

能量效率和碰撞概率联合优化的协作频谱感知算法

倪丹艳 包志华 张士兵

(南通大学电子信息学院, 南通, 226019)

摘要: 协作频谱感知能提高认知无线网络的感知性能。随着认知网络频谱感知性能的提高, 一方面感知网络将会消耗更多的能量; 另一方面次用户拥有更多的机会接入授权频谱, 次用户的吞吐量不断增加, 同时在通信过程中主用户与次用户发生碰撞的概率也不断增大。本文提出了一种联合优化能量效率和碰撞概率的协作频谱感知算法, 通过最优感知检测点判断节点所处信道状态, 融合中心舍弃信道状态不好的节点使其不参与数据融合, 既消除了信道状态不好的节点对全局判决的不良影响, 又提高了能量利用率。仿真结果表明, 该算法提高了网络的频谱检测性能, 并延长了感知网络的生命周期。

关键词: 认知无线电; 协作频谱感知; 能量有效性; 碰撞概率

中图分类号: TN911.23

文献标志码: A

Cooperative Spectrum Sensing Algorithm Based on Joint Optimization of Energy Efficiency and Collision Probability

Ni Danyan, Bao Zhihua, Zhang Shibing

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong, 226019, China)

Abstract: Cooperative spectrum sensing can improve the sensing performance of cognitive radio(CR) network. At the cost of improving the sensing performance, the cognitive network costs more energy. Meanwhile, the secondary users have more opportunities to access the spectrum hole. However, with the development of the cognitive network throughput, the data collision probability between the primary user and cognitive user increases continuously. This paper proposes a cooperative spectrum sensing algorithm based on the energy efficiency and data collision probability. In this algorithm, we choose the optimal sensing check point to judge the nodes' channel state. At the same time, bad channel state of node is discarded in fusion center. Therefore, not only the effect of bad channel state of node on global decision is eliminated, but also the energy efficiency is improved. The simulation results show that the proposed algorithm can improve the spectrum sensing performance of CR network effectively and prolong its lifecycle.

Key words: cognitive radio; cooperative spectrum sensing; energy efficiency; collision probability

引言

随着无线通信技术的飞速发展, 传统的静态频谱资源分配方式由于缺乏灵活性, 已经远远不能满足

日益紧张的无线接入需求^[1]。认知无线电(Cognitive radio, CR)作为未来无线通信新的里程碑,在不影响授权用户(Primary user, PU)通信的基础上,未授权用户(Secondary user, SU)可以按照某种方式动态接入已授权频段工作,提高授权频段的频谱利用率^[2]。

频谱感知是 CR 的重要技术之一。通过对认知网络周期性地感知,决定次用户是否可以利用频谱空穴传输信息。在实际的 CR 网络中,单点频谱感知容易受阴影效应和多径衰落等不确定因素的影响,存在一定的局限性^[3]。协作频谱感知有效克服了单点感知的缺点,提高了频谱感知性能,同时也增大了网络的吞吐量^[4,5]。随着协作节点数的增加及感知时间的延长,网络消耗的能量不断增加,与当今绿色通信的主题相悖。在保证网络感知性能的前提下如何使系统能量效率最优已经成为 CR 网络的一个研究重点^[6-8]。文献[9]研究了认知网络的能量有效性和传输方案的联合设计的算法,将能量有效性和感知性能描述为一个多约束优化问题,分析了混合频谱共享下的最优频谱感知时长选择方案和最优的功率分配方案。文献[10]在认知网络主用户中断概率的约束下,通过最优化次用户网络的功率分配使系统的能量效率最大化。文献[11]提出了衰落信道下 CR 网络的频谱感知和功率有效的最优算法,通过搜索最优的感知时间来最大化网络的检测概率和功率有效性。文献[12]提出了恶劣环境下通过多优化鉴别码的长度来优化感知网络的能量效率算法,延长网络生命周期的同时并有效抵抗了网络的频谱感知数据篡改的攻击。在机会式的频谱接入模型中,次用户通过判断当前主用户的信道状态决定是否接入授权频谱。随着协作网络感知性能的提高,次用户拥有更多的机会进入频谱,不可避免与主用户在通信过程中会发生碰撞^[13]。文献[14]分析了主用户不同状态下的认知无线网络的碰撞概率。文献[15]提出在保证网络检测概率的条件下最小化系统碰撞概率的数据通信方式。

为提升认知无线电感知网络的能量有效性,同时减少主次用户通信过程中发生的碰撞,本文提出了一种联合优化碰撞概率和能量有效性的协作频谱感知算法。通过选择最优的感知检测点,能提高认知网络的感知性能,并延长感知网络的生命周期。

1 系统模型

1.1 主用户信道状态模型

信道占用状态常用的模型包括离散模型^[16]和连续模型^[17]。假设主用户在相邻时隙间的状态转移服从 ON/OFF 的马尔科夫过程,如图 1 所示。根据授权频谱在时隙 t 是否被占用分为两种状态: H_1 (ON)和 H_0 (OFF)。 H_1 表示网络中检测到授权频谱忙碌,主用户占用该频段, H_0 表示频谱空闲,主用户不占用授权频段。

假设主用户在忙碌和空闲阶段持续的时间分布分别服从均值为 $1/\alpha$ 和 $1/\beta$ 的指数分布,则这两个阶段的概率密度函数分别为

$$f_{\text{ON}}(t) = \alpha e^{-\alpha t} \tag{1}$$

$$f_{\text{OFF}}(t) = \beta e^{-\beta t} \tag{2}$$

式中: t 为时间变量, α 和 β 分别表示由 ON 到 OFF 和由 OFF 到 ON 的状态转移速率。

所以 H_0 和 H_1 两种情况下的概率分别为

$$P(H_0) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \tag{3}$$

$$P(H_1) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \tag{4}$$

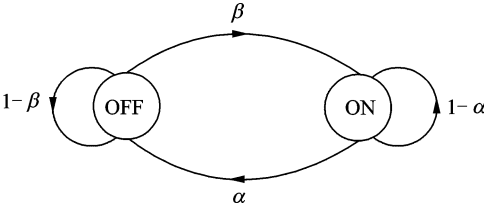


图 1 ON/OFF 随机马尔科夫过程
Fig. 1 ON/OFF Markov random process

1.2 认知用户网络模型

假设认知无线网络有一个主用户和 K 个感知节点，其模型如图 2 所示。假设各个信道之间相互独立，协作频谱感知主要分为两步：频谱检测和数据融合。在频谱检测阶段，各个次用户首先进行本地频谱感知，然后再将感知统计量发送到数据融合中心(Fusion center, FC)。

在数据融合阶段,FC 综合考虑各个认知节点的信息并作最后判决。第 $k(k=1, 2, \cdots, K)$ 个次用户的频谱检测可建模为一个二元建设检验问题,即

$$\begin{cases} H_0 : x_k(n) = \eta_k(n) & n=1,2,\cdots,N \\ H_1 : x_k(n) = h_k(n)s_k(n) + \eta_k(n) & n=1,2,\cdots,N \end{cases} \quad (5)$$

式中: $x_k(n)$ 为第 $k(k=1, 2, \cdots, K)$ 个感知节点接收信号, $s_k(n)$ 表示主用户发射信号, $\eta_k(n)$ 表示均值为 0, 方差 σ_r^2 的高斯白噪声, $h_k(n)$ 为第 $k(k=1, 2, \cdots, K)$ 个感知节点所在的信道增益, N 为信号的采样点数。

2 传统意义下的协作频谱感知

2.1 协作频谱感知性能与感知节点数的关系

协作频谱感知有效地解决了单点感知的检测不确定性和阴影效应等问题,提高了频谱感知性能。图 3 为在不同感知节点数条件下的频谱检测概率图。由图 3 可知,平均信噪比一定时,协作感知($K > 1$) 的性能优越于单点感知($K=1$) 的性能,且检测概率正比于协作感知节点数^[18];随着感知节点数的不断增加,当 $K=8$ 和 $K=10$ 时的检测概率几乎相同。随着感知节点数 K 的不断增加,协作频谱感知性能会渐渐趋于平缓,能量有效性降低,因此选择合适的节点数目参与频谱感知至关重要。

2.2 协作频谱感知性能与信任节点数的关系

图 4 为感知系统中节点总数 $K=4$ (均为信任节点,即 $T=4$) 和 $K=6$ (其中信任节点 $T=4$ 和不被信任节点 $M=2$) 下的频谱检测概率对比图^[19]。由图可知在低信噪比时,节点总数 $K=4$ 比 $K=6$ 下的感知性能好。所以在加权协作频谱感知过程中,感知性能的提高不完全依赖于参与协作节点数的增加,选择高信任度的节点参与感知不仅能保证感知性能同时也能提高能量效率。

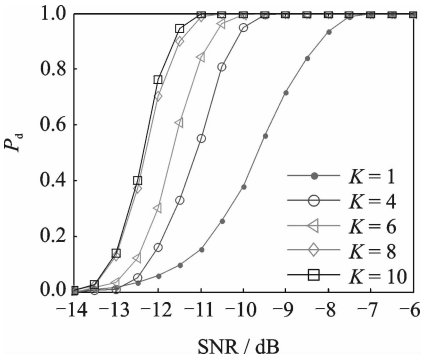


图 3 检测概率 P_d 与感知总节点数 K 的关系

Fig. 3 Relationship between detection probabilities P_d and total cognitive nodes K

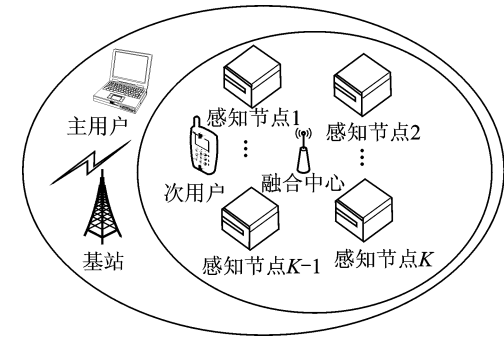


图 2 认知网络系统模型

Fig. 2 Cognitive network system model

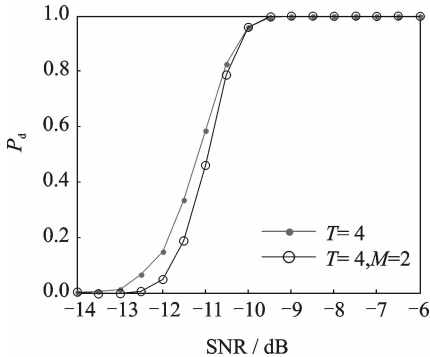


图 4 检测概率 P_d 与信任节点数 T 的关系

Fig. 4 Relationship between detection probabilities P_d and reliable nodes T

3 能量效率与碰撞概率联合的协作频谱感知算法

3.1 碰撞概率

在 CR 网络中,为了避免次用户对 PU 产生干扰,必须进行周期性的感知。图 5 给出了两种情况下的认知网络感知时隙图。如图 5(a)所示,在感知周期 T 不变时,传输时间 T_d 越长,在传输过程中主用户出现的频率越高,则传输过程中主用户和次用户发生碰撞的概率也越大^[15]。其中,图 5(a)和图 5(b)的高电平表示主用户存在,低电平表示主用户不存在。随着次用户接入授权频谱的时间点不同,主要有两种碰撞情况:

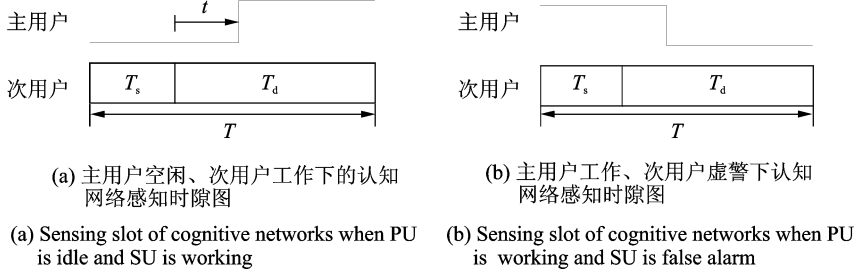


图 5 认知网络感知时隙图

Fig. 5 Sensing slot of cognitive networks

(1) 网络中主用户不存在,授权信道处于空闲状态,次用户检测后成功接入授权频段。在次用户接入频段后 t 时刻,主用户突然到来使用授权频段,如图 5(a)所示;

(2) 网络中主用户存在,授权信道被占用,次用户发生虚警未发现主用户存在而接入网络,从而发生碰撞,如图 5(b)所示。

综上,感知网络的碰撞概率为

$$P_c = \frac{P(H_1)(1 - P_d) + P(H_0)(1 - P_f)(1 - e^{-\beta})}{P(H_1)(1 - P_d) + P(H_0)(1 - P_f)} \quad (6)$$

式中: P_d 为感知网络的检测概率, P_f 为虚警概率。

3.2 协作频谱感知的检测概率和虚警概率

3.2.1 协作感知节点的选择及感知消耗能量效率

在感知时隙 T_s , 假设认知网络中的 K 个感知节点各完成采样 N 次, 则可形成一个 $K \times N$ 维的矩阵 \mathbf{D}

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(m) & \cdots & x_1(N) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(m) & \cdots & x_2(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_k(1) & x_k(2) & \cdots & x_k(m) & \cdots & x_k(N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_K(1) & x_K(2) & \cdots & x_K(m) & \cdots & x_K(N) \end{bmatrix} \quad (7)$$

频谱感知过程可分成两个步骤:

(1) 选择第 $m(1 \leq m \leq N)$ 次采样信号 $x_k(m)$ ($k=1, 2, \dots, K$) 用于检测当前信道状态, 其中 m 称为感知检测点。假设各个感知节点当前信噪比分别 $\text{SNR}_1(m), \text{SNR}_2(m), \dots, \text{SNR}_K(m)$, 则平均信噪比值为

$$\overline{\text{SNR}}(m) = \frac{\text{SNR}_1(m) + \text{SNR}_2(m) + \cdots + \text{SNR}_K(m)}{K} \quad (8)$$

(2) 如果 $\text{SNR}_k(m) \geq \overline{\text{SNR}}(m)$ ($k=1, 2, \dots, K$), 则意味着信道衰落小, 则次用户节点 k 参与网络的协作感知; 反之不再参与协作感知。

综上,原本的采样数据矩阵 \mathbf{D} 变为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} x_1(1) & \cdots & x_1(m) & x_1(m+1) & \cdots & x_1(N) \\ x_2(1) & \cdots & x_2(m) & x_2(m+1) & \cdots & x_2(N) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_k(1) & \cdots & x_k(m) & x_k(m+1) & \cdots & x_k(N) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_K(1) & \cdots & x_K(m) & x_K(m+1) & \cdots & x_K(N) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:虚线框表示当第 k 节点在感知检测点 m 时的信道状态较差时,则从第 $m+1$ 次的采样暂停且节点不参与 FC 最后的数据融合。

假设每个节点完成一次采样共消耗 $N \times E$ 能量,则 K 个节点总共消耗 $K \times N \times E$ 。从能量消耗的角度,删除一个感知节点可节省 $(N-m) \times E$ 的能量,删除 $p(1 \leq p < K)$ 个认知节点可节省 $p \times (N-m) \times E$ 能量,所以能量消耗的效率为

$$\Psi(p, m) = \frac{K \times N - p \times (N - m)}{K \times N} \quad (10)$$

式中: $1 < m \leq N, 1 \leq p < K$ 。

3.2.2 加权因子

传统的协作频谱感知克服了单点感知所存在的缺点,提高了感知性能,但同时也为一些恶意节点提供了可乘之机。在数据融合阶段,综合考虑各个认知节点的信任度能有效缓解恶意节点的攻击^[19]。

假设第 $i(1 \leq i \leq K)$ 个感知节点与第 $j(1 \leq j \leq K)$ 个感知节点内部之间的信任度为

$$r_{ij} = \begin{cases} e^{-| \text{SNR}_i - \text{SNR}_j |} & | \text{SNR}_i - \text{SNR}_j | \leq M\sigma_r \\ 0 & | \text{SNR}_i - \text{SNR}_j | > M\sigma_r \end{cases} \quad (11)$$

式中 σ_r 为所有参与协作感知节点信噪比的标准差, $M(0 \leq M \leq 1)$ 为调节因子。

假设最终共 $K_1(K_1 \leq K)$ 个感知节点参与协作, K_1 个感知节点之间的信任度矩阵为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1K_1} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2K_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \cdots & r_{kK_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{K_1 1} & r_{K_1 2} & \cdots & r_{K_1 K_1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:矩阵 \mathbf{B} 对角线上的元素值 $r_{ii}(i=1, 2, \cdots, K_1)$ 为自信信任度,取值均为 1。

K_1 个感知节点各自的信任度为

$$B_k = \sum_{j=1}^{K_1} r_{kj} \quad (13)$$

参与协作的 K_1 个认知节点加权因子为

$$\omega_k = \frac{B_k}{\sum_{k=1}^{K_1} B_k} \quad (14)$$

在融合中心,将参与最终协作频谱感知节点的本地检测量 T_k 进行加权,可得最终判决统计量为

$$\bar{T} = \sum_{k=1}^{K_1} \omega_k T_k \quad (15)$$

式中: T_k 为参与协作的认知节点的本地统计量。

所以整个网络的检测概率和虚警概率分别为

$$P_d = Pr[\bar{T} > \gamma | H_1] \quad (16)$$

$$P_f = Pr[\bar{T} > \gamma | H_0] \quad (17)$$

式中 γ 为判决门限^[21]。

3.3 最优感知检测点

从 CR 系统的角度而言,当感知时间 T_s 保持不变时,感知检测点 m 值的选择不同将直接影响参与感知的节点数及网络的感知性能,并间接影响了网络的能量有效性和碰撞概率。为了联合优化系统的碰撞概率和能量有效性,以减小网络的碰撞概率和能量消耗率,设定目标函数 $TF(m, p)$ 为

$$TF(m, p) = (1 - \theta \times P_c + \theta \times \Psi(m, p)) \quad 0 \leq \theta \leq 1 \quad (18)$$

式中: θ 为常数,当 $\theta \rightarrow 0$ 时,碰撞概率 P_c 为主要考虑因素;当 $\theta \rightarrow 0.5$ 时,能量效率和碰撞概率为同等代价考虑因素;当 $\theta \rightarrow 1$ 时,能量有效性为主要考虑因素。通过设定不同的 θ 值,找到不同侧重因素下的感知网络的最优感知检测点 m 。

3.4 算法实现及流程图

根据以上分析,本文所提的联合优化系统能量有效性和碰撞概率的协作频谱感知算法(Cooperative spectrum sensing algorithm based on energy efficiency and data collision, EDCSS)的主要步骤可归纳为:

(1) 选择参数 θ 值,找到最优感知检测点 m 的值。各个认知节点采用最大最小特征值法进行本地感知,在采样过程中,选择节点性能较优的感知节点参与协作,将获得本地检测信息发送至 FC。

(2) 根据式(13),计算各个节点的信任度 B_k 。

(3) 根据式(14,15),融合中心按照参与协作的各个感知节点的可信度因子 w_k 对其检测量进行加权,得到最终的判决统计量 \bar{T} 。

(4) 根据式(16,17),融合中心判决。将加权后的统计量 \bar{T} 与判决门限 γ 进行比较,如果 $\bar{T} \geq \gamma$,则 PU 信号存在,反之 PU 信号不存在。

算法流程图如图 6 所示。

4 仿真与分析

为了验证本文所提算法的性能,采用 BPSK 为主信号进行 10 000 次的 Matlab 仿真。在仿真中,假设网络的频谱检测虚警概率 P_f 为 0.1,采样频率为 10 MHz,网络中总共有 10 个 SU 且各个 SU 相互独立,噪声方差 σ_n^2 为 1。实验分别对本文所提的 EDCSS 与信任度加权的协作频谱感知算法(Weighted reliability cooperative spectrum sensing, WRCSS)^[18] 两种算法进行性能仿真对比。

图 7 给出了采样点数 N 从 400 变化到 1 600 的情况下,各个节点平均信噪比分别为 -6 dB 和 -10 dB 时,EDCSS 算法的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 的变化情况。由图可知,随着采样点数 N 值的增加,不同信噪比下的检测率呈增加趋势。当平均信噪比为 -10 dB 时, $N=850$ 时的检测概率接近 1;当平均信噪比为 -6 dB 时, $N=580$ 的时检测概率接近 1。随着采样点数 N 的增加,两种信噪比下的虚警概率都较小且稳定,远小于预设的虚警概率 0.1。

图 8 为不同信噪比的情况下,系统的碰撞概率随采样点数 N 的变化情况。由图可知,随着采样点数 N 的增加,碰撞概率减小且最终

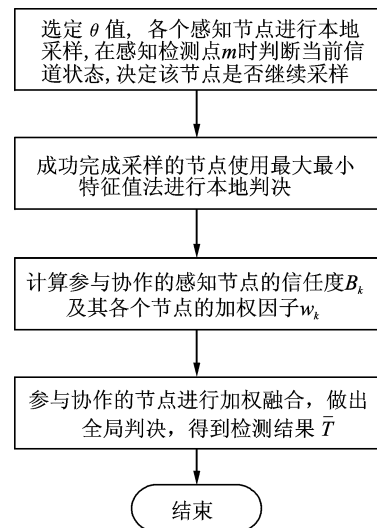


图 6 EDCSS 算法流程图

Fig. 6 Flow chart of EDCSS algorithm

趋于稳定。当节点平均信噪比为-10 dB,采样节点数 $N=900$ 时碰撞概率趋于 0.02;当节点平均信噪比为-6 dB时,采样节点数 $N=500$ 时碰撞概率趋于 0.02。所以当平均信噪比较好时,感知性能好,则主用户和次用户通信时发生碰撞的概率越小。

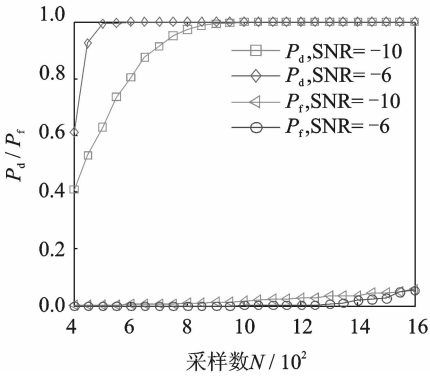


图 7 不同信噪比下的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f

Fig. 7 Detection probabilities and false alarm probabilities SNR under different SNR

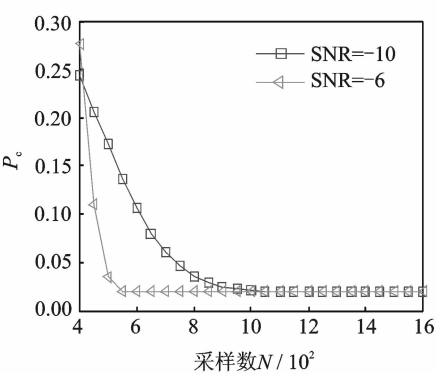
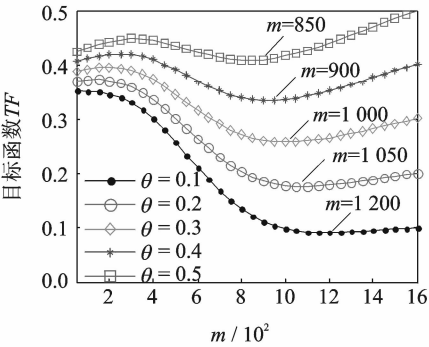


图 8 不同信噪比下的碰撞概率 P_c

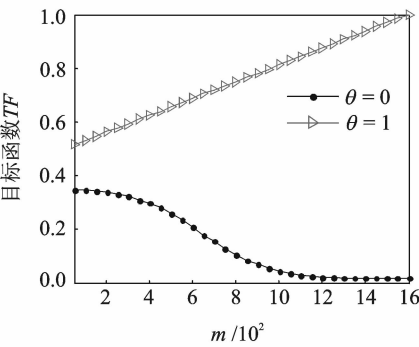
Fig. 8 Collision probabilities P_c under different SNR

图 9 为节点平均信噪比为-10 dB,感知检测点 m 取值从 200 至 1 600, θ 分别取 0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,1 情况下目标函数 TF 数值的变化图。由图 9(a)可知,随着 θ 的增加,目标函数 TF 的取值总体呈现增加的趋势,感知系统对于碰撞概率的关注度不断减小,更多关注能量消耗效率;当 θ 值不变时, TF 的取值总的变化趋势为先减小再增大,存在最佳检测点 m ;随着 θ 的减小,最优感知检测节点 m 值不断增大,感知网络消耗的能量不断增加。由图 9(b)可知,当 $\theta=1$ 时,表示系统只关注网络的能量有效性,而忽略了碰撞概率,此时目标函数 TF 的值随着检测点 m 的值增加而变大;反之 $\theta=0$ 时,只注重网络的碰撞概率, TF 的值不断减小,当检测点 $m=1\ 600$ 即所有节点全部完成采样时, TF 取得最小值,感知网络的能量消耗率为 100%。

图 10 为 EDCSS 算法与 WRCSS 算法的性能仿真对比。由图可知,随着节点平均信噪比的增加,EDCSS 算法在平均信噪比为-10 dB 时检测概率已接近 1,WRCSS 算法要在-8.7 dB 时检测概率才接



(a) 当 $\theta=0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$ 时的 TF 值
(a) TF values when θ is 0.1,0.2,0.3,0.4,0.5



(b) 当 $\theta=0,1$ 时的 TF 值
(b) TF values when θ is 0 and 1

图 9 不同 θ 值下目标函数 TF 值

Fig. 9 Values of target function TF with different θ values

近1,EDCSS算法比 WRCSS算法改进了 2 dB左右的信噪比。EDCSS算法的虚警概率明显优于 WRCSS,几乎接近于 0。综上,EDCSS算法的性能明显优于 WRCSS算法。

图 11 为 WRCSS 和 EDCSS 两种算法的感知网络生命周期的对比。在 WRCSS 算法中,在完成本地判决前,各个节点都要完成全部的采样。所以当系统的总能量保持不变时,随着信噪比的变化,系统的生命周期都维持不变。为提高网络的能量有效性,EDCSS 算法在感知过程中通过设置检测点提前检测信道状态,信道状态较好的节点完成整个采样,信道状态较差的就不再进行之后的采样。由图可知,随着信噪比值的增加,EDCSS 算法的能量有效性呈现优越于 WRCSS 算法的趋势。

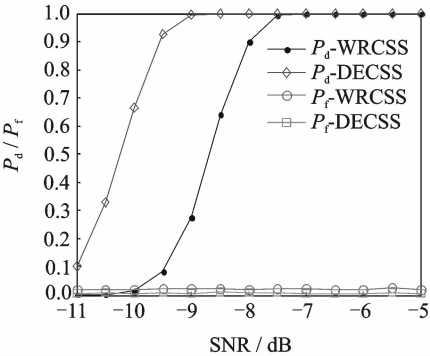


图 10 WRCSS 和 EDCSS 两种算法感知性能的对比
Fig. 10 Sensing performance comparison between WRCSS and EDCSS algorithms

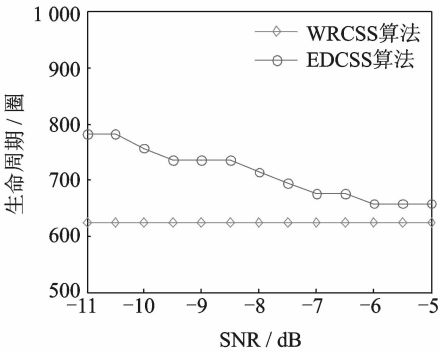


图 11 WRCSS 和 EDCSS 算法生命周期对比
Fig. 11 Comparison of life cycles between WRCSS and EDCSS algorithms

5 结束语

在网络中,相比单点感知,协作频谱感知提高了网络的频谱感知性能。随着感知时间的延长,一方面不断增加了网络的能耗,减少了网络的寿命;另一方面使得次用户拥有更多的机会接入授权频谱,主用户和次用户发生碰撞的机率增大。针对这些问题,本文提出了联合优化网络碰撞概率和能量有效性的协作频谱感知,通过寻找网络感知过程中的最优检测点,提高了认知无线网络的感知性能,从而延长了整个认知网络的生命周期。

参考文献:

[1] 魏急波,王杉,赵海涛. 认知无线网络:关键技术与研究现状 [J]. 通信学报,2011, 32(11): 147-158.
Wei Jibo, Wang Bin, Zhao Haitao. Cognitive wireless networks: Key techniques and sate of the art [J]. Journal on Commnications, 2011, 32(11):147-158.

[2] Mitola J, Jr Maguire G Q. Cognitive radio: Making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4):13-18.

[3] Cacciapuoti A S, Caleffi M, Paura L, et al. Decision maker approaches for cooperative spectrum sensing: Participate or not participate in sensing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 2445-2457.

[4] 张士兵,宋莲莲,刘燕,等. 基于节点识别的协作频谱感知算法[J]. 数据采集与处理,2014, 29(5):688-693.
Zhang Shibing, Song Lianlian, Liu Yan, et al. Cooperative spectrum detection algorithm based on node recognition[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(5):688-693.

[5] 王海莲,张士兵,郭莉莉. 基于可信度加权的协作频谱感知算法[J]. 数据采集与处理,2014, 29(3):472-477.
Wang Hailian,Zhang Shibing, Guo Lili. Reliability-based weighted cooperative spectrum sensing algorithm [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(3):472-477.

[6] Atapattu S, Tellambura C, Hai J. Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4):1232-1241.

[7] Sun Xiangxia, Tsang D H K. Energy-efficient cooperative sensing scheduling for multi-band cognitive radio networks[J].

IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(10): 4943-4955.

- [8] Chien Wenbin, Yang Chihkai, Huang Yuan. Energy-saving cooperative spectrum sensing processor for cognitive radio system [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2011, 58(4): 711-723.
- [9] 邱涛, 宋涛, 许文俊, 等. 能量有效性频谱感知和传输方案的联合[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(5): 54-58.
Qiu Tao, Song Tao, Xu Wenjun, et al. Schemes of joint design of energy-efficiency spectrum sensing and transmission [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(5): 54-58.
- [10] Liang W, Min S, Xijun W, et al. Mean energy efficiency maximization in cognitive radio channels with pu outage constraint [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(2): 287-290.
- [11] Hassan E S. Spectrum sensing and power efficiency trade-off optimisation in cognitive radio networks over fading channels [J]. IET Communications, 2013, 7(3): 198-205.
- [12] 曹龙, 赵杭生, 姚富强, 等. 恶意环境中基于能量效率的安全协作频谱感知[J]. 电波科学学报, 2013, 3(3): 492-496.
Cao Long, Zhao Hangsheng, Yao Fuqiang, et al. Secure cooperative spectrum sensing based on energy efficiency in hostile environment [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 3(3): 492-496.
- [13] Jiang C, Chen Y, Gao Y, et al. Joint spectrum sensing and access evolutionary game in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 2470-2483.
- [14] d'Utra da Costa M, Cardieri P. Collision probabilities for dynamic spectrum access with cognitive radios [C]// 2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). Belem, Brazil: IEEE, 2009: 272-276.
- [15] Du Hong, Wei Zaixue, Wang Yu, et al. Transmitting-collision tradeoff in cognitive radio networks: A flexible transmitting approach [C]// 2011 Sixth International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM). Osaka: IEEE, 2011: 271-275.
- [16] Jiang Hai, Lai Lifeng, Fan Rongfei, et al. Optimal selection of channel sensing order in cognitive radio [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(1): 297-307.
- [17] Zhao Qianchuan, Geirhofer S, Tang Lang, et al. Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2): 785-796.
- [18] Bao Zhihua, Ni Danyan, Zhang Shibing. Weighted reliability cooperative spectrum sensing algorithm [C]// The 24th Wireless and Optical Communications Conference. National Taiwan University, China: IEEE, 2015: 1-4.
- [19] 李玲远, 杨爽. 基于信噪比加权的协作频谱感知技术[J]. 华中师范大学学报, 2010, 44(4): 577-579.
Li Lingyuan, Yang Shuang. SNR-based weighted cooperative spectrum sensing in cognitive radio [J]. Journal of Huazhong Normal University, 2010, 44(4): 577-579.
- [20] 韩磊磊, 陈越, 于丽莉. P2P网络的恶意节点检测模型[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(2): 484-488.
Han Leilei, Chen Yue, Yu Lili. Malicious node detecting model for P2P networks [J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(2): 484-488.
- [21] Zeng Yonghong, Liang Yingchang. Eigenvalue based spectrum sensing algorithms for cognitive radio [J]. IEEE Transaction on Communications, 2009, 57(6): 1784-1793.

作者简介:



倪丹艳(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 认知无线网络, E-mail: 18260598837@163.com。



包志华(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 现代通信技术、通信信号处理、认知技术以及中继协作等。



张士兵(1962-)男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 宽带数字通信、通信信号处理、认知无线电以及中继协作等。

