

基于分簇协作频谱感知的认知无线网能量效率研究

胡琳娜^{1,2} 蒋益锋³ 蔡雪⁴

(1. 南京理工大学紫金学院, 南京, 210046; 2. 河海大学计算机与信息学院, 南京, 210098; 3. 江苏理工学院信息中心, 常州, 213001; 4. 苏州大学电子信息学院, 苏州, 215006)

摘要: 针对认知无线网能量消耗引起的能量效率较低问题, 在研究认知无线网分簇协作频谱感知能量效率的基础上, 提出了一种最优功率分配算法来最大化次用户系统的能量效率。通过建立基于次用户能量效率最大化传输优化模型, 在考虑传输功率、感知时间以及干扰限制的情况下, 利用拉格朗日函数及KKT条件, 得到最优次用户发射功率分配算法, 以达到系统能量效率最大化的目的, 同时分析了不同参数对能量效率的影响。仿真结果表明, 本文所提算法能有效提高次用户系统的能量效率、减少系统开销。

关键词: 认知无线网; 协作频谱感知; 分簇; 能量效率

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Research on Energy Efficiency of Cognitive Radio Network Based on Cluster Cooperative Spectrum Sensing

Hu Linna^{1,2}, Jiang Yifeng³, Cai Xue⁴

(1. Zijin College, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210046, China; 2. Computer & Information College, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 3. Information Center, Jiangsu University of Technology, Changzhou, 213001, China; 4. School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University, Suzhou, 215006, China)

Abstract: Aiming at the low energy efficiency caused by the energy consumption of cognitive radio network, an optimal power allocation algorithm is proposed to maximize the energy efficiency of secondary user system based on clustering cooperative spectrum sensing. By establishing the energy efficiency maximization transmission model and considering transmission power, perceived time constraints and interference constraints, the optimal transmitted power allocation algorithm can be obtained to achieve the purpose of the system energy efficiency maximization through using Lagrange function and KKT condition. Then the influence of different parameters on energy efficiency is analyzed. Simulation results show that the proposed algorithm can reduce energy consumption and improve energy efficiency.

Key words: cognitive radio network; cooperative spectrum sensing; clustering; energy efficiency

引言

近年来,“绿色通信”成为新一代无线通信的发展方向,其中“绿色”即节能减排、合理分配资源,从

而实现可持续发展,所以系统的能量效率成为了“绿色通信”新的衡量指标。传统的固定频谱分配方案由于频谱利用率不高而引起一定程度上的“频谱空穴”,造成频谱资源浪费。而认知无线电技术(Cognitive radio, CR)能够有效解决这一问题,同时可以缓解目前日益增长的无线业务需求与频谱资源短缺之间的矛盾^[1-2]。

在认知无线网中,次用户(Secondary user, SU)能够通过协作频谱感知检测主用户(Primary user, PU)占用信道状态,在不影响主用户通信的情况下伺机接入授权频段进行通信。目前关于认知无线网中的协作频谱感知能量效率问题已经成为研究热点。有学者提出了在分簇情况下的协作频谱感知方案^[3-4],多个次用户同时感知主用户的存在状态,并且将感知到的结果发送给簇头(Cluster head, CH),由簇头再将结果汇报给融合中心(Fusion center, FC)进行最终的融合判决。文献[5,6]提出将感知时间与功率控制进行联合优化,从而提高系统能量效率。文献[7]通过建立多重约束条件下的频谱感知和传输联合优化模型,在考虑单位发射速率消耗功率和干扰限制的情况下使能量效率最大化,但都没有考虑到分簇在提高能量效率上的重要作用。文献[8]提出了一种采用加权系数的多簇协作检测算法,根据用户的信噪比给与不同的权重来提高检测概率,但是只考虑到检测性能没有考虑能量效率方面的影响。文献[9]根据授权用户的本地感知和簇内融合的判决结果设计簇内、簇间审查规则以此来减少汇报的次用户数,但减少的能量消耗是有限的,没有从优化传输功率和感知时间的角度考虑减少能耗。而文献[10]提出了一种迭代算法来确定联合优化的传感时间、数据传输时间和用户数量,从而使系统的能源效率最大化。该算法将感知时间和数据传输时间这两个设计参数合并为一个参数,却没有从减少汇报的用户数考虑进一步降低能耗。

针对以上分析,本文提出了一种基于分簇协作频谱感知的认知无线网能量效率优化算法。该算法以分簇认知无线网为基础,通过对次用户传输系统的分析和推导,建立基于次用户能量效率最大化的传输优化模型,在考虑主用户服务质量(Quality of service, QoS)以及约束条件的限制下,提出了一种最优功率分配算法,通过最优化次用户发射功率以达到系统能量效率最大化的目的。

1 分簇认知无线网协作频谱感知模型

1.1 系统模型

假设集中式分簇认知无线网络系统由1个融合中心,1个授权主用户和 N 个次用户组成,系统模型如图1所示。认知无线网络系统通过协作频谱感知的方式检测主用户信道使用情况。考虑到动态分簇时空间位置的随机性变化较大,并且因移动性产生高维数据处理复杂性较高,所以本文采用静态分簇,以减少计算的复杂度。在此,根据地理位置将 N 个次用户平均分成 K 个簇,每个簇内的次用户同时进行本地频谱感知,将检测结果通过时分复用的方式汇报给簇头。簇头接收到各次用户信息后,利用等增益合并的软判决融合准则得到簇内感知结果^[11],并将结果汇报给融合中心。FC根据各个簇上报的数据,通过硬判决融合准则判断主用户状态。

1.2 帧结构模型

系统帧结构模型如图2所示,将一个时长为

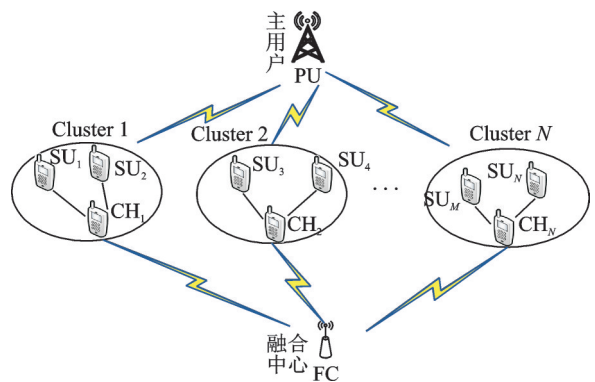


图1 分簇认知无线网协作频谱感知系统模型

Fig.1 Cluster cognitive radio network cooperative spectrum sensing system model

T 的感知周期分成感知时间 τ_s 、汇报时间 t_r 和数据传输时间 t_d 。在频谱感知阶段,所有次用户同时独立地感知信道占用状态。假设所有认知用户处于相同的定时同步状态,以保证整个频谱感知过程的同步性。

$$T = \tau_s + t_r + t_d \quad (1)$$

假设每个SU汇报感知结果到簇头的时间为 t_1 ,每个簇头上报感知结果给FC的时间为 t_2 ,即簇内感知汇报时间为 $(N/K-1)t_1$,簇间汇报的时间为 kt_2 。由此可得到一个感知周期内的总感知汇报时间为

$$t_r = (N/K-1)t_1 + Kt_2 \quad (2)$$

帧内数据传输的时间为

$$t_d = T - \tau_s - [(N/K-1)t_1 + Kt_2] \quad (3)$$

2 能量效率问题描述

本文主要考虑次用户系统的能量效率问题,通过对次用户系统吞吐量及能量消耗的分析,得到次用户系统的能量效率。

2.1 吞吐量分析

根据最终全局感知结果决定次用户是否允许传输数据,只有当检测结果为主用户信道空闲时才能进行数据传输。此时有2种情况:(1)PU正在使用授权频段,但没有检测到PU的存在,SU在这种情况下发送信息造成对PU的干扰;(2)PU未使用频段,同时也检测到主用户不存在。则发生情况(1)的概率为

$$\begin{aligned} P(x < \lambda_c, H_1) &= P(x < \lambda_c | H_1)P(H_1) = \\ &= (1 - P(x > \lambda_c | H_1))P(H_1) = \\ &= (1 - Q_d)P(H_1) \end{aligned} \quad (4)$$

发生第2种情况的概率为

$$\begin{aligned} P(x < \lambda_c, H_0) &= P(x < \lambda_c | H_0)P(H_0) = \\ &= (1 - P(x > \lambda_c | H_0))P(H_0) = \\ &= (1 - Q_f)P(H_0) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: H_1 和 H_0 分别表示主用户存在和不存在的情况; $P(H_1)$ 和 $P(H_0)$ 分别表示主用户占用频段和不占用频段的概率; λ_c 为判决门限; Q_d 为全局检测概率; Q_f 为全局虚警概率。

情况(1)的吞吐量为

$$R_1 = \frac{T - \tau_s - [(N/K-1)t_1 + Kt_2]}{T} (R_{11} + R_{12})(1 - Q_d)P(H_1) \quad (6)$$

式中: R_{11} 为次用户向簇头汇报数据过程中的吞吐量, R_{12} 为簇头向FC汇报数据过程中的吞吐量。

$$\begin{aligned} R_{11} + R_{12} &= C_1(N/K-1)t_1K + C_1t_2K = \\ &= C_1[(N-K)t_1 + Kt_2] \end{aligned} \quad (7)$$

根据香农定理得到 C_1 为

$$C_1 = B \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_T + N_0} \right) \quad (8)$$

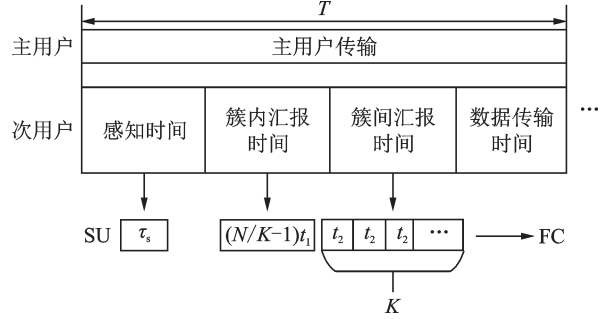


图2 协作频谱感知帧结构图

Fig.2 Frame structure in cooperative spectrum sensing

式中: P_s 为次用户传输数据时的发射功率, P_T 为主用户发射功率, N_0 是噪声的功率, B 为信道带宽。所以由式(8)可得情况(1)的吞吐量为

$$R_1 = \frac{T - \tau_s - [(N/K - 1)t_1 + Kt_2]}{T} [(N - K)t_1 + Kt_2] B \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_T + N_0} \right) (1 - Q_d) P(H_1) \quad (9)$$

在情况(2)下, C_2 是主用户未占用时进行数据传输的信道容量

$$C_2 = B \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{N_0} \right) \quad (10)$$

同理可得情况(2)下的吞吐量为

$$R_2 = \frac{T - \tau_s - [(N/K - 1)t_1 + Kt_2]}{T} [(N - K)t_1 + Kt_2] B \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{N_0} \right) (1 - Q_f) P(H_0) \quad (11)$$

综上,可以得到次用户系统总吞吐量表达式为

$$R = R_1 + R_2 = \frac{T - \tau_s - [(N/K - 1)t_1 + Kt_2]}{T} [(N - K)t_1 + Kt_2] B \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_T + N_0} \right) (1 - Q_d) P(H_1) + \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{N_0} \right) (1 - Q_f) P(H_0) \right] \quad (12)$$

2.2 能量消耗分析

根据图1,2可知,系统总能耗 E 包括数据传输能量消耗、本地频谱感知能量消耗、次用户发送和接收感知结果的能耗、簇头及融合中心对感知结果进行融合处理的能耗。由此,总能量消耗可表示为

$$E = P_s [T - \tau_s - (N/K - 1)t_1 - Kt_2] + E_1 + E_r + E_p \quad (13)$$

式中: P_s 表示当检测到主用户不占用信道时,次用户进行数据传输时的功率; E_1 表示次用户进行本地频谱感知的能量消耗; E_r 表示SU进行数据汇报及接收的能量消耗; E_p 表示对感知结果进行融合处理中的能量消耗,故

$$E_1 = \left(\frac{N}{K} - 1 \right) K \tau_s P_{lk} = (N - K) \tau_s P_{lk} \quad (14)$$

$$E_r = \left[\left(\frac{N}{K} - 1 \right) K P_{tk} + \left(\frac{N}{K} - 1 \right) K P_{rk} \right] t_1 + [K P_{tk} + K P_{rk}] t_2 = [(N - K)t_1 + Kt_2] (P_{tk} + P_{rk}) \quad (15)$$

$$E_p = \left(\frac{N}{K} - 1 \right) K P_{pk} t_1 + K P_{pk} t_2 = [(N - K)t_1 + Kt_2] P_{pk} \quad (16)$$

式中: P_{lk} 表示次用户进行本地频谱感知时单位时间内消耗的功率; P_{tk} 和 P_{rk} 分别为每个SU发送和接收判决结果时消耗的功率; P_{pk} 表示簇头和融合中心处理判决结果时消耗的功率。综上,总能量消耗 E 可表示为

$$E = P_s [T - \tau_s - (N/K - 1)t_1 - Kt_2] + (N - K) \tau_s P_{lk} + [(N - K)t_1 + Kt_2] (P_{tk} + P_{rk} + P_{pk}) \quad (17)$$

2.3 能量效率分析

综合以上分析,得到系统的能量效率可以表示为系统总吞吐量与系统总能量消耗的比值,即

$$\eta = \frac{R}{E} = \frac{\frac{T - \tau_s - [(N/K - 1)t_1 + Kt_2]}{T} [(N - K)t_1 + Kt_2] B \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_T + N_0} \right) (1 - Q_d) P(H_1) + \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{N_0} \right) (1 - Q_f) P(H_0) \right]}{P_s [T - \tau_s - (N/K - 1)t_1 - Kt_2] + (N - K) \tau_s P_{lk} + [(N - K)t_1 + Kt_2] (P_{tk} + P_{rk} + P_{pk})} \quad (18)$$

3 能量效率最优化

本文以最大化次级用户能量效率为目标,在考虑主用户 QoS 以及约束条件的限制下,通过最优化次级用户发射功率以达到次级用户系统能量效率最大化的目的。由于实际频谱感知过程的不完美,会出现检测错误,即当信道占用时,检测结果为空闲,此时次级用户传输数据会对主用户产生干扰,因而对主用户的通信质量产生影响。为了保证主用户通信质量不受影响,需要次级用户产生的干扰小于主用户所能容忍的干扰门限,以确保主用户的通信质量。因此,在最优化问题中通过约束条件加以限制。假设采用能量检测时,信道的检测门限相同,对于给定的感知时间和检测概率可以求出检测门限,次级用户系统能量效率最优化问题可表示成

$$\begin{aligned} \text{OP1:Max}\eta \\ \text{s.t. } C_1: P_s \leq P_{\max} \\ C_2: (1 - Q_d)P(H_1)P_s \leq I_{\max} \\ C_3: 0 < \tau_s < T \end{aligned} \quad (19)$$

由于总吞吐量和能量都是连续的实函数,吞吐量大于零恒成立的,所以可以作进一步等价代换来简化理论分析从而解决复杂的优化问题。定义一个变量 η^* 来表示两种情况下的最大能量效率,最优化问题可以转化为混合整数非线性规划问题来解决,可以得到

$$\text{Max}_{P_s^*} \left\{ \begin{aligned} & \frac{T - \tau_s - [(N/K - 1)t_1 + Kt_2]}{T} [(N - K)t_1 + Kt_2] \times \\ & B \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_s^*}{P_T + N_0} \right) (1 - Q_d)P(H_1) + \log_2 \left(1 + \frac{P_s^*}{N_0} \right) (1 - Q_f)P(H_0) \right] - \\ & \eta^* \{ P_s^* [T - \tau_s - (N/K - 1)t_1 - Kt_2] + (N - K)\tau_s P_{\text{tk}} + [(N - K)t_1 + Kt_2](P_{\text{tk}} + P_{\text{rk}} + P_{\text{pk}}) \} \end{aligned} \right\} = 0 \quad (20)$$

由拉格朗日方程可得

$$\begin{aligned} L = R - \eta E + \lambda (P_{\max} - P_s) + \mu [I_{\max} - (1 - Q_d)P(H_1)P_s] + \nu (T - \tau_s) = \\ \frac{T - \tau_s - [(N/K - 1)t_1 + Kt_2]}{T} [(N - K)t_1 + Kt_2] \times \\ B \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_T + N_0} \right) (1 - Q_d)P(H_1) + \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{N_0} \right) (1 - Q_f)P(H_0) \right] - \\ \eta \{ P_s [T - \tau_s - (N/K - 1)t_1 - Kt_2] + (N - K)\tau_s P_{\text{tk}} + [(N/K - 1)t_1 + Kt_2](P_{\text{tk}} + P_{\text{rk}} + P_{\text{pk}}) \} + \\ \lambda (P_{\max} - P_s) + \mu [I_{\max} - (1 - Q_d)P(H_1)P_s] + \nu (T - \tau_s) \end{aligned} \quad (21)$$

式中 λ, μ, ν 均为在限制 C_1, C_2, C_3 下的拉格朗日系数。利用拉格朗日函数以及 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件^[12], 通过求偏导可以得到最优功率 P_s^* 的表达式为

$$P_s^* = \left[\frac{A_{12} + \sqrt{B_{12}}}{2} \right]^+ \quad (22)$$

部分系数表示为

$$S_{12} = \frac{[\lambda + \eta(T - \tau_s - (N/K - 1)t_1 - Kt_2) + (1 - Q_d)P(H_1)\mu] \ln 2T}{(T - \tau_s - (N/K - 1)t_1 - Kt_2)[(N - K)t_1 + Kt_2]B} \quad (23)$$

$$A_{12} = \frac{(1 - Q_d)P(H_1) + (1 - Q_f)P(H_0)}{S_{12}} - P_T - 2N_0 \quad (24)$$

$$B_{12} = A_{12}^2 - 4 \left[P_T N_0 + N_0^2 - \frac{(1 - Q_d)P(H_1)N_0 + (1 - Q_f)P(H_0)(P_T + N_0)}{S_{12}} \right] \quad (25)$$

式中: $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。

通过次梯度算法,搜索拉格朗日系数,迭代可得到最优值。次梯度算法的核心思想是在次梯度方向上引入一个步长序列 δ^n 来迭代更新拉格朗日的系数^[13]。迭代第 $n+1$ 次的拉格朗日乘数表达式为

$$\begin{aligned} \lambda^{n+1} &= [\lambda^n - \delta^n (P_{\max} - P_s)]^+ \\ \mu_l^{n+1} &= [\mu_l^n - \delta^n (I_{\max} - (1 - Q_d)P(H_1)P_s)]^+ \quad l = 1, 2, \dots, L \\ \nu_k^{n+1} &= [\nu_k^n - \delta^n (T - \tau_s)]^+ \quad k = 1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (26)$$

4 算法实现

根据以上分析,本文所提出的基于分簇网络的最优次用户发射功率分配算法的主要实现步骤如下:

- (1)初始化,设定最大迭代次数 N 、收敛误差 if_judge 以及标志位 Converange12 。设置第 1 次迭代的能量效率 η_{12} , 迭代次数 $n=0$ 。
- (2)根据式 (26), 计算第 n 次迭代的拉格朗日参数值, 并且在最大迭代次数内不断更新。
- (3)根据式 (22—25), 初始化第 n 次迭代的最优发射功率。
- (4)在功率约束条件内, 将式 (20) 的计算结果与所设门限 if_judge 作比较, 如果在所设门限范围内, 则得到最优功率解, 标志位 Converange12 为 1, 结束循环。
- (5)反之, 进入下一次循环, 直到找到最优解或者迭代次数结束。

5 仿真结果分析

本节利用 Matlab 平台对所提算法的系统性能进行了仿真实验。在仿真中, 假设系统中共有 50 个次用户, 平均分成 5 个簇, 固定总帧长 $T=100$ ms, 假设次用户将感知结果发送到簇头的时间与簇头发送数据到 FC 的时间相等。设全局检测概率 $Q_d=0.9$, 采样频率为 6 MHz, 噪声为高斯白噪声。设次用户频谱感知所消耗的功率 $P_l = 40$ mW, 簇头和融合中心处理判决结果时消耗的功率 $P_{pk} = 15$ mW。

图 3 所示为本文算法与文献[9]和文献[10]算法在不同次用户数下与能量效率的关系图。由图 3 可看出, 3 种算法的能量效率都随次用户数的增加呈先增大后缓慢减小的趋势。本文所提算法的能量效率明显大于其他两种算法, 并且随着用户数的增加, 能量效率衰减幅度不大。这主要是因为随着用户数的增加, 汇报感知结果的用户数也在增加, 与此同时也增加了能量消耗, 因此能量效率在降低。从图 3 中可以看出, 当次级用户数为 20 时, 文本算法能量效率达到最大值之后随着用户数的增大能量效率呈现缓慢下降的趋势。而文献[9]和文献[10]达到能量效率最大值后, 随着用户数的不断增加, 能量效率呈现急剧下降的趋势。图 4 给出了分簇对认知系统能量效率的影响分析。在同等条件下, 分簇后系统能量效率明显高于不分簇的情况, 并且分成 5 个簇时的能量效率要高于分成 3 个簇的情况。这是因为分簇将单一的次用户传

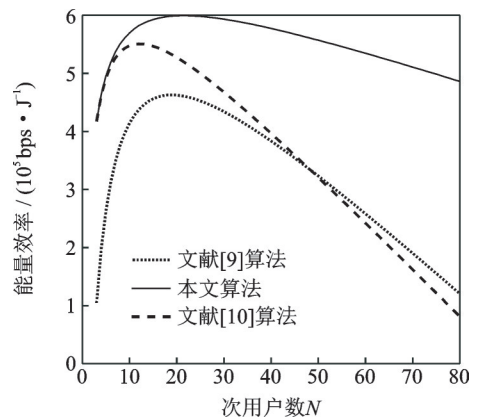


图 3 不同算法下能量效率与次用户数的关系
Fig.3 Energy efficient versus the number of SUs under different schemes

输进行集中化处理,大大减少了感知汇报的时间,同时也减少了不必要的开销,因而系统能量效率得到了提升。从图4还可以看出,起初随着发射功率的提高,系统能量效率显著增加,当发射功率达到一定值时,能量效率不再无限增加,而是呈缓慢下降的趋势。图5所示为信噪比为 -10 dB、 -20 dB和 -22 dB下,系统能量效率与发射功率的关系曲线。在相同的发射功率下,SNR= -10 dB时,系统能量效率最高,SNR= -22 dB时,系统的能量效率最低。这是因为高信噪比情况下,信道状况较好,此时检测概率较高,因而能量效率也较高。所以信道环境是提升能量效率的有利因素。

图6是不同传输功率下能量效率与感知时间的关系图。由图6可以看出,能量效率都随感知时间呈现先增加后减少的趋势。在一定的传输功率下,感知时间 $t_s=0.012$ s左右时,能量效率达到一个最大值。此后随着感知时间增加,能量效率呈下降趋势。这是因为随着感知时间增加,检测概率变大,系统吞吐量也不断增大,由此系统能效也就随之增加;但随着感知时间进一步增加,系统能效在达到极限值后开始不断下降,这是因为随着感知时间的增加,感知性能的提高受到限制,但同时感知能耗却不断增加,而且随着感知时间的增加,传输时间相应变少,由此影响到数据传输过程,系统吞吐量也会由此变小,导致了系统能量效率出现下降的情况。

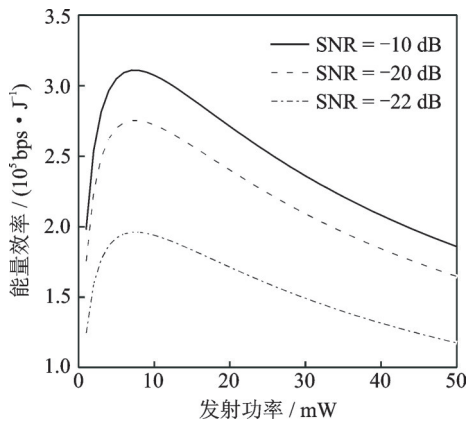


图5 不同信噪比条件下发射功率与能量效率的关系
Fig.5 Energy efficiency versus transmission power under different SNR

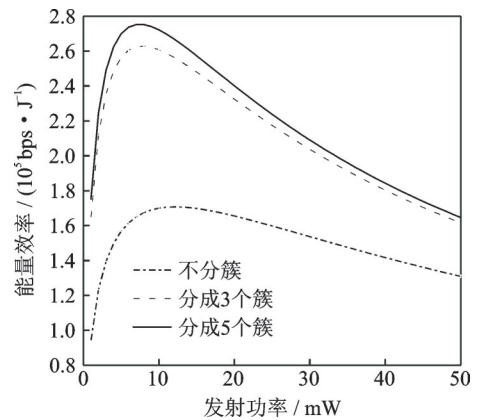


图4 不同分簇下发射功率与能量效率的关系
Fig.4 Energy efficiency versus transmission powers under different clusters

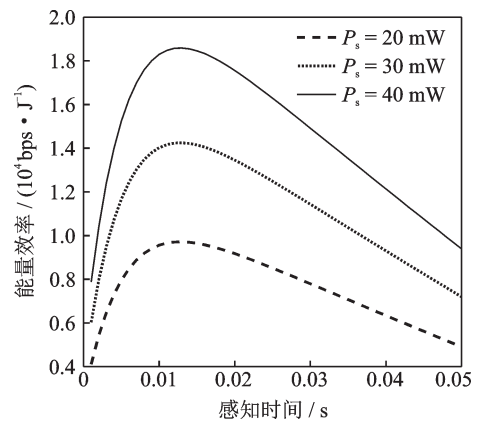


图6 不同发射功率下能量效率与感知时间的关系
Fig.6 Energy efficiency versus sensing time curves under different transmission powers.

6 结束语

本文主要研究了基于分簇协作频谱感知的认知无线网能量效率优化问题。针对密集网络环境中,协作频谱感知导致网络开销较大,系统能耗增加的问题,提出了一种基于分簇协作频谱感知的认知无线网最优能量效率功率分配算法。首先建立了分簇认知无线网协作频谱感知系统模型。在此基础上构建分簇认知网次级用户系统多约束条件下的能量效率最优化问题,将最优化问题转化为混合整数非线性规划问题,利用拉格朗日函数以及Karush-Kuhn-Tucker (KKT)条件,通过次梯度迭代算法得到次

用户最优发射功率分配方案。仿真结果表明,本文提出的算法能够减少次用户感知汇报时间,降低系统感知能耗,从而有效提升认知无线网次级用户系统能量效率。

参考文献:

- [1] 陈兵,胡峰,朱琨. 认知无线电研究进展[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(3): 440-451.
Chen Bing, Hu Feng, Zhu Kun. Research progress of cognitive radio [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(3): 440-451.
- [2] 刘洋,崔颖,李鸥,等. 认知无线网络中多信道频谱感知周期优化算法[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(4): 737-745.
Liu Yang, Cui Ying, Li Ou, et al. Multi-channel spectrum perception cycle optimization algorithm in cognitive wireless network [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(4): 737-745.
- [3] Dost B, Nasir S, Haewoon N. Fuzzy C-means clustering and energy efficient cluster head selection for cooperative sensor network[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1459-1476.
- [4] Joe I, Jiao Y, Yin P. A novel clustering scheme for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IET Communications, 2016, 10(13): 1590-1595.
- [5] 杨明,李翔,杨昊,等. 能量效率认知无线电协作感知和传输联合优化[J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(3): 101-107.
Yang Ming, Li Xiang, Yang Hao, et al. Joint optimization of cooperative perception and transmission of energy efficiency cognitive radio[J]. Journal of Xi'an Dianzi University, 2017, 44(3): 101-107.
- [6] 朱江,段昂,郭兵. 认知网中感知时间和功率控制的联合优化机制[J]. 电讯技术, 2016, 56(3): 246-251.
Zhu Jiang, Duan Ang, Guo Bing. Joint optimization mechanism of perceived time and power control in cognitive network [J]. Telecommunications Technology, 2016, 56(3): 246-251.
- [7] 胡琳娜,陈钱. 基于不完全频谱感知的认知中继网络能量效率[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(36): 36-40.
Hu Linna, Chen Qian. Energy efficiency of cognitive relay network based on incomplete spectrum perception [J]. Science, Technology and Engineering, 2018, 18(36): 36-40.
- [8] 李涛. 基于分簇加权的认知无线电协作检测算法[J]. 无线电工程, 2015(9): 41-44.
Li Tao. Clustering weighted cognitive radio cooperative detection algorithm [J]. Radio Engineering, 2015(9): 41-44.
- [9] 刘逸韬,朱昌平,彭浩. 分簇认知网络中能量有效的协作频谱感知算法 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 76-81.
Liu Yitao, Zhu Changping, Peng Hao. An energy-efficient collaborative spectrum sensing algorithm in cluster cognitive networks [J]. Science, Technology and Engineering, 2018, 18(4): 76-81.
- [10] Awin F A, Abdelraheem E, Ahmadi M. Designing an optimal energy efficient cluster-based spectrum sensing for cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(9): 1884-1887.
- [11] 姜赖赢. 认知无线电中协作频谱感知算法的研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2017.
Jiang Laiying. Research on cooperative spectrum sensing algorithm in cognitive radio [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [12] Zhang H, Nie Y, Cheng J. Sensing time optimization and power control for energy efficient cognitive small cell with imperfect hybrid spectrum sensing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016(99): 1-1.
- [13] Hu L, Chen Q, Optimal energy-efficient for OFDM-Based cognitive relay networks with sensing errors[C]//2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference(IAEAC).Chongqing, China:IEEE, 2018:1960-1964.

作者简介:



胡琳娜(1980-),女,副教授,研究方向:认知无线网络,中继网络,异构网络, E-mail:hulnnj@139.com。



蒋益锋(1980-),男,高级工程师,研究方向:无线传感器网络, E-mail:jyf@jsut.edu.cn。



蔡雪(1997-),女,硕士研究生,研究方向:认知无线网络, E-mail:caixue78@163.com。