

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.12.004

引用格式:富爽,杜红,许杰.一种贪婪的异构多信道并行合作频谱感知方法[J].电讯技术,2015,55(12):1330-1336.[FU Shuang, DU Hong, XU Jie. A Greedy Parallel Cooperative Spectrum Sensing Method for Multiple Heterogeneous Channels[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(12):1330-1336.]

一种贪婪的异构多信道并行合作频谱感知方法*

富爽^{1,2,**}, 杜红¹, 许杰¹

(1. 黑龙江八一农垦大学 信息技术学院, 黑龙江 大庆 163319;
2. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001)

摘要:为了同时对多个异构信道进行有效地合作频谱感知,并克服现有方法中只考虑检测准确性而忽略感知开销和系统效益,忽略不同认知用户对不同异构信道感知性能的差异以及参与合作感知的认知用户较多等问题,提出了一种贪婪的异构多信道并行合作频谱感知方法。根据对感知开销和传输收益的定义,充分考虑不同认知用户对不同异构信道感知性能的差异,利用贪婪算法在多个认知用户和多个异构信道间最优地进行感知任务分配,使总系统效益最大。仿真结果表明,所提方法与基于迭代匈牙利的并行合作频谱感知方法、改进的基于迭代匈牙利的并行合作频谱感知方法和随机的合作频谱感知方法相比,能够获得较高的总系统效益,且所需的参加合作感知的认知用户数较少。

关键词:认知无线电;并行合作频谱感知;异构信道;贪婪算法

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)12-1330-07

A Greedy Parallel Cooperative Spectrum Sensing Method for Multiple Heterogeneous Channels

FU Shuang^{1,2}, DU Hong¹, XU Jie¹

(1. Institute of Information Technology, Heilongjiang Bayi Agriculture University, Daqing 163319, China;
2. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To simultaneously and efficiently cooperatively sense multiple heterogeneous channels, and overcome some problems in current methods, such as only considering the sensing accuracy instead of the sensing overhead and the transmission gain, neglecting the difference of detection performance between different secondary users and different heterogeneous channels, and requiring more cooperative secondary users, a greedy parallel cooperative spectrum sensing method for multiple heterogeneous channels is proposed. According to the definitions of sensing overhead and transmission gain and considering the difference of detection performance between different secondary users and different heterogeneous channels, it uses greedy algorithm to optimally assign the sensing task between multiple secondary users and multiple heterogeneous channels to maximize the total system profit. The simulation results show that the proposed method can obtain higher system profit and requires less cooperative secondary users than iterative Hungarian algorithm based parallel cooperative spectrum sensing method, improved iterative Hungarian algorithm based parallel cooperative spectrum sensing method, and random cooperative sensing method.

Key words: cognitive radio; parallel cooperative spectrum sensing; heterogeneous channels; greedy algorithm

* 收稿日期:2015-04-10;修回日期:2015-06-24 Received date:2015-04-10;Revised date:2015-06-24
基金项目:黑龙江省青年科学基金项目(QC2015070);黑龙江省教育厅科技项目(12541583);黑龙江省高等教育教学改革项目(JG2013010450);黑龙江八一农垦大学博士科研启动基金项目(XDB2015-28,XYB2013-23)

Fundation Item: The Science Foundation of Heilongjiang Province for the Youth(QC2015070);The Scientific Research Fund of Heilongjiang Provincial Education Department(No. 12541583);The Teaching Reform Project of Heilongjiang Province(JG2013010450);The Scientific Research Foundation for Doctors of Heilongjiang Bayi Agricultural University(XDB2015-28,XYB2013-23)

** 通讯作者:fushuang_dq@163.com Corresponding author:fushuang_dq@163.com

1 引言

随着无线通信业务和人们需求的快速增长,频谱资源日益匮乏。认知无线电技术^[1]采用开放的频谱接入机制,使非授权用户可以在不影响授权用户(也称主用户)的情况下灵活使用主用户暂不使用的空闲频谱,能够有效解决当前频谱资源匮乏与人们日益增长的通信需求之间的矛盾,是无线通信发展的必然趋势。为了准确发现可用的频谱资源并有效避免对授权用户造成干扰,频谱感知^[2-3]被认为是认知无线电实现的关键。

在认知无线电频谱感知中,往往需要同时感知多个信道,而这些信道可能被不同的主用户网络占用,并具有不同的频带宽度,因此它们往往拥有不同的传输速率和占用概率,即异构信道。对于多个异构信道的感知问题,文献[4]利用遗传算法来解决单个认知用户如何同时感知多个异构信道的问题,文献[5]讨论了一个认知用户具有多个天线的情况,通过决定每个信道感知的天线数使系统的吞吐量最大。但是,文献[4-5]只考虑了单个认知用户的感知问题,没有考虑多个认知用户合作感知的问题,由于信道衰落和阴影效应的影响,单个认知用户的感知结果往往并不准确。为了减少衰落和阴影效应的影响,多用户的合作频谱感知技术被广泛采用^[6-7]。目前,有关合作频谱感知技术的研究大多集中于对某一单独信道进行感知,而对于多个异构信道,则需要对多个异构信道依次进行单信道感知,这将导致很大的感知时延及通信开销。并行合作频谱感知通过多个认知用户同时感知不同的信道,能够有效解决在一个感知周期内感知多个信道的问题。在并行合作频谱感知技术中,一个关键的问题就是哪些认知用户感知哪些信道,即感知任务分配问题。针对该问题,文献[8]提出了一种并行合作频谱感知方法,该方法能够最优地选择参加合作频谱感知的认知用户数及判决门限值,但该文献假设所有用户对所有信道的感知性能均相同,由于不同认知用户的位置、性能均不同,且各异构信道的带宽也不同,因此不同认知用户对不同异构信道的感知性能也是不同的。文献[9]将并行合作频谱感知问题等效成一个求二分图最优匹配的问题,利用匈牙利算法得到最优的感知任务分配方案,但是该方法仅考虑一个信道仅由一个认知用户感知的情况。文献[10-11]分别提出了使用迭代匈牙利算法和迭代

Kuhn-Munkres(KM)算法进行并行合作频谱感知的方法,但是这两种方法只考虑检测的准确性,而没有考虑感知开销和系统效益的问题,而且由于该方法没有完善的终止条件,导致需要较多的认知用户来进行频谱感知,这将会严重增加认知用户的能量消耗,以及增大系统的虚警概率。本文充分考虑不同认知用户对不同异构信道感知性能的差异,定义感知开销和系统效益的表达式,提出了一种贪婪的异构多信道并行合作频谱感知方法,通过合理分配感知任务,达到系统效益最大,且所需认知用户数最小的目的。

2 系统模型

在一个由一个融合中心和 N 个认知用户构成的集中式认知无线网络中,感知对象包括 M 个异构信道,每一个异构信道具有不同的带宽、不同的传输速率以及不同的占用概率。认知用户在每一个时隙 T 内分为感知时隙 T_s 和传输时隙 T_r 两部分,即 $T=T_s+T_r$ 。每个认知用户在一个感知时隙 T_s 内仅感知一个信道,而每个信道可由多个认知用户合作感知以提高准确性,合作时采用 OR 准则。设认知用户使用能量检测方法进行频谱感知,检测门限为 λ ,信号为复相移键控(Complex Phase Shift Keying, CPSK)信号,噪声为循环对称复高斯噪声,噪声方差为 σ_u ,接收信号的采样速率为 f_s ,则认知用户的虚警概率可以表示为^[12]

$$P_f = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u} - 1 \right) \sqrt{\frac{T f_s}{2}} \right). \tag{1}$$

式中, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数。

由于每个用户所处的位置和无线环境不同,不同认知用户处不同信道的信噪比也不同。设已知各认知用户处各信道的信噪比 $Y=[\gamma_{mn}]_{M \times N}$,其中 γ_{mn} 表示第 n 个认知用户处第 m 个信道的信噪比,每个认知用户的虚警概率 $P_f^{m,n}$ 保持一致,即 $P_f^{m,n}=P_f$,认知用户 n 感知信道 m 的检测概率为 P_d^{mn} ,其中 $n=1, 2, \dots, N, m=1, 2, \dots, M$,则检测概率矩阵定义为 $P_d=[P_d^{mn}]_{M \times N}$,其中 P_d^{mn} 可根据式(1)由下式得出:

$$P_d^{mn} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2(2\gamma_{mn}+1)}} \left[\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(1-2P_f) - \sqrt{T f_s} \gamma_{mn} \right] \right\}. \tag{2}$$

设 $X=[x^{mn}]_{M \times N}$ 为分配矩阵,当认知用户 n 被分配感知信道 m 时, $x^{mn}=1$, 否则 $x^{mn}=0$ 。由于当信道

由多个认知用户合作感知时采用 OR 准则,因此信道 m 的检测概率 $P_{d_ch}^m(X)$ 和虚警概率 $P_{f_ch}^m(X)$ 为

$$P_{d_ch}^m(X) = 1 - \prod_{x^{mn}=1} [1 - P_d^{mn}(T_s)], \quad (3)$$

$$P_{f_ch}^m(X) = 1 - \prod_{x^{mn}=1} (1 - p_f). \quad (4)$$

为保证频谱使用率,设系统所允许的各信道最大虚警概率为 Q_{fa} ,根据 OR 准则和各认知用户的虚警概率 p_f ,可以得到每个信道允许的最大认知用户数 N_{co_max} 为

$$N_{co_max} = \lfloor \lg_{(1-p_f)}(1-Q_{fa}) \rfloor. \quad (5)$$

式中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

在认知用户进行频谱感知时,必须停止其数据传输,定义感知开销为认知用户因频谱感知任务所减少传输的数据量。设 R_{cr}^n 为认知用户 n 的传输速率,则认知用户 n 的感知开销 H^n 为

$$H^n = R_{cr}^n T_s. \quad (6)$$

定义传输收益为所感知的信道用于认知用户传输时单位时间内所能传输的平均有效数据量。信道用于认知用户传输时分为两种情况:第一种情况是信道空闲且被认知用户正确感知,第二种情况是信道被主用户占用,但被认知用户错误感知而误认为是空闲。设 R_{ch}^m 为信道 m 的传输速率, P_{on}^m 为信道 m 的空闲概率, $P_{d_ch} = [P_{d_ch}^m]_M$ 为各信道的检测概率矢量, $P_{f_ch} = [P_{f_ch}^m]_M$ 为各信道的虚警概率矢量,其中 $P_{d_ch}^m$ 和 $P_{f_ch}^m$ 分别为认知网络对信道 m 的检测概率和虚警概率,则对于第一种情况,信道 m 所能传输的有效信息量是 $R_{ch}^m T_r P_{on}^m [1 - P_{f_ch}^m]$;而对于第二种情况,当信道被主用户占用时,由于主用户信号的存在,不仅认知用户传输的信息可能无法被正确接收,导致多余的能量消耗,而且还会对主用户造成干扰,这是认知无线电设计理念所极力避免的,因此,这时所传输的信息量 $R_{ch}^m (1 - P_{on}^m) [1 - P_{d_ch}^m] T_r$ 可以看成是对传输收益的惩罚函数。设 δ 为惩罚因子,用来衡量第二种情况时由于能量消耗和对主用户造成的干扰对系统的影响程度, δ 越大则表示影响越大,则信道 m 的传输收益 G^m 为

$$G^m = R_{ch}^m T_r P_{on}^m [1 - P_{f_ch}^m] - R_{ch}^m (1 - P_{on}^m) [1 - P_{d_ch}^m] T_r \delta, \quad (7)$$

这样在分配 X 时的总系统效益 $U_{all}(X)$ 可以定义为总传输收益和总感知开销之差:

$$U_{all}(X) = \sum_{m, x^{mn}=1} G^m - \sum_{n, x^{mn}=1} H^n. \quad (8)$$

为了使总系统效益最大,必须根据传输收益和感知开销合理地选择最优的分配矩阵 X 。

根据以上描述的系统模型,并行合作频谱感知的感知任务分配问题可以等效成如下分配问题:

$$\begin{aligned} \max_X \quad & U_{all}(X) = \sum_{m, x^{mn}=1} \{R_{ch}^m T_r P_{on}^m [1 - P_{f_ch}^m] - \\ & R_{ch}^m (1 - P_{on}^m) [1 - P_{d_ch}^m] T_r \delta\} - \sum_{n, x^{mn}=1} R_{cr}^n T_s \quad (9) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{m=1}^M x^{mn} = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N; \\ & \beta \leq \sum_{n=1}^N x^{mn} \leq N_{co_max}, \quad m = 1, 2, \dots, M; \\ & x^{mn} \in \{0, 1\}. \end{aligned}$$

式中, β 表示是否能在一个感知时隙内检测完所有信道,如果 $N \geq M$,即认知用户数大于信道数,则能够在一个感知时隙内检测完所有信道,置 $\beta = 1$;否则,置 $\beta = 0$ 。

3 算法描述

本文采用贪婪算法解决上述感知任务分配问题。

首先,计算每个分配所能获得的系统效益,设将信道 m 分配给认知用户 n 感知时所能获得系统效益为 U^{mn} ,可由下式得到:

$$U^{mn} = G^m - H^n. \quad (10)$$

式中, H^n 为认知用户 n 感知时产生的感知开销,可由式(6)得出; G^m 为当信道 m 分配给认知用户 n 感知时所能获得的传输收益,可由式(7)得出。

然后,将每个信道上所有认知用户的系统效益 U^{mn} 从大到小分别排列,进行第一次迭代。从第一个信道开始,各信道依次将该信道分配给系统效益最大的认知用户进行感知。设当前迭代分配矩阵为 $X_0 = [X_0^{mn}]_{M \times N}$,以信道 m 为例,如果 $U^{mn'} = \sup_{n=1,2,\dots,N} (U^{mn})$,则设 $X_0^{mn'} = 1$,其他 $X_0^{mn} (n \neq n')$ 置 0。这样第一次迭代完成,为每一个信道均分配一个认知用户进行感知。置分配矩阵 $X = X_0$ 。计算各信道的检测概率和虚警概率,对于信道 m ,可得 $P_{d_ch}^m$ 等于 P_d^{mn} , $P_{f_ch}^m$ 等于 p_f 。为了避免对主用户造成干扰,检测概率必须大于一定值。设系统要求的各信道检测概率为 $P_{d_ch}^{req}$ 。经过一次迭代后,如果存在不满足检测概率要求的信道,即 $P_{d_ch}^m < P_{d_ch}^{req}$,且还有未分配感知信道的认知用户,则进行第二次迭代。

在第二次迭代中,为每一个检测概率不满足系统检测概率要求的信道依次再分配一个未分配感知信道的认知用户,与之前迭代分配的认知用户一同感知该信道。分配的原则仍然是在所有未分配感知

信道的认知用户中,选择系统效益 U^{mn} 最大的进行分配。置分配矩阵 $\mathbf{X}=\mathbf{X}+\mathbf{X}_0$ 。增加新的认知用户对信道进行合作感知后,信道的检测概率和虚警概率都会增加,由式(3)计算出各信道的检测概率 $P_{d_ch}^m$,判断其是否满足要求,如满足,则算法结束;如不满足,则继续为不满足系统检测概率要求的信道继续分配认知用户进行合作感知。依次类推,直至所有信道均满足检测概率的要求,即 $\forall m$, 均有 $P_{d_ch}^m \geq P_{d_ch}^{req}$, 或所有节点均分配信道进行感知,最终得到最优分配矩阵 $\mathbf{X}$ 。

此外,为了充分的利用频谱,每个信道允许的最大认知用户数为 N_{co_max} , 因此最大迭代次数为 N_{co_max} 。

其详细步骤如下:

步骤 1 初始化 $N, M, Q_{fa}, P_{d_ch}^{req}, p_f, P_d, T_r, T_s, \delta, R_{cr}^n (n=1, 2, \cdots, N), R_{ch}^m (m=1, 2, \cdots, M), P_{on}^m$ 。置 $\mathbf{X}=0, \mathbf{X}_0=0, \mathbf{P}_{d_ch}=0$ 以及 $\mathbf{P}_{f_ch}=1$, 利用式(5)计算 N_{co_max} ;

步骤 2 根据式(10)计算 U^{mn} , 其中 $m=1, 2, \cdots, M, n=1, 2, \cdots, N$, 并分别将各信道的 U^{mn} , 从大到小排列;

步骤 3 对于检测概率 $P_{d_ch}^m < P_{d_ch}^{req}$ 的信道, 依次在未分配感知信道的认知用户中选择系统效益 U^{mn} 最大的进行分配, 即为每一个检测概率未达到要求的信道分配一个未分配感知信道的认知用户进行感知, 直至没有未分配感知信道的认知用户, 得到当前迭代最优分配矩阵 $\mathbf{X}_0$;

步骤 4 置分配矩阵 $\mathbf{X}=\mathbf{X}+\mathbf{X}_0$ 。根据 $\mathbf{X}$, 由式(3)计算各信道的检测概率矢量 $\mathbf{P}_{d_ch}$;

步骤 5 判断是否满足截止条件: 所有信道均满足 $P_{d_ch}^m \geq P_{d_ch}^{req}$; 所有认知用户均已分配信道进行感知; 达到最大迭代次数 N_{co_max} 。3 个截止条件满足任意一个, 则迭代终止算法结束; 否则, 跳到步骤 3。

4 复杂度分析

对于本文提出的贪婪的异构多信道并行合作频谱感知方法, 其时间复杂度主要包含两个部分: 一是对 N 个认知用户的系统效益进行排序, 根据堆排序原理, 可得第一部分排序的时间复杂度为 $O(M \cdot N \cdot \lg N)^{[11]}$; 二是为检测概率未达到要求的信道, 在未分配的认知用户中迭代最优分配一个认知用户进行感知, 根据算法流程, 这部分的时间复杂度最大为

$O(\min(N, M \cdot N_{co_max}))$, 即不考虑检测概率要求满足的截止条件, 只考虑所有认知用户均分配感知任务或所有信道均被 N_{co_max} 个认知用户感知。因此本文方法的总时间复杂度为 $O(\max(M \cdot N \cdot \lg N, \min(N, M \cdot N_{co_max})))$ 。当 $N \leq M \cdot N_{co_max}$ 时, 其总的时间复杂度为 $O(M \cdot N \cdot \lg N)$; 当 $N > M \cdot N_{co_max}$ 且 $N_{co_max} \leq N \cdot \lg N$ 时, 其总的复杂度为 $O(M \cdot N \cdot \lg N)$; 当 $N > M \cdot N_{co_max}$ 且 $N_{co_max} > N \cdot \lg N$ 时, 其总的复杂度为 $O(M \cdot N_{co_max})$ 。为了同时感知多个信道, N 值往往比较大, 而为了保证信道的使用效率, 系统要求的虚警概率一般较低, 因此 N_{co_max} 值一般较小, 大多数情况下均有 $N_{co_max} \leq N \cdot \lg N$, 因此, 总时间复杂度可计为 $O(M \cdot N \cdot \lg N)$ 。

5 仿真结果及分析

设感知的异构信道数 $M=10$, 每帧时长 T 、感知时长 T_s 、传输时长 T_r 分别取典型值 200 ms、5 ms 和 195 ms^[9,13]。各认知用户处各异构信道的信噪比 γ_{mn} 服从均值为 -7 dB 的指数分布。各信道的空闲概率 P_{on}^m 在 0 ~ 1 中随机变化。每个认知用户的虚警概率 $p_f=0.01$, 系统所允许的信道最大虚警概率为 $Q_{fa}=0.05^{[10]}$, 根据式(5)可得 $N_{co_max}=5$ 。采样频率 f_s 设为 10 000 Hz。各异构信道传输速率 R_{ch}^m 和各认知用户传输速率 R_{cr}^n 均在 0.1 ~ 1 Mb/s 范围内随机变化^[8]。设系统检测概率要求 $P_{d_ch}^{req}=0.95$, 惩罚因子 $\delta=1$ 。以上仿真参数的设置, 与认知无线电应用场景相符, 实验表明其参数的设置对仿真结果及结论影响不大。使用 Matlab 软件进行仿真分析, 所有仿真结果均由 Monte Carlo 方法得到, 仿真次数越多结果越接近真实结果, 本文设仿真次数为 10 000 次。

本文将所提出的贪婪的异构多信道并行合作频谱感知方法与文献[10]中基于迭代匈牙利的并行合作频谱感知方法、改进的基于迭代匈牙利算法并行合作频谱感知方法和随机的合作频谱感知方法相比较。基于迭代匈牙利的频谱感知方法由于缺乏完善的迭代终止条件, 因此需要较多的认知用户参加合作感知, 将导致较大的感知开销和较大的系统虚警概率。因此, 本文对其进行改进, 增加与本文所提算法相同的迭代终止条件检测概率要求 $P_{d_ch}^{req}$, 即当某信道的检测概率大于 $P_{d_ch}^{req}$ 时, 则不再分配其他的认知用户感知该信道, 以避免单纯追求检测概率而导致感知开销过大的问题。在随机的并行合作频谱

感知方法中,对于检测概率不满足检测概率要求 $P_{d_ch}^{req}$ 的信道,随机地分配未分配感知任务的认知用户进行感知,直至所有的信道均达到检测概率要求或达到最大迭代次数。

图 1 为 4 种方法在不同认知用户数时所能获得的总系统效益。由图 1 可见,本文方法相比其他 3 种方法能够获得更高的总系统效益,且随着认知用户数增加,系统所能获得的总系统效益呈上升趋势。这是由于随着认知用户数的增多,可供选择参加合作感知的认知用户也就越多,这样在感知任务分配中,可以选择性能更加优良的认知用户(如各信道信噪比较高、传输速率较低的认知用户)参加合作感知,从而使系统总效益增加。基于迭代匈牙利算法的并行合作频谱感知方法虽在认知用户数较少时,总系统效益随着认知用户数的增加而增加,但随着认知用户数的继续增加,由于缺乏完善的终止条件,导致参加合作感知的认知用户数过多,使感知开销不断增大,因此,其总系统效益随着认知用户数的增加而逐渐下降。改进的基于迭代匈牙利的并行合作频谱感知方法,由于引入了检测概率要求的终止条件,避免了原方法参与合作感知的认知用户数较多的缺点,减少了感知开销,因此,避免了原方法当认知用户数较多时总系统效益下降的问题。随机的并行合作频谱感知方法由于随机地分配感知任务,因此,总系统效益最低。

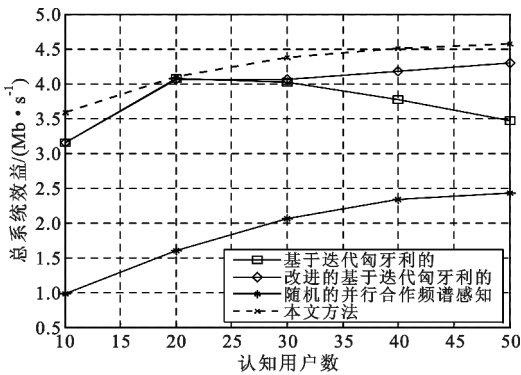


图 1 4 种方法在不同认知用户数时所能获得的总系统效益
Fig. 1 Total system profits of the four methods over different numbers of secondary users

图 2 为 4 种方法在不同认知用户数时参与合作感知的认知用户数。由图 2 可见,本文方法相比其他 3 种方法,参与合作感知的认知用户数较少,这不仅有利于降低各认知用户的能量消耗,还有利于降低系统的虚警概率,提高频谱的使用效率。当认知

用户数较少时,为了使各信道的检测概率达到要求,随着认知用户数的增加,系统会不断增加新的认知用户进行合作感知,因此参与合作感知的认知用户数随着认知用户数的增加而增加,如图 2 中本文方法的曲线在认知用户数从 10 ~ 20 变化时所示。当认知用户增加到一定程度时,使所有信道均达到检测概率的要求,这时随着认知用户的增加,可供选择的认知用户增加,为了减少感知开销,系统会选择性能更优良的更少的认知用户进行感知以达到系统检测概率的要求,因此,随着认知用户数的增加,参与合作感知的认知用户数随着认知用户数的增加而减少,如图 2 中本文方法的曲线在认知用户数从 20 ~ 50 变化时所示。由图 2 还可见,本文方法中参与合作感知的认知用户数由增加到减小的转折点位置相比其他算法出现得较早,这是由于该方法能够通过贪婪算法较优地确定感知任务分配策略,使各信道的检测概率在认知用户数较少时就能达到系统检测概率的要求。基于迭代匈牙利的并行合作频谱感知方法由于缺乏完善的终止条件,因此需要较多的参与合作感知的认知用户数,随机的并行合作频谱感知方法由于随机地确定感知任务分配策略,因此,需要参与合作感知的认知用户数较多。

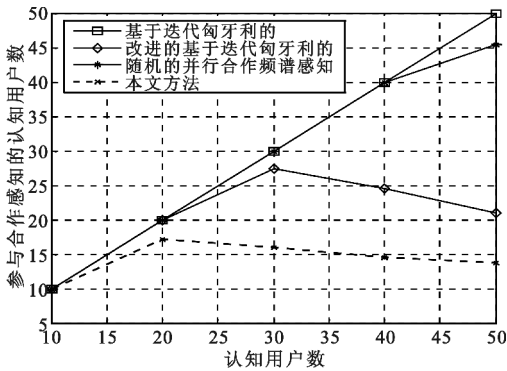


图 2 4 种方法在不同认知用户数时参与合作感知的认知用户数
Fig. 2 Numbers of secondary users participating in cooperative sensing of the four methods over different numbers of secondary users

图 3 为 4 种方法在不同认知用户数时各信道平均虚警概率。由于各认知用户的虚警概率恒定,因此合作感知之后,各信道的虚警概率仅取决于感知各信道的认知用户数,因此,图 2 和图 3 的曲线形状相似。由图 3 可见,本文方法相比其他 3 种方法,由于需要参与合作感知的认知用户数较少,因此,各信道的平均虚警概率也最小,这有利于提高频谱的使用效率。

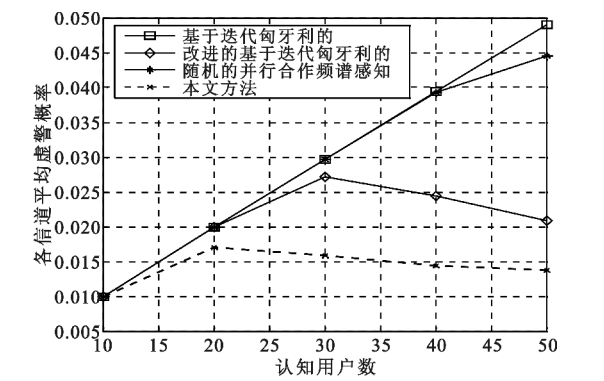


图 3 4 种方法在不同认知用户数时的各信道平均虚警概率
Fig. 3 The average false alarm probabilities of the four methods over different numbers of secondary users

图 4 为 4 种方法在不同认知用户数时各信道平均检测概率。由图 4 可见,本文方法的各信道平均检测概率高于随机的并行合作频谱感知方法,却低于基于迭代匈牙利的并行合作频谱感知方法及其改进方法。这说明本文方法的性能是以适当降低检测概率为代价的。本文方法在满足系统检测概率要求时,能够及时启动迭代终止条件,有效避免了基于迭代匈牙利的并行合作频谱感知方法及其改进方法过分追求检测概率而导致的参与合作感知的认知用户数过多和总系统效益较低的问题。

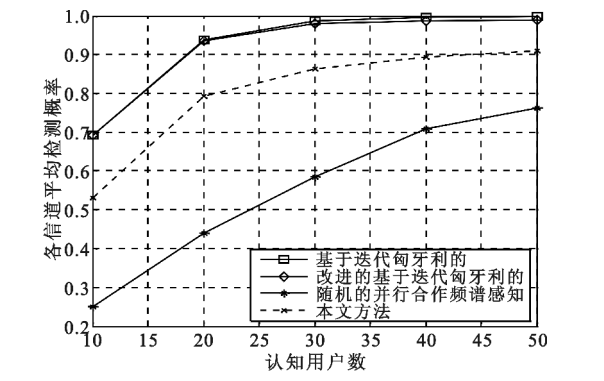
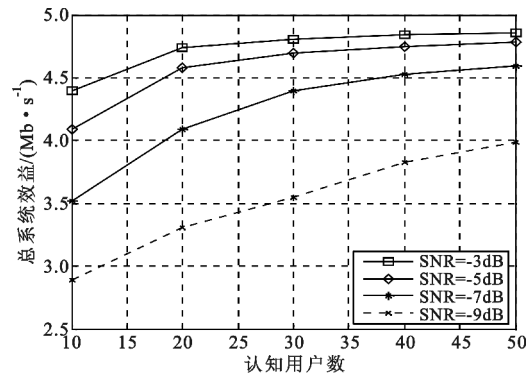


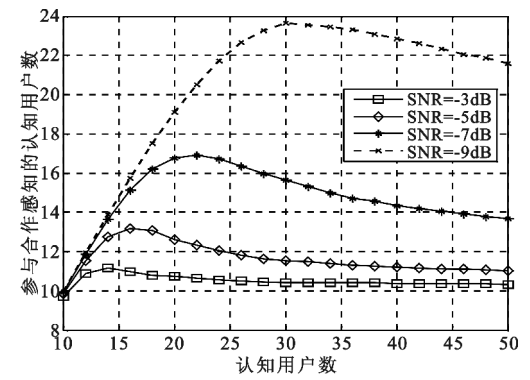
图 4 4 种方法在不同认知用户数时的各信道平均检测概率
Fig. 4 The average detection probabilities of the four methods over different numbers of secondary users

图 5 为本文方法在不同平均信噪比时总系统效益和参加合作感知的认知用户数。由图 5 可见,信噪比越低,所能获得的系统总效益就越低,所需要的参与合作感知的认知用户数就越多。这是由于信噪比越低,各认知用户对各信道的检测概率就越低,传输收益也就越低。此外,为了达到检测概率的要求,需要更多的认知用户进行合作感知,从而使感知开销增加,导致总系统效益降低。由图 5(b)还可以看出,信噪比越低,参与合作感知的认知用户数由上升到下降

的转折点出现得越晚。这是由于随着信噪比的降低,达到系统检测概率要求所需的参与合作感知的认知用户数就越多,因此,转折点出现得就越晚。



(a) 总系统效益



(b) 参与合作感知的认知用户数

图 5 本文方法在不同信噪比时所能获得的总系统效益和参加合作感知的认知用户数
Fig. 5 Total system profits and numbers of secondary users participating in cooperative sensing of the method proposed in this paper over different SNR values

6 结束语

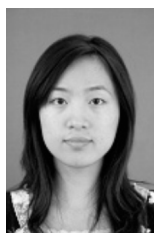
本文针对异构多信道频谱感知中存在的一些问题,如只考虑检测准确性而忽略感知开销和系统效益,忽略不同用户对不同异构信道感知性能的差异、参与合作感知的认知用户较多等问题,提出了一种贪婪的异构多信道并行合作频谱感知方法。该方法充分考虑了不同用户对不同异构信道感知性能的差异,根据对感知开销和系统效益的定义及其数学模型,通过贪婪算法在多个认知用户和异构信道间合理分配感知任务,使总系统效益最大化。仿真结果表明,利用贪婪算法可以较好地解决系统模型所描述的感知任务分配问题,本文方法相比基于迭代匈牙利的并行合作频谱感知方法、改进的基于迭代匈牙利算法并行合作频谱感知方法和随机的合作频谱感知方法,能够在异构多信道并行合作频谱感知中

获得更高的总系统效益,以及需要更少的参加合作感知的认知用户数,这对提高系统效率、降低节点能耗和提高频谱利用率都具有重要意义。此外,本文对感知开销和系统效益的定义及其数学模型,也对同类研究有一定借鉴价值。本文提出的贪婪的异构多信道并行合作频谱感知方法,因其能够对多个异构信道进行感知,因此,不仅适用于同构的认知无线网络,如使用传统 TV 频段的认知无线网络,也适用于多个异构网融合的认知无线网络,如使用更广泛的 ISM 频段及其他频段的认知无线网络。最后,在此研究中尚未发现例外和难以解决的问题,后续研究可进一步改进贪婪策略或采用其他优化方法,逐渐向最优解靠近。

参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] 富爽,李一兵,叶方,等. 利用频域 Sevcik 分形维数进行快速盲频谱感知[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(3): 854-860.
FU Shuang, LI Yibin, YE Fang, et al. Fast blind spectrum sensing using Sevcik fractal dimension in frequency[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2014, 44(3): 854-860. (in Chinese)
- [3] 邱恭安,封森. 基于最小生成树的分簇协作频谱感知改进算法[J]. 电讯技术, 2014, 54(5): 564-568.
QIU Gong'an, FENG Sen. An improved clustering cooperative spectrum sensing algorithm based on minimum spanning tree[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(5): 564-568. (in Chinese)
- [4] 邝祝芳,罗孟宇,陈志刚. 认知无线网络中基于遗传算法的异构信道频谱感知策略[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(11): 102-104, 135.
KUANG Zhufang, LUO Mengyu, CHEN Zhigang. A heterogeneous channel spectrum sensing strategy base on genetic algorithm in cognitive radio network[J]. Computer Application and Software, 2011, 28(11): 102-104, 135. (in Chinese)
- [5] ZHAO Y, PAN B, HU H. Multi-channel coordinated spectrum sensing in cognitive radio[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. Paris, France: Atlantis Press, 2013: 500-504.
- [6] GAO R, LI Z, QI P, et al. A robust cooperative spectrum sensing method in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(11): 1987-1990.
- [7] PAUL R, PAK W, CHOI Y J. Selectively triggered cooperative sensing in cognitive radio networks[J]. IET Communications, 2014, 8(15): 2720-2728.
- [8] XIE S, LIU Y, ZHANG Y, et al. A parallel cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(8): 4079-4092.
- [9] SHAHRASBI B, RAHNAVAR N. Cooperative parallel spectrum sensing in cognitive radio networks using bipartite matching[C]//Proceedings of 2011 IEEE Military Communications Conference. Baltimore, MD: IEEE, 2011: 19-24.
- [10] WANG Z, FENG Z, ZHANG P. An iterative Hungarian algorithm based coordinated spectrum sensing strategy[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(1): 49-51.
- [11] WANG Z, FENG Z, ZHANG D, et al. Optimized strategies for coordinated spectrum sensing in Cognitive Radio Networks[C]//Proceedings of 2011 Sixth International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. Osaka: IEEE, 2011: 96-100.
- [12] LIANG Y C, ZENG Y H, PEH E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [13] KIM H, SHIN K G. Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5): 533-545.

作者简介:



富爽(1982—),女,黑龙江伊春人,2014年于哈尔滨工程大学获博士学位,现为讲师,主要研究方向为认知无线电频谱感知及分配、认知LTE;

FU Shuang was born in Yichun, Heilongjiang Province, in 1982. She received the Ph. D. degree form Harbin Engineering University in 2014. She is now a lecturer. Her research concerns spectrum sensing and allocation in cognitive radio and cognitive LTE.

Email: fushuang_dq@163.com

杜红(1982—),女,黑龙江大庆人,2012年于北京邮电大学获博士学位,现为讲师,主要研究方向为认知无线电频谱感知与分配;

DU Hong was born in Daqing, Heilongjiang Province, in 1982. She received the Ph. D. degree form Beijing University of Posts and Telecommunications in 2012. She is now a lecturer. Her research concerns spectrum sensing and allocation in cognitive radio.

许杰(1973—),男,黑龙江肇东人,2005年于哈尔滨工程大学获硕士学位,现为副教授,主要研究方向为信号处理。

XU Jie was born in Zhaodong, Heilongjiang Province, in 1973. He received the M. S. degree form Harbin Engineering University in 2005. He is now an associate professor. His research concerns signal processing.