

基于鱼群算法的认知 OFDM 资源分配算法研究

王 蔚¹, 覃锡忠¹, 贾振红¹, 牛红梅², 曹传玲²

(1 新疆大学 信息科学与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2 中国移动通信集团新疆有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘 要: 为解决认知 OFDM 系统中由于授权用户未能充分利用频谱资源而引起资源短缺的问题, 提出一种基于鱼群算法的最优资源分配策略. 根据比例公平原则分配子载波, 通过人工鱼群算法对认知用户的功率进行合理分配, 其中考虑到认知用户和授权用户互不干扰, 同时兼顾适应度函数作为判断功率分配的合理性, 实现认知 OFDM 系统的容量最大化. 实验结果表明, 该算法在认知用户对授权用户干扰小于门限值要求条件下, 保证认知用户子载波和功率分配的公平性, 有效提高频谱利用率, 实现了系统的传输速率最大化.

关键词: 认知无线电; 正交频分复用; 资源分配; 干扰约束

中图分类号: TN929

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)06-0062-05

Cognitive OFDM Optimal Resource Allocation Algorithm Based on Fish Swarm Algorithm

WANG Wei¹, QIN Xi-zhong¹, JIA Zhen-hong¹, NIU Hong-mei², CAO Chuan-ling²

(1 College of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2 China Mobile Group Xinjiang Co., Ltd., Urumqi 830063, China)

Abstract: In order to solve problems due to cognitive OFDM system authorized user underutilized spectrum resources caused by the shortage of resources, the proposed optimal resource allocation strategy based on fish swarm algorithm. According to the principle of fair distribution ratio of sub-carriers, a reasonable allocation by AFSA cognitive power users, taking into account the cognitive users and authorized users without disturbing each other, taking into account the fitness function for judging the reasonableness of power allocation to achieve cognitive OFDM system capacity is maximized. Experimental results show that the algorithm in cognitive user interference to authorized users is less than the threshold requirements under the conditions, ensure the fairness of cognitive users subcarrier and power allocation, improve spectral efficiency, to achieve the maximum transmission rate of the system.

Key words: cognitive radio; orthogonal frequency division multiplexing; resource allocation; interference constraint

1 引言

认知无线电(Cognitive Radio, CR)是一个具有智能性和灵活性的无线通信系统,能够感知外部环境进而检测周围没有被占用的空闲时段和频段,使用人工智能技术对系统参数进行改变,可以实现频谱的动态共享和分配^[1]和最佳通信性能. 正交频

分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM)已经是 4G、5G 无线通信的核心技术,同时也是 CR 的核心技术之一. OFDM 灵活选择子载波传输,从而对频谱资源进行动态分配. 频谱资源分配问题既需要认知无线电的智能检测,又需要 OFDM 的动态选择分配,认知 OFDM 结合了两者的优点,因此基于认知 OFDM 进行无线频谱资源分配是当

前研究的热点.

目前关于频谱资源分配问题已是研究热点. 文献[2]提出有关功率资源分配的算法, 进行 OFDM 的资源分配, 用朗格朗日进行目标线性化, 求解最优解, 使计算复杂度降低. 其中都考虑公平原则, 但是没有考虑到干扰门限制. 文献[3]基于速率最大化问题, 采用鱼群算法在总功率固定和公平函数的前提下进行了功率分配, 达到系统容量最大, 但是应用于 OFDM 系统中, 对于认知 OFDM 系统, 还需要考虑干扰门限. 文献[4]在 PU 不受干扰的前提时, 分别进行多种用户的子载波、功率资源分配, 从而降低算法的复杂度, 但其子载波分配不充分. 文献[5]主要通过线性注水算法分配功率. 其中也采用了子载波和功率各自进行分配. 但是文章没有考虑到公平性衡量函数和 CU 与 PU 之间的干扰门限. 文献[6]在认知无线网络中引入认知用户对授权用户的控制因子分配功率, 使系统容量趋于最优, 但是其中没有考虑授权用户对认知用户的干扰.

针对无线频谱资源分配问题, 上述文献中对公平函数和干扰门限未能给与全面的考虑, 本文提出一种基于鱼群算法进行合理分配认知用户功率的方法, 建立认知 OFDM 系统模型, 最终满足公平性因子接近 1 且系统容量进一步提升.

2 认知 OFDM 系统模型

考虑图 1 所示的 CR_OFDM 系统模型. 其中 B 为授权用户带宽, Δf 为每个子载波带宽, N 为认知用户的子载波总数. 由于采用认知 OFDM 模型, 授权用户和认知用户都会受到彼此的干扰, 其干扰大小与用户之间的频谱距离相关, 距离越大, 干扰越小, 距离越小, 干扰越大.

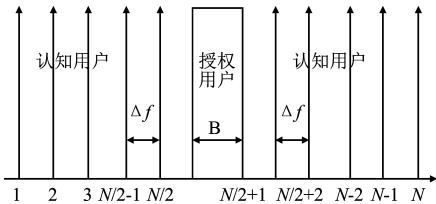


图 1 认知 OFDM 系统模型

2.1 认知用户和授权用户分别引入的干扰

假设认知用户的信道增益都服从瑞利衰落, 且 CR 已经获得每个其信道状态信息. 第 n 个子载波对授权用户的干扰:

$$I_n(d_n, p_n) = p_n T_s \int_{d_n-B/2}^{d_n+B/2} \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 df \quad (1)$$

式中, p_n 为第 n 个子载波的传输功率, T_s 为 OFDM 符号周期. $d_n = |f_n - f_0|$ 为第 n 个子载波与授权用户频段间的距离, f_0 为授权用户的频率点.

模型中 PU 对 CU 也有干扰, 其授权用户的 PSD 为 $\varphi_{PU}(f)$, 则 PU 对第 n 个子载波的干扰为

$$J_n(d_n, p_n) = \int_{d_n-B/2}^{d_n+B/2} \varphi_{PU}(f) df \quad (2)$$

2.2 系统模型转化为数学模型

系统中有 K 个 CU, 第 k 个 CU 在第 n 个子载波上的冲激响应为 $h_{k,n}$, 相应的信道增益为

$$H_{k,n} = \frac{h_{k,n}^2}{\Gamma(\sigma_n^2 + J_n)} \quad (3)$$

式中, σ_n^2 是加性高斯白噪声方差, $\Gamma = -\ln \cdot \text{BER}/1.5$, 其误码率 BER 一般都小于等于 10^{-3} . 由香农定理得, 第 k 个 CU 在第 n 个子载波的传输速率为

$$R_{k,n} = \Delta f \log_2(1 + H_{k,n} p_{k,n}) \quad (4)$$

满足以上干扰约束, 同时兼顾比例公平性原则, 认知用户所有子载波功率和小于最大约束功率, 以认知 OFDM 系统的容量最大化为目标, 可将上述约束和目标问题转化数学公式建模为

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \lambda_{k,n} \Delta f \log_2(1 + H_{k,n} p_{k,n}) \quad (5)$$

s. t.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n} \leq P_{\text{total}} \quad (a)$$

$$p_{k,n} \geq 0 \quad (b)$$

$$\sum_{n=1}^N I_n \leq I_{th} \quad (c)$$

$$\lambda_{k,n} \in \{0, 1\} \quad \forall k, n \quad (d)$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_{k,n} = 1 \quad \forall n \quad (e)$$

$$R_1 : R_2 : \dots : R_K = \theta_1 : \theta_2 : \dots : \theta_K \quad (f)$$

式中, $\lambda_{k,n} \in \{0, 1\}$ 若为 1, 则第 n 个子载波已经分配给第 k 个认知用户, 相反没有分配; (a) 和 (b) 表示各个子载波上的功率值大于 0, 且功率总和不超过总功率值; (c) 表示子载波的干扰不能超过最大门限值; (d) 和 (e) 表示每个子载波仅仅可以分配给一个认知用户; (f) 是设定了比例公平系数值. 定义公平性 G 用来衡量系统的公平性, 即:

$$G = \frac{\left(\sum_{k=1}^K \frac{R_k}{\theta_k} \right)^2}{K \sum_{k=1}^K \left(\frac{R_k}{\theta_k} \right)^2} \quad (6)$$

本文研究的模型, 其优化目标是有约束的非线

性优化,由于子载波数量过多,运用寻优的非线性算法导致计算量过大,优化复杂度高.根据优化模型中的式(5),把问题分为两步解决:(1)根据公平比值原则和等功率条件下对每个 CU 的子载波 $\lambda_{k,n}$ 进行线性分配,降低计算量,进而减小了优化目标的复杂度;(2)采用鱼群算法进行最优功率 $p_{k,n}$ 分配的求解,并将其结果与线性注水算法进行对比分析.

3 子载波分配算法

对于子载波分配前提基于等功率分配子载波数,由文献[2]可得:各个初始分配的子载波数为

$$N'_k = \left\lceil \frac{\theta_k N}{\sum_{k=1}^K \theta_k} \right\rceil, \text{初始化没有被分配子载波的个数}$$

为 $N^* = N - \sum_{k=1}^K N'_k$.子载波集合 $\Omega_N = \{1, 2, \dots, N\}$,用户集合 $\Omega_K = \{1, 2, \dots, K\}$,平均功率 $p = P_{\text{total}}/N$.

具体算法如下所示.

(1) 初始化:

$$R_k = 0, \lambda_{k,n} = 0;$$

$$\Omega_N = \{1, 2, \dots, N\}, \Omega_K = \{1, 2, \dots, K\}, p = P_{\text{total}}/N;$$

(2) 对 $k = 1, 2, \dots, K$

$$n = \operatorname{argmax}_{n \in \Omega_N} H_{k,n}, \Omega_N = \Omega_N - \{n\}, N'_k = N'_k - 1, \lambda_{k,n} = 1, C_k = C_k + (n), R_k = f \log_2(1 + p H_{k,n});$$

(3) 若 $\|\Omega_N\| > N^*$, $k = \operatorname{argmin}_{k \in \Omega_K} \frac{R_k}{\theta_k}$, $n = \operatorname{argmin}_{n \in \Omega_N} H_{k,n}$, 否则转达(5);

$$(4) \text{ 若 } N'_k > 0, N'_k = N'_k - 1, C_k = C_k + (n), \Omega_N = \Omega_N - \{n\}, R_k = R_k + \Delta f \log_2(1 + p H_{k,n})$$

否则, $\Omega_K = \Omega_K - \{k\}$, 跳转到(2);

$$(5) \text{ 对 } n = 1:N^*, k = \operatorname{argmax}_{k \in \Omega_K} H_{k,n}, \Omega_K = \Omega_K - \{k\}, C_k = C_k + (n), R_k = R_k + \Delta f \log_2(1 + p H_{k,n}).$$

通过上述算法完成子载波分配后,本文的优化问题可简化为

$$\max \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \Delta f \log_2(1 + p_{k,n} H_{k,n}) \quad (7)$$

s. t.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n} \leq P_{\text{total}} \quad (a)$$

$$p_{k,n} \geq 0 \quad \forall k, n \quad (b)$$

$$\sum_{n=1}^N I_n \leq I_{\text{th}} \quad (c)$$

$$R_1:R_2:\dots:R_K = \theta_1:\theta_2:\dots:\theta_K \quad (d)$$

4 最优功率分配

对于功率分配经典的算法为注水算法,这里介绍了线性注水算法和本文的鱼群算法.线性注水算法^[5]运用拉格朗日进行简化,再用联合方程组,进行线性计算.鱼群算法适用于非线性优化目标,更加适合优化目标函数(7),运用鱼群算法采用四种行为进行自适应分配,使得功率分配更加合理继而整个系统的传输速率最大.

人工鱼群算法收敛过程中可以跳出局部极值,更好地获取全局极值,它的操作简单、收敛速度快、使用灵活,只要给出问题的目标函数,就可以找到问题的解.人工鱼群算法是一种智能化寻优算法,是通过觅食、聚群、追尾、随机等行为在可视域中寻找最优解.

将 CR 的功率作为鱼群,目标函数方程(7)为食物浓度,假设每个 CU 初始功率 P_k 的集合为鱼群的当前状态 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,人工鱼视觉范围内所在的某状态 $X_V = (x_{1v}, x_{2v}, \dots, x_{nv})$,则该过程可以表示如下:

$$X_V = X_i + \text{visual} \cdot \text{rand}() \quad (8)$$

$$X_{\text{next}} = X_i + \frac{X_V - X_i}{\|X_V - X_i\|} \text{step} \cdot \text{rand}() \quad (9)$$

由于实际中子载波数比用户数要大得多,为了降低鱼群在所有子载波上进行最优功率分配的复杂度,每个 CU 所分配的子载波上功率根据其相应的信道增益按比例分配即

$$p_{k,n} = P_i + \frac{H_{k,n}}{\sum_{n=1}^{N_k} H_{k,n}} \quad (10)$$

考虑系统容量和用户的公平性问题,结合目标函数(7)和公平函数(6)定义适用度函数:

$$\text{fitness} = \begin{cases} \frac{\left(\sum_{k=1}^K \frac{R_k}{\theta_k}\right)^2}{K \sum_{k=1}^K \left(\frac{R_k}{\theta_k}\right)^2} \sum_{k=1}^K R_k, P_T \leq 1 \\ 0, P_T > 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $R_k = \sum_{n=1}^{N_k} \log_2(1 + H_{k,n} p_{k,n})$.

(1) 初始化:鱼群个体大小 M ,鱼移动的最大步长 $\text{step} = P_{\text{tot}}/(2 \times K)$,视野 $\text{visual} = l/M$, (l 表示最优人工鱼与其他鱼的距离和)觅食行为尝试的最大次数 try_number , delta , 最大迭代次数

MAXGEN, $gen = 1$.

(2) 觅食行为:指鱼游向食物密度大的方向的一种行为。假设当前初始状态为 X_i , 即等功率条件下进行 P_i 的初始化, X_i 在个体 i, j 之间的距离 $d_{ij} < visual = v/N$ 范围内随机生成一个状态 X_j , 若目标函数 $Y_j > Y_i$, 则按照式(8)和(9) X_i 向 X_j 的方向移动一步, 否则继续在 $visual$ 内选择状态 X_j , 若循环生成 try_number 次后 $Y_j < Y_i$, 则返回随机行为。

(3) 聚群行为:在人工鱼向量 X_i 可视范围探索其领域内 $d_{ij} < Visual$ 的鱼群的数目 n_f 及其中心位置 X_c 。若 $\frac{Y_c}{n_f} < \delta \cdot Y_i$, 表明鱼群中心的食物较多且不太拥挤, 则人工鱼按照式(8)和(9)向中心位置方向前进一步, 否则返回(2)。

(4) 追尾行为:在人工鱼 X_i 可视范围探索 $d_{ij} < Visual$ 的鱼群中 Y_j 为最大值的人工鱼 X_i 。若 $\frac{Y_j}{n_f} < \delta \cdot Y_i$, 表明人工鱼 X_j 周围的食物浓度较高且不太拥挤, 则按照式(8)和(9)朝 X_i 的方向前进一步, 否则返回(2)。

(5) 对人工鱼 X_i 分别进行觅食行为、聚集行为、追尾行为、随机行为, 对比找出最优值。

(6) 根据式(11)计算每条鱼的适应度值, 且更新公告板上的向量 X 。

(7) 判断是否满足循环条件 MAXGEN, 若满足就输出认知用户的功率分配及系统容量, 否则转到(5)。

在鱼群算法结束后输出每个用户的最优功率分配值, 再通过式(10)和目标函数求解, 最终输出系统容量的值。

5 仿真分析

为验证本文提出的基于人工鱼群功率分配算法的认知 OFDM 系统功率方法的性能, 通过仿真将其算法与线性功率分配的文献[5]进行比较。假设信道模型为 WLAN 信道, 频率选择性 6 径衰落信道。假设 T_s 、 Δf 和 B 分别为 $4 \mu s$ 、 0.3125 MHz 、 0.3125 MHz , 其最大功率约束功率为 1 W , 认知用户的误码率设为小于等于 10^{-3} , 加性高斯白噪声方差 $\sigma_n^2 = 1.2944 \times 10^{-15}$; 假设授权用户为一个, 16 个认知用户, 其中 $N=64$, J_i 与 σ_i^2 相等。给出 Γ 为 3.3, 干扰门限 $I \leq I_{th}$ 设置为 0.05。鱼群算法中 $M=100$ 个, $Try_number = 100$, $MAXGEN=50$, 拥挤度因子为 1。

图 2 是认知用户数 k 在 2~16 变化时, 本文算

法与文献[5]中算法的认知用户系统容量对比图。本文的子载波分配不仅保证了每个用户都可以分配到最优的子载波, 剩余子载波的分配保证了公平性原则且增加了合理性。再通过人工鱼群算法进行行为选择运算, 反复的运算寻找全局最优功率分配解, 从而得到更高的传输速率。文献[5]线性算法比经典注水算法高出 1.67%, 从图中可以明显看出本文算法比文献[5]算法高出 2.53%。可以得出本文算法比经典算法高出 4.37%。

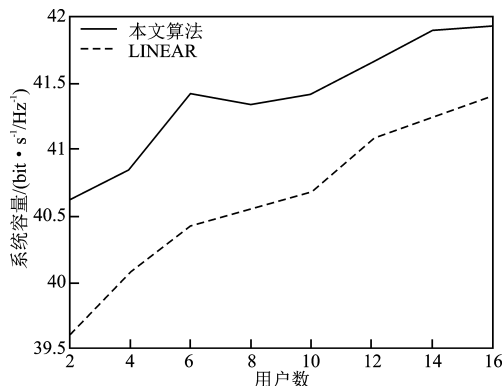


图2 两种算法系统容量的对比

图3所示为对不同用户数时两种算法的公平性对比, 由于本文算法中的剩余的子载波分配未能遵循比例分配导致公平性降低, 但鱼群算法中加入公平衡量系数, 从而提升了整体的公平性。两种算法的比例公平性, 相差不大而且都接近于1。因此, 鱼群算法进行的功率分配, 具有较好的公平性且使系统容量最大化。

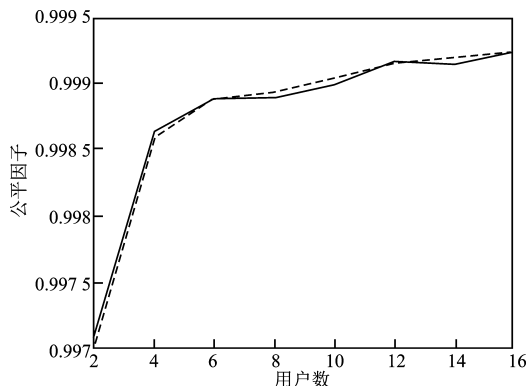


图3 公平性的对比

图4为误码率和系统传输速率的关系图。图中分别给出6个认知用户和14个认知用户, 在误码率为 $[10^{-4}, 5 \times 10^{-4}, 10^{-5}, 5 \times 10^{-5}]$ 条件下, 其对应的传输速率的变化情况。从图中可以看出, 随着误码率越小, 其传输速率随之下降。在相同的误码率条

件下,本文分配算法得到的传输速率优于文献[5]的算法。结合以上三幅图,本文算法在不干扰门限限制的条件下,不仅保证了各个用户的高容量,而且保证了用户容量的比例公平性。

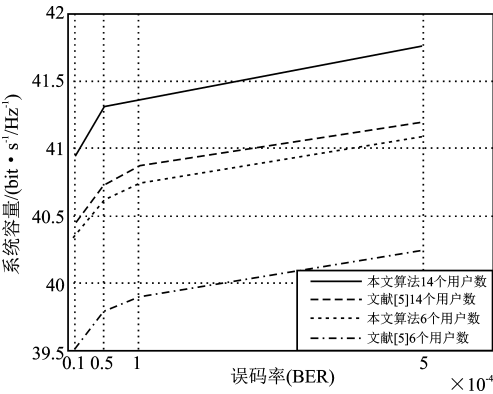


图 4 误码率与传输速率的变化曲线

6 结束语

本文研究了基于子载波和功率分配解决认知 OFDM 频谱资源分配问题,提出基于鱼群算法合理分配功率资源策略. 对于优化问题进行分步处理,采用比例值、放宽约束进行子载波分配,降低优化目标的复杂性;鱼群算法是一种对非线性问题进行全局优化智能算法,对给定目标和约束就可以找出最合适解集. 实验结果表明鱼群算法找出的最优功率分配解和线性注水算法的解相比更优,实现了系统的传输容量的提高. 对于认知无线电环境下,多个授权用户系统的资源分配还需要进一步研究.

参考文献:

[1] Wang S , Zhou Z H , Ge M, et al. Resource allocation for heterogeneous cognitive radio networks with imperfect spectrum sensing [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications ,2013 ,31(3) :464-475.

[2] 汪照,李有明,陈斌,等. 基于鱼群算法的 OFDMA 自适应资源分配 [J]. 物理学报, 2013, 62 (12): 509-515.

[3] 施伟嘉,王少尉. 基于 OFDM 的认知无线网络资源分配[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2014, 70(3): 342-349.

[4] Shen Z, 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.

[5] Sun D, Zheng B, Xu X. Multi-user cognitive OFDM with adaptive sub-carrier and power allocation[C]// Proceedings of IEEE Future Computer and Communication (ICFCC). Wuhan: IEEE Press,2010: V1-159 - V1-163.

[6] Pao W C, Chen Y F. Adaptive gradient-based methods for adaptive power allocation in OFDM-based cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(2):836-848.

作者简介:

王 蔚 女,(1989-),硕士研究生. 研究方向为认知无线网络、信号与信息处理. E-mail: wwllaj@163. com.

覃锡忠 男,(1964-),副教授,硕士生导师. 研究方向为无线通信、信号与信息处理.

贾振红 男,(1964-),教授,博士生导师. 研究方向为光通信技术、信号与信息处理.