

# 基于步进拍卖的认知无线网络动态频谱分配

徐友云<sup>1,2</sup>, 高林<sup>2</sup>

(1. 解放军理工大学通信工程学院, 江苏南京 210007; 2. 上海交通大学无线通信技术研究所, 上海 200240)

**摘要:** 动态频谱分配是认知无线电网络的关键技术之一, 主要关心频谱拥有者如何将其空闲频谱动态地分配给二级用户. 提出了一种基于拍卖理论的动态频谱分配模型——多卖家步进拍卖模型, 其中频谱拥有者作为拍卖人, 二级用户作为竞买人, 其基本过程为: 每个拍卖人从底价逐步抬高自己的频谱价格, 每个竞买人决定是否购买频谱以及购买哪个拍卖人的频谱. 所提方法的特点是: ①分布式执行, 复杂度很低; ②频谱拥有者之间不需要信息交互, 二级用户之间也不需要信息交互, 节省信令开销; ③最终的频谱分配结果近似于全局最优.

**关键词:** 认知无线电; 动态频谱分配; 拍卖理论

**中图分类号:** TN929.5      **文献标识码:** A

## Dynamic spectrum allocation in cognitive radio networks based on multi-auctioneer progressive auction

XU You-yun<sup>1,2</sup>, GAO Lin<sup>2</sup>

(1. Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. Institute of Wireless Communication Technologies, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Dynamic spectrum access (DSA) is a promising paradigm to achieve efficient utilization of spectrum resources by allowing unlicensed users (i. e., secondary users, SUs) to access the licensed spectrums. A key issue in DSA is how to assign the idle spectrum bands of multiple primary spectrum owners (POs) among the SUs. A Multi-Auctioneer Progressive spectrum auction mechanism (MAP) based on the auction theory is proposed, where the POs act as the auctioneers and SUs act as the bidders. In MAP, each auctioneer systematically raises the price and each bidder subsequently chooses one auctioneer for bidding. It's shown analytically that MAP converges to an equilibrium where spectrum utilization is maximized. It's further shown that MAP dynamic spectrum access is low in complexity and traffic overhead.

**Key words:** cognitive radio; dynamic spectrum allocation; auction theory

## 0 引言

随着无线通信技术的飞速发展, 尤其是无线局域网(WLAN)技术、无线个人域网络(WPAN)技术的发展, 越来越多的人通过这些技术以无线的方式

接入互联网, 使得无线频谱成为越来越紧缺的资源<sup>[1~4]</sup>. 认知无线电(CR)<sup>[5,6]</sup>, 通过允许非授权用户在一定限制下接入频道, 可有效提高频谱利用率. 在认知无线网络中, 一般分为主要用户(记为PU)和二级用户(也称次级用户, 记为SU). 主要用户为

授权用户,拥有对频道的所有权,能够随时地接入频道而不会受到任何限制;二级用户为非授权用户,只有在不对主要用户造成干扰的条件下才可以占用频道,也即是机会式地占用频道从而获得最大吞吐量。

动态频谱分配技术是认知无线网络中的关键技术之一。动态频谱分配是指根据二级用户的数量以及服务要求将空闲频谱分配给一个或多个指定的用户。目前,认知无线动态频谱分配的分析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,主要有以下三种常用认知无线电频谱分配模型:基于图论的频谱分配模型、基于博弈论的频谱分配模型以及基于拍卖竞价的频谱分配模型。基于图论的频谱分配模型<sup>[7~10]</sup>是建立在相应的干扰和约束条件之上的,将认知用户组成的网络拓扑结构抽象成图;基于图论分配模型,通常需要中心式的优化算法,复杂度很高且信令开销大。基于博弈论的频谱分配模型中<sup>[11~14]</sup>,博弈参与者为所有期望获取频谱的认知无线电用户或拥有频谱授权的主系统,其策略集分别为选择频谱需求或选择频谱租借价格;基于博弈论的分配模型,由于博弈者独立进行决策,博弈的解(纳什均衡)通常是局部最优解而非全局最优解。利用微观经济学中定价拍卖原理而制定的频谱分配机制在近年来得到广泛的研究,而且已经被证明是认知无线网络的频谱分配问题的有效解决方法<sup>[15~17]</sup>。基于竞价拍卖的分配模型,网络结构一般是集中式,拍卖人是频谱拥有者,竞买人是二级用户,拍卖物品是空闲频道;然而,目前的频谱拍卖方式主要基于静态拍卖模型,具有较高的计算复杂度,且不适用于多个频谱拥有者的认知无线网络。

本文考虑了具有多个频谱拥有者(记为 PO)和多个二级用户的认知无线网络中的频谱分配方案,其中每个频谱拥有者拥有一组空闲信道可分配给二级用户。提出了一种基于动态拍卖的频谱分配模型——多卖家步进拍卖模型,其基本过程为:每个拍卖人从底价逐步抬高自己的频谱价格,每个竞买人决定是否购买频谱以及购买哪个拍卖人的频谱,最终拍卖过程收敛到均衡点。该拍卖方式的特点是:①分布式执行,复杂度很低;②频谱拥有者之间不需要信息交互,二级用户之间也不需要信息交互,节省信令开销;③最终的频谱分配结果是全局最优的。

本文结构如下,第 1 节介绍认知无线网络模型,第 2 节提出了基于多卖家步进拍卖的动态频谱

分配方案,第 3 节通过仿真对本文所提方案的收敛速度、频谱效率等进行分析,第 4 节对本文的工作做一个简要总结。

## 1 系统模型

考虑包括  $M$  个频谱拥有者和  $N$  个二级用户的认知无线网络,每个频谱拥有者  $i$  拥有  $m_i$  个空闲信道。假设每个频谱拥有者的信道是完全相同的,即相同的中心频率、带宽、调制方式等,不同频谱拥有者之间的信道可以是不同的。图 1 所示为包含 2 个频谱拥有者( $a_1$  和  $a_2$ )和 6 个二级用户( $s_1 \sim s_6$ )的认知无线网络,其中  $a_1$  拥有 3 个位于 900 MHz 频段的空闲信道, $a_2$  拥有 4 个位于 5 GHz 频段的空闲信道。

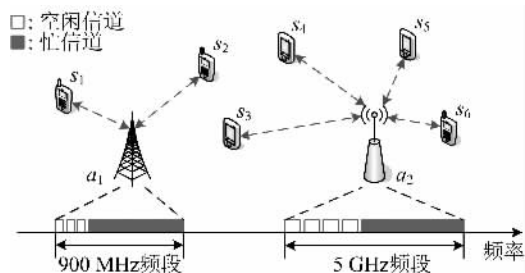


图 1 包含 2 个 PO 和 6 个 SU 的认知无线网络模型  
Fig. 1 An example of CR network with 2 POs and 6 SUs

每个频谱拥有者  $i$  对其所拥有的空闲信道持有一个底价  $c_i$ , 定义为分配一个空闲信道给二级用户对自身造成的损失,该损失可认为来自于功率消耗或对其内部主用户的干扰等。每个二级用户  $j$  对于每个频谱拥有者  $i$  的信道有一个估价  $v_{ji}$ , 定义为使用该信道对二级用户的收益,本文将该估价定义为香农容量<sup>[18]</sup>, 即

$$v_{ji} = w_i \log \left( 1 + \frac{1}{d_{ji}^2} \times A \right) \quad (1)$$

其中,  $w_i$  为频谱拥有者  $i$  的信道带宽;  $d_{ji}$  为二级用户  $j$  和频谱拥有者  $i$  之间的距离;  $A$  与发送功率、天线增益以及噪声等相关, 本文假设对于任意  $j$  和  $i$ ,  $A$  为常数。定义  $\mathbf{V} = \{v_{ji}\}_{N \times M}$  为所有二级用户和所有频谱拥有者之间的信道估价矩阵。

假设每个信道只能分配给 1 个二级用户使用, 且假设每个二级用户在一个时刻只能使用 1 个空闲信道。定义  $\mathbf{R} = \{r_{ji}\}_{N \times M}$  为分配矩阵, 其中元素  $r_{ji} = 1$  表示频谱拥有者  $i$  分配 1 个空闲信道给二级用户  $j$  使用,  $r_{ji} = 0$  反之。因此, 一个合理的分配矩阵, 必然有

$$\sum_{j=1}^N r_{ji} \leq m_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, M \quad (2a)$$

$$\sum_{i=1}^M r_{ji} \leq 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (2b)$$

其中,式(2a)表示每个频谱拥有者最多分配  $m_i$  个二级用户,式(2b)表示每个二级用户最多使用 1 个信道。

从全局角度看,当频谱拥有者  $i$  分配一个空闲信道给二级用户  $j$ ,该信道上的频谱效率为  $v_{ji} - c_i$ 。注意,当所有频谱拥有者将分配一个信道给二级用户所带来的自身损失(即  $c_i$ )设为 0 时,总频谱效率等效于系统吞吐量。因此,全局最优的频谱分配策略,即使频谱效率最大化的频谱分配策略,可通过下面的线性优化方程获得:

$$\mathbf{R}^* = \arg \max_{\mathbf{R}} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M r_{ji} \cdot (v_{ji} - c_i)$$

s. t.

$$\begin{aligned} \text{(I)} \quad & \sum_{j=1}^N r_{ji} \leq m_i, \quad \forall i = 1, \dots, M \\ \text{(II)} \quad & \sum_{i=1}^M r_{ji} \leq 1, \quad \forall j = 1, \dots, N \\ \text{(III)} \quad & r_{ji} \in \{0, 1\}, \quad \forall i = 1, \dots, M, \\ & \quad \quad \quad \forall j = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

容易看出,式(3)本质上是一个整数线性规划问题(integer linear programming, ILP)。通常,可使用线性规划理论中的分值定界法(branch-and-bound)<sup>[19]</sup>或图论中的最优匹配 Kuhn-Munkres 算法<sup>[20]</sup>等中心式算法,求解上述优化问题。但是,在认知无线网络中,上述中心式算法并不适用:首先,中心式算法的复杂度高,理论上是一个 NP-hard 问题;其次,中心式算法需要全局信息,即整个估价矩阵  $\mathbf{V}$ ,然而,每个频谱拥有者  $i$  最多拥有自己的信道对二级用户的价值信息,即  $\mathbf{V}$  中的第  $i$  列;此外,每个频谱拥有者有可能是基于不同网络的(异构),相互之间的信息交互十分困难。

## 2 多卖家步进拍卖方案

基于微观经济学的拍卖理论已被认为是一种有效的资源分配机制<sup>[21]</sup>,因此,我们引入了基于拍卖的频谱分配模型。在频谱拍卖模型中,频谱拥有者为拍卖人,二级用户为竞买人。每个频谱拥有者将其所拥有的空闲信道以一定的价格销售给二级用户使用。频谱拥有者  $i$  指定其销售价格  $p_i$ ,显然  $p_i \geq c_i$ 。当频谱拥有者  $i$  将一个空闲信道以价格  $p_i$  卖给二

级用户  $j$  时,定义频谱拥有者  $i$  的收益为  $p_i - c_i$ ,二级用户  $j$  的收益为  $v_{ji} - p_i$ 。假设每个二级用户都是理性的,因此二级用户  $j$  将购买使自身收益最大的信道  $s(j)$ ,即

$$s(j) = \begin{cases} \arg \max_i (v_{ji} - p_i) & \text{if } \max_i (v_{ji} - p_i) \geq 0 \\ -1 & \text{if } \max_i (v_{ji} - p_i) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $s(j) = -1$  表示用户  $j$  不购买任何信道。注意,当二级用户  $j$  没有购买任何信道时,其收益设为 0,因此,当  $\max_i (v_{ji} - p_i) < 0$  时,用户  $j$  不会发起任何竞买请求,即  $s(j) = -1$ 。

### 2.1 拍卖机制设计

多卖家步进拍卖,可以认为是英式拍卖的演进,即多拍卖人多物品的英式拍卖。传统的英式拍卖<sup>[19]</sup>为单个拍卖人拍卖单个物品,其基本过程是:拍卖人从底价开始往上叫价,直到剩下最后一个竞买人愿意接受该价格。多物品英式拍卖的基本过程是:拍卖人从底价开始往上叫价,直到剩下最后  $B$  个竞买人愿意接受该价格,其中  $B$  为拍卖物品数。多卖家步进拍卖的基本思想是:每个拍卖人逐步抬高自己的报价,每个竞买人相应地选择使自身收益最大的拍卖人进行竞买。其特点是:①每个拍卖人内部,本质上是一个多物品英式拍卖;②每个竞买人选择使自己收益最大的拍卖人进行竞买。

详细地说,多卖家步进拍卖是一个动态过程,每一阶段分为两个子阶段,前一子阶段为叫价(Asking)阶段,后一子阶段为竞标(Bidding)阶段。具体描述如下:在每一阶段的 Asking 阶段,每个拍卖人统计上一阶段向自身发起竞买请求的二级用户的数量(即需求量),如果需求量大于自身所拥有的空闲信道数(也叫需求过剩),则将自己的报价抬高一个步长,否则保持上一阶段的价格不变;在每一阶段的 Bidding 阶段,每个竞买人接收所有频谱拥有者的叫价,根据式(4)选择使自身收益最大的频谱拥有者发起竞买请求;重复上述叫价和竞标过程,直到整个拍卖过程达到稳定状态,此时终止拍卖并根据当前所有二级用户的竞买请求分配信道。详细的拍卖机制如下所示:

- (I) Initialization  
 for each PO  $i \in M$  do: set  $p_i = c_i$ ,  $d_i = 0$   
 for each SU  $j \in N$  do: set  $s(j) = -1$
- (II) Asking

```

set  $\mathbf{p}' = \mathbf{p}$ 
for each PO  $i \in M$  do:
  get  $d_i = \sum_{j \in N} \delta(s(j), i)$ 
  if  $d_i > m_i$  do: set  $p_i = p_i + \epsilon$ 
if  $\mathbf{p} = \mathbf{p}'$  do:
  exit; //END auction
(III) Bidding
for each SU  $j \in N$  do
  set  $s(j)$  according to Eq. (4)
go back to (II); //NEXT round

```

其中,  $\delta(x, y)$  为判断函数, 即: 如果  $x$  等于  $y$ , 则  $\delta(x, y) = 1$ , 否则  $\delta(x, y) = 0$ ;  $\epsilon > 0$  为价格更新步长;  $\mathbf{p}$  为所有频谱拥有者的报价向量, 即  $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_M)$ ,  $\mathbf{p}'$  为上一阶段的报价向量. 需要注意的是, 该拍卖模型并不需要二级用户解调所有频谱拥有者的报价. 具体来说, 当二级用户  $j$  距离频谱拥有者  $i$  非常远时, 以至于用户  $j$  无法正确解调  $i$  的报价, 此时用户  $j$  将频谱拥有者  $i$  的价格设为无穷大, 以阻止用户  $j$  选择  $i$  的信道.

## 2.2 收敛性分析

上述拍卖机制中, 当所有频谱拥有者均不处于需求过剩状态时, 则所有频谱拥有者均不再加价, 即报价向量  $\mathbf{p}$  保持不变, 相应的, 所有二级用户的竞标请求也保持不变. 此时, 拍卖过程进入一个稳定状态, 即使重复步骤 (II) 和 (III), 频谱拥有者的价格或二级用户的竞买请求也不会发生任何改变. 很明显, 随着频谱拥有者叫价的提高, 二级用户逐渐放弃购买信道; 当频谱拥有者的价格抬高到一定程度时, 可保证所有频谱拥有者均不处于需求过剩状态, 即拍卖过程必然收敛到稳定状态, 即均衡状态.

当拍卖达到均衡状态时, 根据每个二级用户当前的竞买请求分配信道, 即每个频谱拥有者分配一个信道给当前向其发起竞买请求的二级用户. 在均衡状态时, 所有频谱拥有者均不处于需求过剩状态, 因此当前每个发起竞买请求的二级用户均可获取一个信道.

由于需要多次循环叫价和竞买过程, 拍卖才能达到均衡状态, 因此, 多卖家步进拍卖的局限性主要是收敛速度问题. 一般来说, 随着价格更新步长  $\epsilon$  的增大, 收敛速度加快; 但是, 过大的步长  $\epsilon$ , 又会导致拍卖结果的频谱效率下降. 因此, 在实际系统中, 必须折中考虑收敛速度的提高和频谱效率的下降, 选

择合理的价格更新步长  $\epsilon$ . 通过后文的仿真可以看出, 在本文所使用的仿真参数下,  $\epsilon$  可选择 20 至 100 之间的数值.

## 2.3 性能分析

多卖家步进拍卖具有如下特点:

(I) 分布式执行, 复杂度很低. 对于每个频谱拥有者来说, 每一阶段只需要做 1 次比较运算, 即比较  $m_i$  和  $d_i$  的大小; 对于每个二级用户来说, 每一阶段至多只需要执行  $M$  次比较运算, 即式 (4). 因此, 每一阶段系统总运算量为  $M + NM$ , 并且, 运算分布于所有频谱拥有者和二级用户之间, 可有效减少单个设备的运算复杂度.

此外, 通过引理 2.1 和 2.2, 每个二级用户可进一步减少其运算次数. 容易看出, 在引理 2.1 和引理 2.2 的第一种情况下, 二级用户  $j$  每一阶段的运算量为 0; 在引理 2.2 的第二种情况下, 二级用户  $j$  每一阶段的运算量小于或等于  $M$ .

**引理 2.1** 假设第  $T$  阶段二级用户  $j$  的最优策略为  $s(j) = -1$ , 则第  $T+1$  阶段, 用户  $j$  的最优策略必然是  $s(j) = -1$ .

**引理 2.2** 假设第  $T$  阶段二级用户  $j$  的最优策略为  $s(j) \neq -1$ . 第  $T+1$  阶段时, 如果频谱拥有者  $s(j)$  的报价未发生更新, 则用户  $j$  的最优策略保持不变; 如果频谱拥有者  $s(j)$  的报价发生了更新, 则用户  $j$  只需要比较频谱拥有者  $s(j)$  以及  $T+1$  阶段所有未发生过价格更新的频谱拥有者, 选择使自身收益最大的频谱拥有者进行竞买.

(II) 频谱拥有者之间不需要信息交互, 二级用户之间也不需要信息交互, 节省信令开销. 事实上, 在拍卖的每一阶段, 每个频谱拥有者只需要广播其价格, 每个二级用户只需要向相应的频谱拥有者发 1 bit 的竞买请求. 此外, 当所有频谱拥有者使用相同的价格更新步长  $\epsilon$  且假设所有二级用户知道该步长的情况下, 每个频谱拥有者第一阶段广播其初始价格, 之后每一阶段只需要广播 1 bit 的价格更新指示即可.

(III) 最终的信道分配结果近似于全局最优结果, 即式 (3). 事实上, 当价格更新步长  $\epsilon$  足够小时, 步进拍卖的信道分配结果是全局最优. 为更好地理解该特性, 下面提供了一个简单的 2 个频谱拥有者和 2 个二级用户的例子, 其中每个频谱拥有者各有 1 个空闲信道可分配给二级用户使用. 因此, 该例子共有两种可能的信道分配结果: (a) 频谱拥有者 1 和

2 分别将信道分配给二级用户 1 和 2, 和(b)频谱拥有者 1 和 2 分别将信道分配给二级用户 2 和 1. 分两种情况考虑:

①  $v_{11} - c_1 \geq v_{12} - c_2$  且  $v_{21} - c_1 \leq v_{22} - c_2$ , 在这种情况下, 经过一次叫价 (Asking) 和竞买 (Bidding) 过程, 即可达到均衡状态, 此时的信道分配结果为 (a), 频谱效率为  $v_{11} - c_1 + v_{22} - c_2$ ; 很显然,  $v_{11} - c_1 + v_{22} - c_2 \geq v_{21} - c_1 + v_{12} - c_2$ , 也就是说, 在这种情况下, 拍卖所得结果的频谱效率等于全局最优分配的频谱效率. 类似的,  $v_{11} - c_1 \leq v_{12} - c_2$  且  $v_{21} - c_1 \geq v_{22} - c_2$  的情况, 可通过完全相同的方法证明.

②  $v_{11} - c_1 > v_{12} - c_2$  且  $v_{21} - c_1 > v_{22} - c_2$ , 在这种情况下, 经过第一次叫价和竞买过程, 用户 1 和 2 均选择频谱拥有者 1 发起竞买请求, 导致频谱拥有者 1 处于需求过剩状态, 因此, 在下一阶段, 频谱拥有者 1 将其价格更新为  $p_1 = c_1 + \epsilon$ , 频谱拥有者 2 的价格保持不变. 继续拍卖过程, 直到第  $n$  阶段 1 个二级用户 (比如说用户 2) 改变其策略, 即  $v_{11} - c_1 - n\epsilon \geq v_{12} - c_2$  且  $v_{21} - c_1 - n\epsilon \leq v_{22} - c_2$  (或用户 1 改策略, 即  $v_{11} - c_1 - n\epsilon \leq v_{12} - c_2$  且  $v_{21} - c_1 - n\epsilon \geq v_{22} - c_2$ , 证明方法完全类似), 拍卖到达均衡状态, 此时结果为 (a); 根据  $v_{11} - c_1 - n\epsilon + v_{22} - c_2 \geq v_{21} - c_1 - n\epsilon + v_{12} - c_2$ , 可得  $v_{11} - c_1 + v_{22} - c_2 \geq v_{21} - c_1 + v_{12} - c_2$ , 也即此时的信道分配结果 (a) 为全局最优分配. 类似的,  $v_{11} - c_1 < v_{12} - c_2$  且  $v_{21} - c_1 < v_{22} - c_2$  的情况, 可通过完全相同的方法证明.

### 3 性能仿真

本节通过 Matlab 对上节所述的多卖家步进拍卖的性能进行仿真. 仿真参数设置为: 存在 5 个频谱拥有者, 100 个二级用户, 平均分布于  $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$  的矩形区域. 每个频谱拥有者各拥有 6 个空闲信道, 底格均为 0. 每个频谱拥有者的信道可位于 900 MHz, 2.4 GHz 或 5 GHz 频段等, 相应的信道带宽可为 200 kHz, 1~20 MHz 等. 每个二级用户均将信道的香农容量定义为其使用价值. 拍卖每一阶段的时长为 10 ms, 其中前一子阶段 (Asking 阶段, 1 ms) 用于频谱拥有者广播各自的价格, 后一子阶段 (Bidding 阶段, 9 ms) 用于二级用户发送竞买请求. 仿真场景的网络拓扑结构如图 2 所示, 其中三角符号为频谱拥有者, 圆点符号为二级用户.

图 3 是多卖家步进拍卖方案的收敛速度示意图. 如该图所示, 随着频谱拥有者的价格更新步长  $\epsilon$

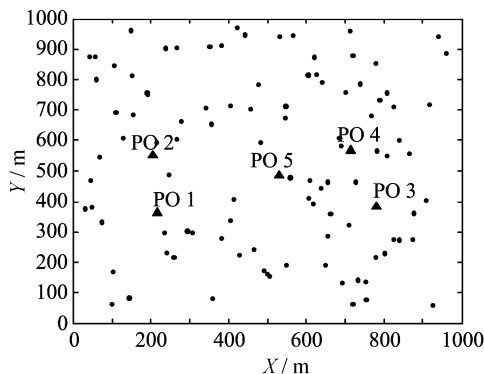


图 2 仿真场景的网络拓扑结构图

Fig. 2 The topology of the simulation network

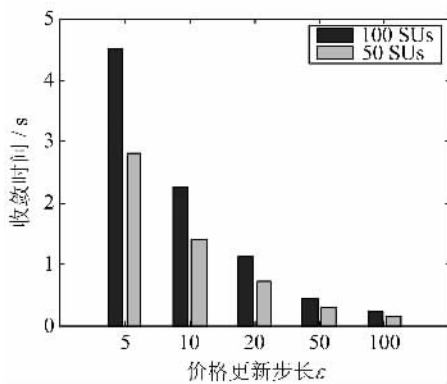


图 3 收敛速度与价格更新步长的关系

Fig. 3 The convergence of MAP vs  $\epsilon$

的增大, 收敛速度加快; 此外, 收敛时间随着二级用户数的增长, 呈现线性增长, 因此具有良好的伸缩性.

图 4 是多卖家步进拍卖方案与最优频谱分配的频谱效率对比图. 如该图所示, 当价格更新步长  $\epsilon \leq 20$  时, 本文所提方法的频谱效率与最优频谱分配的频谱效率近似相同; 当  $\epsilon > 20$  时, 本文所提方法的频谱效率略有下降, 在仿真的最大步长  $\epsilon = 100$  时, 其

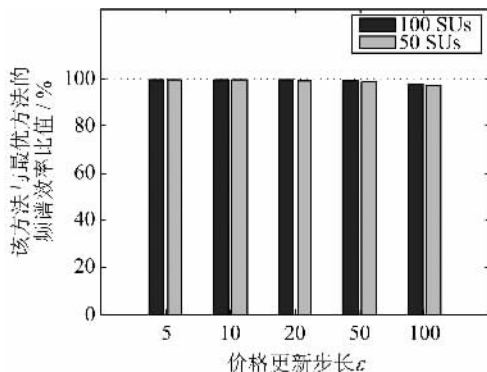


图 4 频谱效率与价格更新步长的关系

Fig. 4 The ratio of MAP efficiency to optimal efficiency vs  $\epsilon$

频谱效率下降不到 2%。

## 4 结论

本文考虑了具有多个频谱拥有者和多个二级用户的认知无线网络中的频谱分配方案。中心式算法由于复杂度以及信令开销等问题,在实际的认知无线网络中并不适用。因此,提出了一种基于动态拍卖的频谱分配模型——多卖家步进拍卖模型,其基本过程为:每个拍卖人从底价逐步抬高自己的频谱价格,每个竞买人决定是否购买频谱以及购买哪个拍卖人的频谱,最终拍卖过程收敛到均衡点。该拍卖方式的特点是:①分布式执行,复杂度很低;②频谱拥有者之间不需要信息交互,二级用户之间也不需要信息交互,节省信令开销;③最终的频谱分配结果是全局最优的。

### 参考文献(References)

- [1] Tuttlebee W. Software Defined Radio: Origins, Drivers and International Perspectives [M]. West Sussex: Wiley, 2002.
- [2] Federal Communications Commission. Spectrum policy task force report, ET Docket No. 02-135 [R]. Washington, DC: FCC, 2002.
- [3] Capar F, Martoyo I, Weiss T, et al. Analysis of Coexistence Strategies for Cellular and Wireless Local Area Networks[C]//IEEE 58th Vehicular Technology Conference. IEEE, 2003; 1 812-1 816.
- [4] Broderson R W, Wolisz A, Cabric D, et al. CORVUS: A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum[R]. Berkeley Wireless Research Center (BWRC) White paper, 2004.
- [5] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [6] Mitola III J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications[J]. Mobile Networks and Applications, 2001, 6(5): 435-441.
- [7] Peng C, Zheng H, Zhao B Y. Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access [J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(4): 555-576.
- [8] Wang W, Liu X. List- Coloring based channel allocation for open- spectrum wireless networks[C]//2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC). Dallas: IEEE Communications Society Press, 2005: 690-694.
- [9] Zheng H, Peng C. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access [C]//Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Communications: Vol 5. IEEE, 2005; 3 132-3 136.
- [10] 廖楚林, 陈劼, 唐友喜, 等. 认知无线电中的并行频谱分配算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1 608-1 611.
- [11] Ercan A O, Lee J, Pollin S, et al. A revenue enhancing stackelberg game for owners in opportunistic spectrum access[C]//IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Network, 2008. 3rd. IEEE, 2008; 1-8.
- [12] Nie N, Comaniciu C. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks [J] Mobile Networks and Applications, 2006, 11(6): 779-797.
- [13] Niyato D, Hossain E. Competitive Pricing for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: Dynamic Game, Inefficiency of Nash Equilibrium, and Collusion[J]// IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 192-202.
- [14] Halldorsson M M, Halpern J Y, Li L, et al. On Spectrum Sharing Games [C]//Proceedings of the twenty-third annual ACM symposium on Principles of Distributed Computing. New York, USA: ACM, 2004; 107-114.
- [15] Huang J, Berry R A, Honig M L. Auction-based Spectrum Sharing [J]. Mobile Networks and Applications, 2006, 11(3): 405-408.
- [16] Zhou X, Gandhi S, Suri S, et al. eBay in the Sky: Strategy-Proof Wireless Spectrum Auctions [C]//Proceedings of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM, 2008; 2-13.
- [17] Kloeck C, Jaekel H, Jondral F. Auctions Sequence as a resource Allocation Mechanism [C]// 2005 IEEE 62nd Vehicular Yechnology Conference. IEEE, 2005: 240-244.
- [18] Rappaport T S. Wireless Communications[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [19] Schrijver A. Theory of Linear and Integer Programming [M]. West Sussex: John Wiley & Sons, 1998.
- [20] Munkres J. Algorithms for the Assignment and Transportation Problems[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1957, 5(1): 32-38.
- [21] Krishna V. Auction Theory[M]. San Diego: Academic Press, 2002.