 O 中减去元素 \cdot , 最后结果 $\text{user}(m)$ 即为每个 SU 分配到的子载波集合。

第2种:根据文献[6]可知,距离 PU 频谱近的子载波对 PU 干扰较大,则分配的功率少,传输的速率相对较小,距离 PU 频谱远的则相反。为了尽量保证各 SU 的公平性,可以先把所有子载波分成离 PU 频谱近和远两部分,用 O_1 和 O_2 来表示,即 $O_1 = \{1, 2, \dots, N/4, 3N/4 + 1, \dots, N\}$ 和 $O_2 = \{N/4 + 1, \dots, 3N/4\}$ 。为使每个 SU 分配到离 PU 不同距离的子载波相对均匀,则他们应该在每部分中分配相同的子载波数。考虑一般性,第 m 个认知用户在集合 O_1 中分配的子载波为 $N_m^1 = \left\lfloor \frac{N_m}{2} \right\rfloor$, 剩余的子载波 $N_m^2 = N_m - N_m^1$ 在集合 O_2 中分配,然后分别按照算法一把 O_1 和 O_2 中的子载波分配给各 SU。在算法一中的第2)步是按照

用户1到 M 的顺序进行分配,第1个用户首先从未分配子载波中选择它所对应的增益最大的子载波,然后用户2在剩余的子载波中进行分配,直到第 M 个 SU。为了保证各 SU 的公平性,在每两轮的分配中 SU 的次序相反,即第二轮的次序为用户 M 到用户1。这样更加保证了 SU 分配子载波时的公平性。具体算法可参照算法一。

3.2 子载波功率分配

在子载波分配完成后,式(6)的优化问题可以简化成如下:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{n=1}^N r_n. \\ & \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{n=1}^N P_n \leq P_{\text{total}}; \\ \sum_{n=1}^N P_n F_n \leq I_{\text{th}}; \\ P_n \geq 0, \forall n. \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

上述问题简化为类似单 SU 的功率分配问题,其中 r_n 和 P_n 分别表示第 n 个子载波的速率和发送功率,其他相应的多 SU 变量都降低为单 SU,该问题可通过拉格朗日方法迭代求解,过程如下:

$$\eta(P_n, \mu) = \sum_{n=1}^N r_n - \mu \left(\sum_{n=1}^N P_n F_n - I_{\text{th}} \right). \quad (10)$$

式中 μ 为拉格朗日因子。

结合式(4),令 η 对 P_n 求导等于0可得每个子载波分配的功率为

$$P_n = \frac{I_{\text{th}} + \sum_{n=1}^N \frac{F_n}{g_n}}{NF_n} - \frac{1}{g_n}. \quad (11)$$

式中 $g_n = \frac{|h_n|^2}{\Gamma(\delta_n^2 + Q_n)}$ 。通过式(11)计算出的某些

子载波上分配的功率为负值,则给具有最大负值功率的子载波分配零功率,然后对剩余的子载波进行重新迭代计算,直到所有子载波分配的功率都为非负。在得到功率分配结果后检验是否满足限制条件 $\sum_{n=1}^N P_n \leq P_{\text{total}}$,如不满足则按比例进行调整。

4 性能分析与仿真

参数设置如下:PU 带宽 $W_p = 1$ MHz,子载波带宽 $W_s = 0.3125$ MHz,符号周期 $T_s = 4 \mu\text{s}$,子载波数为64,AWGN 功率谱密度 $N_0 = 10^{-8}$ W/Hz,PU 信道增益 h^{BU} 和子载波增益 $h_{m,n}$ 为独立同分布且均值为1的瑞利衰落。假设 SU 所允许发射的

最大总功率为 $P_{total} = 1\text{ W}$, PU 所允许的最大干扰为 $I_{th} = 0.001\text{ W}$, $\Gamma = 1$.

图 2 是两种算法在不同认知用户数量下总速率变化情况. 从图 2 可以看出, 随着系统中认知用户的增多, 其总速率也在相应提高. 这是由于多用户的差异性, 即一个系统中的用户越多, 某一个子载波在所有用户都产生深衰落的可能性越少. 在认知用户数量一定的情况下, 算法一的总速率要大于算法二, 这是因为在算法二中子载波被分成两部分, 认知用户在每部分中分配子载波时的选择性变小.

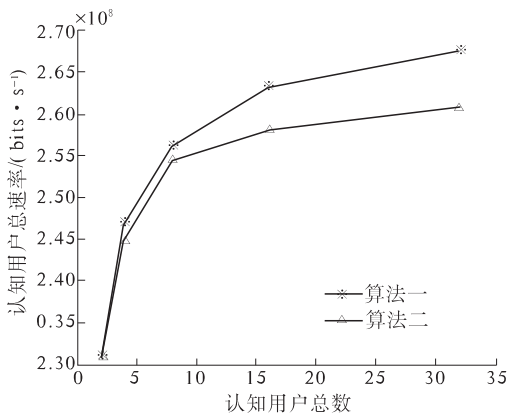


图 2 不同认知用户数量情况下的总速率
Fig. 2 Total rate under different number of the seconder users

图 3 是当认知用户数为 4 时, 两种算法下认知用户速率和公平性比较. 图 3(a) 和图 3(b) 所设定的速率比分别为 1:1:1:1 和 3:2:2:1. 由图可知, 算法二的结果更接近所设定的速率比, 公平性得到了很好的体现. 原因是算法二把各认知用户分配的子载波距主用户的距离考虑在内, 而且各认知用户在分配时的次序也相对公平. 根据以上分析得出: 当对总速率和算法复杂度要求更高时, 可以采用算法一对子载波进行分配; 当对各认知用户的公平性要求更高时, 可以采用算法二.

5 结束语

笔者研究了在基于多用户 OFDMA 的认知无线电中, 各认知用户在保证它们之间公平性下的资源分配策略. 提出了两种子载波分配算法, 在子载波功率分配中采用了经典的注水算法以实现认知用户吞吐量的最大化. 笔者所提算法的仿真结果表明了认知用户速率的公平性得到了很好的体现, 同时保证了吞吐量的最大化.

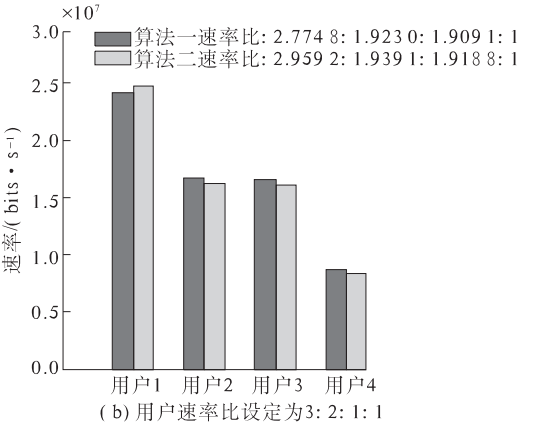
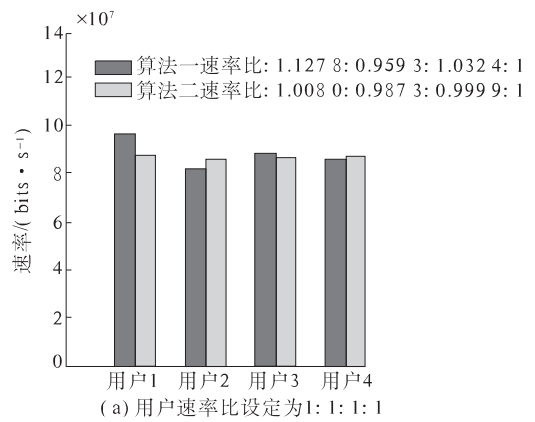


图 3 两种算法下认知用户速率和户公平性比较
Fig. 3 Comparison of the second users rate and fairness under two kinds of algorithms

参考文献:

[1] GALLAGER R G. Information theory and reliable communication [M]. NewYork: John Wiley and Sons, 1968.

[2] MITOLA J, MAGUIRE JR G Q. Cognitive radio: making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.

[3] YIN Hu-jun, SLAMOUTI S. OFDMA: A broadband wireless access technology [C]// IEEE Sarnoff Symposium. Princeton, NJ, USA; IEEE Press 2006: 1-4.

[4] WONG I C, SHEN Z, EVANS B L, et al. A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems [C]// IEEE Workshop on Signal Processing Systems. Austin, Texas, USA; IEEE Press, 2004: 1-6.

[5] OTANI Y, OHNO S, TEO K A D, et al. Subcarrier allocation for multi-user OFDM system [C]// IEEE Asia-Pacific Conference on Communications. Perth WA, Australia; IEEE Press, 2005: 1073-1077.

[6] QIN Tao, LEUNG C. Fair adaptive resource allocation for multiuser OFDM cognitive radio systems [C]// The second International Conference on Communications

and Networking in China. Shanghai, China: IEEE Press, 2007:115 – 119.

[7] SHEN Zu-kang, ANDREWS J G, EVANS B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4 (6) : 2726 – 2737.

[8] WEISS T, HILLENBRAND J, KROHN A, et al. Mutual interference in OFDM – based spectrum pooling systems [C] // IEEE Vehicular Technology Conference. Milan, Italy: IEEE Press, 2004:1873 – 1877.

Study on the Fairness of OFDMA Resource Allocation Strategy in Cognitive Radio

YANG Shou-yi, HAO Wan-ming

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: For the resource allocation unfair problem among the second users in cognitive radio, a resource allocation algorithm based on the fairness of the second users rates is proposed, and it also makes the throughput maximum. The algorithm can be divided into two steps, cognitive user subcarrier allocation and subcarrier power allocation. In the first step, two subcarrier allocation schemes are put forward, and those two schemes allocate subcarriers to cognitive users according to their rates ratio. But, the difference is that subcarriers are divided into two classes in the second scheme, and this scheme improves fairness among the users. In the second step, water-filling algorithm is used to make the throughput maximum. The simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: cognitive radio; resource allocation; fairness

(上接第 54 页)

Study of Density of Progress for Distributed Networks

LI Na-na¹, CHEN Chang-hai^{2,3}, GAN Yong¹, DING Han-qing¹

(1. School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Electrical Information Engineering, Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, China; 3. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Based on the assumption that the distance between the source transmitter and the final receiver is not infinite in distributed network, the effective transmission distance is redefined, the upper and lower bounds of the expectation of effective transmission distance and the density of progress are derived, and how the network parameters affect the density of progress is studied. Numerical and simulation results show that: the simulation value for the expectation of effective transmission distance is between its upper and lower bounds, and decreases with the angle of the region for the selection of relay; the simulation value for the density of progress, which is between its upper and lower bounds, is closer to its upper bound, and the density of progress is determined by the expectation of effective transmission distance and the maximum probability of outage.

Key words: network capacity; density of progress; probability of outage; effective transmission distance