

# 一种联盟博弈频谱感知机制

贺欢欢 王兴伟 李洁 黄敏

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

**摘要** 为了在主用户具有异构性且认知用户处于多路径衰减、阴影效应等低感知性能的认识环境中,使认知用户公平有效地进行频谱感知,提出一种联盟博弈频谱感知机制,将频谱感知问题建模为效用不可转移的联盟博弈。首先,将认知用户划分成多个子联盟,根据头结点选取原则选出各个子联盟的头结点;其次,根据规则进行子联盟合并或分裂;最后,子联盟头结点利用“OR”规则进行数据融合,得到最终感知结果并广播给子联盟内的所有认知用户。仿真实验和性能评价结果表明,该机制具有好的性能。

**关键词** 认知无线电,联盟博弈,联盟形式,频谱感知

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.1.026

## Coalitional Game Spectrum Sensing Scheme

HE Huan-huan WANG Xing-wei LI Jie HUANG Min

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract** To help cognitive users conduct fair and efficient spectrum sensing in the cognitive environment where primary users are heterogeneous and the perceived performances of cognitive users are low due to multipath fading and shadow effect, a coalitional game spectrum sensing scheme was proposed. The spectrum sensing problem was modeled as a coalitional game with nontransferable utilities. Firstly, cognitive users are divided into several sub-coalitions, and each sub-coalition head node is selected according to head node selection principle. Secondly, merging and division of sub-coalitions are taken according to specific rules. Finally, sub-coalition head nodes use “OR” rules to do data fusion, and get final sense results and broadcast them to all cognitive users in sub-coalition. Simulated implementation and performance evaluation were done, and the results show that the proposed scheme has good performance.

**Keywords** Cognitive radio, Coalitional game, Coalitional form, Spectrum sensing

## 1 引言

近年来,无线通信系统已经成为经济和社会发展的动力,但是频谱资源的可用性制约了无线通信系统的发展,固定可用的频谱资源难以满足通信需求。最主要的原因在于:静态的频谱分配策略不灵活,在所有频段(包括已授权频段和未授权频段)中,频谱资源的利用不平衡。一方面,大部分频谱资源存在于授权频段中,但是授权用户不会在任何时候都使用频谱资源,将造成资源浪费,出现空闲频谱;另一方面,非授权的频谱只占频谱资源的少部分,但是该频段上的用户非常多,造成拥挤,不能满足用户的需求。为了利用空闲频谱,减少资源浪费,提出利用认知无线电技术动态管理频谱,从而提高频谱资源利用率。认知无线电技术能够利用空闲频谱,并向认知用户开放。认知用户可以在对主用户不造成任何干扰的前提下机会式地使用这些频谱,根据频谱可用性动态智能地选择工作频带、传输参数和接入技术。

在认知无线电中,频谱感知是首要研究问题。频谱感知即认知用户能够检测无线电环境,发现可用频谱资源,同时,需要实时监测主用户活动情况,以避免干扰主用户。通过频谱感知实现频谱接入和共享,进而解决频谱资源短缺问题。

认知无线电技术近年来引起了专家学者的广泛关注。文献[1]针对多授权信道提出了一种最佳的感知计划。文献[2]重点研究了高效的动态频谱接入机制,优化了随机建模方法。文献[3]详细讨论了非合作博弈、经济博弈、合作博弈、随机博弈在认知无线电中的应用。文献[4]研究了如何应对提高非合作均衡的次优性能带来的挑战,提出了干预博弈机制。文献[5]通过建立认知用户同时接入多个主用户没有使用的频谱时把拥塞程度考虑到目标函数中的干扰感知频谱接入博弈模型,研究了非合作频谱接入博弈。文献[6]指出频谱感知的性能往往受到多路径衰落、阴影效应、接收机不确定的影响,为了减轻上述问题带来的影响,协作频谱感知是一种有效的方法。

到稿日期:2014-12-23 返修日期:2015-02-01 本文受国家杰出青年科学基金资助项目(61225012,71325002),高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域资助课题(20120042130003),辽宁省百千万人才工程资助项目(2013921068)资助。

贺欢欢(1991—),女,硕士生,主要研究方向为移动社交网络等,E-mail: wangluohhh@126.com;王兴伟(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为未来互联网、云计算、网络与信息安全等;李洁(1988—),女,博士生,主要研究方向为未来互联网等;黄敏(1968—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为物流与供应链管理、智能算法设计与优化、调度理论与方法等。

为了达到整体的感知公平,使得在一个系统中每个认知用户都能够感知到某些主用户的存在,获得频谱接入机会,不会由于外界的影响使感知能力下降或者感知不到主用户的存在,进而影响整体的感知性能,鉴于博弈在频谱管理、通信量疏导<sup>[7]</sup>、网络路由<sup>[8,9]</sup>等领域的成功应用,本文提出一种基于联盟博弈的频谱感知机制,该机制追求集体理性、协作、公平,实现个人效用最大化,通过改变结盟大小来实现整体最优效果。仿真结果表明,该机制是可行和有效的。

## 2 问题描述

为了实现频谱感知公平,本文提出了一种基于联盟博弈的频谱感知机制。为了实现该机制,需要构建网络模型;计算单个认知用户的频谱感知参数;根据融合规则计算子联盟的频谱感知参数;采用联盟博弈建模并设计联盟形成规则。

### 2.1 网络模型

在主用户具有异构性且认知用户处于多路径衰减、阴影效应等低感知性能的认知环境中,采用图1所示的网络模型来研究联盟博弈频谱感知机制。在该网络模型中,认知用户通信时先检测在自己区域内的主用户使用频谱的情况,然后对收集到的信息进行决策分析,发现可用的空闲频谱。按照本文提出的基于联盟博弈的频谱感知机制,认知用户会按照一定规则聚集成一个群组,形成子联盟进行频谱感知,提高了整体感知效果。

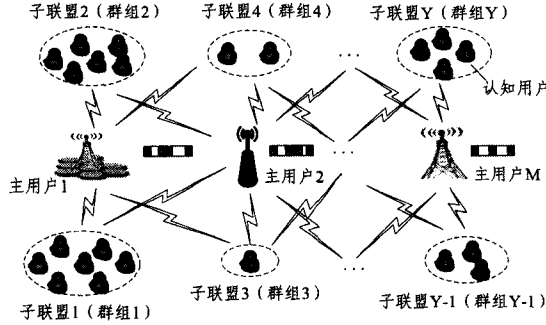


图1 网络模型

设认知用户集合  $N = \{1, \dots, i, \dots, n\}$  表示  $|N|$  个认知用户,主用户集合  $M = \{1, \dots, i, \dots, m\}$  表示  $|M|$  个主用户,子联盟集合  $W = \{1, \dots, i, \dots, w\}$  表示经过博弈联盟机制形成的  $|W|$  个子联盟。

### 2.2 单个认知用户的频谱感知参数

假设认知用户采用能量检测进行频谱感知。在衰落信道(比如瑞丽信道)下,认知用户  $i$  对主用户  $j$  的检测概率为  $P_{i,j}^D$ 、虚警概率为  $P_{i,j}^F$ ,分别按照式(1)和式(2)计算。

$$P_{i,j}^D = P\{T > \lambda | H_1\} = e^{-\frac{1}{2} \mu \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{2}\right)^n} + \left(\frac{1 + \bar{\gamma}_{i,j}}{\bar{\gamma}_{i,j}}\right)^{\mu-1} \times \left[ e^{-\frac{\lambda}{2(1+\bar{\gamma}_{i,j})}} - e^{-\frac{1}{2} \mu \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda \bar{\gamma}_{i,j}}{2(1+\bar{\gamma}_{i,j})}\right)^n} \right] \quad (1)$$

$$P_{i,j}^F = P\{T > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma(\mu, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(\mu)} \quad (2)$$

其中,  $\mu$  为时间带宽积,  $\lambda$  是能量检测阈值,  $\Gamma(\cdot, \cdot)$  是不完全伽马函数,  $\Gamma(\cdot)$  是伽马函数,  $\bar{\gamma}_{i,j}$  是认知用户  $i$  从主用户  $j$  获得的平均信噪比,  $\bar{\gamma}_{i,j} = \frac{P_j l_{i,j}}{\sigma^2}$ , 其中  $P_j$  是主用户的发射功

率,  $\sigma^2$  是加性高斯白噪声的方差,  $l_{i,j} = \frac{\kappa}{d_{i,j}^\eta}$  为认知用户  $i$  和主用户  $j$  之间的路径损失,  $\kappa$  是路径损失常数,  $\eta$  是路径损失的指数,  $d_{i,j}$  是  $i$  和  $j$  之间的距离。

从式(2)可以看出:虚警概率仅与时间带宽积和能量检测阈值有关,与认知用户到主用户之间的距离无关。

认知用户  $i$  漏检测了主用户  $j$  存在的概率称为漏检测概率  $P_{i,j}^M$ ,漏检测概率  $P_{i,j}^M$  与检测概率  $P_{i,j}^D$  的关系如式(3)所示。

$$P_{i,j}^M = 1 - P_{i,j}^D \quad (3)$$

### 2.3 子联盟的频谱感知参数

认知用户根据一定的联盟形式形成子联盟,对于每一个联盟  $S \subseteq N$ ,都需要找出一个联盟头结点。联盟头结点使用“OR”规则进行融合决策。对于联盟头结点为  $h$  的子联盟  $S$  ( $h \in S$ ),可以按照式(4)和式(5)分别计算漏检测概率和虚警概率:

$$Q_{i,S}^M = \prod_{i \in T} [P_{i,j}^M (1 - P_{i,h}^E) + (1 - P_{i,j}^M) P_{i,h}^E] \quad (4)$$

$$Q_{i,S}^F = 1 - \prod_{i \in T} [(1 - P_{i,j}^F) (1 - P_{i,h}^E) + P_{i,j}^F P_{i,h}^E] \quad (5)$$

其中,  $P_{i,h}^E$  为认知用户  $i$  向联盟头结点  $h$  发送感知比特时的错误概率(因为传输信道存在衰落),  $P_{i,h}^E$  的计算公式如下:

$$P_{i,h}^E = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_{i,h}}{1 + \bar{\gamma}_{i,h}}} \right) \quad (6)$$

其中,  $\bar{\gamma}_{i,h} = \frac{P_i l_{i,h}}{\sigma^2}$  为联盟  $S$  中认知用户  $i$  向联盟头结点  $h$  报告感知比特的平均信噪比。  $P_i$  表示认知用户  $i$  向联盟头结点  $h$  发送比特报告的发射功率,  $\sigma^2$  是加性高斯白噪声的方差,  $l_{i,h} = \frac{\kappa}{d_{i,h}^\eta}$  为认知用户  $i$  和联盟头结点  $h$  之间的路径损失,  $\kappa$  是路径损失约束,  $\eta$  是路径损失的指数,  $d_{i,h}$  是  $i$  和  $h$  之间的距离。

在每一个联盟中都需要有一个联盟头结点。选取联盟头结点的原则为:在联盟  $S$  中,选择具有最小漏检测概率  $P_{i,j}^M$  的节点作为联盟头结点。若采用集中式频谱感知方法,则联盟头结点的开销会非常大,而且联盟头结点一旦瘫痪,就会对所有认知用户都造成极大的影响,因此本文采用分布式感知。

从子联盟的漏检测概率和虚警概率的计算可以看出:随着子联盟中的认知用户数量不断增加,漏检测概率越来越低,然而虚警概率却越来越高,所以两者的权衡很重要。

### 2.4 联盟博弈建模

为了使认知用户公平协作地感知频谱,将分布式协作频谱感知建模为具有不可转移效用的联盟博弈  $(N, v)$ ,  $N$  是认知用户的集合,特征函数  $v$  为  $\{S | S \subseteq N\}$  到实数集  $R$  的映射。特征函数给出了任一子联盟  $S$  所能获得的最大效用  $v(S)$ ,  $v(S)$  也通常称为联盟  $S$  的价值。对于具有不可转移效用的联盟博弈  $(N, v)$  而言,其联盟效用是不能被联盟内的认知用户分配的,但是联盟效用与协作策略相关。

在设计效用函数时,应考虑在满足一定虚警概率的前提下尽可能地提高子联盟的检测概率,也就是提高频谱感知能力。

根据上述描述,  $v(S)$  的定义如式(7)所示:

$$v(S) = Q_{i,S}^D - C(Q_{i,S}^F, \alpha_{j,S}, \beta) \quad (7)$$

其中,  $Q_{i,S}^D$  是子联盟的检测概率,定义如式(8)所示。  $C(Q_{i,S}^F, \alpha_{j,S}, \beta)$  为成本函数,与子联盟的虚警概率  $Q_{i,S}^F$ 、虚警概率阈值  $\alpha_{j,S}$ 、联盟  $S$  到主用户  $j$  的距离调节参数  $\beta$  有关。

$$Q_{i,s}^D = 1 - Q_{i,s}^M \quad (8)$$

$C(Q_{i,s}^F, \alpha_{j,s}, \beta)$  应该具备: 随着  $Q_{i,s}^F$  的增加,  $C(Q_{i,s}^F, \alpha_{j,s}, \beta)$  也增加; 联盟内的认知用户与主用户的平均距离  $\bar{d}_{j,s}$  越大,  $C(Q_{i,s}^F, \alpha_{j,s}, \beta)$  也增加; 当  $Q_{i,s}^F$  超过阈值时,  $C(Q_{i,s}^F, \alpha_{j,s}, \beta)$  将会无穷大, 具体表达如式(9)所示:

$$C(Q_{i,s}^F, \alpha_{j,s}, \beta) = \begin{cases} -(\bar{d}_{j,s})^{-\beta} \log(1 - (\frac{Q_{i,s}^F}{\alpha_{j,s}})^2), & \text{if } \frac{Q_{i,s}^F}{\alpha_{j,s}} < 1 \\ +\infty, & \text{if } \frac{Q_{i,s}^F}{\alpha_{j,s}} \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

## 2.5 联盟形式

对于联盟博弈而言, 需要设计一种合适的联盟形式, 即不管认知用户是加入子联盟还是离开子联盟, 都要对新的子联盟有利。只有满足联盟形式的两个或多个子联盟才能够进行结盟。本文使用两种联盟形式: 合并操作和分裂操作, 这两种操作能够体现帕累托最优。下面, 首先定义联盟比较, 然后再定义合并操作和分裂操作。

### (1) 联盟比较

设  $F = \{F_1, \dots, F_c\}$  和  $G = \{G_1, \dots, G_d\}$  是  $N$  的两种联盟划分方式。任取一个认知用户  $i$ , 它是联盟  $F_y \in F$  的成员, 其中  $1 \leq y \leq c$ ,  $F_y$  中的效用函数值为  $\varphi_{i,F_y}$ ; 设认知用户  $i$  同为联盟  $G_k \in G$  的成员, 其中  $1 \leq k \leq d$ ,  $G_k$  中的效用函数值为  $\varphi_{i,G_k}$  (其中,  $\varphi_{i,F_y}, \varphi_{i,G_k}$  按照式(7)计算)。若任取认知用户  $i$ ,  $\varphi_{i,F_y} \geq \varphi_{i,G_k}$  都能够成立, 则记为:  $F \infty G$ , 即  $F$  的划分优于  $G$  的划分, 其中“ $\infty$ ”为优于算子。根据优于算子对联盟的排序也称为帕累托(Pareto)序。

### (2) 合并和分裂操作

合并操作: 若  $\{U_{y=1}^{s_y}\} \infty \{s_1, \dots, s_c\}$  成立, 则子联盟  $\{s_1, \dots, s_c\}$  会被合并成一个新的子联盟  $\{U_{y=1}^{s_y}\}$ 。

分裂操作: 若  $\{s_1, \dots, s_c\} \infty \{U_{y=1}^{s_y}\}$  成立, 则子联盟  $\{U_{y=1}^{s_y}\}$  会被分裂成若干个新的子联盟  $\{s_1, \dots, s_c\}$ 。

使用上述的联盟形式, 多个子联盟之间可以互动以及使用优于算子“ $\infty$ ”决定是否进行合并或者分裂操作。对于帕累托最优而言, 当且仅当至少有一个认知用户可以通过合并(分裂)操作提高自己的效用且不会使其他认知用户的效用下降时, 联盟才进行合并(分裂)。因此, 在频谱感知过程中, 如果认知用户进行协作是对其有益的, 那么按照帕累托最优进行的合并操作是一种具有约束力的协议, 这个协议是部分可逆的, 比如: 通过分裂协议实现可逆。

## 3 算法设计

在异构认知无线电环境下, 进行分布式联盟感知的目的是实现频谱感知公平, 在频谱共享时, 认知用户能够根据自身需求和无线信道环境选择最佳的主用户, 则要求每个联盟能够感知到  $q$  个主用户的存在, 即认知用户有  $q$  种选择。

分布式联盟感知机制的主要思想为: 以任一初始子联盟内具有最低虚警概率的节点作为联盟头结点, 然后按照联盟比较形式, 进行合并操作; 当处理完该子联盟的所有邻居子联盟后, 找出该子联盟内具有次低的虚警概率的节点作为联盟头结点, 然后按照联盟比较形式, 进行合并操作, 共选择  $q$  次联盟头结点; 当所有子联盟都被处理后, 按照联盟比较形式,

所有子联盟同时进行分裂操作; 执行以上步骤直到没有合并-分裂操作为止, 至此完成子联盟的划分, 然后各子联盟进行联盟感知。

分布式联盟感知机制的具体步骤如下:

步骤 1 将网络中所有认知用户划分为  $W = \{W_1, \dots, W_l, \dots, W_k\}$ 。

步骤 2 每个认知用户计算各自对应的  $P_{i,j}^n$  和  $P_{i,j}^f$ , 并按照从低到高的顺序进行排序, 选出  $q$  个 ( $q < m$ ) 存放在每个认知用户的用户信息表 BI 中, 根据联盟头结点选取原则选出子联盟头结点。

步骤 3 子联盟  $W_l$  通过分析经公共控制信道(例如: Cognitive Pilot Channel, CPC)接收到的信息来发现邻居子联盟, 联盟头结点将信息存储在邻居信息表 NI 中。

步骤 4 子联盟  $W_l$  检查邻居信息表是否为空, 若为空, 则转步骤 7; 否则, 从中选出距离该子联盟  $W_l$  最近的子联盟并向其发起合并操作请求, 并交换子联盟内每个认知用户的位置、 $P_{i,j}^n$  和  $P_{i,j}^f$ 。

步骤 5 根据合并操作规则进行计算, 若满足合并操作规则, 则进行合并操作, 形成新的子联盟; 否则, 无合并操作。

步骤 6 从邻居信息表中将邻居子联盟删除, 转步骤 4。

步骤 7 检查子联盟  $W_l$  中是否存在  $P_{i,j}^f$  ( $j \neq j'$ ) 比当前头结点的  $P_{i,j}^f$  高的节点, 若存在, 则从中选出具有最低虚警概率的节点作为联盟头结点, 然后执行步骤 3。

步骤 8 若还有未进行合并操作的子联盟  $W_l$ , 则转步骤 3。

步骤 9 每个子联盟以合并操作时联盟头结点对应的用户顺序, 根据分裂规则, 在所有可能的划分中, 进行分裂操作。若满足分裂操作, 则进行分裂操作; 否则, 转步骤 11。

步骤 10 重复执行步骤 3 至步骤 9, 直到每个子联盟都不能进行合并或者分裂操作。

步骤 11 子联盟中的每一个认知用户向各自对应的联盟头结点发送感知比特数据。

步骤 12 联盟头结点利用“OR”规则融合: 把接收到的感知数据与自己的感知数据融合, 得出最终感知结果, 通过公共控制信道将感知结果广播给子联盟内的所有认知用户。

## 4 仿真实现与性能评价

基于联盟博弈的频谱感知机制采用 C/C++ 语言<sup>[10]</sup> 与 MATLAB 语言<sup>[11]</sup> 混合编写实现, 以 Microsoft Visual Studio 10.0、MATCOM 4.5、MATLAB 2013a 为主要开发工具, 在 Windows 7 平台下调试运行。

4 个主用户随机部署在方形区域内, 40 个认知用户(认知用户最多不超过 40 个, 在进行性能对比时, 认知用户的数量会发生改变)随机分布在主用户周围。设置主用户发射功率  $P_{PU1} = 90\text{mW}$ ,  $P_{PU2} = 100\text{mW}$ ,  $P_{PU3} = 110\text{mW}$ ,  $P_{PU4} = 120\text{mW}$ ; 所有认知用户发射感知比特数据的功率  $P_{SU} = 10\text{mW}$ ; 噪声功率  $\delta^2 = -90\text{dBm}$ ; 路径损失常数  $\kappa = 1$ ; 路径损失的指数  $\eta = 3$ ; 参考 IEEE 802.22 标准设置, 虚警概率阈值  $\alpha = 0.1$ ; 实际的认知网络为了降低频谱感知时的接入延迟和带宽需求, 时间带宽积  $\mu$  的取值都比较小, 这里设置  $\mu_1 = 5$ ,  $\mu_2 = 7$ ,  $\mu_3 = 4$ ,  $\mu_4 = 3$ 。

把本文提出的分布式联盟感知机制作为机制 1,把认知用户非协作地进行频谱感知的场景作为机制 2,把文献[12]中提出的基于启发式算法的频谱感知机制作为机制 3,在仿真拓扑上对机制 1、机制 2 和机制 3 进行仿真对比。对于本文提出的机制 1,除了要设置基本的参数之外,还有两个参数需要讨论:在每个子联盟中需要选出感知性能靠前的  $q$  个主用户、联盟  $S$  到主用户  $j$  的距离调节参数  $\beta$ 。

为了比较认知用户进行协作频谱感知与非协作频谱感知的性能的优劣,首先比较了不同的主用户数  $q$  对机制 1 和机制 2 的影响,然后比较了不同的距离调节参数  $\beta$  对机制 1 的影响。最后,对比了机制 1 和机制 3 的联盟效用。

#### 4.1 检测概率和虚警概率

认知用户数分别为 1、5、10、20、30、40,对比机制 1 和机制 2 的检测概率和虚警概率。

(1)  $\beta=1, q$  分别取 1、2 和 3,比较机制 1 和机制 2 的性能。

平均检测概率  $\bar{P}^D$  按式(10)定义,则平均检测概率随认知用户数量变化的情况如图 2 所示。

$$\bar{P}^D = \frac{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^N P_{ij}^D}{qN} \quad (10)$$

其中,  $N$  表示认知用户的总数。

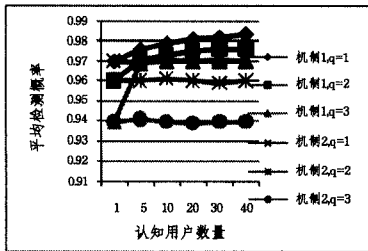


图 2 平均检测概率随认知用户数量的变化情况

平均虚警概率  $\bar{P}^F$  按式(11)定义,则平均虚警概率随认知用户数量变化的情况如图 3 所示。

$$\bar{P}^F = \frac{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^N P_{ij}^F}{qN} \quad (11)$$

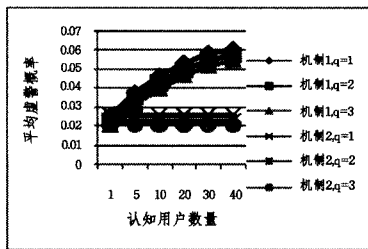


图 3 平均虚警概率随认知用户数量的变化情况

从图 2 和图 3 得出,机制 1 的频谱感知结果比机制 2 好。随着认知用户的不断增加,机制 1 的检测概率不断升高,同时虚警概率也升高,但虚警概率始终远低于虚警概率阈值。

(2)  $q=2, \beta$  分别取 1/4、1 和 4 时,进行机制 1 的性能分析。

平均检测概率和平均虚警概率随距离调节参数  $\beta$  的变化情况分别如图 4 和图 5 所示。从中得出:

a) 距离调节参数  $\beta$  相同时,随着认知用户增加,平均检测概率增加。这是因为认知用户数越多,联盟进行时,有更多的

子联盟可供选择,所以子联盟会越来越来少。

b) 当认知用户数相同时,距离调节参数  $\beta$  越大,平均检测概率(平均虚警概率)会越大。这是因为距离调节参数越大,联盟内的认知用户到主用户的平均距离对效用函数的影响越小,从而可以与该子联盟距离更远的子联盟进行联盟,也就是能够形成更大的子联盟。

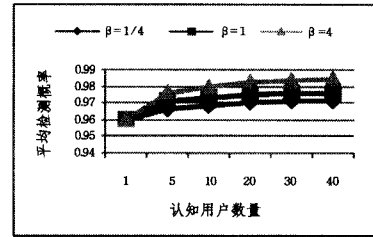


图 4 平均检测概率随距离调节参数的变化情况

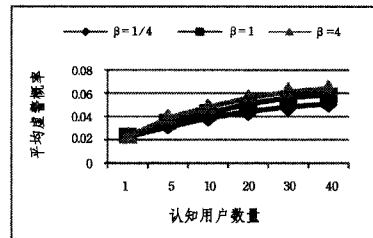


图 5 平均虚警概率随距离调节参数的变化情况

#### 4.2 联盟效用

联盟感知结果稳定时,所有子联盟的平均效用称为联盟效用。在认知用户数分别为 1、5、10、20、30、40 的情况下,对比机制 1 和机制 3 的联盟效用,联盟效用随认知用户数量的变化情况如图 6 所示。

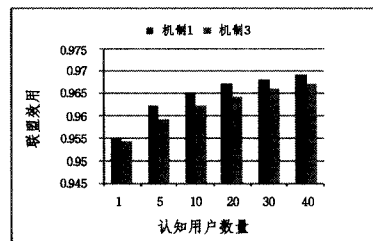


图 6 联盟效用随认知用户数量的变化情况

从图 6 看出,随着认知用户数量增加,机制 1 和机制 3 的联盟效用不断增加,而且机制 1 的平均效用高于机制 3 的。这是因为,随着认知用户数量增加,认知用户使用联盟形式按照帕累托最优进行合并操作或者分裂操作,从而形成新的子联盟;合并操作或者分裂操作的目的是使新形成的子联盟的效用高于原子联盟的。而机制 3 将分布式频谱感知问题建模为多重选择背包问题,目标函数考虑了检测概率,但没有考虑虚警概率。

**结束语** 本文通过引入博弈论,设计并仿真实现了一种基于联盟博弈的频谱感知机制,其利用各个子联盟进行联盟感知,从而能够在低感知环境中,实现认知用户的公平感知并增强感知效果。

#### 参考文献

[1] Real-Time Computing Laboratory (RTCL) [EB/OL]. <http://kabru.eecs.umich.edu/bin/view>

- [2] Signals and information Group [EB/OL]. <http://www.cspl.umd.edu/sig>
- [3] Wang B B, Wu Y L, Liu K J. Game theory for cognitive radio networks; An overview[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(14): 2537-2561
- [4] Park J, van der Schaar M. The Theory of Intervention Games for Resource Sharing in Wireless Communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(1): 165-175
- [5] Elias J, Martignon F, Capone A, et al. Non-cooperative spectrum access in cognitive radio networks: A game theoretical model [J]. *Computer Networks*, 2011, 55(17): 3832-3846
- [6] Akyildiz I F, Lo B F, Balakrishnan R. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey [J]. *Physical Communication*, 2011, 4(1): 40-62
- [7] Wang Xing-wei, Wang Qing-jun, Lai Wu-wen, et al. Static Traffic Grooming Scheme Based on Predatory Search and Gaming [J]. *Computer Science*, 2012, 39(12): 30-32(in Chinese)  
王兴伟, 王庆军, 赖武文, 等. 基于捕食搜索和博弈的静态通信量疏导模式[J]. *计算机科学*, 2012, 39(12): 30-32
- [8] Wang Xing-wei, Wang Qi, Huang Min, et al. A Fuzzy Integral and Game Theory Based QoS Multicast Routing Scheme [J]. *Journal of Software*, 2008, 19(7): 1743-1752(in Chinese)  
王兴伟, 王琦, 黄敏, 等. 基于模糊积分和博弈论的 QoS 组播路由机制[J]. *软件学报*, 2008, 19(7): 1743-1752
- [9] Wang Xing-wei, Hou Mei-jia, Huang Min, et al. A Game Theory Based Fuzzy Unicast QoS Routing Scheme [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(1): 10-17(in Chinese)  
王兴伟, 侯美佳, 黄敏, 等. 一种基于博弈论方法的模糊 QoS 单播路由机制[J]. *计算机学报*, 2007, 30(1): 10-17
- [10] Lippman S B, Lajoie J, Moo B E. C++ Primer Plus[M]. Li Shixian, Jiang Ai-jun, Mei Xiao-yong, et al., eds. Beijing: Posts & Telecom Press, 2012: 122(in Chinese)  
Lippman S B, Lajoie J, Moo B E. C++ Primer Plus[M]. 李师贤, 蒋爱军, 梅晓勇, 等译. 北京: 人民邮电出版社, 2012: 122
- [11] Liu Wei. Proficient in MATLAB and C/C++ mixed programming design [M]. Beijing: Beihang University Press, 2008 (in Chinese)  
刘维. 精通 MATLAB 与 C/C++ 混合程序设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008
- [12] Koufos K, Ruttik K, Jäntti R. Distributed Sensing in Multiband Cognitive Networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(5): 1667-1677

(上接第 88 页)

- [3] Harel J, Koch C, Perona P. Graph-based visual saliency[C]//NIPS. 2007: 545-552
- [4] Cheng M M, Zhang G X, Mitra N J, et al. Global contrast based salient region detection[C]//IEEE CVPR. 2011: 409-416
- [5] Zhang J M, Sclaroff S. Saliency Detection: A Boolean Map Approach[C]//ICCV. 2013: 153-160
- [6] Judd T, Ehinger K, Durand F, et al. Learning to predict where humans look[C]//ICCV. 2009: 2106-2113
- [7] Borji A. Boosting bottom-up and top-down visual features for saliency estimation[C]//CVPR. 2012: 438-445
- [8] Zhao Q, Koch C. Learning a saliency map using fixated locations in natural scenes[J]. *Journal of Vision*, 2011, 11(3): 1-15
- [9] NUSEF[OL]. <http://mmas.comp.nus.edu.sg/NUSEF.html>
- [10] MSRA[OL]. [http://research.microsoft.com/en-us/um/people/jiansun/SalientObject/salient\\_object.htm](http://research.microsoft.com/en-us/um/people/jiansun/SalientObject/salient_object.htm)
- [11] MIT[OL]. <http://people.csail.mit.edu/tjudd/WherePeopleLook/index.html>
- [12] PASCAL VOC 2007[OL]. <http://pascallin.ecs.soton.ac.uk/challenges/VOC/>
- [13] Torralba A. Modeling global scene factors in attention[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2003, 20(7): 1407-1418
- [14] <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/>
- [15] Erdem E, Erdem A. Visual saliency estimation by nonlinearly integrating features using region covariances[J]. *Journal of Vision*, 2013, 13(4): 1-20
- [16] Margolin R, Zelnik-Manor L, Tal A. Saliency for image manipulation[J]. *The Visual Computer*, 2013, 29(5): 381-392
- [17] Hou X, Harel J, Koch C. Image Signature: Highlighting sparse salient regions[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(1): 194-201
- [18] Zhang L, Tong M, Marks T, et al. SUN: A bayesian framework for saliency using natural statistics[J]. *Journal of Vision*, 2008, 8(7): 32: 1-20
- [19] Judd T, Durand F, Torralba A. A benchmark of computational models of saliency to predict human fixations[R]. MIT, 2012
- [20] Itti L, Koch C. Computational modeling of visual attention[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2001, 2(3): 194-203
- [21] Hou X, Zhang L. Saliency detection: A spectral residual approach[C]//CVPR. 2007: 1-8
- [22] Judd T, Durand F, Torralba A. MIT saliency benchmark[OL]. <http://people.csail.mit.edu/tjudd/SaliencyBenchmark/>
- [23] Bruce N, Tsotsos J. Saliency based on information maximization [C]//NIPS 18. 2006: 155-162
- [24] Cheng M-M, Zhang Z, Lin W-Y, et al. BING: Binarized normed gradients for objectness estimation at 300fps[C]//IEEE CVPR. 2014: 2386-2393
- [25] Borji A, Itti L. State-of-the-art in visual attention modeling[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(1): 185-207
- [26] Vig E, Dorr M, Cox D. Large-Scale Optimization of Hierarchical Features for Saliency Prediction in Natural Images[C]//IEEE CVPR. 2014: 2798-2805
- [27] Borji A, Sihite D N, Itti L. Salient object detection: A benchmark [C]//ECCV. 2012: 414-429
- [28] Goferman S, Zelnik-Manor L, Tal A. Context-aware saliency detection[J]. *PAMI*, 2012, 34(10): 1915-1926
- [29] Kienzle W, Wichmann F A, Scholkopf B, et al. A Nonparametric Approach to Bottom-Up Visual Saliency[C]//NIPS. 2007: 689-696