

DOI: 10.7652/xjtuxb201708010

采用注水因子辅助搜索的能效优先子载波功率联合优化算法

伍伟伟, 许晓荣, 王云川, 曾嵘
(杭州电子科技大学通信工程学院, 310018, 杭州)

摘要: 针对认知无线网络中以频带利用率为目标进行资源分配网络能效低的问题,提出了一种采用注水因子辅助搜索的能效优先子载波功率联合优化(EF-WFAS)算法。首先,以最大化认知用户总能效作为优化目标,考虑在认知用户发射功率控制、主用户干扰功率限制和认知用户最低信息传输速率限制等多个约束条件下,构造最优化函数;然后,通过能效优先子载波分配与注水因子辅助搜索(WFAS)的功率分配求解优化函数,即根据认知用户的信道增益和能效进行子载波分配;最后,对拉格朗日乘子运用二分查找法结合 WFAS 进行以能效为目标的功率分配。EF-WFAS 优化算法可以在认知用户信息传输速率限制条件下保证系统总能效。仿真结果表明:与子载波功率平均分配算法相比,EF-WFAS 优化算法的能效提高了约 1.2 kbit/J。

关键词: 认知无线网络;能效优先;注水因子辅助搜索;子载波功率联合优化

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)08-0059-06

Joint Optimization Algorithm for Subcarrier and Power with Priority of Energy Efficiency Based on Water-Filling Factor Aided Search

WU Weiwei, XU Xiaorong, WANG Yunchuan, ZENG Rong
(College of Telecommunication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A joint optimization algorithm for subcarrier and power with priority of energy efficiency based on a water-filling factor aided search (EF-WFAS) is proposed to solve the problem of traditional spectral efficiency oriented resource allocation in cognitive radio network (CRN) that energy efficiency is in low level. Firstly, the proposed algorithm constructs a constrained optimization problem with maximization of the total energy efficiency of secondary user (SU) as an optimization objective under constraints of SU transmission power control, primary user (PU) interference power control, and limitation of minimum information transfer rate of SU. Then, the optimization problem is solved via subcarrier assignment with priority of energy efficiency and power allocation using WFAS, that is, subcarriers are assigned in accordance with SU channel gain and energy efficiency. Eventually, the optimal power allocation with energy efficiency objective is obtained by a combination of bisection search of the Lagrangian multipliers and the EF-WFAS method. The proposed algorithm guarantees the total energy efficiency under given limitation of information transfer rate of SU. Simulation results and a comparison with the subcarrier and power equal-allocation algorithm show that the proposed

收稿日期: 2016-12-21。 作者简介: 伍伟伟(1992—),男,硕士生;许晓荣(通信作者),男,博士,副教授。 基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LY15F010008);浙江省科协青年科技人才培养工程资助项目(2016YCGC009);杭州电子科技大学研究生科研创新基金资助项目(CXJJ2016035)。

网络出版时间: 2017-05-15 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170515.1954.012.html>

algorithm enhances energy efficiency by approximate 1.2 kbit/J.

Keywords: cognitive radio networks; energy efficiency; water-filling factor aided search; subcarrier and power joint optimization

频谱资源的稀缺和能量效率(energy efficiency, EE)的低下制约了通信行业的发展。在认知无线网络(cognitive radio networks, CRN)^[1-2]系统中, 认知用户(secondary user, SU)通过频谱感知^[3-4]检测主用户(primary user, PU)占用频谱的状况, 在保证PU正常工作的情况下, 动态地接入PU频谱^[5], 这种方式有效提高了频谱效率。随着研究者对CRN频谱效率研究^[6]的日趋成熟, 传统以频带利用率为目标进行CRN资源分配方案往往忽视了网络能效问题, 在提高频谱效率的同时网络能耗也迅速增大^[7-8]。认知OFDM多载波调制作为CRN物理层调制技术, 采用不连续正交子载波实现主次用户频谱共享, 同时采用主动干扰抵消、子载波加权和星座扩展等技术进行频谱旁瓣抑制以解决信号带外泄漏问题^[1]。

早期的CRN资源分配方法并未充分考虑能效问题。文献[9]研究了在宽带CRN中, 以最小化SU对PU干扰为目标, 考虑了系统吞吐量、误比特率、认知用户总功率、子载波速率和PU干扰功率、每个子载波虚警概率和漏检概率等多个约束条件, 进行功率分配和感知门限的联合优化; 文献[10]研究了在卫星CRN环境下, 以最大化信息传输量为目标, 提出一种检测门限与功率分配联合优化算法; 文献[11]在保证目标速率的条件下, 提出了一种高效的联合资源分配方案, 实现了算法性能和复杂度之间的权衡; 文献[9-11]以PU干扰功率受限^[9]或最大化信息传输速率^[10-11]为优化目标, 构造CRN子载波功率联合优化模型, 但这些研究并未考虑系统能效。

针对CRN中以单用户能效为目标的资源分配不够合理问题, 文献[12]提出了一种简单快捷的算法来解决最优化注水问题, 同时考虑了单个子信道所分配到的传输功率存在上界的约束条件和不考虑此约束条件的情况。该注水算法的改进方法比已存在的算法复杂度更低, 不需要注水水面的搜索, 而且可以更快地收敛到最优解。文献[13]提出了注水因子辅助搜索(WFAS)功率分配方法, 并采用该方法对总功率、干扰功率和最低信息传输速率限制下的能效优化模型进行了详细的分析与仿真; 通过对能效模型的转化, 并且对两个拉格朗日乘子运用二分

查找方法结合传统注水方法, 有效解决了认知用户功率优化分配问题。文献[14]借助WFAS方法, 提出了在总功率和干扰功率约束下, 以能效为目标且具有频谱感知误差情况下的功率分配算法。然而, 文献[12-14]所提注水方法均只针对单认知用户的功率分配, 而对以能效为优化目标的CRN多用户多资源联合分配算法还需要进一步探索。

本文以认知OFDM系统中的能效为目标进行多用户子载波功率的联合优化, 将WFAS方法扩展到多认知用户CRN, 提出了在实际多约束条件下采用注水因子辅助搜索的能效优先子载波功率联合优化(EE-WFAS)算法。仿真实验表明, 本文所提CRN多用户EE-WFAS算法有效保证了系统能效。

1 系统模型

图1给出了 M 个SU以能效优先进行多用户多资源联合分配与频谱共享场景。认知基站(cognitive base station, CBS)将多个分布式SU本地频谱感知进行集中式融合判决, 并将判决结果进行广播, 如果判决结果为PU正在利用该频段, 则在保证PU正常通信的条件下, SU自适应调整发射功率和占用的子载波等, 以重叠式(underlay)共享方式机会式接入PU频谱。如果CBS判决结果为PU未使用该频段, 则SU以交叉式(overlay)共享方式接入PU频谱。CRN以能效为优化目标, 在满足多个约束条件下, 进行子载波功率联合优化分配。

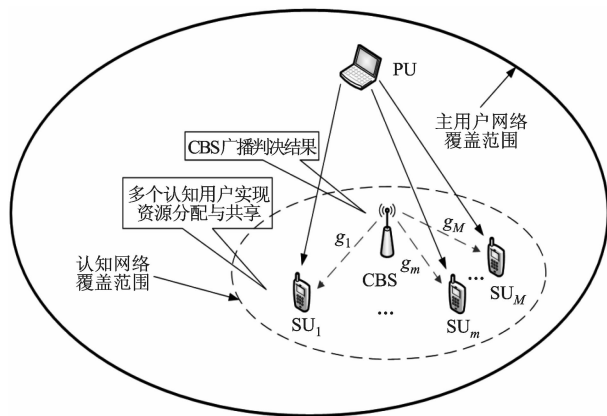


图1 M 个SU多用户多资源联合分配与频谱共享场景图

设CRN存在 L 个未被PU占用的子载波, 对于第 $m(1 \leq m \leq M)$ 个SU接收端, 其在第 $n(1 \leq n \leq$

L)个子载波上的接收信号为

$$y_{m,n} = h_{m,n}x_{m,n} + N_{m,n}^o + N_{m,n}^I \quad (1)$$

式中: $h_{m,n}$ 为第 m 个 SU 在第 n 个子载波上传输时的信道衰落因子; $x_{m,n}$ 表示第 m 个 SU 在第 n 个子载波上的发送信号; $N_{m,n}^o$ 表示第 m 个 SU 在第 n 个子载波上传输时的信道噪声; $N_{m,n}^I$ 为 PU 对第 m 个 SU 第 n 个子载波的干扰噪声,此处未对 PU 到每个 SU 载波上的增益做分析处理。记第 m 个 SU 在第 n 个子载波上传输功率为 $P_{m,n} = E(|x_{m,n}|^2)$ 。令噪声总和为 $N_{m,n} = N_{m,n}^o + N_{m,n}^I$,第 m 个 SU 在第 n 个信道传输信息时的信道增益 $g_{m,n} = |h_{m,n}|^2 / E(|N_{m,n}|^2)$ 。考虑到干扰功率对系统的影响,本文采用信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR) γ 来表示传输信号功率与总噪声(噪声与干扰)功率的比值。第 m 个 SU 在第 n 个子载波上的信息传输速率为

$$r_{m,n} = W \lg(1 + g_{m,n}P_{m,n}) \quad (2)$$

式中: $r_{m,n}$ 为信息传输速率,单位为 bit/s; W 为每个子载波的带宽,单位为 Hz。

在交叉式共享方式下,当 PU 占用第 n 个子载波时,SU 无法使用第 n 个子载波。如果第 n 个子载波未被 PU 占用,当 SU 检测出子载波 n 被 PU 占用时,则发生虚警,相应的虚警概率记为 $p_{f,m,n}$ 。此时,由于 SU 检测错误,子载波 n 判断为无法分配给第 m 个 SU,导致总的信息传输速率减小。若第 n 个子载波未被 PU 占用,则当 SU 成功进行检测时,事件的发生概率为 $1 - p_{f,m,n}$ 。根据文献[15],虚警概率 $p_{f,m,n}$ 可以表示为

$$p_{f,m,n} = p_f = \frac{\Gamma(D/2, \lambda / (2\sigma^2))}{\Gamma(D/2)} \quad (3)$$

式中: D 为影响虚警概率 $p_{f,m,n}$ 变化的自由度因子,其数值等于两倍的时间带宽积; σ^2 为方差为 1 的非中心卡方分布; λ 为判决门限; $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 为不完全伽马函数^[14]。在本文中,不失一般性,认为各 SU 对第 n 个子载波的 $p_{f,m,n}$ 值均相同(记为 p_f)。

第 m 个 SU 的总信息传输速率 R_m 和总传输功率 P_m 分别为

$$R_m = \sum_{n=1}^L \alpha_{m,n} (1 - p_f) r_{m,n} = \sum_{n=1}^L W \alpha_{m,n} (1 - p_f) \lg(1 + g_{m,n}P_{m,n}) \quad (4)$$

$$P_m = \sum_{n=1}^L \alpha_{m,n} P_{m,n} \quad (5)$$

式中: $\alpha_{m,n}$ 取值为 0 或 1, $\alpha_{m,n} = 0$ 表示子载波 n 不

配给第 m 个 SU, $\alpha_{m,n} = 1$ 表示子载波 n 分配给第 m 个 SU。由于一个子载波最多只能分配给一个 SU, 则有

$$\sum_{m=1}^M \alpha_{m,n} \leq 1 \quad (6)$$

第 m 个 SU 总功率为

$$P_{s,m} = \zeta_m P_m + P_c \quad (7)$$

式中: P_c 为电路功率; ζ_m 为产生单位传输功率所需的功率放大系数。根据式(2)和式(5),CRN 中 SU 的总信息传输速率 R 和总传输功率 P_s 分别为

$$R = \sum_{m=1}^M R_m = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^L W \alpha_{m,n} (1 - p_f) \lg(1 + g_{m,n}P_{m,n}) \quad (8)$$

$$P_s = \sum_{m=1}^M P_{s,m} = \sum_{m=1}^M \zeta_m P_m + P_c \quad (9)$$

因此,CRN 的能量效率和第 m 个认知用户的能量效率分别记作

$$\epsilon = \frac{R}{P_s} \quad (10)$$

$$\epsilon_m = \frac{R_m}{P_{s,m}} \quad (11)$$

式中: ϵ 为 CRN 系统的总能效; ϵ_m 为第 m 个认知用户的能效,单位为 bit/J。

第 m 个 SU 的能效优化模型,即目标问题 1 为

$$\max_{P_{m,n}} \epsilon_m = \frac{R_m}{\zeta_m \sum_{n=1}^L P_{m,n} + P_c} \quad (12)$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{cases} \sum_{n=1}^L \alpha_{m,n} P_{m,n} \leq P_m^{\text{th}} \\ \alpha_{m,n} \in \{0, 1\} \\ \sum_{m=1}^M \alpha_{m,n} \leq 1 \\ P_{m,n} \geq 0 \\ \sum_{m=1}^M P_m^{\text{th}} \leq P^{\text{th}} \\ \sum_{n=1}^L \alpha_{m,n} (1 - p_f) r_{m,n} \geq R_m^{\text{th}} \\ \sum_{n=1}^L \alpha_{m,n} \beta_{m,n} P_{m,n} \leq I_m^{\text{th}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: P_m^{th} 为第 m 个 SU 的传输功率阈值; P^{th} 为 M 个 SU 的总传输功率阈值; R_m^{th} 为第 m 个 SU 的最低信息传输速率阈值; I_m^{th} 为 PU 的干扰功率阈值; $\beta_{m,n}$ 为功率耗散因子。

2 子载波和功率联合优化分配算法

本文所提能效优先子载波功率联合优化(EE-WFAS)算法分为2个部分:子载波分配和WFAS分配。首先对每个SU进行子载波分配,然后对子载波分配后的SU进行WFAS功率分配。WFAS功率分配问题是以能效为目标的非凸优化问题,本文通过将非凸优化问题转化为凸优化问题进行求解。

2.1 子载波分配

假定功率平均分配在每个子载波上,令 X_m 表示第 m 个SU的子载波集合, Z 表示剩余未被分配的子载波。为了满足基本的最低传输速率要求,找出 M 个SU中信息传输速率 R_m 小于信息传输速率阈值 R_m^{th} 的SU,并且让 R_m 与信息传输速率阈值 R_m^{th} 相差最大的SU优先从剩余的子载波中选择子载波,然后找出SU到基站最佳信道条件的子载波,将该子载波分配给该SU。同时为了提高每个SU的能量效率,找出能效最低的SU和该SU对应最佳信道条件的子载波,如果使用这个子载波可以提高能效,则向该SU分配子载波。如果无法提高,则终止算法。子载波分配算法的具体步骤如下。

(1)初始化: $R_m=0, X_m=\emptyset, 1 \leq m \leq M, Z=\{1, 2, 3, \dots, L\}$ 。

(2)循环:①找出所有的 m 满足条件 $R_m^* < R_m^{\text{th}}$ 和 $R_m^* - R_m^{\text{th}} \leq R_m - R_m^{\text{th}}$ 的最优 m^* ;②找出对应 m^* 中满足条件 $g_{m^*,n}^* \geq g_{m^*,n}, n \in Z$ 最优 n^* ;③更新 $X_m^* = X_m^* \cup \{n^*\}, Z = Z - \{n^*\}, R_m^* = R_m^* + \text{lb}(1 + g_{m^*,n^*}^* P^{\text{th}}/L)$;当 $Z = \emptyset$ 或对于所有的 m 都有 $R_m \geq R_m^{\text{th}}$ 结束循环。

(3)计算: $P_m = |X_m| P^{\text{th}}/L, \epsilon_m = \frac{R_m}{\zeta_m P_m + P_c}$ 。

(4)while $Z \neq \emptyset$ do:①找出对所有的 m 满足条件 $\epsilon_m^* \leq \epsilon_m$ 的最优 m^* ;②找出对应 m^* 中满足条件 $g_{m^*,n^*}^* \geq g_{m^*,n}, n \in Z$ 最优 n^* ;③如果 $[R_m^* + \text{lb}(1 + g_{m^*,n^*}^* P^{\text{th}}/L)]/[\zeta_m(P_m^* + P^{\text{th}}/L) + P_c] \geq \epsilon_m^*$,则更新 $X_m^* = X_m^* \cup \{n^*\}, Z = Z - \{n^*\}, P_m^* = P_m^* + P^{\text{th}}/L, R_m^* = R_m^* + \text{lb}(1 + g_{m^*,n^*}^* P^{\text{th}}/L), \epsilon_m^* = R_m^*/(\zeta_m P_m^* + P_c)$;否则,跳出while循环。

(5)输出: P_m, X_m 和 ϵ_m 。

2.2 WFAS 功率分配

完成基于能量有效性的SU子载波分配后,在分配的子载波内采用二分查找法结合WFAS进行以能效为目标的功率分配。本文采用WFAS方法对 M 个SU分别进行功率分配。完成子载波分配

后,第 m 个SU能效的优化问题,即目标问题2为

$$\max_{P_{m,n}} \epsilon_m = \frac{\sum_{n \in X_m} W(1-p_f) \text{lb}(1+g_{m,n}P_{m,n})}{\zeta_m \sum_{n \in X_m} P_{m,n} + P_c} \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{n \in X_m} P_{m,n} \leq P_m^{\text{th}} \\ P_{m,n} \geq 0 \\ \sum_{n \in X_m} (1-p_f)r_{m,n} \geq R_m^{\text{th}} \\ \sum_{n \in X_m} \beta_{m,n}P_{m,n} \leq I_m^{\text{th}} \end{cases} \quad (15)$$

由于 ϵ_m 是一个关于 $P_{m,n}$ 的非凸函数,则目标问题2是一个非凸优化问题。在WFAS方法中,令限制条件集合 $S_1 = \{P_{m,n} \geq 0, \sum_{n \in X_m} \beta_{m,n}P_{m,n} \leq I_m^{\text{th}}\}$, S_1 中限制条件是关于 $P_{m,n}$ 的凸函数。构造系统信息传输速率函数为

$$R(P_m, S_1) = \max_{\substack{P_{m,n} \leq P_m^{\text{th}}, \\ n \in X_m}} \sum_{n \in X_m} W(1-p_f) \text{lb}(1+g_{m,n}P_{m,n}) \quad (16)$$

将目标问题2可以转化为以下问题^[13],即目标问题3

$$\max_{P_{m,n}} \epsilon_m(P_m, S_1) = \frac{R(P_m, S_1)}{\zeta_m P_m + P_c} \quad (17)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} P_m \leq P_m^{\text{th}} \\ R(P_m, S_1) \geq R_m^{\text{th}} \end{cases} \quad (18)$$

由于 $R(P_m, S_1)$ 是一个凸优化问题,利用卡罗需库恩塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件,结合拉格朗日乘子法,求得第 m 个SU在第 n 个子载波上的功率分配优化解为

$$P_{m,n} = \frac{W(1-p_f)}{(u + \beta_{m,n}v) \ln 2} - \frac{1}{g_{m,n}} \quad (19)$$

式中: u, v 分别为第 m 个SU的发射功率限制和干扰功率限制的拉格朗日乘子。根据功率的非负性质,功率分配的优化解 $P_{m,n}$ 应为

$$P_{m,n} = \begin{cases} P_{m,n}, & P_{m,n} \geq 0 \\ 0, & P_{m,n} < 0 \end{cases} \quad (20)$$

WFAS功率分配算法利用了 u 和 v 两个拉格朗日乘子,结合二分查找方法和注水法求出优化的功率分配结果 $P_{m,n}^*$ 和 P_m^* ,并可求出对应的 $R(P_m^*, S_1)$ 和 $\epsilon_m(P_m^*, S_1)$,进而求解出对应于每个SU的能效 $\max_{P_{m,n}} \epsilon_m$ 以及该CRN中所有 M 个SU的总能效 $\max_{P_{m,n}} \epsilon$ 。WFAS功率分配算法的步骤如下。

(1)初始化: $P_m^{\min}=0, P_m^{\max}=P_m^{\text{th}}$ 。

(2)循环:①令 $P_m = (P_m^{\min} + P_m^{\max})/2$; ②求解 u 、 $P_{m,n}$ 和 $R(P_m, S_1)$; ③如果 $R(P_m, S_1) \leq R_m^{\text{th}}$ 成立, 或者 $P_m \leq P_m^{\text{th}}$ 与 $u \geq \zeta_m R(P_m, S_1)/(\zeta_m P_m + P_c)$ 同时成立, 则 $P_m^{\min} = P_m$, 否则 $P_m^{\max} = P_m$, 当 $P_m^{\max} - P_m^{\min} < \delta_1$ 时结束循环, 其中 δ_1 表示收敛精度, 是一个很小的常数。

(3)输出: $P_{m,n}^* = P_{m,n}, P_m^* = P_m$ 。

求解信息传输速率函数 $R(P_m, S_1)$ 的具体步骤如下。

(1)初始化: $u^{\max} = W(1 - p_f) \max(g_{m,n})/\ln 2$, $u^{\min} = 0$ 。

(2)循环:①令 $u = (u^{\min} + u^{\max})/2$; ②通过二分查找方法找出满足干扰限制 $\sum_{n \in X_m} \beta_{m,n} P_{m,n} \leq I_m^{\text{th}}$ 的最小 v 值, $v > 0$; ③如果 $\sum_{n \in X_m} P_{m,n} \geq P_m$, 则 $u^{\min} = u$; 否则 $u^{\max} = u$; 当 $u^{\max} - u^{\min} < \delta_2$ 时结束循环, 其中 δ_2 表示收敛精度, 是一个很小的常数。

(3)输出: $u, P_{m,n}, R(P_m, S_1) = \sum_{n \in X_m} W(1 - p_f) \ln(1 + g_{m,n} P_{m,n})$ 。

3 仿真结果与分析

本文通过 Matlab 的仿真对认知无线电系统下能效优先 WFAS 多用户子载波功率联合分配算法的能效进行了分析。仿真参数设置如下^[9,13]: 设归一化的干扰噪声功率为 $N_0 = 1$, 每个子载波的带宽 $W = 15$ kHz, 每个 SU 的干扰阈值 $I_m^{\text{th}} = 0.2N_0$, 最低信息传输速率阈值 $R_m^{\text{th}} = 20$ kbit/s; $g_{m,n}$ 为均值为 1 的指数分布随机数; $\beta_{m,n}$ 在子载波分配以后取 $(0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 0.4, 0.2, 0.1, 0.04, 0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 0.4, 0.2, 0.1, 0.04)$ 中的前 $|X_m|$ 个数; 收敛精度 $\delta_1 = 10^{-3}, \delta_2 = 10^{-5}$ 。

图 2 给出了本文算法与子载波功率平均分配算法、传统注水法功率分配算法的 SU 能效性能比较。设 $M=8, L=64$, 自由度 $D=2$, 判决门限 $\lambda=20$, 功耗放大系数 $\zeta_m=3$, 电路功耗 $P_c=10$ W, 信干噪比 $\gamma=10$ dB。子载波功率平均分配算法在子载波分配后对每个载波的功率进行平均分配。本文算法在子载波分配之后对每个 SU 采用 WFAS 功率分配, SU 的能效得到显著提高, 能效提高了约 1.2 kbit/J。由于传统注水法未考虑 PU 干扰功率限制, 对比发现, 本文算法在对 PU 的干扰功率限制条件下有效保证了每个 SU 的能效。例如, 对于单个 SU, 本文算法同时考虑了 PU 干扰功率限制的条件, 本文

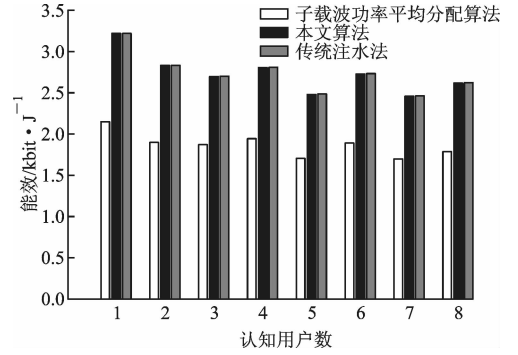


图2 不同算法下 SU 的能效比较

算法的能效较传统注水法功率分配下降了约 1.5~4 bit/J。

设自由度 $D=2, \lambda=20, \zeta_m=3, P_c=10$ W。图 3 给出了单个 SU 和多个 SU 在不同信干噪比 γ 下的总能效曲线。由图 3 可知, 当 $M=1, L=8$ 时, 对比子载波功率平均分配算法, 本文算法显著提高了系统能效。对比文献[14]单个 SU 采用 WFAS 进行功率分配的情况 ($M=1, L=8$, 即 8 个子载波均分配给单个 SU, 未考虑子载波分配情况), 单用户情况下采用本文算法进行子载波功率分配时, 在子载波分配阶段, 随着 γ 增大, 部分子载波将不分配给 SU。在 γ 较大时, 对比文献[13], 本文算法与文献[13]算法分配的子载波数不同, 从而在功率分配阶段能效相对偏低。

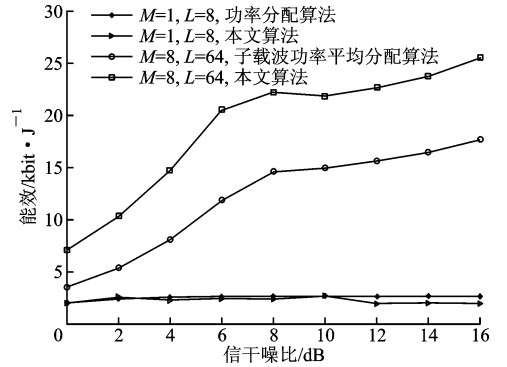


图3 单个 SU 和多个 SU 在不同算法、不同信干噪比下的总能效曲线

设定 $M=8, L=64, \zeta_m=3, P_c=10$ W, $\lambda=5$ 。图 4 所示为在不同的信干噪比时, 自由度 D 对系统总能效的影响。由于 D 和 λ 是影响虚警概率 p_f 的两个重要参数, 此处为了适度凸显自由度 D 的变化对系统能效的影响, 假设门限 $\lambda=5$ 。由 4 图可知: 在不同 γ 时, 随着自由度 D 的增大, 系统总能效先降低后提高, 当 $D=4$ 时系统总能效最低; 随着 D 的增加, p_f 呈现先增加后减少的趋势, 直接影响了系统能效的变化; 当自由度 D 一定时, 能效随着 γ 的增

加显著提高。设定 $M=8, L=64, D=2, \lambda=20$ 。图 5 描述了在不同信干噪比时, 电路功耗 P_c 与功耗放大系数 ζ_m 对系统总能效的影响。由图 5 可以看出: 当 P_c 与 ζ_m 增大时, 系统总能效均下降, 且 P_c 对总能效的影响非常显著; 当 $\zeta_m=3, P_c=10 \text{ W}$ 时, 可以获得系统最大总能效; 随着 γ 的增加, 系统总能效也显著增大。

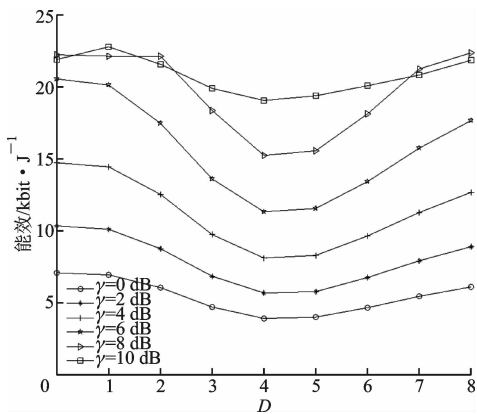


图 4 不同信干噪比下系统的总能效随自由度的变化曲线

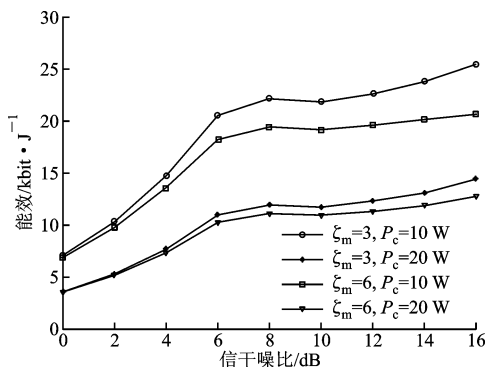


图 5 不同电路功耗与功耗放大系数下系统的总能效变化曲线

4 结 论

论文以 CRN 认知 OFDM 系统中能效为优化目标, 提出了采用注水因子辅助搜索的能效优先子载波功率联合优化 (EE-WFAS) 算法。本文所提算法首先根据信道状态和能效为每个 SU 分配子载波, 而后对 SU 采用 WFAS 进行功率分配, 最后以能效为优化目标, 利用二分查找法搜索注水因子完成功率分配。仿真表明, 与传统注水法功率分配相比, 本文所提 EE-WFAS 优化算法考虑了实际认知 OFDM 系统中多用户多约束条件下的联合子载波功率分配, 其可达能效与注水法功率分配算法基本相同; 与子载波功率平均分配方案相比, 所提方案的

能效显著提高。

参考文献:

- [1] BUDIARJO I, NIKOOKAR H, LIGHTHART L P. Cognitive radio modulation techniques [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(6): 24-34.
- [2] ZOU Y, YAO Y D, ZHENG B. Cognitive transmissions with multiple relays in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 648-659.
- [3] ZOU Y, YAO Y D, ZHENG B. Cooperative relay techniques for cognitive radio systems: spectrum sensing and secondary user transmissions [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(4): 98-103.
- [4] 张正浩, 裴昌幸, 陈南, 等. 宽带认知无线网络分布式协作压缩频谱感知算法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(4): 67-71.
ZHANG Zhenghao, PEI Changxing, CHEN Nan, et al. A sensing algorithm based on distributed cooperative compressed spectrum for wideband cognitive radio network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(4): 67-71.
- [5] LIANG Y C, CHEN K C, LI G Y, et al. Cognitive radio networking and communications: an overview [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(7): 3386-3407.
- [6] 安春燕. 认知无线网络资源管理若干关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013: 20-25.
- [7] KARMOKAR A K, NAEEM M, ANPALAGAN A. Energy-efficient subcarrier power allocation for cognitive radio networks using statistical interference model [C] // Proceedings of 2015 IEEE 26th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1121-1126.
- [8] ZHOU F, BEAULIEU N C, LI Z, et al. Energy-efficient optimal power allocation for fading cognitive radio channel: ergodic capacity, outage capacity and minimum-rate capacity [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 15(4): 2741-2755.
- [9] LIU X, JIA M, GU X. Joint optimal sensing threshold and subcarrier power allocation in wideband cognitive radio for minimizing interference to primary user [J]. China Communications, 2013, 10(11): 70-80.
- [10] 陈鹏, 邱乐德, 王宇. 卫星认知无线电检测门限与功率分配联合优化算法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(6): 31-36.

(下转第 71 页)