

基于干扰温度限制的认知正交频分复用系统功率分配算法

来啸俊, 宋广华*, 杨波威

(浙江大学 空天信息技术研究所, 杭州 310027)

(*通信作者电子邮箱 ghsong@zju.edu.cn)

摘要:在认知正交频分复用(OFDM)系统中,为避免对主用户(PU)的干扰,需要对认知用户(CU)基站的发射功率进行控制和分配。针对认知用户基站无法合理分配其发射功率及无法有效提高数据传输速率等问题,在传统注水功率分配算法的基础上,提出了一种双因子二分搜索最优功率分配算法。该算法充分考虑认知用户信道上干扰温度的限制,首先,在满足总功率限制的条件下引入剩余函数;然后,利用剩余函数的单调性,通过双层二分搜索迭代方法求得拉格朗日因子的准确值;最后,通过拉格朗日因子的值求出各子信道上所分配的功率值。仿真结果表明,所提算法能有效利用主用户频带间的频谱空穴,在总功率限制和干扰温度(IT)限制下,最大化认知用户的数据传输率,其值逼近传统注水算法。同时该算法所得到的数据传输速率比总功率平均控制算法和干扰温度平均控制算法有明显的提高,在相同仿真环境下其传输总速率超出约 4×10^5 b/s。在迭代过程中所提算法处理时间较少,并体现出良好的鲁棒性。

关键词:正交频分复用;功率分配;干扰温度;频谱空穴

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A

Power allocation algorithm in cognitive orthogonal frequency division multiplexing system based on interference temperature limit

LAI Xiaojun, SONG Guanghua*, YANG Bowei

(Institute of Space Information Technology, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: In cognitive Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems, to avoid interference to Primary Users (PU), the transmission power of Cognitive Users (CU) need to be controlled and allocated. Since the transmission power can not be allocated legitimately and the data transmission rate can not be improved effectively, a power allocation algorithm of double factor binary search optimization was proposed on the basis of traditional water-filling power allocation algorithm. In the presented algorithm, the interference temperature limit on the cognitive user channel was taken into account. Firstly, a surplus function was introduced under the total power constraints. Secondly, because of the monotonicity of the surplus function, the accurate values of Lagrangian multipliers could be attained through the double binary search iteration method. Finally, the power allocation of the sub-channels was conducted through the values of Lagrangian multipliers. The simulation results show that the proposed algorithm can effectively use the spectrum hole between primary users. The data transmission rate of the cognitive users can be maximized under both total power constraints and Interference Temperature (IT) constraints. The data transmission rate is approaching to the traditional water-filling algorithm. Compared with the total power average control algorithm and the interference temperature average control algorithm, the data transmission rate of the presented algorithm is obvious higher, which exceeds about 4×10^5 b/s under the same circumstance. Moreover, the algorithm has less processing time and reflects a good robustness.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); power allocation; interference temperature; spectrum hole

0 引言

近年来,无线通信需求高速增长,频谱占用越来越快,如何高效利用日益稀缺的频谱资源已成为无线通信领域的研究热点之一。联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)的报告表明,大部分已分配的频谱目前并没有得到充分的利用。认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术

由此诞生,其能动态利用频率资源,提高频谱效率和利用率。在认知无线电系统中,认知用户(Cognitive User, CU)检测到频谱空穴后,机会式地接入主用户(Primary User, PU)暂时没有使用的空闲频谱,并通过合理的功率分配,实现系统性能最优^[1]。由于主用户会随时改变传输状态参数,认知用户应该以灵活的多址接入方式进行数据传输。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术具有

收稿日期:2014-05-08;修回日期:2014-06-25。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61272467)。

作者简介:来啸俊(1989-),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向:无线通信资源管理及其分配; 宋广华(1968-),男,浙江海宁人,副教授,博士,主要研究方向:卫星通信、空间数据系统; 杨波威(1984-),男,湖南岳阳人,讲师,博士,主要研究方向:高性能与分布式计算、空间数据系统。

抗多径干扰能力强、频谱效率高的优点,并且能够根据频率选择性衰落信道带来的衰落情况快速调整各子载波上的调制和编码方案^[2]。因此,将 OFDM 应用于认知无线电,能够通过改变 OFDM 和数字射频等各种配置参数,关闭一些被主用户占用的子载波,以适应环境的变化,从而达到最大的传输速率。

在认知 OFDM 无线电系统中,为避免对主用户的有害干扰,认知用户的发射功率必须被控制在一定的范围内,其衡量指标是干扰温度(Interference Temperature, IT)。认知用户可根据系统中监测点的反馈信息自动调整功率,使其对主用户接收端产生的干扰小于干扰温度门限值。目前,学术界对此热点问题进行了研究:文献[3]在认知用户总功率限制和各子载波的功率限制条件下,进行功率分配,从而最大化认知用户的数据传输速率;文献[4-6]提出了在认知用户干扰温度约束下的功率分配算法。上述文献都是在局部限制条件下进行功率分配,未能对系统进行完善的建模,有一定的局限性。文献[7]引入了功率控制参数,分析了其对整个系统的影响,但未能提出具体的分配过程和算法。文献[8]提出了一种功率差值分配算法,并对其计算时间进行了仿真实验,但未能呈现认知用户的数据传输总速率。文献[9]提出了一种在最小速率要求下的功率分配算法,但未能对算法的计算复杂度作具体分析。文献[10]研究了在多用户条件下的功率分配问题,并重点研究认知用户之间的公平性,但其提出的算法未能与其他算法作出比较。

在上述研究基础上,本文提出了一种双因子二分搜索功率分配算法。该算法以最大化认知用户的数据传输速率为目标,综合考虑了发射总功率限制和干扰温度限制:首先,将功率在认知用户子信道上进行初次分配,使其满足总功率限制;其次,考虑干扰温度限制并引入干扰温度剩余函数,根据此函数的单调性将功率再次分配使其达到最小,从而完成整个分配过程。

1 认知 OFDM 系统模型

本文设计的系统模型如图 1 所示,考虑的是认知 OFDM 无线电系统的下行链路。假设一个小区内主用户基站服务主用户的同时,认知用户基站又服务 M 个认知用户,认知用户基站与认知用户之间采用 OFDM 传输机制。主用户与认知用户的频谱分布如图 2 所示。假定认知用户机会接入的频谱总带宽为 B ,并且等分为 N 个子载波,那么每个子载波所分配的带宽为 $W = B/N$ 。认知用户基站可以通过认知用户的反馈获得信道损耗参数,并利用这些参数动态调整子信道上的发射功率。

假设 δ_n^c 表示认知用户接收机第 n 个子载波上的噪声功率,该噪声包含随机噪声和主用户对该子载波的使用状况。 $|h_n^c|^2$ 表示第 n 条认知链路上的信道损耗, p_n 表示第 n 个子载波上的发送功率。若采用多进制正交幅度调制(Multiple Quadrature Amplitude Modulation, MQAM)和理想相位检测,则单个子载波上的传输速率为:

$$R_n = W \cdot \lg\left(1 + \frac{|h_n^c|^2 p_n}{\delta_n^c \eta}\right) \quad (1)$$

其中: η 为误码率(Bit Error Rate, BER)的函数,且 $\eta = -\ln(5BER)/1.5$ 。

在认知 OFDM 无线电系统中主用户与认知用户之间存在相互干扰,影响通信质量,因此需要考虑干扰温度的限制。认知用户的第 n 个子载波对主用户的干扰可表示为:

$$I_n(p_n, d_n) = p_n \int_{d_n - \frac{B_p}{2}}^{d_n + \frac{B_p}{2}} T_s t^p \left(\frac{\sin(\pi f T_s)}{\pi f T_s} \right)^2 df = p_n K_n \quad (2)$$

其中: d_n 为第 n 个子载波与主用户频带之间的距离, B_p 为主用户占用的频带宽度, T_s 为一个 OFDM 符号所持续的时间, t^p 为认知发射机与主用户接收机之间干扰链路的信道损耗, K_n 为干扰因子($K_n \geq 0$)。主用户对认知用户的第 n 个子载波的干扰可表示为:

$$J_n = \int_{d_n - \frac{W}{2}}^{d_n + \frac{W}{2}} t^{pc} E\{I_N(\omega)\} d\omega \quad (3)$$

其中: t^{pc} 为主用户发射机与认知用户接收机之间干扰链路的信道损耗, $E\{I_N(\omega)\}$ 为主用户信号的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)^[11]。

为讨论方便,设 $g_n = \frac{|h_n^c|^2}{\delta_n^c \eta}$, P_t 为认知用户发射机总功率

限制, I_{th} 为认知用户所有子载波干扰温度限制值之和,则在认知用户总功率限制和子载波干扰温度限制条件下,以认知用户传输总速率最大化为目标的动态功率分配最优化问题可如下描述,其中式(5)为约束条件:

$$\arg \max R = \sum_{n=1}^N W \cdot \lg(1 + g_n p_n) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N p_n \leq P_t \\ p_n \geq 0 \\ \sum_{n=1}^N p_n K_n \leq I_{th} \end{cases} \quad (5)$$

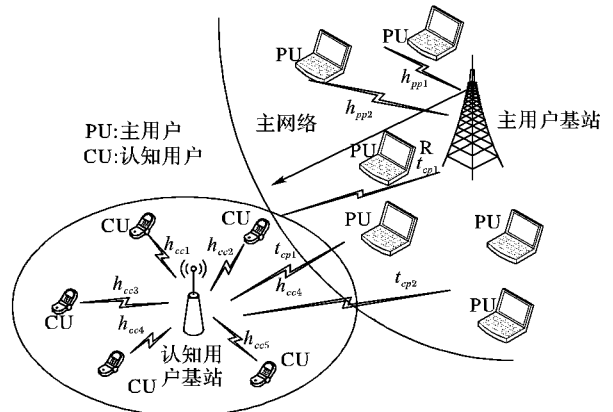


图1 主用户与认知用户共存的认知 OFDM 系统模型

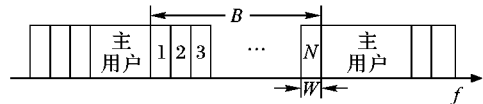


图2 主用户与认知用户占用频带示意图

2 最优化功率分配算法

2.1 双因子二分搜索最优化功率分配算法

由于式(4)是非线性凸函数,因此该问题可称为非线性凸函数不等式约束最优化问题。引入拉格朗日方程:

$$L(p_n, \alpha, \beta, \gamma_n) = \sum_{n=1}^N W \cdot \lg(1 + g_n p_n) + \alpha \left(P_t - \sum_{n=1}^N p_n \right) +$$

$$\beta(I_{th} - \sum_{n=1}^N p_n K_n) + \sum_{n=1}^N \gamma_n p_n \quad (6)$$

其中: $\alpha, \beta, \gamma_n, n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 为拉格朗日因子, 其值均非负。运用 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 最优化条件可得:

$$\alpha(P_t - \sum_{n=1}^N p_n) = 0; \quad \alpha \geq 0 \quad (7)$$

$$\beta(I_{th} - \sum_{n=1}^N p_n K_n) = 0; \quad \beta \geq 0 \quad (8)$$

$$\gamma_n p_n = 0; \quad \gamma_n \geq 0, p_n \geq 0, n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (9)$$

$$\frac{\partial L(p_n, \alpha, \beta, \gamma_n)}{\partial p_n} = \frac{W g_n}{(1 + g_n p_n) \ln 2} - \alpha - \beta K_n + \gamma_n = 0 \quad (10)$$

重新整理式(10)可得:

$$p_n = \frac{W}{(\alpha + \beta K_n - \gamma_n) \ln 2} - \frac{1}{g_n} \quad (11)$$

若 $\gamma_n > 0$, 则根据式(9)可得 $p_n = 0$, 即此子信道环境较差, 故不在此信道分配功率。因此, 各子信道上分配的最优化功率为:

$$p_n = \left[\frac{W}{(\alpha + \beta K_n) \ln 2} - \frac{1}{g_n} \right]^+ \quad (12)$$

其中 $[\cdot]^+ = \max(\cdot, 0)$ 。式(12)和传统注水功率分配算法的区别是: p_n 值由多个拉格朗日因子决定, 注水线也由 α 和 β 共同决定。因此, 最优化功率分配策略可分为4种情况: 1) 当 $\alpha = 0, \beta = 0$ 时, 总功率限制及干扰温度限制均未起作用, 说明分配的各子载波功率值小于预期条件限制; 2) 当 $\alpha > 0, \beta = 0$ 时, 总功率限制起作用, 而干扰温度限制未起作用; 3) 当 $\alpha = 0, \beta > 0$ 时, 总功率限制未起作用, 而干扰温度限制起作用; 4) 当 $\alpha > 0, \beta > 0$ 时, 总功率限制及干扰温度限制均起作用, 说明分配的各子载波功率值大于预期条件限制。

为得到最优分配的功率值, 本文提出一种双因子二分搜索算法, 可以求得准确的 α 和 β 值, 并包含上述4种情况。为解决此问题, 引入干扰温度剩余函数:

$$h(\beta) = \sum_{n=1}^N \left[\frac{W}{(\alpha(\beta) + \beta K_n) \ln 2} - \frac{1}{g_n} \right]^+ K_n - I_{th} \quad (13)$$

其中: $\alpha(\beta)$ 表示因子 α 的值由因子 β 的值唯一确定, 确定的准则是使各子载波上的功率满足总功率限制条件, 即:

$$\sum_{n=1}^N \left[\frac{W}{(\alpha(\beta) + \beta K_n) \ln 2} - \frac{1}{g_n} \right]^+ = P_t \quad (14)$$

当给定一个 β 值后, 式(14)可以看成是关于 α 的单调递减函数, 则可通过二分搜索的方式得到 α 值。如果求得 $\alpha < 0$, 由于式(7)规定的 α 值非负, 那么置 $\alpha = 0$, 说明干扰温度限制未起作用。此外, 剩余函数 $h(\beta)$ 的单调性还可由定理1得到。

定理1 剩余函数 $h(\beta)$ 是关于 β 的单调递减函数。

证明 定义 β_r 为当 $\alpha = 0$ 时式(14)的根, 由式(14)可得当 β 递增时, α 递减。当 $\beta \geq \beta_r$ 时, $\alpha < 0$ 。由于式(7)规定 $\alpha \geq 0$, 所以 α 置零后可以得到: 当 $\beta \geq \beta_r$ 时, $h(\beta)$ 随着 β 的递增而递减。当 $\beta < \beta_r$ 时, 对式(13)求导得:

$$\frac{\partial h(\beta)}{\partial \beta} = \frac{W}{\ln 2} \sum_{n \in N_\omega} \frac{-K_n(\alpha'(\beta) + K_n)}{(\alpha(\beta) + \beta K_n)^2} \quad (15)$$

其中, N_ω 表示分配功率值大于零的子信道的集合。对式(14)求导得:

$$\frac{W}{\ln 2} \sum_{n \in N_\omega} \frac{-(\alpha'(\beta) + K_n)}{(\alpha(\beta) + \beta K_n)^2} = 0 \quad (16)$$

若 $\alpha'(\beta) + K_n$ 的值均为正或者均为负, 则无法得到式(16), 因此在集合 $\{\alpha'(\beta) + K_n\}$ 中, 必存在一定数量的正值元素与负值元素。所以, 可得 $\alpha'(\beta) + \min(K_n)_{n \in N_\omega} < 0$, $\alpha'(\beta) + \max(K_n)_{n \in N_\omega} > 0$, $-\alpha'(\beta) \in (\min(K_n), \max(K_n))_{n \in N_\omega}$ 。对集合 $\{K_n\}_{n \in N_\omega}$ 升序排列, 新序列定义为 $\{t_n, n = 1, 2, \dots, |N_\omega|\}$, 则 $t_1 = \min(K_n)_{n \in N_\omega}, t_{|N_\omega|} = \max(K_n)_{n \in N_\omega}$, $-\alpha'(\beta) \in (t_1, t_{|N_\omega|})$ 。假设 $t_j < -\alpha'(\beta) \leq t_{j+1}$, 则当 $n = 1, 2, \dots, j$ 时, $\alpha'(\beta) + t_n < 0$; 当 $n = j+1, j+2, \dots, |N_\omega|$ 时, $\alpha'(\beta) + t_n \geq 0$ 。可得:

$$\begin{aligned} \frac{dh(\beta)}{d\beta} &= \frac{W}{\ln 2} \sum_{n \in N_\omega} \frac{-t_n(\alpha'(\beta) + t_n)}{(\alpha(\beta) + \beta t_n)^2} < \\ \frac{W}{\ln 2} \left(\sum_{n=1}^j \frac{-t_{j+1}(\alpha'(\beta) + t_n)}{(\alpha(\beta) + \beta t_n)^2} + \sum_{n=j+1}^{|N_\omega|} \frac{-t_{j+1}(\alpha'(\beta) + t_n)}{(\alpha(\beta) + \beta t_n)^2} \right) &= \\ -\frac{W t_{j+1}}{\ln 2} \sum_{n \in N_\omega} \frac{-(\alpha'(\beta) + t_n)}{(\alpha(\beta) + \beta t_n)^2} &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

所以当 $\beta < \beta_r$ 时, $h(\beta)$ 随 β 值递增而递减, 因此 $h(\beta)$ 是关于 β 的单调递减函数。证毕

具体算法步骤描述如下。

算法: 双因子二分搜索最优化功率分配算法。

输入: $\beta_l = 0, \beta_r$ 为 $\alpha = 0$ 时式(13)的根, $\beta_m \leftarrow \frac{\beta_l + \beta_r}{2}$ 。

输出: α_m 和 β_m 。

具体流程:

步骤1 如果 $\beta_r - \beta_l > \xi$, 则算法继续; 否则算法结束。

1) 将 β_m 值代入式(14), 并使用二分搜索求出对应的 α_m , 搜索精度为 ϕ 。

2) 将 β_r 值代入式(14), 并使用二分搜索求出对应的 α_r , 搜索精度为 ϕ 。

步骤2 将 α_m 和 β_m 的值代入式(13), 求出 $h(\beta_m)$; 将 α_r 和 β_r 的值代入式(13), 求出 $h(\beta_r)$ 。

步骤3 若 $h(\beta_m) \cdot h(\beta_r) \geq 0$, 则 $\beta_r \leftarrow \beta_m, \beta_m \leftarrow \frac{\beta_l + \beta_r}{2}$;

若 $h(\beta_m) \cdot h(\beta_r) < 0$, 则 $\beta_l \leftarrow \beta_m, \beta_m \leftarrow \frac{\beta_l + \beta_r}{2}$ 。更新 β 值后返回步骤1, 重新判断。

2.2 算法复杂度分析

双因子二分搜索算法包含两层循环迭代: 步骤1为外层循环, 通过二分搜索求得干扰温度限制因子 β 的值, 复杂度为 $O(\lceil \Delta\beta/\xi \rceil)$, 其中 $\Delta\beta$ 为初始上下界所确定的 β 值的搜索范围, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号。步骤1的1)和2)为并列的两个内层循环, 步骤1的1)在确定 β_m 值后运用二分搜索求得对应的 α_m 值, 复杂度为 $O(\lceil \Delta\alpha_m/\phi \rceil)$, 其中 $\Delta\alpha_m$ 为初始上下界所确定的 α_m 值的搜索范围; 步骤1的2)在确定 β_r 值后运用二分搜索求得对应的 α_r 值, 复杂度为 $O(\lceil \Delta\alpha_r/\phi \rceil)$, 其中 $\Delta\alpha_r$ 为初始上下界所确定的 α_r 值的搜索范围。因此, 本文算法总体复杂度 $O(\lceil \Delta\beta/\xi \rceil \cdot (\lceil \Delta\alpha_m/\phi \rceil + \lceil \Delta\alpha_r/\phi \rceil))$ 。

二分搜索具有收敛速度快、步长稳定等优点, 本文算法运用双层二分搜索来确定拉格朗日因子值, 计算过程中的复杂度较低。当所分配的子信道数目较大时, 效果更加明显。

3 仿真结果及分析

本节对提出的双因子二分搜索功率分配算法进行仿真实验,仿真软件为 Matlab R2009b,所有实验均在一个配备英特尔奔腾处理器(主频为 2.4 GHz)的 PC 上完成。仿真环境参数设置如下:认知用户分配的频谱总带宽(B)为 1 MHz,子载波数目(N)为 32 个,子载波上的噪声功率(δ_n^2)为 0.01 W,系统误比特率(BER)为 0.001,干扰因子(K_n)为服从 0 至 1 间的均匀分布随机数,每个子载波信道损耗参数($|h_n^c|^2$)为服从均值为 1 的瑞利分布随机数。

仿真实验中,在确定 β 初值后先通过二分搜索求出对应 α 的值。由于剩余函数 $h(\beta)$ 是关于 β 的单调递减函数,因此可再次通过二分搜索确定 β 的准确值。最后通过 α 和 β 的值求出各子信道上所分配的功率值。仿真过程中具体的功率分配迭代过程如下所示:

步骤 1 初始化。 $\beta_i = 0, \xi > 0, \varphi > 0, \beta_r$ 为 $\alpha = 0$ 时式 (13) 的根, $\beta_m = (\beta_i + \beta_r)/2$ 。

步骤 2 迭代分配。

- 1) while $\beta_r - \beta_i > \xi$
- 2) do 通过式 (14) 用二分法分别求得 α_m 和 α_r
- 3) do 通过式 (13) 分别求得 $h(\beta_m)$ 和 $h(\beta_r)$
- 4) if $h(\beta_m) \cdot h(\beta_r) \geq 0$
- 5) then $\beta_r \leftarrow \beta_m, \beta_m \leftarrow (\beta_i + \beta_r)/2$
- 6) else $\beta_i \leftarrow \beta_m, \beta_m \leftarrow (\beta_i + \beta_r)/2$
- 7) return α_m 和 β_m

步骤 3 通过 α_m 和 β_m 的值求出 p_n 。

图 3 给出了在不同约束限制环境下认知用户数据传输速率性能比较曲线。其中认知用户发射机总功率限制 P_t 取值范围为 5 ~ 12 W, 干扰温度限制值 I_{th} 分别取 1.8 W、2.0 W 和 2.2 W。图中看出:当总功率限制值 P_t 一定时,干扰温度限制值 I_{th} 越大,数据传输总速率越大;当 I_{th} 一定时,在初始阶段,随着 P_t 值的增大,数据传输总速率增加明显(干扰温度限制不起作用);随着 P_t 值的进一步增加,由于受到干扰温度限制,数据传输总速率趋于平缓 and 稳定,最终达到最大值。

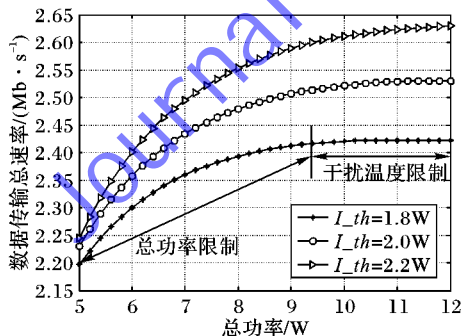


图3 本文算法在不同总功率限制与不同干扰温度限制下的性能

图 4 给出了本文提出的算法与其余三种功率分配算法的数据传输速率对比。其中认知用户发射机总功率限制 P_t 取值范围为 5 ~ 10 W, 干扰温度限制值 $I_{th} = 2$ W。从图 4 中可以看出,经典注水算法在寻求功率分配最优解时,只考虑总功率约束,而未考虑干扰温度约束,所得到的数据传输总速率随总功率限制值的增加呈近似线性增长趋势。而本文算法充分考虑了干扰温度容限这一约束条件,当 P_t 值较小时,干扰温度

限制不起作用,所得的数据传输速率接近经典注水功率算法;当 P_t 值较大时,干扰温度限制起作用,数据传输速率增长幅度变缓,最终趋于饱和。当 $P_t = 6$ W 时,经典注水算法所得数据传输总速率为 $R_{wf} = 2.52$ Mb/s,本文算法所得数据传输总速率为 $R_{dbs} = 2.42$ Mb/s,认知用户损失数据传输量约占总传输量的 3.97%;当 $P_t = 9$ W 时,经典注水算法所得数据传输总速率为 $R_{wf} = 3.01$ Mb/s,本文算法所得到的数据传输总速率为 $R_{dbs} = 2.56$ Mb/s,认知用户损失数据传输量约占总传输量的 15.0%。因此,本文算法所得到的数据传输速率逼近经典注水算法,且算法更加符合真实的认知 OFDM 无线电系统的传输条件约束。

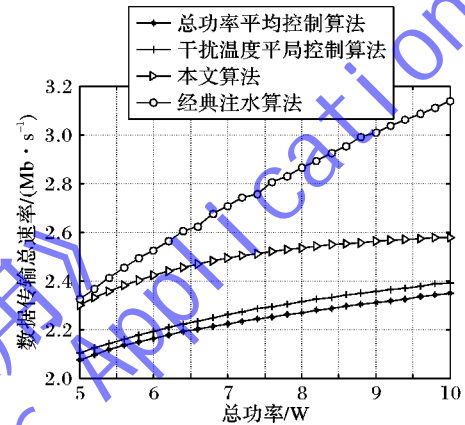


图4 本文算法与其余三种算法的数据传输速率对比

图 4 还给出了本文算法与总功率平均控制算法^[12]及干扰温度平均控制算法^[12]的数据传输速率比较曲线。总功率平均控制算法的核心思想是:在干扰温度限制的条件下进行发射功率分配,然后将每个子载波上分配的功率值与 P_t/N 值比较,若超出则按 $p_n = P_t/N$ 分配;干扰温度平均控制算法的核心思想是:在总功率限制的条件下进行发射功率分配,然后将每个子载波上分配的功率值与 I_{th}/N 值比较,若超出则按 $p_n = I_{th}/N$ 分配。此两种算法的实质是采用单因子限制条件进行功率分配,在判断子载波功率值时损失部分发射功率,从而影响数据传输总速率。从图 4 中看出,本文算法所得到的数据传输总速率比上述两种算法有明显的提高,在相同 P_t 值下传输速率超出约 4×10^5 b/s。

图 5 给出了剩余函数收敛性曲线示意图。其中认知用户发射机总功率限制 $P_t = 5$ W, 干扰温度限制值 $I_{th} = 1.5$ W。图中横坐标为迭代次数,纵坐标为剩余函数的绝对值,即 $|h(\beta)|$ 。每经过一次迭代,拉格朗日因子 α 和 β 的值得到更新,子载波上的功率根据子信道的繁忙程度重新进行最优分配。从图中可以看出:当迭代次数小于 10 时,随着迭代次数的增加, $|h(\beta)|$ 的值下降明显;当迭代次数大于等于 10 时, $|h(\beta)|$ 的值趋于 0。因此,本文算法能通过较少的迭代使得 $|h(\beta)|$ 的值得到收敛,较快满足干扰温度限制条件。

表 1 给出了在此仿真平台上本文算法运算过程中的迭代时间,其中内循环搜索界限取 10^6 ,即 $\Delta\alpha = 10^6$ 。从表中可以看出,本文算法的二分搜索显示出较高的效率,在较短时间内就能确定拉格朗日因子的值。此外,随着搜索精度(ϕ, ξ) 的大幅减小,迭代时间没有明显地增加,显示出良好的鲁棒性。

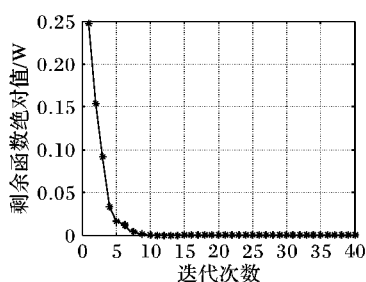


图5 剩余函数收敛性

表1 本文算法迭代处理时间

ms

收敛判断参数	时间(内循环)	时间(外循环)
$\phi = 10^{-2}, \xi = 10^{-2}$	0.092	4.760
$\phi = 10^{-4}, \xi = 10^{-4}$	0.120	8.240
$\phi = 10^{-6}, \xi = 10^{-6}$	0.135	11.400

4 结语

本文在认知 OFDM 无线电系统的背景下研究了子载波功率分配及其优化问题,并提出了一种双因子二分搜索算法。此算法以最大化认知用户数据传输速率为目标,在传统注水算法上进行改进,充分考虑功率发射过程中干扰温度限制等因素,并在模型中加入干扰温度约束条件。仿真结果显示本文算法能获得功率分配最优解,获得的数据传输速率逼近传统注水算法,且运算复杂度较低,具有良好的鲁棒性。本文对单用户的功率分配问题进行了深入探讨,在后续研究中,还会考虑此算法在多用户条件下功率分配的可行性及探究在实际硬件平台上的性能。

参考文献:

- [1] SONG Z. Cognitive radio technology and application [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012: 346–350. (宋志群. 认知无线电技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 346–350.)
- [2] TONG X, LUO T. The principle and application of OFDM mobile communication technology [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2003: 420–435. (佟学俭, 罗涛. OFDM 移动通信技术原理及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 420–435.)
- [3] WANG P, ZHONG X, XIAO L, *et al.* Optimal power allocation in OFDM-based cognitive radio systems [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(8): 1144–1147. (王鹏, 钟晓峰, 肖立民, 等. 基于 OFDM 的认知无线电系统中最优功率分配[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(8): 1144–1147.)
- [4] BANSAL G, HOSSAIN M J, BHARGAVA V K. Adaptive power loading for OFDM-based cognitive radio systems [C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2007: 5137–5142.
- [5] BANSAL G, HOSSAIN J, BHARGAVA V K. Optimal and suboptimal power allocation schemes for OFDM-based cognitive radio systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2008, 7(11): 4710–4718.
- [6] ATTAR A, HOLLAND O, NAKHAI M R, *et al.* Interference limited resource allocation for cognitive radio in orthogonal frequency division multiplexing networks [J]. IET Communications, 2008, 2(6): 806–814.
- [7] LIU J, SONG Y, YANG S, *et al.* Optimal power allocation OFDM-based cognitive radio systems [C]// Proceedings of the 2011 Cross Strait Quad Regional Radio Science and Wireless Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 877–880.
- [8] Qi Q, MINTUMN A, YANG Y. An efficient water-filling algorithm for power allocation in OFDM-based cognitive radio systems [C]// Proceedings of the 2012 International Conference on Systems and Informatics. Piscataway: IEEE Press, 2012: 2069–2073.
- [9] XU W, GAO Y, WANG Y, *et al.* Power allocation with min-rate guarantee for OFDM-based cognitive radio systems [C]// Proceedings of the 2013 8th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM). Piscataway: IEEE Press, 2013: 959–962.
- [10] ATTAR A, HOLLAND O, NAKHAI M R, *et al.* Interference-limited resource allocation for cognitive radio in orthogonal frequency division multiplexing networks [J]. IET Communications, 2008, 2(6): 806–814.
- [11] WEISS T, HILLENBRAND J, KROHN A, *et al.* Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems [C]// Proceedings of the 2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2004, 4: 1873–1877.
- [12] YU G, LUO H, ZHAO Z, *et al.* Power allocation of cognitive orthogonal frequency division multiplexing system [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(4): 673–676. (余官定, 罗海燕, 赵志峰, 等. 认知正交频分复用系统的功率分配研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(4): 673–676.)
- [13] WANG Y, XU W, YANG K, *et al.* Optimal energy efficient power allocation for OFDM-based cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(9): 1420–1423.
- [14] SON K, JUNG B C, CHONG S, *et al.* Power allocation for OFDM-based cognitive radio systems under outage constraints [C]// Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1–5.
- [6] SAMEER S M, RAJA K, UMAR R V. An efficient maximum likelihood carrier frequency offset estimator for OFDM using null subcarriers and cycle prefix [J]. Wireless Personal Communications, 2011, 58(2): 259–279.
- [7] ZHAO H, MA S, ZHANG J, *et al.* Blind estimation of carrier frequency offset for OFDM-BPSK systems [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(6): 842–846. (赵海龙, 马, 张健, 等. 适用于 OFDM-BPSK 的载波频偏盲估计算法[J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(6): 842–846.)
- [8] OH J H, KIM J T. Blind carrier frequency offset estimation for OFDM systems with constant modulus constellations [J]. Communications Letters, 2011, 15(9): 971–973.
- [9] YANG F, LI K H, TEH K C. A carrier frequency offset estimator with minimum output variance for OFDM system [J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(11): 677–679.
- [10] LI X, HAN Q, ELLINGER J, *et al.* General total inter-carrier interference cancellation for OFDM high speed aerial vehicle communication [C]// Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2013: 4698–4702.
- [11] LI X, ZHOU R, CHAKRAVARTHY V, *et al.* Total inter carrier interference cancellation for OFDM mobile communication systems [C]// Proceedings of the 2010 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1–5.
- [12] TAO X, XIAO F, KWOK-WO W. An improved particle swarm optimization algorithm combined with piecewise linear chaotic map [J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 190(2): 1637–1645.
- [13] LI L, NIU B. Particle swarm optimization algorithms [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 35–36. (李丽, 牛奔. 粒子群优化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 35–36.)

(上接第 2790 页)