

网络效益最大化的认知无线电频谱分配算法

郑志刚, 薛菲, 周井泉

(南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要:首先介绍了认知无线电系统中频谱分配的图论着色模型。针对该模型以网络效益最大化为目标,设计了自适应的交叉和变异算子,并在此基础上引入小生境技术,提出了基于自适应小生境遗传算法的认知无线电频谱分配算法。通过仿真实验比较了本算法、颜色敏感图论算法与经典遗传算法的性能。结果表明基于自适应小生境的遗传算法不易陷入局部最优,在较少的代数内就可以找到理想最优解,能更好地实现网络频谱效益最大化,其性能优于颜色敏感图论算法和经典遗传算法。

关键词:认知无线电;频谱分配;小生境;自适应;遗传算法

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)08-0091-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.08.023

Cognitive Radio Spectrum Assignment Algorithm with Network Benefit Maximization

ZHENG Zhi-gang, XUE Fei, ZHOU Jing-quan

(College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts & Telecommunications,
Nanjing 210003, China)

Abstract: Firstly introduce the graph coloring model of spectrum allocation in cognitive radio system. According to this model, design self-adaptive crossover and mutation operator with the network benefit maximization as the goal. Based on it, Niche technology is introduced. Then cognitive radio spectrum assignment based on self-adaptive Niche genetic algorithm is proposed. Simulations are conducted to compare the proposed method with color sensitive graph coloring algorithm and classical genetic algorithm. Results show that the proposed method cannot easily trap into local optimum, and can find the optimal solutions after only several generations, what is more, it better optimizes network spectrum utilization. The proposed method greatly outperforms the color sensitive graph coloring algorithm and classical genetic algorithm.

Key words: cognitive radio; spectrum allocation; Niche; self-adaption; genetic algorithm

0 引言

当前无线通信技术发展迅速,尤其是无线局域网技术(WLAN)的发展,有越来越多的人通过无线的方式接入互联网,使得无线频谱成为越来越紧缺的资源。目前,无线网络普遍采用的是固定分配的方式^[1,2],只有拥有授权的用户才能使用。认知无线电(Cognitive Radio, CR)的提出正是为了解决频谱资源的紧缺,使频谱分配方式更为灵活和高效。利用认知无线电技术,通过动态频谱接入方式可以有效降低频谱干扰,提高频谱利用率。

针对不同的网络体系结构及应用,人们提出了不

同的动态频谱分配模型,主要包括图论着色模型^[3,4]、博弈论模型^[5,6]、拍卖理论模型^[7,8]。图论模型执行比较简单,收敛较快,有很强的可扩展性。文献[3]提出了颜色敏感图论着色算法。文献[9]提出了基于List着色的频谱分配算法,以获得最大的频带分配数。文献[10]在频谱分配中引入了遗传算法(Genetic Algorithm, GA),并验证了其可行性。文中首先介绍了图论着色频谱分配模型,并在此基础上,提出一种自适应小生境遗传算法(Self-adaptive Niche Genetic Algorithm, SNGA)的频谱分配方法,通过仿真对基于SNGA的频谱分配算法和颜色敏感图论着色算法以及经典遗传算法的性能进行了比较,仿真结果验证了文

收稿日期:2012-10-31

修回日期:2013-01-31

网络出版时间:2013-04-22

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2009AA01Z202)

作者简介:郑志刚(1984-),男,硕士研究生,研究方向为认知无线电;周井泉,教授,研究方向为通信网络流量分配、路由选择、认知无线电。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130422.1726.049.html>

中所提算法的有效性和优越性。

1 认知无线电频谱分配图论着色模型

在认知无线网络中,认知用户择机使用授权用户的频谱,假设在一个 $X \times Y$ 的区域中随机分布着 K 个授权用户和 N 个认知用户,可用频谱被划分为 M 个互不重叠的同构正交子信道,用户间的干扰由欧式距离决定。那么可以用可用频谱矩阵、效益矩阵、干扰约束矩阵以及无干扰分配矩阵来描述认知无线电频谱分配图论着色模型^[5]。

定义 1(可用频谱矩阵 L):可用频谱矩阵用来表示频段和认知用户之间的可用关系。在某个空间、某个时间主用户不占用的频谱,由于主用户地理位置、发射功率等参数的不同,临近次用户对主用户频谱的可用性可能不同。可用频谱矩阵记为:

$$L = \{l_{n,m} | l_{n,m} \in \{0,1\}, n = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M\}_{N \times M} \quad (1)$$

其中, N 为认知用户数; M 为信道数; $l_{n,m} = 1$ 表示认知用户 n 可以使用信道 m ; $l_{n,m} = 0$ 表示 m 对 n 不可用。

定义 2(效益矩阵 B):效益矩阵 B 用来表示用户使用某频谱获得的效益情况,记为:

$$B = \{b_{n,m} | b_{n,m} \geq 0, n = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M\}_{N \times M} \quad (2)$$

其中, $b_{n,m}$ 为认知用户 n 使用信道 m 获得的最大带宽。矩阵 B 受矩阵 L 约束,当 $l_{n,m} = 0$ 时, $b_{n,m} = 0$ 。

定义 3(干扰约束矩阵 C):表示不同的认知用户同时使用同一个频谱时,认知用户之间产生干扰的情况,记为:

$$C = \{c_{n,k,m} | c_{n,k,m} \in \{0,1\}, n = 1, \dots, N; k = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M\}_{N \times N \times M} \quad (3)$$

其中, $c_{n,k,m} = 1$ 表示用户 n 与用户 k 不能同时使用信道 m , $c_{n,k,m} = 0$ 表示用户 n 与用户 k 可以同时使用信道 m 。矩阵 C 受矩阵 L 约束,当 $n = k$ 时, $c_{n,k,m} = 1 - l_{n,m}$ 。

定义 4(无干扰分配矩阵 A):无干扰分配矩阵 A 表示在一定的目标函数下得到的无干扰的频谱分配结果,记为:

$$A = \{a_{n,m} | a_{n,m} \in \{0,1\}, n = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M\}_{N \times M} \quad (4)$$

其中, $a_{n,m} = 1$ 时表示认知用户 n 可以使用频谱 m ; $a_{n,m} = 0$ 表示认知用户 n 不能使用频谱 m 。并且无干扰分配矩阵 A 需要满足干扰约束矩阵 C 定义的约束条件:

$$a_{n,m} + a_{k,m} \leq 1 \cap c_{n,k,m} = 1, \forall n, k \in [1, N], m \in [1, M] \quad (5)$$

实际应用中,由于认知无线电系统进行频谱分配

的时间相对于频谱环境变化的时间很短,因此假定用户地理位置、可用频谱资源等是静态的,即矩阵 L, B, C 在一个分配周期内维持不变。认知无线电频谱分配目标即最大化网络效益 $U(R)$,令 $\Lambda(L, C)_{N, M}$ 表示无干扰频谱分配矩阵集合,则频谱分配可表示为如下所示的优化问题:

$$A^* = \arg \max_{A \in \Lambda(L, C)_{N, M}} U(R) \quad (6)$$

其中, A^* 为最优的无干扰频谱分配矩阵。

2 基于 SNGA 的频谱分配算法

2.1 自适应小生境遗传算法基本原理

自适应小生境遗传算法(SNGA),可以自适应地调整交叉和变异概率,并采用小生境技术,将组织结构相近的一些个体划分为一个种群,每一代分类为几个种群,其中优秀的个体有更大的机率参加种群中以及种群之间的遗传操作产生新一代群体。SNGA 能够更好地保持种群的多样性,同时收敛速度更快,全局的寻优能力更强,尤其适合复杂多峰函数的寻优问题。其主要操作包括染色体编码、种群初始化、适应度函数设计、遗传操作。选择、交叉和变异是遗传操作的核心算子。

2.2 基于 SNGA 频谱分配的实现方案

在图论着色模型中,以网络效益最大化为频谱分配目标时,SNGA 频谱分配的方案即为运用 SNGA 在已知可用频谱矩阵 L 和效益矩阵 B 以及干扰约束矩阵 C 时,找到使网络效益最大的无干扰分配矩阵 A 。

2.2.1 目标函数与种群编码

文中以最大化整个网络的频谱效益总和为目标,对一无干扰频谱分配,信道 m 获得的频谱效益为:

$$\alpha_m = \sum_{n=1}^N a_{n,m} \cdot b_{n,m} \quad (7)$$

整个网络的频谱效益总和为:

$$U_{\text{sum}} = \sum_{m=1}^M \alpha_m \quad (8)$$

即目标函数 $U(R) = U_{\text{sum}}$ 。

由于可用频谱矩阵 L 已经初步具备了二进制编码形式,所以染色体直接采用二进制编码。并且, L 中值为 0 的项,对应的无干扰分配矩阵 A 中的项必然为 0,因此染色体中的每位依次与 L 中为 1 的元素相对应, L 中为 0 的元素略去不编入染色体,染色体的长度由 L 中为 1 的元素个数确定。

2.2.2 算子设计

选择、交叉、变异为 SNGA 的核心操作算子,设计的合理与否直接关系算法的整体性能。文中针对认知无线电频谱分配模型,设计了适合该模型的自适应的交叉和变异概率。通过分析,认为基于预选机制小生

境环境实现方式最适合该模型。预选机制要求新生的子代适应度大于父代时,才能替代父代遗传到下一代种群中,因为父代子代编码结构具有相近性,所以替换的都是编码结构相近的个体,从而可以产生小生境的进化环境,保持种群的多样性。

(1) 交叉算子。

实践表明,均匀交叉可以更快地实现全局搜索,所以文中采用均匀交叉的方式。当频谱分配的目标为实现网络效益最大化时,会允许某些认知用户同时使用多个信道,而每个信道上的分配方案是相对独立的,实现每个信道的频谱效益最大化,即实现了整个网络的频谱效益最大化。而以往的交叉方法^[11,12]都是针对整个染色体进行的,这会导致染色体中某些基因段向好的方向进化,而另一些可能会向坏的方向进化,使整个染色体各基因段的进化方向不一致,在进化的过程中使好的基因段难以保留。针对这一问题,文中的交叉操作将直接作用于基因段。其中,每个基因段依次对应一个信道,每个基因段的适应度为所对应信道的频谱效益,由(7)式给出。图1给出了 $N=4$ 、 $M=3$ 时,矩阵 L 与染色体的对应关系以及两条染色体交叉的示例。其中, P_i 和 P_j 为种群中参与交叉的第 i 条和第 j 条染色体, P'_i 和 P'_j 为交叉后生成的子代染色体,其中基因段1与3都发生了交叉,基因段2未发生交叉。

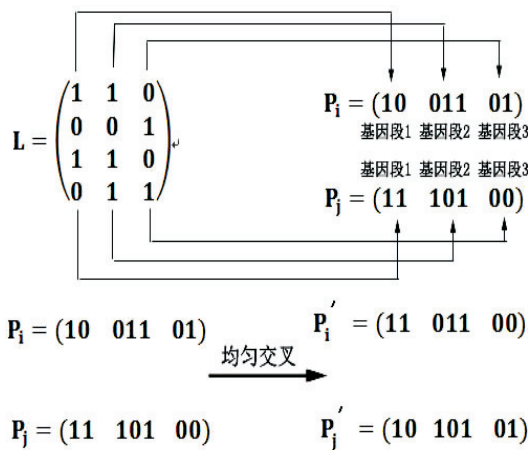


图1 染色体结构及交叉示例

基因段的交叉概率为:

$$P_c = 1 - \frac{P_{cl} \cdot (f^* - f_{\min})}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (9)$$

其中, $P_{cl} = 0.1$; f^* 为两个待交叉基因段适应度的较大值; f_{\max} 为整个种群中该基因段适应度的最大值; f_{\min} 为整个种群中该基因段适应度的最小值。

交叉算子的具体操作过程为:随机将染色体种群两两分组,对每组染色体的基因段按对应的交叉概率进行交叉,计算产生的子代基因段的适应度值,只有当其高于父代时,才用其替代父代,否则继续保留父代的基因段。

(2) 变异算子。

同交叉算子,变异算子计算自适应的变异概率也是基于每条染色体的基因段计算的。变异概率为:

$$P_m = P_{m1} + \frac{P_{m2} \cdot (f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (10)$$

其中, $P_{m1} = P_{m2} = 0.1$; f 为待变基因段的适应度值; f_{\max} 为整个种群中该基因段适应度的最大值; f_{\min} 为整个种群中该基因段适应度的最小值。

变异操作采用基本位变异,对每个基因段变异操作完成后,计算其适应度值,如果大于父代的适应度值则替换对应的父代基因段,如果小于父代的适应度值,则父代基因段保留。

(3) 选择算子。

基于预选机制的小生境环境实现方式,交叉与变异操作本身就隐含了选择过程,为了配合交叉与变异操作,文中设计了一种适合的选择算子。其具体实现为:种群的一半染色体从上一代中以轮盘赌法选出,另一半为随机生成的新染色体,并将上上一代中的最优基因段拼成一个新的染色体,直接替换当前种群中适应度最差的染色体。这实际是一种精英保留策略,可以使最优的基因段不被破坏直接保留到下一代中去,同时通过引入新的染色体可有效地保持种群的多样性,更好地防止了算法的早熟。

2.2.3 算法流程

文中算法实现的流程如下:

步骤一:初始化可用频谱矩阵 L 、效益矩阵 B 、干扰约束矩阵 C ,根据 L 中为1元素的个数确定每条染色体的维数;确定种群的规模(用 s 表示),确定进化代数(用 g 表示)最大值。

步骤二:初始化种群 $P(g) = \{P_1^g, P_2^g, \dots, P_s^g\}$,令初始代数 $g = 0$ 。

步骤三:求出种群中每个基因段的最优基因段组成新的染色体,求出对应的无干扰分配矩阵 A ,计算出对应的频谱效益 Q ,比较其与 Q_{\max} 的大小:若大于 Q_{\max} ,则将 Q 存入 Q_{\max} ;若小于 Q_{\max} ,则保留 Q_{\max} 不变。

步骤四:判断算法是否满足终止条件(文中设为进化达到最大代数或连续五次 Q_{\max} 无变化):若满足,算法终止,执行步骤六;否则,算法继续。

步骤五:种群更新,对种群进行选择、交叉和变异的操作;遗传代数 $g = g + 1$,并返回步骤三。

步骤六: Q_{\max} 中保存的即为最大网络频谱效益,将其对应的染色体映射为无干扰频谱分配矩阵 A ,即为最佳无干扰频谱分配矩阵。

3 仿真实验与结果分析

利用 Matlab 建立仿真实验环境,验证采用 SNGA

解决认知无线电频谱分配问题的有效性。通过仿真比较 SNGA 与颜色敏感图论着色 (CSGC) 算法以及经典遗传算法 (GA) 的性能。

为了比较方便, CSGC 算法采用协作式最大化频谱效益准则, SNGA 与 GA 的最大进化代数都设为 100, 种群大小设为 50。其中 GA 的交叉概率设为 0.9, 变异概率设为 0.1。矩阵 L 、 B 、 C 由文献[3] 的附录 I 提供的伪代码随机产生, 不同实验采用不同的 L 、 B 、 C , 同一次实验不同算法采用相同的 L 、 B 、 C , 所有的仿真结果的取值为 50 次重复运行的平均值。图 2 为 $N = 20$, $M = 10$ 时, 不同的初始条件下, SNGA 和 CSGC 网络频谱效益曲线。从图 2 中可以看出基于 SNGA 获得的网络频谱效益大于 CSGC 算法, 证明了 SNGA 的优越性和有效性。

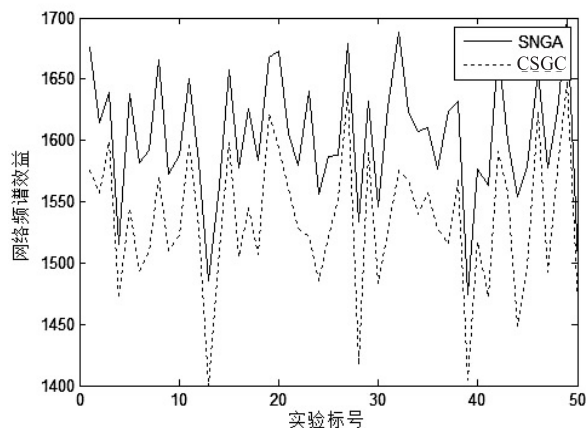


图 2 SNGA 和 CSGC 性能比较

图 3 为可用频谱 $M = 20$ 不变时, 随着认知用户数量的增加, SNGA 与 CSGC 网络频谱效益的变化曲线, 其中认知用户 N 的变化范围为 10 到 30。图 4 为认知用户 $N = 20$ 不变时, 随可用频谱数量的增加, SNGA 与 CSGC 网络频谱效益的变化曲线, 其中可用频谱 M 的变化范围为 10 到 30。结合图 3 和图 4 的仿真结果, 可以看出, 基于小生境自适应遗传算法所得到的网络频谱效益一直大于颜色敏感图论算法, 可以更好地实现

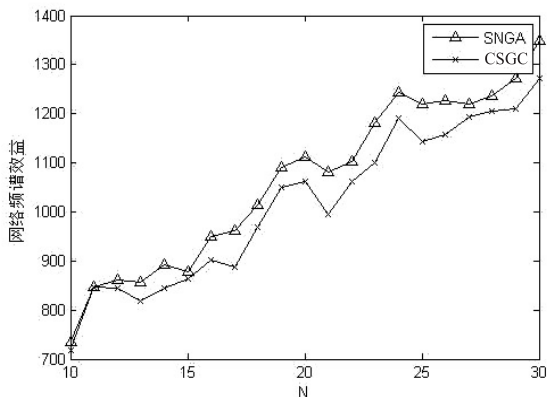


图 3 N 变化时算法性能

网络效益最大化的目标, 文中算法的性能优于颜色敏感图论算法。

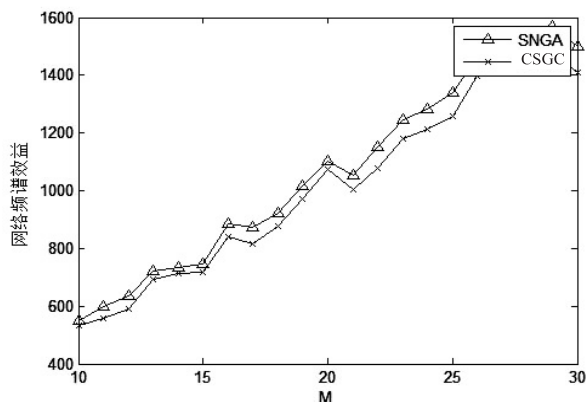


图 4 M 变化时算法性能

图 5 给出了 $N = 20$, $M = 10$ 时, 随进化代数的增加, SNGA 与 GA 性能的比较。从图 5 中可以看出, 经典遗传算法在 100 代以内没有达到收敛, 而文中算法基本在 10 代以内就可以达到收敛, 且其获得的网络频谱效益明显优于经典遗传算法。

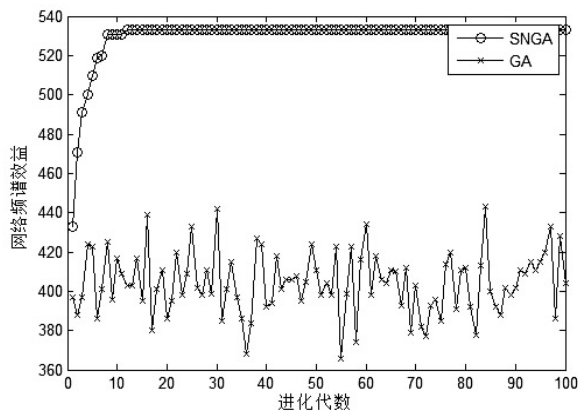


图 5 SNGA 与 GA 性能比较

4 结束语

文中以最大化网络效益为目标, 针对认知无线电图论频谱分配模型, 设计了适合该模型的自适应的交叉和变异算子, 并引入小生境技术, 提出了基于自适应小生境算法的频谱分配算法。通过仿真, 将文中的算法和颜色敏感图论算法以及传统遗传算法进行比较, 结果表明文中算法寻优能力更强, 且可以在较少的代数内收敛, 能更有效实现网络效益的最大化。

参考文献:

- [1] Broderson R W, Wolisz A, Cabric D, et al. CORVUS: A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum[M]. [s. l.]: [s. n.], 2004.
- [2] Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Com-

参考文献:

[1] 孙利民,叶 驰,廖 勇. 传感器网络的路由机制[J]. 计算机科学,2004,31(3):50-54.

[2] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks[C]//Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. [s. l.]:[s. n.],2000:56-67.

[3] 任 彪,柳立峰,马 建. 无线传感器网络中定向扩散协议的改进算法[J]. 电子与信息学报,2006,28(3):563-566.

[4] 李应娣,单志龙. 无线传感器网络定向扩散路由协议研究[J]. 计算机技术与发展,2010,20(9):40-43.

[5] 赵 奇,王汝传,孙力娟. 无线传感器网络定向扩散协议研究及改进[J]. 计算机工程与设计,2007,28(12):2825-2828.

[6] Tang Junhua, Dai Sisi, Li Jianhua, et al. Gossip-based scalable directed diffusion for wireless sensor networks[J]. Int. J. of Communication Systems,2011,24(11):1418-1430.

[7] Chen M, Kwon T, Choi Y. Energy-efficient differentiated directed diffusion (EDDD) in wireless sensor networks[J]. Computer Communications,2006,29(2):231-245.

[8] Di Pietro R, Mancini L V, Law Y W, et al. LKHW: a directed diffusion-based secure multicast scheme for wireless sensor networks[C]//Proc. of 2003 International Conference on Parallel Processing Workshops. [s. l.]:[s. n.],2003:397-406.

[9] Wang E K, Hui L C K, Yiu S M. Authenticated Directed Diffusion[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Cryptology and Network Security. [s. l.]:[s. n.],2008.

[10] Min C, Kwon T, Yong Y, et al. Mobile agent-based directed diffusion in wireless sensor networks[J]. Journal on Applied Signal Processing,2007,2007(1):219-219.

[11] 姜 飞,史浩山,徐志燕,等. WSNs 中基于能量均衡定向扩散的移动 Agent 路由算法[J]. 西北工业大学学报,2010,28(6):898-905.

[12] Intanagonwiwat C, Estrin D, Govindan R, et al. Impact of network density on data aggregation in wireless sensor networks [C]//Proc. of 22nd International Conference on Distributed Computing Systems. [s. l.]:[s. n.],2002:457-458.

[13] Marcucci A, Nati M, Petrioli C, et al. Directed diffusion light: low overhead data dissemination in wireless sensor networks [C]//Proc. of 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference. [s. l.]:[s. n.],2005:2538-2545.

[14] Handziski V, Köpke A, Karl H, et al. Improving the Energy Efficiency of Directed Diffusion Using Passive Clustering[J]. Lecture Notes in Computer Science,2004,2920/2004:172-187.

[15] NS 中文手册[M]. 出版地不详: NS 手册翻译小组,2007.

[16] He Yu, Berson S, Braden B. A programmable routing framework for autonomic sensor networks[C]//Proc. of Autonomic Computing Workshop. [s. l.]:[s. n.],2003:60-68.

[17] Ma Zhanshan, Krings A W. Spatial Distribution Patterns, Power Law, and the Agent-based Directed Diffusion Sensor Networks [C]//Proc. of Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. [s. l.]:[s. n.],2008.

[18] Silva F, Heidemann J, Govindan R, et al. Directed Diffusion [R]. [s. l.]: USC/Information Sciences Institute,2004.

[19] Sayyad A, Shojafar M, Delkhah Z, et al. Improving Directed Diffusion in sensor network using learning automata: DDLA new approach in Directed Diffusion[C]//Proc. of 2010 2nd International Conference on Computer Technology and Development. [s. l.]:[s. n.],2010:189-194.

[20] Shah R C, Rabaey J M. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks[C]//Proc. of Wireless Communications and Networking Conference. [s. l.]:[s. n.],2002.

[21] Carman D W, Kruus P S, Matt B J. Constraints and approaches for distributed sensor network security [R]. [s. l.]: NAI Labs,2000.

(上接第 94 页)

munications[J]. IEEE JSAC,2005,23(2):201-220.

[3] Peng C, Zheng H, Zhao B. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access[J]. Mobile Networks and Applications,2006,11(4):555-576.

[4] 贾 杰,王 闯,张朝阳,等. 认知无线网络中基于图着色的动态频谱分配[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(3):336-339.

[5] 徐昌彪,刘雪亮,鲜永菊. 基于博弈论的动态频谱分配技术研究[J]. 电子技术应用,2012,38(4):102-105.

[6] 张新春,何世彪,葛利嘉,等. 基于频谱差异的动态频谱分配博弈算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2012,24(1):20-23.

[7] 刘振坤,鲜永菊,徐昌彪. 认知网络中基于竞价模型的频谱分配研究[J]. 计算机应用研究,2010,27(3):1006-1008.

[8] 张文柱,王凌云. 基于单频段多赢家拍卖的动态频谱分配[J]. 通信学报,2012,33(2):1-6.

[9] Wang W, Liu X. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks[C]//Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference. Dallas, USA:[s. n.],2005:690-694.

[10] Mustafa Y, Nainay E. Island Genetic Algorithm-based Cognitive Networks[D]. Blacksburg, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University,2009.

[11] 仲向远,金 敏,仲向前,等. 基于自适应遗传算法的蜂窝网络信道分配[J]. 计算机工程,2010,36(17):189-191.

[12] 朱冰莲,裴光术,张 磊,等. 认知无线网络中系统效益最大化的频谱分配[J]. 计算机工程,2012,38(3):107-109.

网络效益最大化的认知无线电频谱分配算法

作者：[郑志刚](#)，[薛菲](#)，[周井泉](#)，[ZHENG Zhi-gang](#)，[XUE Fei](#)，[ZHOU Jing-quan](#)

作者单位：[南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京, 210003](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)



年，卷(期)：2013(8)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201308023.aspx