

性能选择的下垫式认知无线电功率分配

周明月, 李以峰

(长春工业大学 计算机科学与工程学院, 长春 130012)

摘要: 针对 Underlay 认知无线网络中各用户的不同目标需求, 提出根据用户实际需求灵活调整目标的功率分配方案。提出双目标调整因子对用户功耗和服务质量的性能指标进行配置, 构建性能选择目标函数, 有效解决传统的功率分配算法下仅考虑单方面性能提高的情况。为验证方案的有效性, 对不同调整因子下的用户功率和信干噪比进行仿真分析。实验表明: 通过调整目标因子可以实现在低功耗和高服务质量之间进行选择, 满足同一场景下各用户的不同需求。

关键词: 认知无线电; 功率分配; 调整因子

中图分类号: TN 929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3372-07

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230006

Power allocation for a performance-selected underlay cognitive radio

ZHOU Ming-yue, LI Yi-feng

(School of Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Aiming at the different target requirements of each user in the Underlay cognitive radio network, a power allocation scheme that flexibly adjusts the target according to its actual needs is proposed. A dual-objective adjustment factor is proposed to configure the performance indicators of user power consumption and quality of service (QoS), and a performance selection objective function is constructed to effectively solve the problem of only considering unilateral performance improvement under the traditional power allocation algorithm. In order to verify the effectiveness of the scheme, the user power and signal to noise ratio under different adjustment factors are simulated and analyzed. Experiments show that by adjusting the target factor, low power consumption and high quality of service can be selected to meet the different needs of users in the same scenario.

Key words: cognitive radio; power allocation; adjustment factors

0 引言

随着无线通信技术的进步和用户需求的不断增长, 频谱稀缺与使用效率低的矛盾日益显著。认

知无线电技术通过动态选择授权和非授权频段, 有效提高了频谱利用率, 缓解频谱资源的供需矛盾^[1]。

收稿日期: 2023-01-04.

基金项目: 吉林省科技厅自然科学基金项目(20220101135JC); 吉林省教育厅项目(JJKH20230761KJ).

作者简介: 周明月(1980-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 认知无线电系统中的资源分配问题. E-mail: zmyjlu@ccut.edu.cn

认知无线电可以根据周围环境产生相应的变化重构某些操作参数(如发射功率、载波频率等)^[2]。在认知无线电系统中,认知用户的传输功率是实现频谱分配的关键,也是对其他用户造成干扰的主要原因^[3]。

许多学者以往研究的功率控制算法主要聚焦于扩大通信容量,而对能耗问题的关注不足。文献[4]中提出了一个优化问题,在授权用户(Primary user, PU)吞吐量最小的约束下最大化认知用户(Secondary user, SU)吞吐量;文献[5]研究了以接收信噪比最大化为目标的鲁棒功率分配算法;文献[6]研究了认知无线网络中PU干扰功率约束下数据速率最大化的功率控制问题;文献[7]提出了一种优化协同频谱感知“吞吐量”的算法。

部分学者意识到了高能耗问题,但大多数以降低服务质量(Quality of service, QoS)的方式换取能耗的降低。文献[8]以降低总传输功率为目的,设计了一种加权的鲁棒分布式功率分配方案,以保证系统的公平性;文献[9,10]考虑了信道的不确定性,研究在PU干扰功率和服务质量约束下最小化SU发射总功率的鲁棒功率控制算法;文献[11]提出了基于遗传思想的粒子群优化算法,有效降低发射功率并提高SINR。这些算法仅保证了认知用户正常通信所需的QoS,而无法对其进行灵活的调整。

传统单一目标函数算法侧重单一指标,忽略其他重要指标。实际中需进行综合权衡,确保既能满足用户的通信要求,又能有效控制整个网络的能耗。结合认知用户功率和服务质量两个性能指标,引进与其分别关联的调整因子,建立了一个新的目标函数。通过对调整因子的改变可以灵活地在系统功耗和用户服务质量之间进行权衡。该算法不仅可以满足同一认知系统中各个不同认知用户的不同通信需求,也可以满足同一认知用户不同时间的不同通信指标。考虑到认知用户对授权用户产生的干扰,引入加权系数对其进行分配以确保认知用户资源分配的公平性。

1 系统模型和问题规划

在授权用户满足通信正常的条件下,认知用户和授权用户可以同时在授权频段内工作。其条

件是认知用户对授权用户的干扰必须加以限制,防止对授权用户的正常通信产生强烈干扰,即:

$$\sum_{i=1}^M h_i p_i \leq I_{th}, i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (1)$$

式中: h_i 为子信道 i 上认知用户发射机功率对授权用户的信道增益; p_i 为第 i 个认知用户的发射功率; I_{th} 为授权用户所能承受的总干扰功率阈值。

引入加权系数 ω_i ,将其与 I_{th} 相联结,不同认知用户对授权用户的干扰上限可由分配的 ω_i 和 I_{th} 共同决定,可调节 ω_i 的值根据不同用户的功率对干扰条件进行松弛或紧张,表示形式为:

$$h_i p_i \leq \omega_i I_{th}, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (2)$$

在设定干扰阈值的情况下,为了管理认知用户之间的干扰,保障认知系统的正常运行,每个认知用户的发射功率不能超过一定的水平。

$$p_i \leq p_i^{\max}, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (3)$$

式中: $p_i^{\max}$ 为第 i 个认知用户发射机所能允许的最大发射功率。

信干噪比(Signal to interference ratio plus noise radio, SINR)是衡量用户服务质量的重要指标,这里用 r_i 表示第 i 个认知用户接收机所接收信号的SINR,其表达式为:

$$r_i = \frac{p_i g_{ii}}{\sum_{j \neq i}^M p_j g_{ij} + n_i}, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (4)$$

式中: g_{ii} 为第 i 个认知用户发射机到第 i 个认知用户接收机的信道增益; g_{ij} 为 i 个认知用户发射机到第 j 个认知用户接收机的信道增益; n_i 为总的背景噪声。

为方便使用,定义广义噪声 N_i 为:

$$N_i = \frac{\sum_{j \neq i}^M p_j g_{ij} + n_i}{g_{ii}} \quad (5)$$

则式(4)可重写为:

$$r_i = \frac{p_i}{N_i}, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (6)$$

功率控制的目的主要集中于两方面:一是系统功耗的降低;二是用户服务质量的提升。日常生活中用户对网络的要求仅是不影响正常使用,而在某些特定条件下,如工作、娱乐场景下用户追求取得更好的服务质量,对此考虑了一个性能指标:

$$c_i = r_i - r_i^{\max}, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (7)$$

式中: r_i 为认知用户的接收信干噪比; $r_i^{\max}$ 为认知用户的最大信干噪比; c_i 为两者的差值, c_i 的绝对值越小说明认知用户的接收信干噪比和最大值之间距离越近, 用户能取得更好的服务质量。

将式(2)(3)作为约束条件, 在PU所允许的干扰功率、各SU发射功率预算的约束下, 引入调整因子 θ_i 和 ζ_i , 根据实际情况选择降低系统功耗或提高认知用户服务质量, 通过对 θ_i 和 ζ_i 配置适当以调整满足不同认知用户产生的不同需求。该优化问题可以表述为:

$$\begin{aligned} \min \sum_i^M & \left(\theta_i (p_i)^2 + \zeta_i (r_i - r_i^{\max})^2 \right) \quad (8) \\ \text{s. t. } & C1: p_i \leq p_i^{\max}, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\} \\ & C2: h_i p_i \leq \omega_i I_{th}, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned}$$

这里, 当 $\theta_i = 1, \zeta_i = 0 (\forall i = 1, 2, \dots, M)$ 时, 认知无线网络中所有认知用户追求的目标一致, 皆为最小化发射功率, 即能量有效形式目标追求, 符合绿色通信的性能目标。当 $\theta_i = 0, \zeta_i = 1 (\forall i = 1, 2, \dots, M)$ 时, 构建的各用户统一追求服务质量的性能配比。当然, 该网络系统中各个用户 i 可以选取不同的值(1或0), 即同一网络中各用户可以根据自身实际需求, 选取不同的目标函数, 能量有效或服务质量的性能配比。不仅如此, 当系统中 θ_i 和 ζ_i 不等于1时, 可以双目标权衡进行目标配比。该算法称为性能选择算法(Performance selection, PS)。与传统的功率方法^[12-13]相比, 该目标函数更加灵活适用。

图1为凸函数的几何定义图形, 在使用凸优化解决问题时, 需要满足目标函数是凸函数, 且其可行域是凸集的条件。

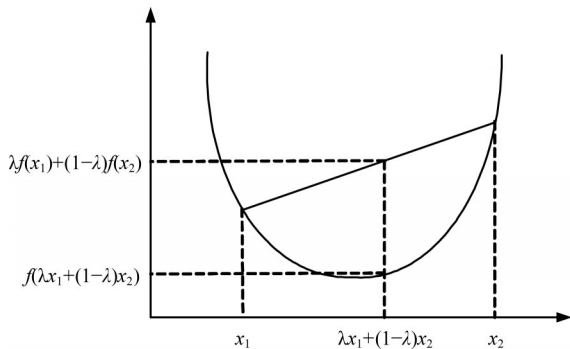


图1 凸函数的几何图形

Fig. 1 Geometric figure of convex function

2 功率分配算法

目标函数为两个凸函数之和, 同样也是一个凸函数, 同时满足可行域为凸集的条件, 因此, 式(8)是一个凸优化问题^[14], 利用Lagrange对偶函数的运算规则, 对目标函数进行Lagrange函数运算, 将式(8)的Lagrange函数定义为:

$$\begin{aligned} L(\{p_i\}, \{\lambda_i\}, \{\mu_i\}) = & \sum_i \left(\theta_i (p_i)^2 + \zeta_i (r_i - r_i^{\max})^2 \right) + \\ & \sum_i \lambda_i (p_i / p_i^{\max} - 1) + \\ & \sum_i \mu_i (h_i p_i / \omega_i I_{th} - 1), \forall i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (9) \end{aligned}$$

式中: λ_i, μ_i 为Lagrange函数的乘子。

由于上述问题中认知用户的功率是耦合的, 利用拉格朗日对偶分解方法可将该问题分解为拉格朗日乘子的最小功率问题和对偶优化问题。式(9)的对偶函数可表示为:

$$\begin{aligned} \Psi(\{\lambda_i\}, \{\mu_i\}) = & \min \sum_i^M L_i(p_i, \lambda_i, \mu_i) - \sum_i (\lambda_i + \mu_i) \quad (10) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} L_i(\{p_i\}, \{\lambda_i\}, \{\mu_i\}) = & \left(\theta_i (p_i)^2 + \zeta_i (r_i - r_i^{\max})^2 \right) + \\ & \lambda_i p_i / p_i^{\max} + \mu_i h_i p_i / \omega_i I_{th}, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (11) \end{aligned}$$

对应式(10)的对偶问题为:

$$\max \Psi(\{\lambda_i\}, \{\mu_i\}) \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \lambda_i \geq 0, \mu_i \geq 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, M\}$$

根据子梯度更新算法, 拉格朗日乘子的具体更新如下:

$$\begin{aligned} \lambda_i(t+1) &= \left[\lambda_i(t) + \alpha (p_i / p_i^{\max} - 1) \right]^+, \\ \mu_i(t+1) &= \left[\mu_i(t) + \beta (h_i p_i / \omega_i I_{th} - 1) \right]^+ \quad (13) \end{aligned}$$

式中: α 和 β 为迭代步长; t 为迭代的次数。

在KKT条件下^[15], 每个用户可以通过式(14)独立计算出最优发射功率:

$$\frac{\partial L_i(\{p_i\}, \{\lambda_i\}, \{\mu_i\})}{\partial p_i} = 0 \quad (14)$$

认知用户 i 的发射功率可以根据以下规律进行更新:

$$p_i^* = \left[\frac{r_i^{\max}}{\frac{1}{N_i} + \frac{\theta_i}{\zeta_i} N_i} - \frac{\frac{\lambda_i}{p_i^{\max}} + \frac{\mu_i h_i}{\omega_i I_{th}}}{2 \cdot \left(\frac{\zeta_i}{N_i^2} + \theta_i \right)} \right]^+ \quad (15)$$

式(15)就是对应式(8)的最优功率计算公式。

3 仿真分析

在 Underlay 认知无线网络中对 1 个 PU 和 3 个 SU 进行仿真研究。PU 所能允许的最大干扰功率阈值为 $0.7 \text{ mW}^{[16]}$, 每个 SU 对 PU 的干扰受限值 I_{th} 由和分配的 ω_i 值共同决定, 分别为 $\omega_i I_{th} = [\omega_1 I_{th}, \omega_2 I_{th}, \omega_3 I_{th}]$, $p^{\max} = [1.2, 1.3, 1.4]^{[17]}$ 分别为认知用户各自的最大发射功率上限。与以往仅考虑单方面的性能优化相比, 可以在其他参数不变的情况下, 通过减小调整因子 θ_i 满足实际应用中用户对系统低功耗的要求。同样地, 若是想要提高用户的服务质量, 可在其他参数保持恒定的情况下通过增大调整因子 ζ_i 的值实现, 即对整个认知系统可以通过配置调整因子 θ_i 和 ζ_i 灵活地满足不同的需求, 解决众口难调的问题。

当所有用户均希望取得好的服务质量时, 此时 PS 算法的目标函数则为 $\min \sum (r_i - r_i^{\max})^2$, 在此目标函数下, 系统会最大限度地提高功耗以提高用户的服务质量, 与传统最大化容量 (Traditional maximum capacity, TMC) 算法的性能进行对比分析。图 2 所得到的是各个认知用户的发射功率, 将两种不同算法下的功率逐一对比发现, PS 算法下各个认知用户的功率值曲线均未超过

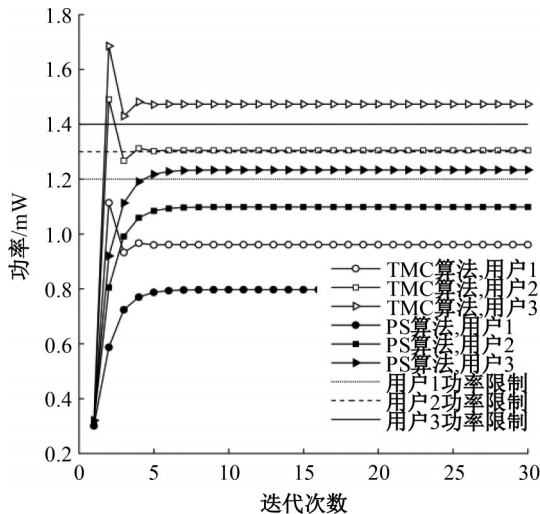
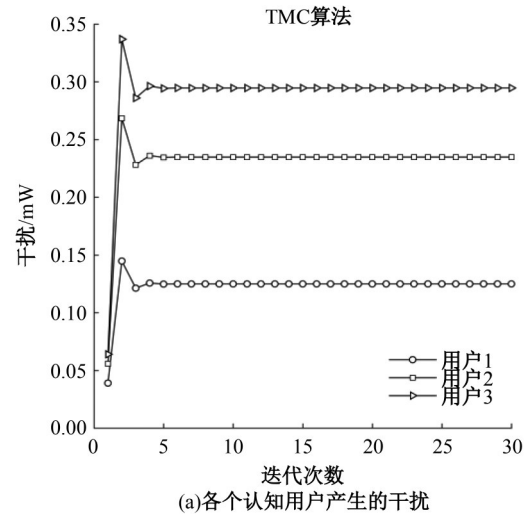


图 2 PS 算法与 TMC 算法的功率

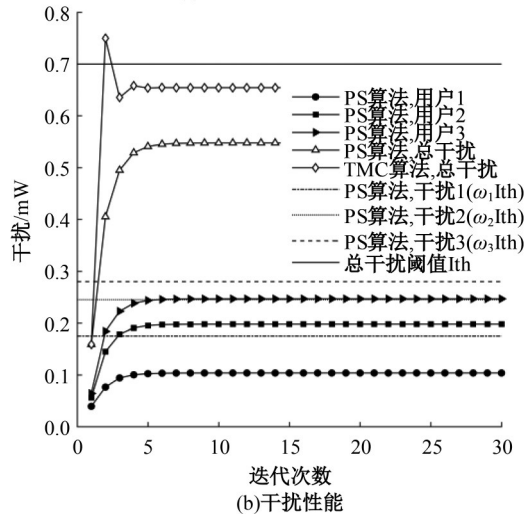
Fig. 2 Power of the PS algorithm and TMC algorithm

其本身的功率限制, 并且所得功率值均小于 TMC 算法, 而 TMC 算法下的用户 3 并没有遵循所设功率限制, 可见 PS 算法在功耗上的性能相较 TMC 算法而言更加优越。

图 3 所显示的是 PS 算法在 $\omega = [0.25, 0.35, 0.4]$ 时与 TMC 算法下认知用户对授权用户产生的干扰。图 3(a) 为 TMC 算法下各个认知用户对授权用户产生的干扰, 图 3(b) 显示了 TMC 算法的总干扰及 PS 算法的各种干扰性能。将图 3(a) 与 (b) 的干扰进行对比分析, TMC 算法仅考虑对授权用户的总体干扰, 而 PS 算法下则需根据配置的 ω_i 值对单个认知用户造成的干扰做出限制。从图 3(b) 中观察可知, 在所取参数下两种算法对授权用户产生的总干扰都未超过所设的阈值。同时, PS 算法上每个认知用户对授权用户的干扰也



(a) 各个认知用户产生的干扰



(b) 干扰性能

图 3 PS 算法与 TMC 算法干扰性能比较

Fig. 3 Interference performance comparison between PS algorithm and TMC algorithm

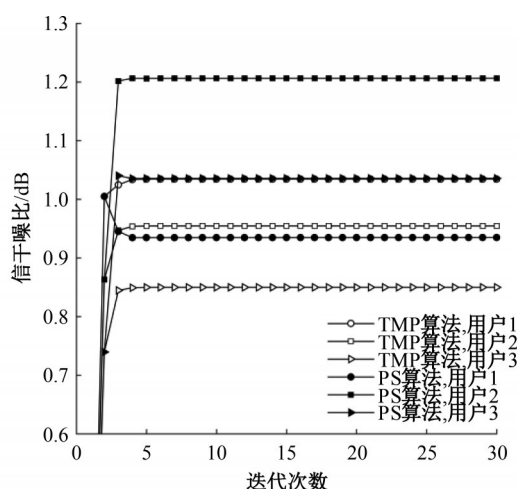
未超过其受限值 $\omega_i I_{th}$, 若是想要进一步减轻对授权用户的干扰, 还可以通过增大调整因子 θ_i 实现。

由(15)的功率计算公式可得, 当 ω_i 的值增大时, 所求功率将会增大。根据式(2)的约束条件, 信道增益与干扰阈值恒定, 分配给某个认知用户的权重值越大, 说明授权用户对其产生的干扰有更高的容忍度, 此时认知用户可以提高其发射功率。

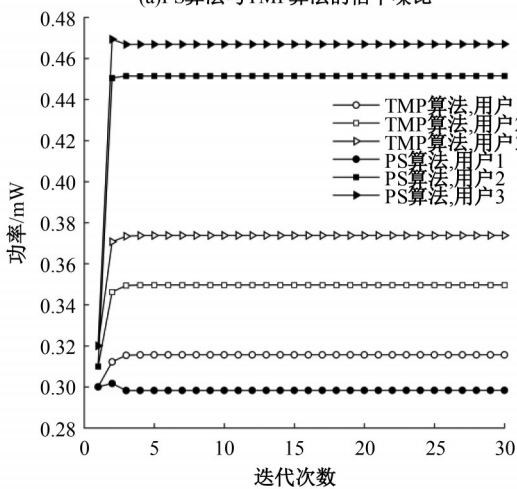
图4是PS算法与传统最小化功率(Traditional minimum power, TMP)算法下认知用户的性能比较。图4(a)为PS算法的调整因子 $\theta_i = 0.17$, $\zeta_i = 0.16$ 的情况下与TMP算法的信干噪比的性能对比。在此图中, PS算法下用户2与用户3的信干噪比性能要略微优于TMP算法, 而用户1的信干噪比性能要稍差一些。当某个用

户对信干噪比的需求发生改变时, 可通过与其对应的调整因子 ζ_i 进行调节以满足其需求。在图4(b)中, 不同算法下的认知用户功率表现不同。在此参数下, 使用PS算法的用户2与用户3为了获得更好的服务质量, 需要消耗更高的功率, 相较而言TMP算法的功率消耗更低。而用户1则更关注低功耗, 为此牺牲了一定的服务质量。认知系统对能耗的要求是尽量追求低功耗, 对于并不强求高质量服务的用户, 可适当调整与其对应的调整因子 θ_i 的值, 从而实现功耗的降低。

以用户1为例, 假设用户2与用户3满足于当前的通信状况, 考虑仅改变 ζ_1 的情况。图5(a)为其他参数恒定的情况, 在此条件下伴随 ζ_1 值的增加与减小, 用户1的信干噪比随之进行增大与减小。当认知用户处于某些特定环境下, 对服务质



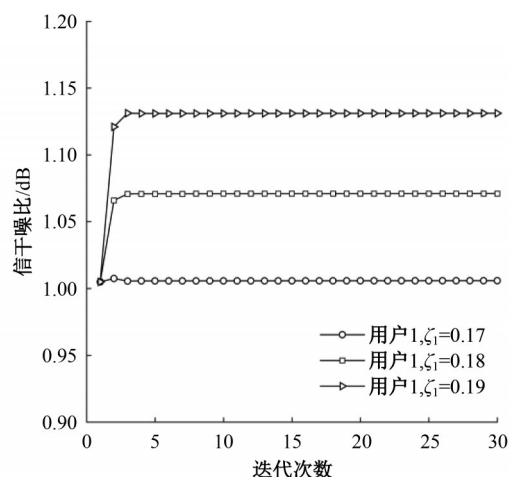
(a) PS算法与TMP算法的信干噪比



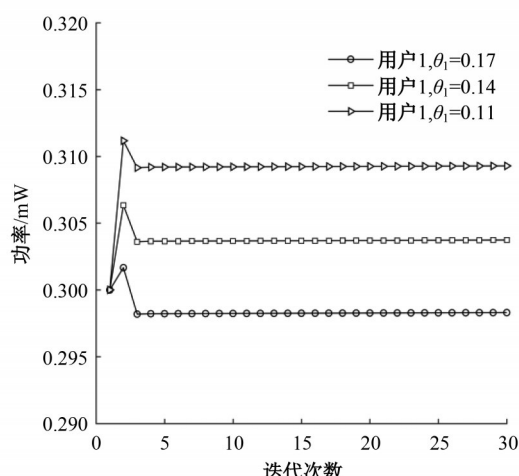
(b) PS算法与TMP算法的功率

图4 PS算法与TMP算法的性能比较

Fig. 4 Performance comparison between PS algorithm and TMP algorithm



(a) PS算法与调整因子 ζ_i 的关系



(b) PS算法与调整因子 θ_i 的关系

图5 PS算法调整因子的有效性验证

Fig. 5 Validity verification of PS algorithm adjustment factor

量的要求提高时,PS算法可以通过增大调整因子 ζ_i 的值灵活地实现对SINR的增强,提高用户的服务质量。当用户满足于正常通信,对服务质量没有硬性要求时,则可适当降低调整因子 ζ_i 的值实现SINR的减小。与之相似,图5(b)是以用户1为例对功率进行的分析,在其他参数恒定情况下仅考虑改变 θ_1 的情况。伴随 θ_1 值的增加与减小,用户1的功率的变化与之相反。根据不同情况下用户对功率的要求,当某个用户需要取得更高的功率时,PS算法可以通过减小与之对应的调整因子 θ_i 的值实现。若用户对功率的需求不高,认知系统则可通过增大调整因子 θ_i 适当降低其功率,追求绿色节能的通信。

4 结束语

对于Underlay认知无线网络系统,提出了可根据用户对性能的要求进行调整的功率分配算法。引入两个调整因子 θ_i 和 ζ_i ,根据用户对系统低功耗和用户高服务质量的性能要求对调整因子进行配置,解决传统功率分配算法中仅考虑单性能优化而不能灵活根据具体需求对性能进行调整的情况。为了验证本文方案的有效性,分别与传统最大化容量算法和传统最小化功率算法进行了对比分析,并对不同调整因子下的性能进行分析,结果表明:能根据调整因子 θ_i 和 ζ_i 对不同用户产生的需求有效地实现低功耗传输或高服务质量传输,相较于以往的单性能优化算法更加灵活,并且能够实现更低的功率消耗。

参考文献:

- [1] 李玲. 认知无线电技术及其典型应用探讨[J]. 中国新通信, 2021, 23(16): 92-93.
Li Ling. Discussion on cognitive radio technology and its typical application[J]. China New Telecommunications, 2021, 23(16): 92-93.
- [2] Riddle A. Comprehending cognitive radios[J]. IEEE Microwave Magazine, 2017, 18(5): 120-132.
- [3] 陈威龙, 梁俊, 肖楠, 等. 能效优先的鲁棒功率控制算法[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2): 143-149.
Chen Wei-long, Liang Jun, Xiao Nan, et al. A robust power control algorithm with priority of energy efficiency[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(2): 143-149.
- [4] Sun M, Jin M, Guo Q, et al. Throughput maximization for cognitive radio with wirelessly powered primary users[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 14(2): 2432-2442.
- [5] 马蓓, 张海林, 张兆维, 等. 基于不完全信道信息的D2D功率分配算法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(4): 1320-1324.
Ma Bei, Zhang Hai-lin, Zhang Zhao-wei, et al. Imperfect channel state information based D2D power allocation algorithm[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2016, 46(4): 1320-1324.
- [6] Wang J, Chen J, You L, et al. Robust power control under location and channel uncertainty in cognitive radio networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 4(2): 113-116.
- [7] Thanuja T C, Daman K A, Patil A S. Optimized spectrum sensing techniques for enhanced throughput in cognitive radio network[C]// International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics, Pune, India, 2020: 137-141.
- [8] Wang H, Zhu M, Zhou M. A robust power allocation scheme in ad-hoc cognitive radio networks[J]. International Journal of Online Engineering, 2017, 13(8): 45-59.
- [9] Xu Y, Chen Q, Huang X. Robust power control for OFDM-based cognitive radio networks with QoS guarantee[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96(2): 2125-2140.
- [10] Zhu L, Zhao X H. Robust power allocation for OFDM based underlay cognitive radio networks with channel uncertainties[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 94(4): 3531-3547.
- [11] 王宏志, 姜方达, 周明月. 基于遗传粒子群优化算法的认知无线电系统功率分配[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2019, 49(4): 1363-1368.
Wang Hong-zhi, Jiang Fang-da, Zhou Ming-yue. Power allocation of cognitive radio system based on genetic particle swarm optimization[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(4): 1363-1368.
- [12] Yousefvand M, Ansari N, Khorsandi S. Maximizing network capacity of cognitive radio networks by capacity-aware spectrum allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(9): 5058-5067.

- [13] Pan C, Wang J, Zhang W, et al. Power minimization in multi-band multi-antenna cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(9): 5056-5069.
- [14] Tsiropoulos G I, Dobre O A, Ahmed M H, et al. Joint channel assignment and power allocation in cognitive radio networks[C]// IEEE Global Communications Conference, Austin, USA, 2014: 876-881.
- [15] Waqas M, Aslam S, Ali Z, et al. Resource optimization for cognitive radio based device to device communication under an energy harvesting scenario[J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 24862-24872.
- [16] Wang H, Yan Y, Zhou M. Resource allocation in OFDM-based cognitive radios under proportional rate constraint[C] // Communications and Networking: 12th International Conference, Xi'an, China, 2017: 416-425.
- [17] 朱孟, 王宏志, 周明月, 等. 基于鲁棒的认知无线电功率分配算法[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2017, 38(1): 43-47.
- Zhu Meng, Wang Hong-zhi, Zhou Ming-yue, et al. Robust power allocation algorithm for cognitive radio systems[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 38(1): 43-47.