

基于最优中继的自适应协作频谱感知算法

张学军^{1,2}, 鲁友¹, 田峰³, 严金童¹, 成谢锋^{1,2}

(1. 南京邮电大学电子科学与工程学院, 江苏南京 210003; 2. 江苏省射频集成与微组装工程实验室, 江苏南京 210003;

3. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏南京 210003)

摘要: 针对认知系统中感知信道存在衰落和中继能耗较大问题, 提出一种兼顾感知性能和感知能耗的中继协作频谱感知算法. 该算法通过机会中继协作、基于效益函数的最优中继协作和系统参数自适应调整机制, 能够获得性能与能耗的优化折中. 文章对所提算法进行了详细的理论推导和性能分析, 并对非中继协作感知算法和最优中继固定的协作感知算法以及本算法在不同系统参数下的感知性能进行了仿真比较. 结果表明本算法具有一定的优越性.

关键词: 认知无线电; 频谱感知; 机会中继; 最优中继; 参数调整

中图分类号: TN915.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)06-1429-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.06.025

An Algorithm of Adaptive Cooperative Spectrum Sensing Based on Optimal Relay

ZHANG Xue-jun^{1,2}, LU You¹, TIAN Feng³, YAN Jin-tong¹, CHENG Xie-feng^{1,2}

(1. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

2. Jiangsu Province Engineering Lab of RF Integration & Micropackage, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

3. School of Telecommunication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: An algorithm of adaptively cooperative spectrum sensing based on optimal relay was proposed, which can overcome the problems about fading of sensing channel and huge consumption of relaying. This algorithm was based on the consideration of sensing performance and energy consumption and obtained optimal tradeoff between performance and consumption by opportunistic relaying, benefit function based selection of optimal relay and mechanism of system parameters adjustment. Meanwhile, detailed theoretical formulas and performance analysis of the algorithm were given. And the comparative simulation of sensing performance of non-relay cooperative sensing algorithm, optimal relay fixed cooperative sensing algorithm and this algorithm under different system parameters were done as well. The results show that the proposed algorithm has certain advantages.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; opportunistic relaying; optimal relay; parameters adjustment

1 引言

认知无线电技术通过利用已分配频谱的频谱空洞可以有效提高频谱资源利用率^[1,2]. 频谱感知可以感知空闲频谱的存在与否. 其感知分为单节点本地检测和多节点协作检测^[3-5]. 由于实际无线环境的复杂性, 多径衰落和阴影效应等因素往往导致单节点检测效果不佳. 而传统协作检测主要有本地检测、数据传输和数据融合等算法, 其本质仅是针对已得本地结果的融合, 当

感知信道较差时往往难以保证本地结果的准确性和真实性.

考虑到本地检测过程中的进一步协作可以提高认知系统的检测性能, 基于中继协作的频谱感知技术得到了广泛关注^[6-9]. 文献[10, 11]研究了基于信道状态的最佳中继协作感知算法, 但算法仅考虑到主用户到中继节点的信道条件. 而且所选中继一般需服务于系统中所有中继申请者, 因此当中继出现状况时会严重影响系统性能. 文献[12~14]研究了基于中继到源节

点和目的节点信道状况的最佳中继选择算法. 但其系统结构是基于认知节点间传输业务数据时的中继选择, 而非感知阶段的中继选择算法. 文献[15,16]研究了机会中继协作算法, 在保证检测可靠性的条件下有效减少了中继协作的次数从而降低能耗. 但是文献[15]研究的是传输信道的机会协作, 且其中继门限的求解过程比较复杂. 而文献[16]以信道容量大小判定是否需要中继, 中继为传输中继而非感知中继. 文献[17,18]研究了基于能效的中继协作频谱感知算法, 但文献[17]中的中继本质上就是认知节点, 其中中继能耗与中继性能的关系实质上就是认知节点数目、采样数目与系统整体检测性能的关系. 而文献[18]中的中继节点不能由认知节点充当, 其本身只转发信号而不进行本地检测. 文献[19,20]研究了传统非认知网络中的中继性能.

本文根据实际认知无线电系统在频谱感知阶段的结构特点, 提出一种基于最优中继的自适应协作频谱感知算法 (Adaptively Optimal Relay-based Cooperative Spectrum Sensing, AORCSS). 该算法具有下述特点: (1) 基于给定的检测性能指标, 理论上推导了认知节点机会中继的判决门限, 从而为多节点中继感知系统的自适应中继机制提供理论基础. (2) 定义效益函数作为选取最优中继的标准. 该函数同时考虑到中继协作的检测性能和中继协作的能耗. (3) 反馈机制. 根据系统本轮整体感知性能反馈系统参数的调节信息, 使下一轮感知更加符合认知需求, 具有一定鲁棒性.

2 系统分析

2.1 系统模型

本文采用的系统模型如图1所示. 1个主用户 (Primary User, PU)、 N 个认知用户 (Secondary User, SU)、1个融合中心 (Fusion Center, FC) 和1个辅助控制器. 假设系统中任意两个节点之间的信道衰落都服从瑞利分布且相互之间统计独立. 所有接收端噪声都是统计独立的加性复高斯白噪声且具有相同的功率谱密度. 辅助控制器可以实时监控系统中感知信道和报告信道状态以及认知用户间链路状态^[10]. 认知用户 CU_i 在进行本地检测的同时若满足信道条件可以作为其他认知用

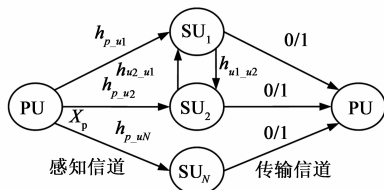


图1 认知无线系统模型

户的中继. 而且中继用户采用非功率限制的放大转发 (Amplify and Forward, AF) 方式转发接收信号.

2.2 基于协作感知的检测概率和虚警概率

在独立感知阶段, 认知节点 CU_i 接收到的信号表示为:

$$y_{u,ui}(k) = \sqrt{E_p} h_{p,ui}(k) x + n_{ui}(k), \quad i=1,2,\dots,N; k=1,2,\dots,M \quad (1)$$

其中, E_p 为主用户发射功率, $h_{p,ui}(k)$ 表示采样点 k 时主用户到认知点 CU_i 的信道衰落系数, 且方差为 $\sigma_{p,ui}^2$, $n_{ui}(k)$ 表示 CU_i 端采样点 k 时均值为 0, 方差为 N_0 的加性复高斯白噪声, 且相互之间统计独立, N 表示认知节点总数, M 表示采样点数. 当主用户存在时 $x = x_p$, 其中 x_p 表示主用户发送的单位功率信号, 即 $E[|x_p|^2] = 1$; 当主用户不存在时 $x = 0$.

则 CU_i 的能量检测器在假设条件 H_0 和 H_1 下的检测统计量为:

$$T_{u,ui}(H_0) = \sum_{k=1}^M |n_{ui}(k)|^2 \quad (2)$$

$$T_{u,ui}(H_1) = \sum_{k=1}^M |h_{p,ui}(k)|^2 E_p + \sum_{k=1}^M |n_{ui}(k)|^2 \quad (3)$$

当 M 较大时, 根据中心极限定理, $\sum_{k=1}^M |n_{ui}(k)|^2$ 和 $\sum_{k=1}^M |h_{p,ui}(k)|^2$ 近似服从高斯分布. 因此, 非中继协作下的 CU_i 的检测概率和虚警概率分别为:

$$\begin{aligned} P_{du,ui} &= \Pr\left\{\sum_{k=1}^M |h_{p,ui}(k)|^2 E_p + \sum_{k=1}^M |n_{ui}(k)|^2 > \lambda\right\} \\ &\approx \Pr\left\{\sum_{k=1}^M |h_{p,ui}(k)|^2 > \frac{\lambda - MN_0}{E_p}\right\} \\ &\approx Q\left(\frac{\lambda - MN_0 - M\sigma_{p,ui}^2 E_p}{\sqrt{2MN_0} E_p}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_{fu,ui} &= \Pr\left\{\sum_{k=1}^M |n_{ui}(k)|^2 > \lambda\right\} \\ &\approx Q\left(\frac{\lambda - MN_0}{\sqrt{2MN_0}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

在中继协作阶段, 假设 CU_i 选择 CU_j 作为中继, 则 CU_j 需将感知阶段接收的信号按 AF 方式转发给 CU_i . 此时 CU_i 接收转发信号并与独立感知阶段接收的信号合并.

$$y_{c,ui}(k) = \sqrt{E_p} h_{p,ui}(k) x + G_{ui,uj} h_{ui,uj}(k) y_{u,uj}(k) + n_{ui}(k) \quad (6)$$

其中, $h_{ui,uj}(k)$ 表示采样点 k 时 CU_i 与 CU_j 之间的信道衰落系数, 且方差为 $\sigma_{ui,uj}^2$, $G_{ui,uj}(k)$ 表示采样点 k 时 CU_j 转发信号至 CU_i 的中继增益, 且令 $G_{ui,uj}(k) = 1/h_{ui,uj}(k)$ ^[10].

CU_i 的能量检测器在假设条件 H_0 和 H_1 下的检测统计量为:

$$T_{c,ui}(H_0) = \sum_{k=1}^M \{ |n_{ui}(k)|^2 + |n_{uj}(k)|^2 \} \quad (7)$$

$$T_{c,ui}(H_1) = \sum_{k=1}^M \{ |h_{p,ui}|^2 + |h_{p,uj}|^2 \} E_p + \sum_{k=1}^M \{ |n_{ui}(k)|^2 + |n_{uj}(k)|^2 \} \quad (8)$$

同理,中继协作下的 CU_i 的检测概率和虚警概率分别为:

$$P_{dc,ui} = \Pr \left\{ \sum_{k=1}^M \{ |h_{p,ui}(k)|^2 + |h_{p,uj}(k)|^2 \} E_p + \sum_{k=1}^M \{ |n_{ui}(k)|^2 + |n_{uj}(k)|^2 \} > \lambda \right\} \\ \approx \Pr \left\{ \sum_{k=1}^M \{ |h_{p,ui}(k)|^2 + |h_{p,uj}(k)|^2 \} > \frac{\lambda - 2MN_0}{E_p} \right\} \\ \approx Q \left(\frac{\lambda - 2MN_0 - M(\sigma_{p,ui}^2 + \sigma_{p,uj}^2)E_p}{\sqrt{2M(\sigma_{p,ui}^4 + \sigma_{p,uj}^4)E_p}} \right) \quad (9)$$

$$P_{fc,ui} = \Pr \left\{ \sum_{k=1}^M \{ |n_{ui}(k)|^2 + |n_{uj}(k)|^2 \} > \lambda \right\} \\ \approx Q \left(\frac{\lambda - 2MN_0}{2\sqrt{MN_0}} \right) \quad (10)$$

3 基于最优中继的自适应协作频谱感知算法

3.1 问题分析

基于中继协作的频谱感知虽然可以提高检测性能,但由于需要中继节点转发信号,会产生额外的能耗.因此,存在感知性能和感知能耗的折中优化问题.以往许多算法针对非认知网络中的中继与能耗进行研究,而多节点认知网络下的此类问题研究较少.本节先对中继协作认知系统中的几个问题进行分析.

(1) 自适应中继. 认知节点根据感知信道条件自适应决定是否需中继协助. 若 CU_i 信道条件好,无中继也可得到精确的本地检测结果. 若 CU_i 信道条件差,会导致本地检测结果不精确,此时需要申请中继. 最终,系统中必然有部分认知节点充当中继,部分认知节点为中继申请者.

本文根据认知节点独立检测时的性能表达式,按照检测性能是否达到指定要求,推导了衡量信道条件好坏的判断标准. 在给定期望虚警概率 P_{fobj} 时,由式(5)可得相应判决门限.

$$\lambda = [Q^{-1}(P_{fobj}) \sqrt{2M} + M]N_0 \quad (11)$$

将式(11)代入式(4)可得非中继下认知节点检测概率.

$$P_{du,ui} \approx Q \left(\frac{Q^{-1}(P_{fobj}) \sqrt{2MN_0} - M\sigma_{p,ui}^2 E_p}{\sqrt{2M\sigma_{p,ui}^2 E_p}} \right) \quad (12)$$

在给定期望虚警概率 P_{dobj} ,为了保证认知节点检测性能需满足:

$$P_{du,ui} \geq P_{dobj} \quad (13)$$

由式(12)和(13)可得出期望信道衰落因子满足:

$$\sigma_{p,ui}^2 \geq \frac{Q^{-1}(P_{fobj}) \sqrt{2MN_0}}{(Q^{-1}(P_{dobj}) \sqrt{2M} + M)E_p} \quad (14)$$

由此可见, CU_i 独立检测时若要达到检测性能要求,必须满足式(14),即上式是可以作为判断 CU_i 是否需要中继协助的标准.

(2) 最优中继. 最优中继选择算法是基于中继性能和能耗而提出的一种中继选择算法. 本文假设中继节点采用功率非受限方式,且转发增益刚好弥补认知节点间的信道衰落,故检测性能最佳的中继为 $(h_{p,uj})_{\max}$ 对应的认知节点. 但是就能耗而言,与中继申请者之间的信道衰落为 $(h_{ui,uj})_{\max}$ 对应的认知节点为最佳中继,因为其所需转发功率最小.

综合考虑,定义 CU_i 的效益函数为:

$$H_{add,ui} = P_{dc,ui} - kE_{loss,ui} \quad (15)$$

其中, $P_{dc,ui}$ 表示 CU_i 在中继协作方式下检测概率大小,即式(9), k 为效益因子,可根据系统整体感知性能自适应调整, $E_{loss,ui}$ 表示 CU_i 在中继协作方式下消耗的能量,其主要取决于转发功率,即:

$$E_{loss,ui} = |G_{ui,uj} y_{u,uj}|^2 = |G_{ui,uj}|^2 (E_p + N_0) \quad (16)$$

所以, CU_i 的最优中继为 $(H_{add,ui})_{\max}$ 对应的中继节点. 同时由于认知系统是以准确性为根本,在寻找关于 CU_i 的最大效益函数时,必须保证检测准确性. 由以上分析,可将 CU_i 中继选择算法转化为下述约束优化问题:

$$\max : H_{add,ui} \quad (17)$$

$$\text{subject to: } \begin{cases} P_{dc,ui} \geq P_{dobj} \\ P_{fc,ui} \leq P_{fobj} \end{cases} \quad (18)$$

(3) 反馈机制. 以上针对单个认知节点的分析可以得到本身中继性能与能耗的优化均衡. 然而针对本文的多节点中继协作认知系统而言,其全局优化研究较为复杂. 因为除了需考虑单节点的优化之外还需研究中继数量的多少对系统整体性能的影响. 本文通过引入反馈机制研究系统在多轮感知过程的全局优化问题.

已知系统参数有期望检测性能 P_{dobj} 、 P_{fobj} 和效益因子 k . 在一定范围内,当系统给定的期望检测性能要求较高时,中继申请者的数目增加,因而系统进行中继协作的次数增多的可能性很大,系统整体检测性能提高,但是能耗相应也会增加;相反,如果系统对能耗要求严格,此时可以降低期望检测性能要求,使中继申请者数

目减少. 综上, 系统可以根据本轮的感知情况反馈调节 P_{dobj} 、 P_{fobj} 的指令, 使下一轮感知更符合系统要求. 效益因子 k 反映了效益函数中性能和能耗的权重. 如果 k 较大, 则认知用户选取的中继能耗较小, 系统整体能耗较小的可能性很大. 相反, 所选中继节点的检测性能突出, 系统整体检测性能更好. 因此, 系统同样可以根据其本轮感知情况反馈参数 k 的调整信息.

综上所述, P_{dobj} 、 P_{fobj} 侧重于控制参与中继的认知节点数, k 侧重于在中继数目一定的条件下控制所选中继的性质. 针对系统的全局优化问题可描述如下:

$$\min: E_{\text{loss}} \quad (19)$$

$$\text{subject to: } \begin{cases} Q_d \geq Q_{dobj} \\ Q_f \leq Q_{fobj} \end{cases} \quad (20)$$

其中, E_{loss} 表示系统整体中继能耗, Q_d 和 Q_f 分别表示系统整体检测概率和虚警概率. Q_{dobj} 和 Q_{fobj} 分别表示系统整体期望检测概率和虚警概率. 本文采用的分步式反馈算法步骤如算法 1.

算法 1 分步式反馈算法

- 步骤 1** 根据当前 P_{dobj} 、 P_{fobj} 和 k 进行中继协作感知, 若最终结果满足式(20)且 $k \leq k_{\max} - \Delta k$, 则 $k = k + \Delta k$, 等待下一轮感知; 否则跳至步骤 2.
- 步骤 2** 若最终结果满足式(20), 同时 P_{dobj} 、 P_{fobj} 未达到阈值下限, 则 $P_{dobj} = P_{dobj} - \Delta P_{dobj}$, $P_{fobj} = P_{fobj} + \Delta P_{fobj}$, $k = k_{\text{init}}$, 等待下一轮感知; 若最终结果满足条件(20), 同时 P_{dobj} 、 P_{fobj} 达到阈值下限, 则 P_{dobj} 、 P_{fobj} 和 k 保持不变, 等待下一轮感知. 否则跳至步骤 3.
- 步骤 3** 若最终结果不满足式(20)且 $k \geq k_{\min} + \Delta k$, 则 $k = k - \Delta k$, 等待下一轮感知; 否则跳至步骤 4.
- 步骤 4** 若最终结果不满足式(20), 同时 P_{dobj} 、 P_{fobj} 未达到阈值上限, 则 $P_{dobj} = P_{dobj} + \Delta P_{dobj}$, $P_{fobj} = P_{fobj} - \Delta P_{fobj}$, $k = k_{\text{init}}$, 等待下一轮感知. 若最终结果不满足条件(20), 同时 P_{dobj} 、 P_{fobj} 达到阈值上限, 则 P_{dobj} 、 P_{fobj} 和 k 保持不变, 等待下一轮感知.

本文所提算法是基于公式(4)和(5)的, 所以适用于能量检测过程中采样数目比较大的场合.

3.2 算法描述

根据以上问题分析, 自适应的最优中继协作频谱感知方案需要先后处理好以下问题: 是否需要中继协助、选择什么样的中继、本轮感知结束后应反馈怎样的参数调整信息. AORCSS 算法步骤见算法 2.

算法 2 AORCSS 算法

- 步骤 1** 初始化系统参数. $P_{dobj} = P_{dobj, \text{init}}$, $P_{fobj} = P_{fobj, \text{init}}$, $k = k_{\text{init}}$.
- 步骤 2** 独立感知阶段. 每个认知节点独立接收信号, 根据辅助控制器中信道状态和式(14)将认知节点分为中继候选集 R 和中继申请集 C .

步骤 3 中继选择阶段. 中继申请集 C 中各认知节点 CU_i 根据式(18)从中继候选集 R 中筛选各自自有中继候选集 R_i , 并在 R_i 中根据式(15)选出 $(H_{\text{add_ui}})_{\max}$ 对应的认知节点 CU_j 作为其最优中继. 统计未成功申请到最佳中继的认知节点数目 N_{nr} . 若 $N_{nr} > N/2$, 终止本轮感知, 返回步骤 1.

步骤 4 传输及整合阶段. 若 CU_i 成功申请到最佳中继 CU_j , 则接收 CU_j 的转发信号, 并与独立感知阶段接收的信号合并, 然后本地判决, 最后将本地检测信息传至 FC. 若 CU_j 未成功申请到最佳中继, 则退出本轮感知. 若 CU_i 无需中继, 则直接本地判决并传输本地检测信息至 FC.

步骤 5 反馈阶段. 融合中心根据“大多数”准则判决最终感知结果, 并按照分步式反馈算法调整系统参数, 返回步骤 1.

AORCSS 算法流程如图 2 所示.

3.3 性能分析

由于 AORCSS 算法研究的是多节点认知系统下中继性能与中继能耗的关系问题, 本节将推导该算法的检测性能. 假设系统中传输信道为无差错信道, 传统协作感知算法的检测概率 Q_{cd} , 虚警概率 Q_{cf} 和漏检概率 Q_{cm} 分别为:

$$Q_{cd} = \sum_{l=N/2+1}^N \binom{l}{N} \prod_{i=1}^l P_{du, ui} \prod_{i=l+1}^N (1 - P_{du, ui}) \quad (21)$$

$$Q_{cf} = \sum_{l=N/2+1}^N \binom{l}{N} \prod_{i=1}^l P_{fu, ui} \prod_{i=l+1}^N (1 - P_{fu, ui}) \quad (22)$$

$$Q_{cm} = 1 - Q_{cd} \quad (23)$$

其中 l 表示非中继协作条件下判断主用户存在的认知节点数目, N 表示认知节点总数. 而系统每一轮感知的能耗为

$$E_{\text{class}} = N(E_s + E_t) \quad (24)$$

其中 E_s 和 E_t 分别表示 CU_i 独立感知阶段能耗和传输本地检测信息的能耗. 相应地, AORCSS 算法的检测概率 Q_{pd} 为

$$Q_{pd} = \Pr(m > N/2 | H_1) \sum_{a=1}^m \binom{a}{m} \times \left\{ \sum_{k_1=1}^a \binom{k_1}{a} \prod_{i=1}^{k_1} P_{du, ui} \prod_{i=k_1+1}^a (1 - P_{du, ui}) \times \sum_{k_2=\max(m/2+1-k_1, 0)}^{m-a} \binom{k_2}{m-a} \prod_{i=1}^{k_2} P_{dc, ui} \prod_{i=k_2+1}^{m-a} (1 - P_{dc, ui}) \right\} \quad (25)$$

其中, m 表示实际参与协作的认知用户数目, a 表示中继用户数目, k_1 表示 a 中判定主用户存在的节点数目, 则 $(m-a)$ 表示中继申请成功的认知节点数目, k_2 表示 $(m-a)$ 中判定主用户存在的节点数目, 并且

$$\Pr(m > N/2 | H_1) = \sum_{m=N/2+1}^N \binom{m}{N} \left\{ \prod_{i=1}^m \left[1 - \Pr(P_{du, ui} < P_{dobj}) \Pr(P_{dc, ui} < P_{dobj}) \right] \times \prod_{i=m+1}^N \left[\Pr(P_{du, ui} < P_{dobj}) \Pr(P_{dc, ui} < P_{dobj}) \right] \right\} \quad (26)$$

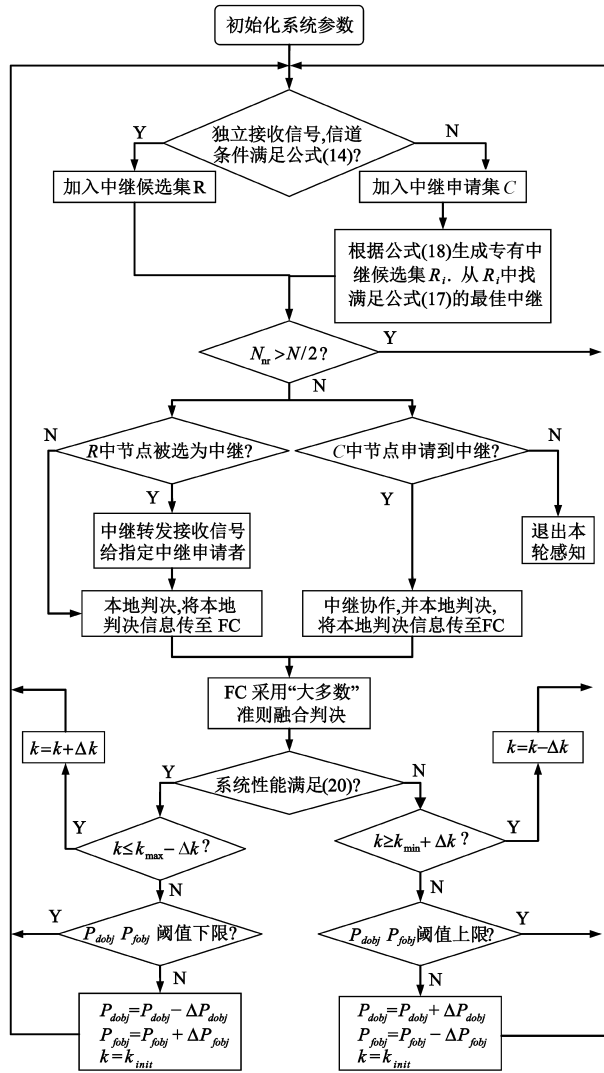


图2 AORCSS算法流程图

同理,虚警概率 Q_{pf} 为

$$Q_{pf} = \Pr(m > N/2 | H_0) \sum_{a=1}^m \binom{a}{m} \times \left\{ \sum_{k_1=1}^a \binom{k_1}{a} \prod_{i=1}^{k_1} P_{fu,ui} \prod_{i=k_1+1}^a (1 - P_{fu,ui}) \times \sum_{k_2=\max(m/2+1-k_1, 0)}^{m-a} \binom{k_2}{m-a} \prod_{i=1}^{k_2} P_{fc,ui} \prod_{i=k_2+1}^{m-a} (1 - P_{fc,ui}) \right\} \quad (27)$$

其中,

$$\Pr(m > N/2 | H_0) = \sum_{m=N/2+1}^N \binom{m}{N} \times \left\{ \prod_{i=1}^m [1 - \Pr(P_{fu,ui} \geq P_{fobj}) \Pr(P_{fc,ui} \geq P_{fobj})] \right\} \times \prod_{i=m+1}^N [1 - \Pr(P_{fu,ui} \geq P_{fobj}) \Pr(P_{fc,ui} \geq P_{fobj})] \quad (28)$$

由定义可得漏检概率 Q_{pm} 为

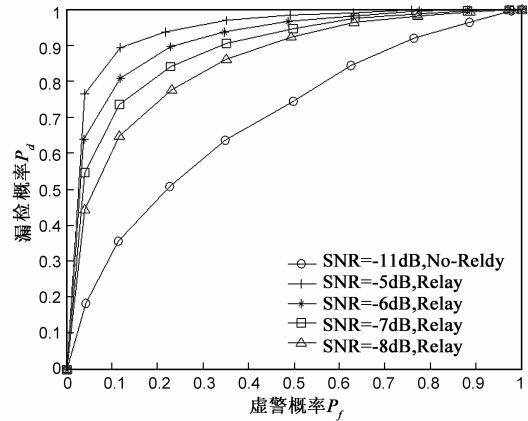
$$Q_{pm} = 1 - Q_{pd} \quad (29)$$

根据算法描述 AORCSS 算法的能耗可表示为

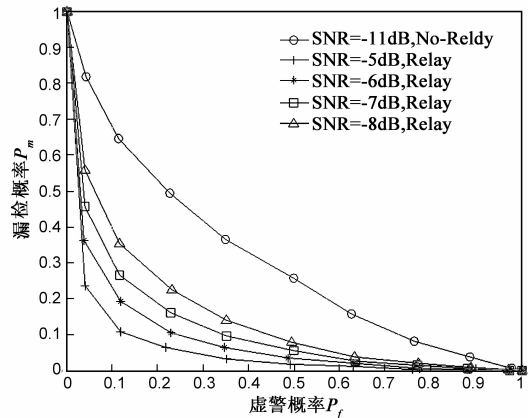
$$E_{loss} = (N - m)E_s + m(E_s + E_t) + \sum_{i=1}^{(m-a)} E_{loss,ui} \quad (30)$$

4 仿真分析

本节在上述理论分析的基础上针对 Rayleigh 信道下的 AORCSS 算法进行 matlab 仿真验证. 图 3 比较了单个认知节点在无中继协助和具有不同中继性能的中继协助下的检测性能. 假设中继申请者接收信号的瞬时信噪比 $SNR = -11\text{dB}$, 各中继的接收信号瞬时信噪比 SNR_i 分别为 -5dB 、 -6dB 、 -7dB 、 -8dB , 采样点数 $M = 100$, 噪声方差 $N_0 = 1\text{W}$, 主用户发射功率 $E_p = 1\text{W}$. 由图 3(a) 可以看出, 当中继节点的信道条件较好时, 中继协助可以明显提高认知节点的检测概率, 而且所选中继的瞬时接收信噪比越高, 其检测概率提升越明显. 图 3(b) 反映出, 当中继节点的信道条件较好时, 中继协助可以明显降低认知节点的漏检概率, 而且所选中继的瞬时接收信噪比越高, 其漏检概率降低越明显. 这是因为认知节点瞬时接收信噪比越高, 其接收信号越能反映主用户的状态, 即其可靠性越高, 转发信号对可靠性低的认知节点的协助作用越大. 因此, 认知节点在选择



(a) 单节点中继与非中继检测概率比较



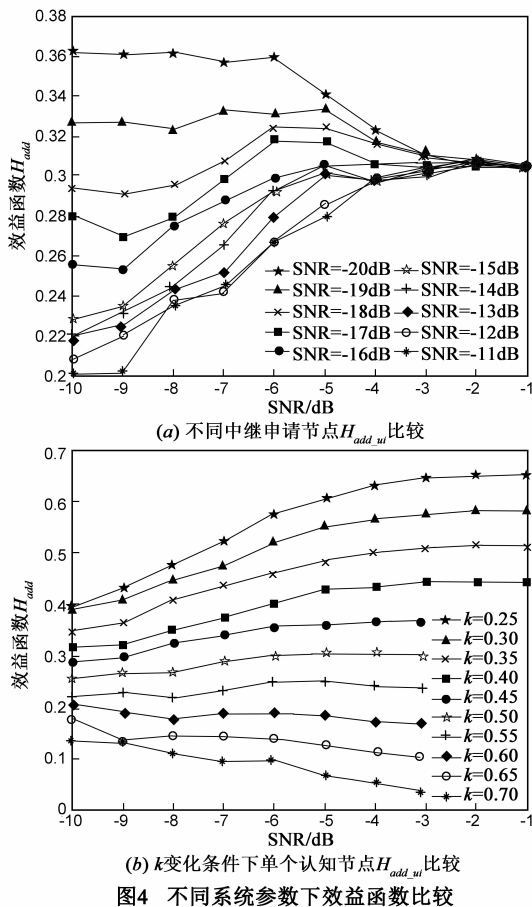
(b) 单节点中继与非中继漏检概率比较

图3 单节点中继与非中继检测概率和漏检概率比较

中继协助时必须考虑中继节点的信道条件.

图 4 仿真了不同信道条件的中继申请者基于原则 (17) 的最优中继选择过程. 假设认知系统中认知节点数目 $N = 20$, 各认知节点接收信噪比范围为 $[-1\text{dB}, -20\text{dB}]$, 取 $P_{dobj} = 0.7, P_{fobj} = 0.3$. 基于式 (14) 的中继门限以及采样点数目有限造成的误差, AORCSS 算法以瞬时接收信噪比 $\text{SNR} \geq -10\text{dB}$ 的认知节点组成中继候选集 R , $\text{SNR} < -10\text{dB}$ 的认知节点组成中继申请集 C . 并假设 $E_s = 0.5\text{mW}, E_r = 0.1\text{mW}$, SNR 为 $[-1\text{dB}, -10\text{dB}]$ 的中继节点转发功率范围为 $[0.6\text{mW}, 1.39\text{mW}]$, 且假设信噪比高的中继节点转发功率较大. 在图 4(a) 中 $k = 0.5$, 由图可以看出, SNR 较高的中继申请节点一般选择 SNR 较低的中继, 因为其信道条件本身较好, 选择信道条件稍好的中继即可达到较高的检测性能, 而且中继能耗的开销较小. 相反, SNR 较低的中继申请节点一般选择 SNR 较高的中继, 因为其信道条件本身较差, 选择信道条件很好的中继才能达到较高的检测性能, 然而其代价是中继能耗的开销增大.

图 4(b) 仿真了单个中继申请节点在效益因子 k 变化 ($0.25 \leq k \leq 0.70$) 的条件下效益函数 H_{add_ui} 的变化情况. 假设 $\text{SNR}_i = -15\text{dB}$, 系统其他参数同图 4(a). 由图可以看出, 当 k 较小时, 认知节点的 $(H_{add_ui})_{\max}$ 对应中继



节点的 SNR 较高; 当 k 较大时, 认知节点的 $(H_{add_ui})_{\max}$ 对应中继节点的 SNR 较低. 这是因为当 k 较小时, H_{add_ui} 中继能耗所占比重较小, 选择信道条件好但是中继转发功耗较大的中继节点的可能性增加; 相反, 当 k 较大时, H_{add_ui} 中继能耗所占比重较大, 选择信道条件相对较差但是中继转发功耗较小的中继节点的可能性很高. 所以, 系统通过适当调整参数 k 可以选择满足实际感知要求的最优中继节点.

图 5 仿真比较了基于最佳中继的协作频谱感知 (Optimal Relay-based Cooperative Spectrum Sensing, ORCSS) 算法、自适应的最优中继协作频谱感知 (AORCSS) 算法和传统非中继协作频谱感知 (Non-Relay-based Cooperative Spectrum Sensing, NRCSS) 算法的检测性能和感知能耗. 假设认知系统中认知节点数目 N 变化范围为 $2 \leq N \leq 20$, 系统其他参数设置与图 4 相同. 由图可以看出 ORCSS 算法的检测概率最好, AORCSS 算法次之, NRCSS 算法检测概率最差. 从能耗方面而言, ORCSS 算法能耗最大, 是因为其始终依靠信道条件最好但是中继转发功率较大的中继协助. 而 NRCSS 的能耗最小, 是因为其无需中继协助. AORCSS 算法检测概率接近 ORCSS 算法, 但是能耗大大降低. 可见, AORCSS 算法可以在较低的能耗下显著提高认知系统的检测性能.

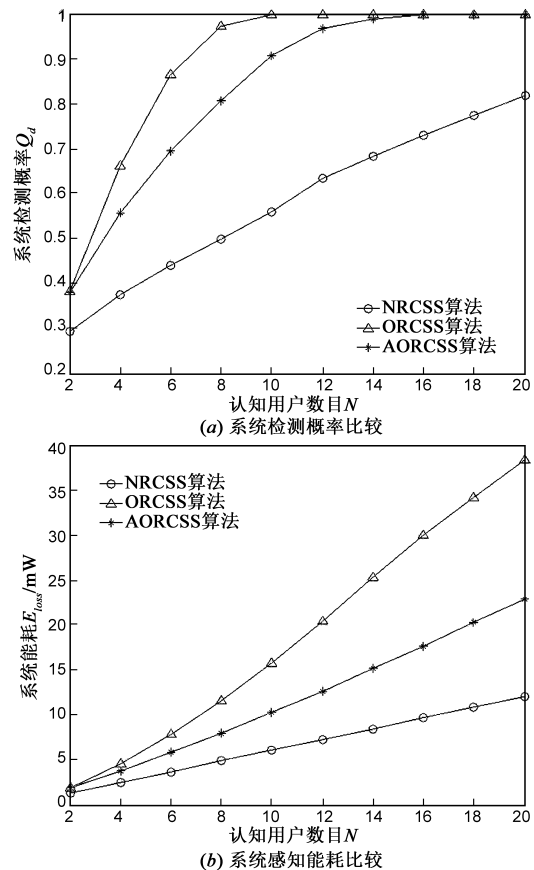


图 6 仿真了期望检测性能要求变化的条件下认知系统的检测性能和能耗变化情况. 假设认知系统中认知节点数目 N 变化范围为 $2 \leq N \leq 20$, 各认知节点接收信噪比范围为 $[-5.5 \text{ dB}, -15 \text{ dB}]$, 取 $0.30 \leq P_{fobj} \leq 0.34$, $0.5 \leq P_{dobj} \leq 0.9$, 系统其他参数设置与图 4 相同. 由图可以看出, 当期望检测性能要求严格时, 系统的整体检测性能提高, 但是系统所需功耗也同时增大; 相反, 当期望检测性能要求降低时, 系统的整体检测性能降低, 而且系统所需功耗降低. 这是因为, 当期望检测性能要求严格时, 需要中继协助的认知节点数目增加, 检测性能提高的认知节点数目增加, 因此导致系统整体性能提高. 同时由于所需中继的认知节点数目增多, 系统中继功耗必然增加, 反之则反. 而且随着认知节点数目的增加, 系统检测性能改变的幅度减小. 这是因为在本仿真中每次 P_{dobj} 和 P_{fobj} 变化引起的中继申请节点数目的变化较小, 当认知节点数目增加时, 这种变化在总的认知节点中所占比例减小, 从而导致系统整体检测性能趋向于稳定.

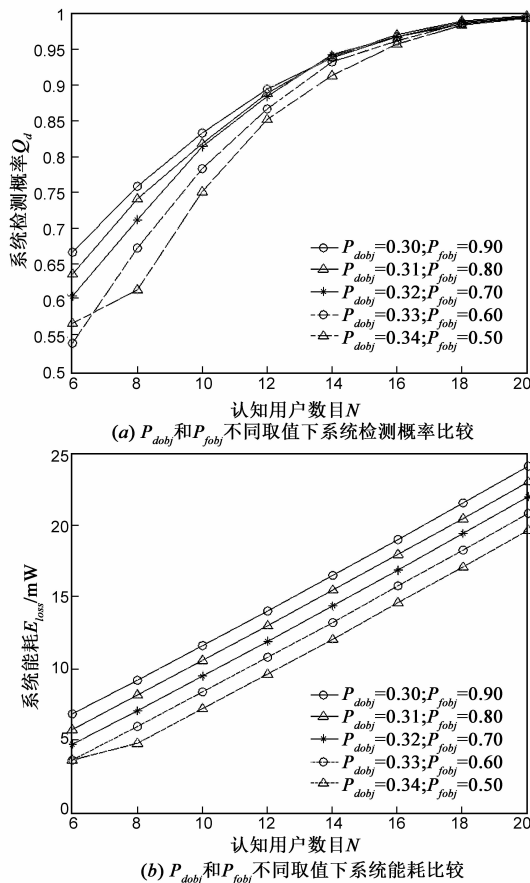


图 6 P_{dobj} 和 P_{fobj} 不同取值下系统检测概率和系统能耗比较

5 总结

本文针对认知无线电系统感知信道存在衰落和中

继协作带来的能耗问题, 提出了一种自适应的最优中继协作频谱感知算法. 该算法兼顾中继协作的检测性能和能耗. 认知节点根据信道条件决定是否申请中继, 而且中继选择原则基于中继节点本身感知性能和转发信号所需能耗. 此外, 在周期性感知过程中, 算法可以根据前一轮的感知情况反馈系统参数调整信息, 使本轮检测更加符合感知需求. 文章在对算法进行了详细的理论分析和性能推导的基础上, 针对 Rayleigh 信道下单节点中继与非中继、多节点中继与非中继以及中继在不同系统参数下的检测性能或能耗进行了仿真验证. 结果表明, 与非中继协作感知算法相比, 该算法可以在能耗较低条件下提高检测性能, 而且当认知用户数较大时, 检测性能接近最佳中继固定的协作感知算法. 同时系统参数调整使感知过程更加符合实际检测需求, 具有一定鲁棒性.

参考文献

- [1] Mitola J, Maguire G Q. Cognitive radios: making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communication, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Liang Y C, Zeng Y H, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326-1337.
- [3] Zhang W, Letaief K. Cooperative spectrum sensing with transmit and relay diversity in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 4761-4766.
- [4] 张学军, 严金童, 田峰, 等. 基于差分能量检测的双门限协作频谱感知算法 [J]. 仪器仪表学报. 2014, 35(6): 1325-1330.
- Zhang Xuejun, Yan Jintong, Tian Feng, et al. Dual-threshold cooperative spectrum sensing algorithm based on differential energy detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, (35)(6): 1325-1330. (in Chinese)
- [5] Cui T, Gao F F, Nallanathan A. Optimization of cooperative spectrum sensing in cognitive radio [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1578-1589.
- [6] Ganesan G, Li Y G. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, part I: two user networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2007, 6(6): 2204-2213.
- [7] Ganesan G, Li Y G. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, part II: multiuser networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2007, 6(6): 2214-2222.
- [8] 张学军, 鲁友, 田峰, 等. 基于信任度的双门限协作频谱感知算法 [J]. 物理学报. 2014, 63(7): 078401.
- Zhang X J, Lu Y, Tian F, et al. Double-threshold cooperative spectrum sensing for cognitive radio based on trust [J].

- Acta Phys Sin, 2014, 63(7):078401. (in Chinese)
- [9] Huang Y Z, Al-qahatani. Zhong C J, et al. Performance analysis of multiuser multiple antenna relaying networks with co-channel interference and feedback delay [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(1):59-73.
- [10] 朱佳, 郑宝玉, 邹玉龙. 基于最佳中继选择的协作频谱感知方案研究[J]. 电子学报, 2010, 38(1):92-98.
Zhu J, Zheng B Y, Zou Y L. Cooperative spectrum sensing in multiuser cognitive radio networks with best relay selection[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1):92-98. (in Chinese)
- [11] 包志华, 张士兵, 张晓格, 等. 最优认知用户配对与协作感知算法研究[J]. 通信学报, 2012, 33(1):128-135.
Bao Z H, Zhang S B, Zhang X G, et al. Research on cognitive user pairing and cooperative sensing[J]. Journal on Communication, 2012, 33(1):128-135. (in Chinese)
- [12] Yang Y, Ge J H, Gao Y. Power allocation for two-way opportunistic amplify-and-forward relaying over Nakagami-m channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2011, 10(7):2063-2067.
- [13] Kim J B, Lim J, CIOFFI J M. Capacity scaling law in opportunistic amplify-and-forward relaying with selective ID feedback[J]. IEEE Communication Letters, 2012, 16(5):589-591.
- [14] Li Q Z, Zhang Q, Feng R H, et al. Optimal relay selection and beamforming in MIMO cognitive multi-relay networks [J]. IEEE Communication Letters, 2013, 17(6):1188-1191.
- [15] Lee I H, Kim D. Outage performance of opportunistic cooperation in amplify-and-forward relaying systems with relay selection [J]. IEEE Communication Letters, 2012, 16(2):224-227.
- [16] 李美玲. 基于中继的协作频谱感知性能分析及优化 [J]. 通信学报, 2013, 34(9):33-40.
Li M L. Performance analysis and optimization of cooperative spectrum sensing with relay[J]. Journal on Communications, 2013, 34(9):33-40.
- [17] Huang S W, Chen H B, Zhang Y, et al. Energy-efficient cooperative spectrum sensing with amplify-and-forward relaying [J]. IEEE Communication Letters, 2012, 16(4):450-453.
- [18] Huang S W, Chen H B, Zhang Y, et al. Sensing-energy tradeoff in cognitive radio networks with relay [J]. IEEE Systems Journal, 2013, 7(1):68-76.
- [19] 李光平, 张广驰, 等. 基于中继放大转发的多天线基站下行传输性能分析 [J]. 电子学报, 2013, 41(7):1305-1312.
Li G P, Zhang G C, et al. Performance analysis of downlink systems with a multi-antenna base station based on amplify-and-forward relaying strategy [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(7):1305-1312. (in Chinese)
- [20] 程卫军. 两跳中继系统在混合 Gamma 衰落信道下的性能分析 [J]. 电子学报, 2014, 42(10):1944-1950.
Cheng W J. Performance analysis of dual-hop relaying system over mixture gamma fading channels [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(10):1944-1950. (in Chinese)

作者简介



张学军 男, 1969 年生于江苏南通. 南京邮电大学教授, 硕士生导师. 主要研究方向为认知网络频谱感知、无线射频识别技术、通信网络的性能分析、流量控制、QoS 理论与技术等.
E-mail: xjzhang@njupt.edu.cn



鲁友 男, 1990 年生于安徽六安. 硕士研究生, 研究方向为认知网络频谱感知、通信网络的性能分析.

田峰 男, 1979 年生于山东枣庄. 南京邮电大学副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为认知无线电与动态频谱资源管理、协作通信和干扰管理等.

严金童 女, 1989 年生于江苏盐城. 硕士研究生, 研究方向为认知网络频谱感知、通信网络的性能分析.

成谢锋 男, 1956 年生于四川资阳. 南京邮电大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为智能信息处理、智能仪器等.