

## 认知无线网络中一种基于蚁群优化的频谱分配算法

杨淼\* 安建平

(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

**摘要:** 针对认知无线电中的频谱分配问题, 该文提出一种基于蚁群优化的频谱分配方法。该方法在授权用户和认知用户共存的认知网络模型中, 通过蚁群访问各个认知节点, 并释放信息素, 从而实现概率型的全局搜索的并行频谱分配算法。与传统的频谱分配方式比较, 该算法能够进行增强型学习积累, 快速收敛到最优路径, 从而获得了最优的平均信道效益。文中对该算法进行了分析和说明, 并通过仿真证明了算法的有效性和稳定性。

**关键词:** 认知无线电; 频谱分配; 蚁群优化算法; 信息素

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2306-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00242

## An Ant Colony Optimization Algorithm for Spectrum Assignment in Cognitive Radio Networks

Yang Miao An Jian-ping

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To solve the spectrum assignment issue in cognitive network, a new ant optimization algorithm for spectrum assignment is proposed in this paper. In the cognitive radio network model, where primary and secondary users are coexistent, ants visit secondary users as the node, and leave pheromones using channel rewards. By this way the optimized parallel algorithm is implemented. Compared with the traditional spectrum assignment method, it can implement enhanced accumulation by learning, fast coverage to the optimal resolution, and improve the performance in the whole network average throughput. The method is analyzed. Simulation results verify the stability and validity of the method.

**Key words:** Cognitive Radio (CR); Spectrum assignment; Ant colony optimization; Pheromone

### 1 引言

近几年, 无线电技术随着无线通信业务的需求而快速发展, 传统的固定频段的频谱使用方式, 即频谱只能供给授予执照的合法用户使用, 这种静态的分配方式已经不能满足如今无线通信用户和业务的需求<sup>[1]</sup>。

认知无线电概念<sup>[2,3]</sup>的产生改变了传统的固定的静态频谱分配和使用方式, 它提出了动态分配频谱共享的概念, 它允许未授权的无线系统通过对周围无线通信环境的感知, 动态地调整自身参数, 如改变传输功率、载频、调制方式等, 以适应环境的变化, 避免对授权用户造成干扰, 来实现共享授权用户所使用的频段, 从而提高频谱利用率<sup>[4]</sup>。

在认知无线电中的关键技术中, 多个认知用户竞争有限的可用信道, 实现频谱的合理有效分配是

认知无线电的重点和难点问题。频谱的分配政策不仅要避免对授权用户造成干扰以及认知用户间的自干扰, 还要满足不同用户对频谱资源的需求, 增大系统容量, 提高频谱利用。

在国内外各个研究机构和学者在这方面已经开展了很多的工作, 为认知无线电中的频谱分配问题提出了分析模型, 主要可分为合作式的频谱分配和非合作式频谱分配<sup>[4]</sup>。合作式频谱分配是认知网络中各节点相互合作, 节点的频谱分配策略不仅考虑本节点的应用需求, 还考虑此策略对其他用户造成的影响。非合作式频谱分配指节点的频谱分配策略只考虑节点本身的需要, 这类用户可定义为自私用户。目前, 建立动态频谱分配模型大多是借鉴于一些经典的数学理论以及微观经济学理论等, 主要有图论着色<sup>[5]</sup>、博弈论<sup>[6]</sup>、拍卖竞价<sup>[7]</sup>等方法。

图着色的频谱分配方法<sup>[5]</sup>是理论较为成熟的一种算法, 它将频谱分配问题表示成一个冲突图  $G = (V, E, B)$ , 根据不同的目标优化函数和规则, 依次将信道非配给用户。当规则下权重值相同时, 获得

2011-03-16 收到, 2011-06-15 改回

国家自然科学基金(61072048)资助课题

\*通信作者: 杨淼 ym322@bit.edu.cn

最优解是成了一个 NP 难题。

文献[6]提出了一种基于博弈论的频谱分配的方法。博弈论(game theory),是应用数学的一个分支,使用数学模型来研究决策过程以及决策的均衡问题。通过使用博弈论为频谱分配的博弈过程找到相应的纳什均衡点,在大多数情况下,纳什均衡点也正是策略选择的最优点。但是该方法在复杂的分配情况下很难得到纳什均衡点,不易实现。

基于微观经济的无线电资源分配机制<sup>[7]</sup>(如拍卖、标价、合同)已经被关注,而且已经被证明是认知无线网络的无线资源(频谱、信道和功率)分配问题的有效解决方法。基于拍卖定价的方法,需要多次竞价才能得到较优的解。这就需要感知用户及基站之间进行多次交互,分配过程复杂。

蚂蚁算法<sup>[8-10]</sup>(Ant Algorithm, AA)是近年来刚刚诞生的随机优化方法,它是一种源于大自然的新的仿生类算法。它是意大利学者 Dorigo 等最早提出的,蚂蚁算法其主要原理是模仿蚂蚁在寻找食物时,能在其经过的路径上释放一种叫做信息素的物质,使得一定范围内的其他蚂蚁能够感觉到这种物质,且倾向于朝向该物质强度高的方向移动,这样蚂蚁群体之间的信息传递,从而达到了寻优的目的,又称为蚁群优化方法(Ant Colony Optimization, ACO),这种算法成功地解决了一系列的组合优化问题。其优点是:其原理是一种正反馈机制,它通过信息素的不断更新达到最终收敛到最优路径上;它是一种通用型随机优化方法,并且在实际蚂蚁的基础之上融入了人类的智能;它是一种分布式的优化方法,不仅适合目前的串行计算机,而且适合未来的并行计算机,在降低计算复杂度的同时还大大提高计算速度;它是一种全局优化的方法,对于求解单目标优化问题和多目标优化问题都十分有效。

蚂蚁算法被广泛的应用于无线路由计算的问题,路由是实现 QoS 的关键之一,将蚁群算法用于解决受限路由问题,目前可以解决包括带宽、延时、包丢失率和最小花费等约束条件在内的 QoS 组播路由问题<sup>[11,12]</sup>,比现有的链路状态路由算法具有明显的优越性。

文献[13]中,作者提出了一种基于蚂蚁算法的多参数车辆无线导航系统。该模型能够在出发地和目的地间找到优化的多参数下的优化路径,同时能够避免车辆拥堵。算法可工作在线上和离线两种模式下,仿真证明了其可行性和性能。文献[14]中,作者为了解决无线网络中频谱分配问题,利用蚁群优化算法在满足一定的多用户干扰约束下实现了完成最小带宽频谱分配问题(MS-FAP)。实验证明了该算法

了有效性和优越性。

本文中针对认知无线电中频谱分配问题提出了一种基于蚁群优化的分配算法。该算法通过信息素的增强型学习的积累,从而快速收敛到最优路径上,有效解决图着色模型中 NP 难题,同时大大提高运行速度,节省了频谱分配所需时间。

## 2 系统模型

在分布式认知无线电频谱共享系统中,每个认知用户(Secondary User, SU)各自感知授权用户(Primary User, PU)信号的存在,并根据自身的性能和方位等情况,得到各自可用的频谱和所受的干扰约束条件<sup>[15]</sup>。然后这些认知用户之间通过控制信道或认知网络基站等方式共享这些可用信道的信息。通过这样的方式,认知网络收集可用信道和干扰约束的信息,构建网络拓扑结构抽象成图。

如图 1 中 3 个授权用户存在的认知网络中,每个授权用户占用一个信道,分别为信道 1,信道 2 和信道 3。在授权用户通信范围内的各个认知用户不能占用授权用户通信所使用的信道,以避免对授权用户造成干扰。同时当两个相邻的认知用户的通信范围彼此交叠时,如果它们使用同一信道工作时,也会对彼此造成干扰。因此感知用户在受到授权用户通信约束的同时,也受到来自相邻节点(认知用户)的约束。

图 2 所示为图 1 的认知用户网络抽象拓扑结构图。图中的每一个顶点代表一个认知用户,每条边代表一对顶点间的冲突或者干扰。如果图中的某两个顶点由一条边连接,则假定这两个节点不能同时使用相同的频谱。

例如,节点 1 位于主用户 1(授权用户)的通信范围内。当主用户 1 工作时,信道 1 不能被节点 2 所使用。节点 1 没有任何与其他节点的边界,所以当信道空闲时,它可用自由的使用信道 2 和信道 3,

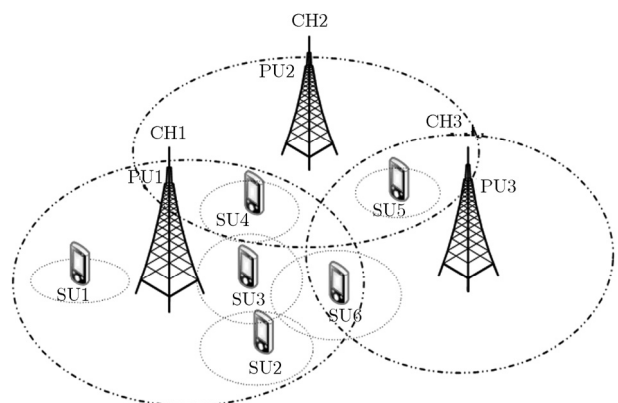


图 1 认知网络频谱分配模型

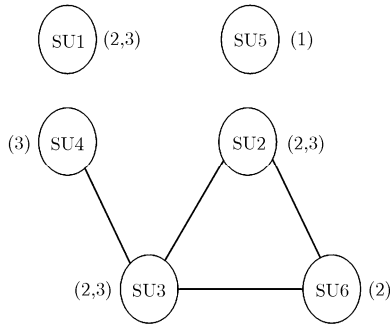


图2 认知网络频谱分配拓扑结构

(2,3)构成了节点1的可用信道的集合。相反,节点2、节点3和节点6的通信区域是交叠的,他们之间存在边界,这表明他们在同一信道上工作时会发生冲突。

在认知网络应用环境中,频段可用性是时变的,由授权用户的工作状况和认知用户的移动性决定。这就使得网络的拓扑结构会随着环境的变化而发生改变。拓扑结构的改变可以通过认知网络周期性的检测报告获得,通过实时的信息交互,认知网络中每个节点会更新数据库里面的关于网络拓扑的信息。本文假定一个检测周期内的系统拓扑结构不会发生改变。

### 3 频谱分配问题的矩阵描述

图论着色中频谱分配问题可用信道矩阵、效益矩阵、干扰约束矩阵和分配矩阵描述。它们的定义如下<sup>[16]</sup>:

(1)可用频谱矩阵  $\mathbf{L}_{N \times M}$ 。  $\mathbf{L} = \{l_{n,m} \in \{0,1\}\}_{N \times M}$ ,  $l_{n,m} = 0$  表示用户  $n$  不可以使用频带  $m$ ,  $l_{n,m} = 1$  表示用户  $n$  可以使用频带  $m$ 。频带  $m$  被授权用户占用,如果使用就会对授权用户造成干扰。可用频谱矩阵是针对授权用户来描述的,只考虑授权用户间的干扰,不考虑感知用户的干扰。

(2)干扰约束矩阵  $\mathbf{C}_{N \times N \times M}$ 。表示认知用户间的干扰约束。如果  $c_{n,k,m} = 1$ , 用户  $n$  和用户  $k$  之间使用信道  $m$  时会产生相互干扰。干扰约束取决于信号的强度和用户间的距离和用户所处的区域。

(3)信道效益矩阵  $\mathbf{B}_{N \times M}$ 。表示一个用户成功获得一个频带的回报,也就是获得的信道吞吐量。 $b_{n,m}$  表示用户  $n$  使用频带  $m$  能获得的最大带宽吞吐量比(假设没有邻道干扰)。若  $l_{n,m} = 0$ , 则  $b_{n,m} = 0$ 。

(4)无冲突分配矩阵  $\mathbf{S}_{N \times M}$ 。  $\mathbf{S} = \{s_{n,m} \in \{0,1\}\}_{N \times M}$ , 其中  $s_{n,m} = 1$  表示频带  $m$  分配给用户  $n$  使用,否则  $s_{n,m} = 0$ 。无冲突分配矩阵必须满足  $\mathbf{L}_{N \times M}$  和  $\mathbf{C}_{N \times N \times M}$  定义下的干扰约束条件。

### 4 基于蚁群优化的频谱分配算法

本文中我们假设认知用户为蚂蚁可能访问的节点,而为用户分配一个信道看作是蚂蚁选择一条移动路径,每只蚂蚁在每个节点留下的信息素和此节点分配可用信道而得到的信道效益和蚂蚁所经历的路线的长短相关的函数。蚂蚁行动是否到达终点和干扰约束条件有关。蚂蚁访问的节点数等于认知用户的个数  $N$ , 用编号  $n$  表示;信道的总数为  $M$ , 用编号  $m$  表示;每个认知用户(节点)出发的蚂蚁数量是相等的,即每个认知用户作为源节点的机会是相等的,而且每只蚂蚁不重复经过相同的节点;蚂蚁的序号可用  $\chi$  表示;迭代次序用编号  $\xi$  表示。基于蚁群优化的频谱分配算法的步骤如图3所示。

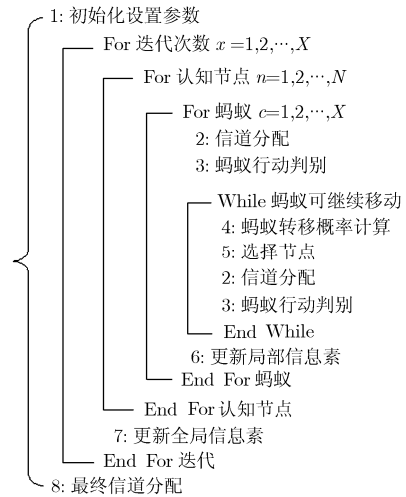


图3 基于蚁群优化的频谱分配算法流程

(1)初始化设置参数:设定算法迭代的次数,每个节点蚂蚁的个数。循环中可用信道矩阵  $\mathbf{L}$  和信道效益矩阵  $\mathbf{C}$  是随算法的进行而改变的,再下一只蚂蚁出发前,需要将其还原成原始值。为每只蚂蚁设置禁忌表,记录蚂蚁所经过的节点,并禁止蚂蚁访问经历过的节点。定义信息素矩阵为  $\mathbf{T}_{N \times M \times \Xi}$ , 其中  $N$  为认知用户的个数,  $M$  为信道的个数,  $\Xi$  为迭代的次数。

(2)信道分配:定义消耗函数如下,

$$\Delta_{n,m} = \left[ \sum_{i=1, i \neq n}^N c_{n,i,m} l_{i,m} \left( \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N c_{i,j,m} l_{j,m}}{b_{i,m}} \right) \right] / b_{n,m} \quad (1)$$

这里的信道分配相当于根据消耗函数为蚂蚁选择一条移动路径。根据文献[5],信道分配的设计原则有多种方式,主要可分为最大化吞吐量和最大化

公平性两类, 每一种又可分为合作式和非合作式原则。本文利用合作的最小化总体干扰和回报比来设计消耗函数, 并根据它为节点  $n$  分配消耗函数最小值所对应的信道  $m$ 。

如果最小值对应的信道不是唯一的, 则从这些信道中随机为用户  $n$  分配一个信道。被选择的信道  $m$  将从可用信道矩阵  $\mathbf{L}$  中删除, 即  $l_{i,m} = 0$ ,  $i = 1, \dots, N$ 。此时修改后的可用信道矩阵用  $\mathbf{L}'$  表示。值得注意的是这里的分配是局部分配, 代表局部解, 而不是最终的分配。

(3) 蚂蚁行为判断: 定义蚂蚁行动函数如下:

$$A_{\chi,\xi} = \begin{cases} 0, & \sum_{j=1}^N c_{n,j,m} = 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

蚂蚁行动函数指示蚂蚁是否继续移动, 当  $A_{\chi,\xi} = 0$  时, 即认知用户  $n$  使用信道  $m$  不会对剩余的未经过的用户节点造成干扰, 那么此时蚂蚁行动到终点, 蚂蚁  $\chi$  停留在此节点处, 不再继续移动。相反, 如果  $A_{\chi,\xi} = 1$ , 则蚂蚁继续前进。这说明当信道  $m$  还能被多个剩余的节点使用, 则蚂蚁需要遍历这些节点, 使这些节点都有机会增加信息素, 从而使分配合理公平。

在每一次蚂蚁行动判别后、下次行动前, 需要将上一个用户节点所分配的信道  $m$  从它和与它有干扰约束的相邻的用户的可用信道中删除。同时解除用户节点之间关于信道  $m$  的干扰约束关系。用户的可用信道和干扰约束关系式是随着蚂蚁的行动而不断改变的。这些都是通过设置  $\mathbf{L}$  和  $\mathbf{C}$  的值来实现的。

(4) 蚂蚁转移概率计算: 每只蚂蚁只经过相同节点一次, 如果蚂蚁行动没有被终止, 并且还有没有访问的信道, 则蚂蚁按照以下转移概率进行移动。

$$P_i^{\chi} = \frac{\left( \sum_{u=1}^M t_{i,u,\xi} l_{i,u} \right)^{\alpha} \left( \sum_{u=1}^M l'_{i,u} b_{i,u} \right)^{\beta}}{\sum_{i \in I} \left[ \left( \sum_{u=1}^M t_{i,u,\xi} l_{i,u} \right)^{\alpha} \left( \sum_{u=1}^M l'_{i,u} b_{i,u} \right)^{\beta} \right]} \quad (3)$$

式(3)中,  $I$  为蚂蚁下一个可能访问的节点的集合, 其中不包含禁忌表中的元素。 $\alpha$  和  $\beta$  为权重因子, 分别表示信息素和信道效益的相对重要程度。这里  $\alpha$  和  $\beta$  取 2<sup>[8]</sup>。 $t_{i,u,\xi}$  为信息素矩阵的元素, 代表蚂蚁在第  $\xi$  迭代中于用户  $i$  和信道  $u$  处留下的信息素的大小。

(5) 选择后继用户节点: 蚂蚁逐步地构造问题的可行解, 在一步解的构造过程中, 蚂蚁以概率方式选择信息素强、启发式因子高的为下一个节点, 直到不能继续移动为止。此时蚂蚁所走过的路径对应

求解问题的一个可行解。这里按下式选出下一个节点,

$$n' = \begin{cases} \text{RW}(p_i^{\chi}), & g < G \\ \text{argmax}(p_i^{\chi}), & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,  $g$  是一个随机数, 服从(0, 1)间的均匀分布。 $G$  取值为 0.9, RW 表示车轮赌选择法。如果  $g$  小于  $G$ , 则按照转移概率的大小, 由车轮赌选择法选出下一个访问的节点<sup>[17]</sup>。否则取转移概率最大的为下一个节点。

(6) 更新局部信息素: 当一只蚂蚁停在了某个节点不再继续行动, 则蚂蚁的循环结束。根据蚂蚁的路线, 对信息素矩阵进行局部的更新:

$$t'_{n,m,\xi} = t_{n,m,\xi} + Q/d_n \quad (5)$$

其中  $Q$  为蚂蚁所释放的信息量,  $Q = \sum_{k \in K} b_{k,m}$ ,  $d_n$  为蚂蚁所经过的节点数。

(7) 更新全局信息素: 当一次迭代结束后, 各路径上的信息素根据式(6)更新。 $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ ) 表示信息素残留系数, 用  $1 - \rho$  表示信息素的挥发系数。

$$\mathbf{T}_{n,m,\xi}^{\text{new}} = \rho \cdot \mathbf{T}_{n,m,\xi}^{\text{old}}, \quad n = 1, \dots, N, \quad m = 1, \dots, M \quad (6)$$

(8) 按照信息素矩阵给信道分配用户:

$$\omega_n = \text{argmax} \left[ \left( \frac{1}{\Xi} \sum_{\xi=1}^{\Xi} t_{n,m,\xi} \right) l_{n,m} \right] \quad (7)$$

依次选择信息素最大值, 将与之对应的信道分配给对应的用户。值得注意的是, 分配还需要满足干扰约束矩阵  $\mathbf{C}$  的限制, 所以当进行一次分配后下一次分配前, 将信息素矩阵中与分配有干扰约束关系的项设置为 0, 直到分配完成。

## 5 仿真及结果分析

下面通过和文献[5]中的 CSUM(Collaborative-Max-Sum-Reward)方法验证蚁群优化算法的有效性和稳定性。值得注意的是两种算法在干扰约束矩阵  $\mathbf{C}$  的约束下, 单个感知用户可能会分配得到多个信道, 同时某个信道也有可能分配给多个无冲突的用户使用。

仿真设置认知网络位于  $10 \times 10$  矩形区域内, 随机分布着  $N_p$  个授权用户和  $N$  个认知用户。将  $M$  个可用信道随机分配给每个授权用户。仿真中假设从各个源节点出发的蚂蚁数量相同。授权用户的通信半径为  $d_p = 4$ , 认知用户的通信半径为  $d_s = 2$ 。根据各个用户的位置和通信范围, 确定可用信道矩阵  $\mathbf{L}$  和干扰约束矩阵  $\mathbf{C}$ 。随机生成信道效益, 取值范围为  $1 \leq b_{n,m} \leq 3$ 。定义平均信道收益<sup>[5]</sup>来衡量算法的性能。

$$U_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m} \quad (8)$$

图 4 中仿真参数为：认知用户  $N = 10$ ，信道数  $M = 10$ ，迭代次数  $\Xi = 5$ ，蚂蚁数  $X = 20$ ，信息素残留率  $\rho = 0.9$ 。每种情况仿真 10 次求平均。从曲线中基于蚁群优化的分配算法(ACO)获得的平均信道收益优于 CSUM 法。随着授权用户的增多这种优势逐渐增加。

图 5 中，设置授权用户  $N_p = 20$ ，其他参数和图 4 中相同。图 6 中  $N_p = 30$ ， $N = 25$ ，其他参数与图 4 中相同。从图 5，图 6 中可以看出，随着认知用户数量和可用信道的增多，蚁群优化算法所获得的平均信道效益都比 CSUM 算法得到了不同程度的提高。

CSUM 算法在信道分配过程中，当判断依据的权值相同时，如果选择不当，则会偏离最优解。而在蚁群优化算法中，由于蚂蚁行动是一种概率型的全局搜索方法，这种非确定性是算法能够有更多的机会求得全局最优解。

图 7 为随机生成的网络模型，信道  $M = 10$ ，授权用户  $N_p = 10$ ，认知用户  $N = 15$ ，它们位置如图 7 所示。在图 7 的模型基础上，图 8 验证了算法的稳定性。从图中可以看出，当迭代次数等于 1 时，当蚂蚁数量少时，算法会出现次优解。但随着蚂蚁

数量和迭代次数的增多，算法趋于稳定。迭代和蚂蚁的增多同时带来计算量增多，但是由于蚂蚁算法可由并行分布式计算完成，虽然计算量增大，计算时间可以保持不变。

每只蚂蚁移动路径的长度由节点的个数  $N$  和干扰约束矩阵  $C$  来决定。假设干扰约束矩阵为全 1 矩阵，此时蚂蚁所经过的路径最长，长度为  $N$ ，因此每只蚂蚁的计算复杂度的最大值  $O(N)$ 。考虑  $\Xi$  次迭代和  $X$  只蚂蚁，则算法的计算复杂度  $\leq O(\Xi X N)$ 。如果算法运行于分布式并行计算中，那么计算复杂度还会大大降低。

### 6 结束语

本文提出了一种基于蚁群优化的频谱分配算法，该算法是一种概率型的全局搜索方法，这种非确定性是算法能够高概率地求得全局最优解，从而改善了认知无线网络中，可用信道资源的分配，进一步获得更大的信道利用率和认知用户效益。本文同时对蚂蚁算法进行了分析，给出了算法工作流程以及相关公式。数值和仿真实验结果表明：从主用户，认知用户和信道个数等方面与传统图论的频谱分配相比较，该算法都提高了认知网络的信道利用率，增加了认知网络的吞吐量。同时验证了当迭代次数和蚂蚁数量达到一定值的情况下，算法趋于稳定。

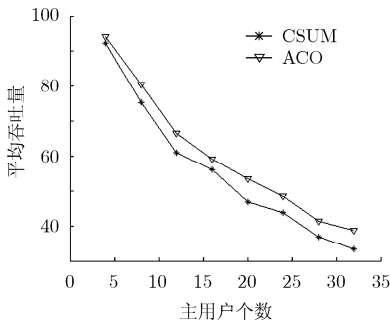


图 4 频谱分配性能随着主用户增多变化的曲线

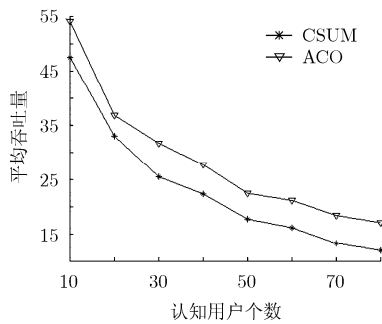


图 5 频谱分配性能随着认知用户增多变化的曲线

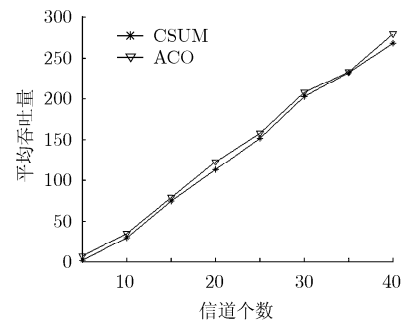


图 6 频谱分配性能随着可用信道增多变化的曲线

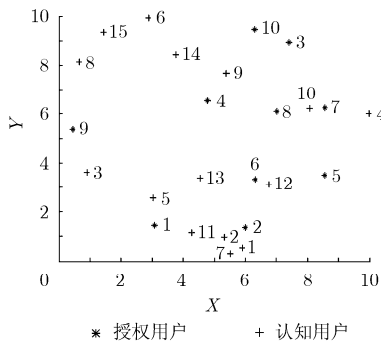


图 7 10x10 区域内随机分布的主用户和认知用户

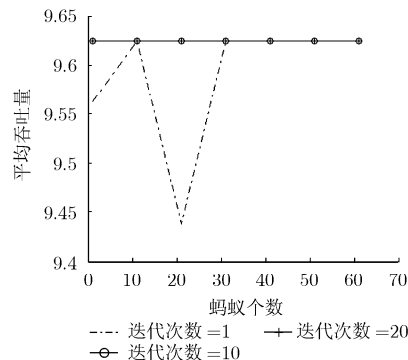


图 8 频谱分配随蚂蚁和迭代次数的变化

## 参 考 文 献

- [1] Yang Miao and An Jianping. An improved eigenvalue-based algorithm for cooperative spectrum sensing[C]. The 6th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Chengdu, China, 2010: 1-4.
- [2] Mitola I J. Software radios: survey, critical evaluation and future directions[J]. *IEEE Aerosp Electron Systems Magazine*, 1993, 8(4): 25-31.
- [3] Zheng Yong-hong, Liang Ying-Chang, Hoang Anh-tuan, *et al.* A review on spectrum sensing for cognitive radio: challenges and Solutions[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2010, Article ID 381465.
- [4] Zhao Qing and Sadler B M. A survey of dynamic spectrum access[J]. *IEEE Signal Processing Magazine, IEEE*, 2007, 24(3): 79-89.
- [5] Peng C, Zheng H, and Zhao B Y. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access[J]. *ACM Mobile Networks and Applications*, 2006, 11(4): 555-576.
- [6] Nie Nie and Cristina C. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks[C]. In Proc. IEEE DySPAN 2005, Baltimore, MD, USA, Nov. 2005: 269-278.
- [7] Sengupta S and Chatterjee M. Designing auction mechanisms for dynamic spectrum access [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2008, 13(5): 498-515.
- [8] Marco D and Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1) : 53-66.
- [9] Salehinejad H and Talebi S. A new ant algorithm based vehicle navigation system: a wireless networking approach[C]. IST International Symposium Telecommunications, Tehran, Aug. 27-28, 2008: 36-41.
- [10] Zhang Chao, Zhen Zi-yang, Wang Dao-bo, *et al.* UAV path planning method based on ant colony optimization[C]. Control and Decision Conference (CCDC). Xuzhou, China, May 26-28, 2010: 3790-3792.
- [11] Chu C H, Gu J, Hou X, *et al.* A heuristic ant algorithm for solving QoS multicast routing problem [C]. Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, Honolulu, May 12-17, 2002: 1630-1635.
- [12] Wang Ying and Xie Jian-ying. Ant colony optimization for multicast routing[C]. IEEE Asia-Pacific Conference on Computation Circuits and Systems, Tianjin, China, Dec. 4-6, 2000: 54-57.
- [13] Salehinejad H and Talebi S. A new ant algorithm based vehicle navigation system: a wireless networking approach[C]. IEEE Proc. of Int. Symposium on Telecommunications, Tehran, Iran, 2008: 36-41.
- [14] Montemanni R, Smith D H, and Allen S M. An ants algorithm for the minimum-span frequency-assignment problem with multiple interference[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2002, 51(5): 949-953.
- [15] Khoshkholgh M G, Navaie K, and Yanikomeroğlu H. Access strategies for spectrum sharing in fading environment: overlay, underlay, and mixed[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(12): 1780-1793.
- [16] Zhang Tao, Wang Bin, and Wu Zhi-qiang. Spectrum assignment in infrastructure based cognitive radio networks[C]. Aerospace & Electronics Conference (NAECON), 2009, Dayton, OH, July 21-23, 2009: 69-74.
- [17] Maniezzo V, Gambardella L M, and De Luigi F. Ant Colony Optimization—New Optimization Techniques in Engineering[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2004: 101-117.
- 杨 淼: 男, 1984 年生, 博士, 研究方向为认知无线电、软件无线电、通信信号处理等。
- 安建平: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为抗干扰无线通信与网络技术、认知无线电、协作通信与网络编码。