

认知无线网络中基于免疫克隆优化的功率分配

柴争义^{1,2}, 陈亮², 朱思峰¹, 沈连丰¹

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096; 2. 河南工业大学信息科学与工程学院 郑州 450001)

【摘要】针对认知OFDM无线网络中下行链路的功率分配问题, 将其建模为一个约束优化问题, 进而提出了一种基于免疫克隆的求解方法。给出了功率分配的数学优化模型、算法实现过程和关键技术, 设计了适合算法求解的编码、克隆、变异算子。仿真实验结果表明, 在总发射功率、误码率及主用户可接受的干扰约束下, 该算法可以获得更大的总数据传输率, 同时具有较快的收敛速度, 能够得到较优的功率分配方案, 进而提高频谱利用效率。

关键词 认知无线网络; 约束; 免疫克隆; OFDM; 功率分配

中图分类号 TN925, TP18

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.01.009

Power Allocation of Cognitive Wireless Network Based on Immune Clonal Optimization

CHAI Zheng-yi^{1,2}, CHEN-Liang², ZHU Si-feng¹, and SHEN Lian-feng¹

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University Nanjing 210096;

2. School of Information Science and Engineering, Hennan University of Technology Zhengzhou 450001)

Abstract The optimization of downlink power allocation of cognitive OFDM wireless network is converted into an optimization problem with constraints. An immune clonal algorithm is proposed to solve this problem. The power allocation model, key techniques, and implementation processes are described. The coding, clonal, and maturation operators are designed. The experiments results show that, with the constraints of total power, the bit error rate (BER) and the acceptable interferences of primary user, the algorithm can maximizes the total transmit rate and converges rapidly. It can get the better power allocation scheme and improve the reuse of spectrum.

Key words cognitive wireless network; constraints; immune clone algorithm; orthogonal frequency division multiple; power allocation

认知无线网络是一种智能的无线通信系统, 可以根据信道的状态, 实现频谱的动态共享和分配^[1]。认知无线网络中, 次用户(认知用户)可以择机地接入主用户(授权用户)的空闲频段, 以提高授权频谱的利用率, 但次用户对主用户频段内的干扰必须满足干扰限制要求^[2]。正交频分复用(orthogonal frequency division multiple, OFDM) 是一种多载波并行的无线传输技术, 非常适合认知无线网络中的频谱资源的分配传输^[3]。如何对认知多用户OFDM系统中的下行链路资源进行自适应分配, 引起了研究者的广泛关注。已有算法^[4-7]大都采用传统的数学优化方法或者贪婪搜索算法进行求解, 计算复杂度和求解难度均较高。认知无线网络的资源分配问题实际上是一个非线性优化问题^[8], 适合用智能方法求解。文献[9]提出了基于遗传算法的资源分配算法, 并取得了较

好的求解效果, 但遗传算法固有的易陷入局部最优解的缺点, 使得求解效果还有待进一步优化。人工免疫算法由于具有较好的寻优能力, 已经在工程优化领域得到了广泛应用^[10-12]。本文将认知网络中下行链路的功率资源分配问题建模为一个约束优化问题, 进而提出了基于免疫克隆优化的求解方法。仿真实验表明, 在总发射功率、误码率及主用户可接受的干扰约束下, 该算法可以获得更大的总数据传输率。

1 功率资源分配问题模型

假设认知无线网络中, 一个基站的服务范围包括1个主用户和 M 个次用户, 主用户和次用户使用相邻的频段, 次用户使用OFDM传输技术。假设在一个OFDM符号周期内信道是慢衰落的, 并且基站完

收稿日期: 2011-03-30; 修回日期: 2012-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61202099, 61171081, 61201175, 61271207); 国家自然科学基金委-河南省人民政府人才培养联合基金(U1204618); 江苏省博士后科研项目(1202006C)

作者简介: 柴争义(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事无线认知网络、免疫优化算法方面的研究。

全知道信道的状态信息, 现共得到 N 个子载波, 各子载波的带宽为 W_c 。设定每个OFDM符号期间用户 m ($m=1,2,\dots,M$) 要发射的速率为 R_m ; $b_{m,n}$ 表示用户 m 在第 n 个子载波上的传输速率; $p_{m,n}$ 表示用户 m 在子载波 n 上的功率; $g_{m,n}$ 为用户 m 在子载波 n 上的信道增益; N_0 表示对所有用户和子载波都相同的噪声频谱密度功率(常数); δ 表示传输的误码率, 在物理层采用MQAM调制时, $\delta = -\ln(5p_e)/1.5$ [13]; $S_{m,n}$ 表示主用户对次用户的干扰; F_n 表示在子载波 n 上, 次用户对主用户的干扰因子, 满足 $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \lambda_{m,n} p_{m,n} F_n \leq I_{th}$ (I_{th} 为主用户可接受的最高干扰上限)。在一个OFDM符号周期内, 可在子载波 n 上传输的最大速率为 [14-15]:

$$b_{m,n} = \left\lfloor \log_2 \left[1 + \frac{P_{m,n} g_{m,n}^2}{\delta(N_0 W_c + S_{m,n})} \right] \right\rfloor$$

认知无线网络中, 功率资源分配问题的优化目标是在授权用户干扰门限、总发射功率及误码率的限制下, 最大化系统(次用户)总的传输速率, 以提高频谱利用率。因此, 该问题可以建模为:

$$\max \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M b_{m,n} \lambda_{m,n} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \lambda_{m,n} \left\lfloor \log_2 \left[1 + \frac{P_{m,n} g_{m,n}^2}{\delta(N_0 W_c + S_{m,n})} \right] \right\rfloor \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{m=1}^M \lambda_{m,n} = 1 \quad \lambda_{m,n} = \begin{cases} 0 & b_{m,n} = 0 \\ 1 & b_{m,n} \neq 0 \end{cases} \quad (1a)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{m,n} \leq p_{total} \quad (1b)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \lambda_{m,n} p_{m,n} F_n \leq I_{th} \quad (1c)$$

$$p_e \leq p_u \quad (1d)$$

约束条件式(1a)表示一个子载波只能被一个用户占用, $\lambda_{m,n}$ 是子载波分配状态变量, 当第 n 个子载波被用户 m 占用时, $\lambda_{m,n} = 1$; 反之为0。约束条件式(1b)表示所有次用户发送的功率 $p_{m,n}$ 之和不能超过系统总功率上限 p_{total} 。约束条件式(1c)表示所有次用户对主用户的干扰, 不能超过其可容忍的干扰上限 I_{th} 。约束条件式(1d)表示误码率必须小于最大误码率要求 p_u 。

由此可见, 该问题是一个约束优化问题。因此, 本文问题即转换为: 在满足约束条件的前提下, 求解用户对应的功率分配方案 $p_{m,n}$, 使得所有次用户

的总传输速率最大。

2 算法关键技术与实现

2.1 算法流程图

算法基本流程如图1所示。

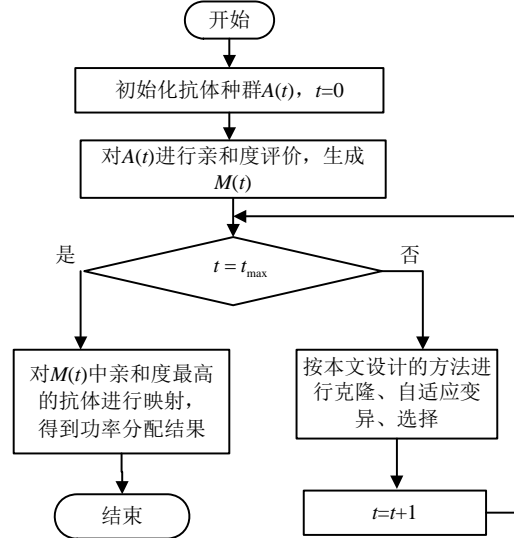


图1 算法基本流程图

本文算法的关键技术如下所述。

2.2 编码方式

由于不同的子载波的信道衰落不同, 从而需要的发送功率也不同。本文目的是求得功率分配方案 $p_{m,n}$, 因此, 用一个 $M \times N$ 维的矩阵编码表示, 其中矩阵的行表示用户 m ($m=1,2,\dots,M$), 列表示载波 n ($n=1,2,\dots,N$), 矩阵的每个元素 $p_{m,n}$ 表示用户 m 在第 n 个载波上获得的功率, 即:

$$p_{m,n} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,N-1} & p_{1,N} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,N-1} & p_{2,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ p_{M,1} & p_{M,2} & \cdots & p_{M,N-1} & p_{M,N} \end{bmatrix}$$

式中, $p_{m,n} \in [0, p_{total}]$ 。根据约束条件式(1a)可知, 一个子载波只能被一个用户占用, 表现在编码矩阵中, 则为矩阵的每列只能有一个非零元素。因此, 如果把矩阵的每一位都进行编码, 则抗体的长度过长并且存在很多冗余。本文采用对抗体编码种群中不为0的位采用实数进行编码, 则抗体长度为 N (N 个子载波), 每一个抗体基因位为用户 m 分配的功率数。经过编码, 一个抗体代表一种功率分配方案。

2.3 抗体种群初始化

按照编码方式, 随机产生抗体组成初始抗体种群。对产生的每个抗体, 进行满足最大功率 p_{total} (约束式(1b))和对主用户最大干扰 I_{th} (约束式(1c))的处

理, 即计算 $\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{m,n}$, 满足约束条件的抗体作为候选抗体。

2.4 亲和度函数

由于本文的优化目标为最大化总传输容量, 因此, 直接将上面定义的优化目标式(1)作为评价抗体好坏的亲和度函数。

2.5 基于免疫克隆优化的算法实现过程

算法具体实现过程如下:

1) 初始化。

设进化代数 t 为0, 初始化种群 \mathbf{A} , 规模为 k ; 则初始化种群记为:

$$\mathbf{A}(t) = \{A_1(t), A_2(t), \dots, A_k(t)\}$$

2) 亲和度评价。

对抗体种群 $\mathbf{A}(t)$ 进行亲和度评价, 计算每个抗体的亲和度 $f(\mathbf{A}(t))$; 根据亲和度大小, 将抗体群分为记忆单元 $\mathbf{M}(t)$ 和一般抗体种群单元 $\mathbf{N}(t)$, 即 $\mathbf{A}(t) = [\mathbf{M}(t), \mathbf{N}(t)]$, 其中 $\mathbf{M}(t) = \{A_1(t), A_2(t), \dots, A_s(t)\}$, 并且 $s = 0.2k$ 。

3) 终止条件判断。

如果达到最大进化次数 t_{\max} , 算法终止, 将记忆种群 $\mathbf{M}(t)$ 中保存的亲和度最高的抗体进行映射, 即得到最佳的功率分配方案; 否则, 转步骤4)。

4) 对 $\mathbf{A}(t)$ 克隆扩增 T_c 。

对这 $\mathbf{A}(t)$ 中的抗体进行克隆操作 T_c , 形成种群 $\mathbf{B}(t)$ 。克隆操作 T_c 定义为:

$$\mathbf{B}(t) = T_c(\mathbf{A}(t)) = [T_c(A_1(t)), T_c(A_2(t)), \dots, T_c(A_k(t))]$$

具体克隆方法为: 按照亲和度大小进行比例克隆, 则对第 i 个抗体 $A_i(t)$ ($1 \leq i \leq k$) 的 q_i 克隆产生的抗体数目为:

$$q_i(t) = \left\lceil n_i \frac{f(A_i(t))}{\sum_{j=1}^n f(A_j(t))} \right\rceil$$

第 t 代克隆产生的抗体种群总个数为:

$$Q = N(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t)$$

式中, $\lceil * \rceil$ 表示向上取整; n_i ($n_i > s$) 表示克隆控制参数; $f(*)$ 代表亲和度函数的计算。

5) 对 $\mathbf{A}(t)$ 进行克隆变异 T_m 。

依据概率 p_m 对克隆后的种群 $\mathbf{B}(t)$ 进行变异操作 T_m , 得到抗体种群 $\mathbf{C}(t)$ 。定义为 $\mathbf{C}(t) = T_m^c(\mathbf{B}(t))$ 。

本文变异设计了一种非均匀变异, 重点搜索原个体附近的微小区域。

具体过程如下: 假设 $\mathbf{B}(t)$ 中的一个个体 $B_i(t)$ ($1 < i < Q$), 记为 $B_i(t) = (b_i^1, b_i^2, \dots, b_i^j, \dots, b_i^{N-1}, b_i^N)$, 假设选中 b_i^j 进行变异, 显然其取值范围为 $[0, p_{\text{total}}]$ 。变异后的个体记为 $C_i(t) = (b_i^1, b_i^2, \dots, b_i^{j'}, \dots, b_i^{N-1}, b_i^N)$, 则有:

$$b_i^{j'} = \begin{cases} b_i^j + \Delta(t, p_{\text{total}} - b_i^j) & \text{rand}(2) = 0 \\ b_i^j - \Delta(t, b_i^j) & \text{rand}(2) = 1 \end{cases}$$

式中, $\text{rand}(2) = 0$ 表示将随机均匀产生的正整数模2所得的结果; t 是进化代数, $\Delta(t, y)$ 的值域为 $[0, y]$, 并且当 t 增大时, 其取值接近0的概率越大, 这样变异的优点在于: 算法在进化初期, 进行大范围搜索, 而在后期主要进行局部搜索, 有利于算法快速收敛。其中, $\Delta(t, y)$ 的具体取值可表示为^[16]:

$$\Delta(t, y) = y(1 - r^{(1-t)/t_{\max}})^\theta$$

式中, r 为 $[0, 1]$ 上的一个随机数; t_{\max} 为最大进化代数; θ 为一个系统参数, 它决定了随机数扰动对进化代数 t 的依赖程度, 起着调整局部搜索的作用, 一般取值为2~5, 本文取值为3。变异后的种群为:

$$\mathbf{C}(k) = \{C_1(t), C_2(t), \dots, C_Q(t)\}$$

6) 克隆选择 T_s 。

定义 $\mathbf{A}(t+1) = T_s(\mathbf{C}(t) \cup \mathbf{A}(t))$ 。具体方法为: 对 $\mathbf{C}(t)$ 中的每个抗体, 进行满足最大功率 p_{total} (约束式(b))和对主用户最大干扰 I_{th} (约束式(c))处理, [即计算](#)并计算其抗体亲和度。对于不满足上述约束条件的抗体, 将其亲和度设置为所有抗体中亲和度的最小值。然后, 对 $\mathbf{C}(t)$ 和 $\mathbf{A}(t)$ 一起选择 k 个亲和度高的抗体组成下一代种群 $\mathbf{A}(t+1)$; 并选择前 s 个亲和度高的抗体更新记忆种群 $\mathbf{M}(t+1)$, $t = t+1$; 否则, 转步骤3)。

2.6 算法特点分析

1) 设计了适合问题表示的抗体编码方式, 直观并节约了存储空间。

2) 抗体按照亲和度比例进行克隆, 保证了较优抗体进入下一代的机率更大; 记忆种群的使用, 有利于算法快速收敛。

3) 非均匀变异算子的使用, 使得变异操作与进化代数相结合, 减少了变异的盲目性, 进一步加快了收敛速度。

3 实验结果与分析

3.1 实验环境和参数设置

假设系统为多径频率选择性衰落信道, 各子载波的信道增益服从平均信道增益为1的瑞利衰落, 次用户发信机到主用户接收机的信道增益 $g_{m,n}$ 为1; 次用户的误码率 p_e (这里设置等于最大误码率 p_u) 设置为 $10^{-5} \sim 10^{-1}$, 进而可以得到 δ 为5 dB; 加性高斯白噪声的功率谱密度 $N_0 = 10^{-7} \text{ W/Hz}$, 主用户对次用户的干扰 $S_{m,n} = 10^{-6} \text{ W}$, 各子载波的带宽为 $W_c = 0.315$; 系统总发射功率 $P_{\text{total}} = 1 \sim 30 \text{ W}$, $I_{\text{th}}^n (I_{\text{th}} / F_n) = 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ W}$, 次用户数 $M = 8$, 子载波为 $N = 64$ 。实验环境为Windows XP系统, 采用MATLAB编程实现。通过反复实验, 免疫克隆算法的参数设置为: 最大进化代数 $t_{\text{max}} = 200$; 种群规模 $k = 30$, $s = 0.2k = 6$, 抗体编码长度等于子载波的个数 ($N = 64$), 克隆控制参数 $n_i = 12$ 。

为了验证算法性能, 在相同的参数设置下, 将算法运行10次, 取平均值, 并与文献[9]进行对比。

图1为在发射总功率 ($P_{\text{total}} = 1 \text{ W}$) 和误码率 ($p_e = 10^{-3}$) 受限的情况下(即满足模型约束条件), 两种算法得到的次用户的总传输速率。

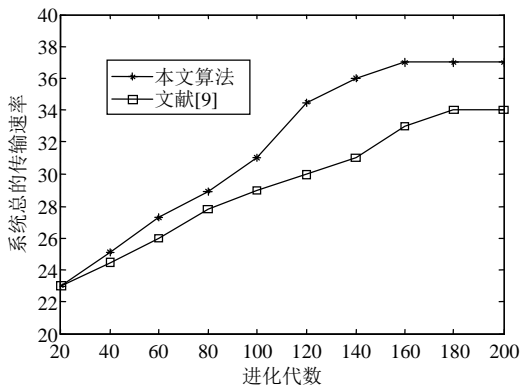


图1 进化代数与系统总传输速率的关系

从图1中可以看出, 在迭代次数相同的情况下, 本文算法求得的系统总传输功率明显优于文献[9], 并且收敛速度较快, 节约了运行时间, 说明针对本问题设计的各种算子是有用的, 增强了算法的寻优能力。

次用户数为8, 进化代数达到最大代数, 在不同的误码率下, 系统总的传输速率对比结果如图2所示。

从图2中可以看到, 随着系统所要求的误码率的降低, 约束条件在降低, 因此, 系统总的传输速率在增大, 同时也说明系统可以有效适应不同误码率限制情况下的功率分配, 本算法的求解结果优于文

献[9]。

在不同的主用户可容忍的干扰门限下, 次用户总的传输功率变化情况如图3所示。从图中可以看出, 随着可容忍干扰门限的增加, 说明允许次用户可使用的发射功率在增大, 因此, 系统总的传输功率在增大。随着主用户可容忍的干扰门限的增大, 本算法表现出了较好的运行性能。

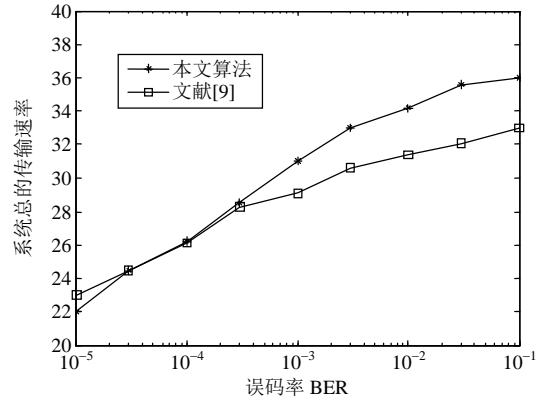


图2 误码率与系统总传输速率的关系

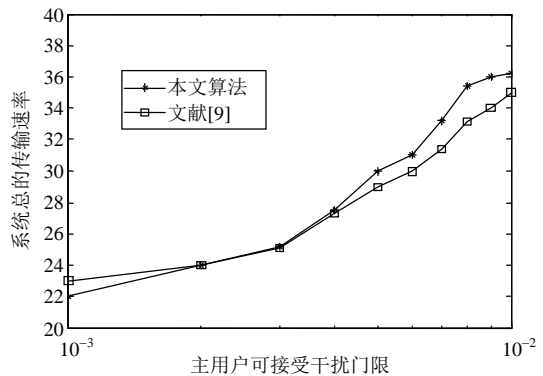


图3 干扰门限与系统总传输速率的关系

系统总的传输速率随着最大功率约束的变化曲线如图4所示。从图中可以看出, 当次用户发射功率较小时, 大部分主用户在没有达到次用户的干扰功率门限时, 就已经先达到了自身的最大发射功率。随着认知用户发射功率约束的增大, 系统总的传输速率在增大, 本文算法较优于文献[9]。

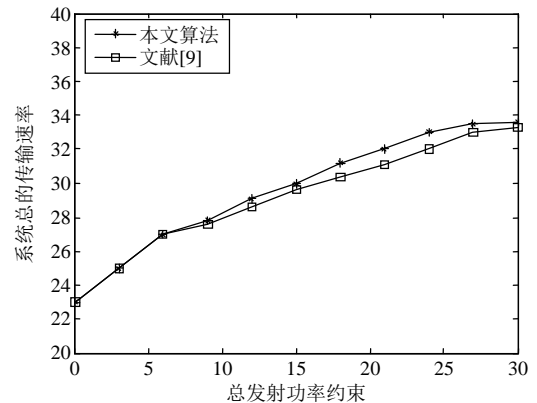


图4 发射功率约束与系统总传输速率的关系

4 结论

本文提出了一种基于免疫克隆规划的多用户认知OFDM功率分配方案。实验结果表明,在满足主用户可容忍干扰、总功率限制及误码率的要求下,该算法可以最大化系统总的传输速率,同时收敛速度较快,可以对认知无线网络中的功率分配进行有效优化。

参考文献

- [1] 柴争义, 刘芳. 基于免疫克隆选择优化的认知无线网络频谱分配[J]. 通信学报, 2010, 31(11): 92-100.
CHAI Zheng-yi, LIU fang. Spectrum allocation of cognitive wireless network based on immune clone selection optimization[J]. Journal on Communications, 2010, 31(11): 92-100.
- [2] SHI Jie, XU Wen-jun, HE Zhi-qiang, et al. Resource allocation based on genetic algorithm for multihop OFDM system with non-regenerative relaying[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2009, 32(10): 312-318.
- [3] 兰海燕, 杨莘元, 刘海波, 等. 基于文化算法的多用户OFDM系统资源分配[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(1): 226-230.
LAN Hai-yan, YANG Shen-yuan, LIU Hai-bo, et al. Resource allocation for multi-user OFDM system based on cultural algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition): 2011, 41(1): 226-230.
- [4] CHENG P, ZHANG Z, CHEN H H, et al. Optimal distributed joint frequency, rate, and power allocation in cognitive OFDMA systems[J]. IETCommun, 2008, 2(6): 815-826.
- [5] 许文俊, 贺志强, 牛凯. OFDM系统中考虑信源编码特性的多播资源分配方案[J]. 通信学报, 2010, 31(8): 52-59.
XU Wen-jun, HE Zhi-qiang, NIU kai. Multicast resource allocation scheme considering source-coding characteristic in OFDM systems[J]. Journal on Communications, 2010, 31(8): 52-59.
- [6] 周广素, 吴启晖. CR OFDM系统中具有QoS要求的自适应资源分配算法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(6): 608-612.
ZHOU Guang-su, WU Qi-hui. Adaptive resources allocation with QoS requirement incognitive radio ofDM system[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2010, 11(6): 608-612.
- [7] GE Wen-dong, JI Hong, SI Peng-bo, et al. Optimal subcarrier allocation for cognitive radio with multi-user OFDM and distributed antenna[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2009, 126(4): 513-517.
- [8] 唐伦, 曾孝平, 陈前斌, 等. 认知无线网络基于正交频分复用的子载波和功率分配策略[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(8): 17-22.
TANG Lun, ZENG Xiao-ping, CHEN Qian-bin, et al. Novel strategy for subcarrier and power allocation in OFDM-based cognitive radio networks[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(8): 17-22.
- [9] 周杰, 俎云霄. 一种用于认知无线电资源分配的并行遗传算法[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 7508-7515.
ZHOU jie, ZU Yun-xiao. A parallel genetic algorithm in adaptive resource allocation for cognitive radio network[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(10): 7508-7515.
- [10] 朱思峰, 刘芳, 柴争义. 基于免疫计算的TD-SCDMA网络基站选址优化[J]. 通信学报, 2011, 32(1): 106-110.
ZHU Si-feng, LIU Fang, CHAI Zheng-yi. Immune computing-based base station location planning in the TD-SCDMA network[J]. Journal on Communications, 2011, 32(1): 106-110.
- [11] 孟宪福, 解文利. 基于免疫算法多目标约束P2P任务调度策略研究[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 101-107.
MENG Xian-fu, XIE Wen-li. Research on P2P task scheduling with multi-objective constraints based on immune algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 101-107.
- [12] 张向荣, 辜晓雪, 焦李成. 基于免疫谱聚类的图像分割[J]. 软件学报, 2010, 21(9): 2196-2205.
ZHANG Xiang-rong, QIAN Xiao-xue, JIAO Li-cheng. Immune pectral lustering lgorithm for mage egmentation[J]. Journal of Software, 2010, 21(9): 2196-2205.
- [13] KANG X, LIANG Y C, NALLANATHAN A, et al. Optimal power allocation for fading channels in cognitive radio networks: Ergodic capacity and outage capacity[J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2009, 8(2): 940.
- [14] ZHANG Rui, CUI Shu-guang, LIANG Ying-chang. On erg-odic sum capacity of fading cognitive multiple-access and broadcast channels[J]. IEEE Trans INF Theory, 2009, 55(11): 5161-5178.
- [15] 张然然, 刘元安, 林晓峰. 认知无线电下行链路中的OFDMA资源分配算法[J]. 电子学报, 2010, 38(3): 632-637.
ZHANG Ran-ran, LIU Yuan-an, LIN Xiao-feng. OFDMA based resources allocations for downlink cognitive radio[J]. Acta Elettronica Sinica, 2010, 38(3): 632-637.
- [16] GONG M G, JIAO L C, ZHANG L N, et al. Immunesecondary response and clonal selection inspired optimizers[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(2): 237-253.

编辑 张俊