

# 认知无线传感网络中吞吐量能耗均衡研究

高 卉<sup>1</sup>,冯友宏<sup>1,2</sup>,王晓雨<sup>1</sup>

(1. 南京邮电大学 教育部宽带无线通信与传感器技术重点实验室,江苏 南京 210003;  
2. 安徽师范大学 物理与电子信息学院,安徽 芜湖 241000)

**摘 要:**认知无线传感网可利用空闲的授权频段来解决传统无线传感器网络的频谱资源短缺的问题,在授权频段内,其利用频谱空穴进行通信,从而改善了无线传感器网性能。由于认知无线传感网主要基于无线传感器网,因此存在着节点能力弱、需考虑网络节能及其与节点协作等问题,不能直接套用传统认知无线电网络的技术。由于次用户能耗限制和上传信道信息可能存在错误,提高能耗效率在次用户频谱感知和协作发送过程中显得非常重要。为此,提出了一种用于集中式协作频谱感知的硬判决融合算法。该算法在能耗阶段,由总的检测概率和虚警概率的限制求最小的次用户数目;在能耗效率优化阶段,在固定感知时隙等参数限制下,设计优化目标函数,迭代算法求得最优用户数,从而实现能耗的最大效率。基于信道信息误码率对能耗影响的分析,进行了硬判决融合算法与传统算法的对比仿真实验。仿真结果表明,该算法需要的感知节点最少,且能耗效率可达到最优。

**关键词:**认知无线网络;协作频谱感知;能耗效率;硬判决;误码率限制

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)10-0130-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.10.028

## Research on Tradeoff of Energy Consumption and Throughput in Cognitive Wireless Sensor Networks

GAO Hui<sup>1</sup>, FENG You-hong<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-yu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Technology of MOE,  
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. College of Physics and Electronic Informaion, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** Cognitive Wireless Sensor Networks (CWSN) can utilize idle authorized spectrum to overcome the shortage of spectrum resources in the traditional wireless sensor network. Within the authorized spectrum, the use of spectrum hole for communication can improve performance of wireless sensor network. In addition, since the CWSN operates in wireless sensor network there exist many shortcomings, such as weak energy of each sensor node, consideration of energy-saving and collaboration of energy-saving with specific node etc, which limit the direct application of traditional technology of cognitive radio network. Due to the energy constraint of each cognitive user and potential secondary transmission errors in CWSN, energy efficiency becomes very important for each cognitive node in spectrum sensing and cooperative transmission. The novel energy efficient strategies are proposed for the centralized CSS using hard decision fusion rules. In stage of energy consumption the minimum number of users can be calculated with the limitation of overall detection probability and false alarm probability; in stage of energy efficiency optimization under the constraint of parameters involving fixed perception time slot etc. the objective function is optimized with iterative algorithm for the optimized number of users as well as the maximum efficiency of energy consumption. Based on analysis on the channel information error rate of energy consumption, the simulation experiments on hard decision fusion algorithm are conducted in contrast with traditional ones. The results show that the optimality of k with N-Rule is prior to both of OR and AND-Rules and the energy efficiency is optimal.

**Key words:** cognitive wireless network; cooperative spectrum sensing; energy efficiency; hard decision fusion; bit-error-rate constraint

## 1 概 述

目前无线传感网(WSN)面临着诸多挑战,包括非授权ISM频段频谱资源匮乏和节点的能量有限等问题。为了缓解WSN的频谱资源匮乏问题,将无线通信领域的认知无线电技术引入WSN,认知无线传感网(CWSN)应运而生<sup>[1]</sup>。为了检测授权用户的活跃性,认知用户感知目标频谱。如果感知到没有主用户,次用户可以发送信息。然而,由于信道衰落和阴影效应的影响,单个WSN节点进行频谱感知可能导致错误判决。为了提高资源分配和频谱感知的性能,提出了协作机制<sup>[2]</sup>。次用户间的协作可以提高感知结果的可靠性,这称为协作频谱感知。在协作频谱感知阶段,次用户报告各自的本地判决到融合中心,在融合中心根据预设的判决准则进行最终判决。

协作频谱感知分为集中式和分布式。集中式协作频谱感知,所有次用户检测主用户存在与否,做出硬判决发给融合中心<sup>[3]</sup>。融合中心收集所有的判决,运用硬判决融合算法(与融合、或融合等),把判决结果发给各个次用户。对于分布式频谱感知,每个次用户检测与WSN网络节点使用同样频段的其他无线电用户信号,并与邻节点交换观测信息,经过多轮交换,做出最终判决。集中式频谱感知要求在次用户和融合中心之间建立一个公用的控制信道。然而,这导致了频带的开销,如:带宽、计算复杂度、时延等。

传统的认知无线电(CR)网络技术研究中,已有大量文献对协作感知进行研究。文献[4]提出了最优化表决融合来获得最高能耗效率。文献[5-6]结合两种融合准则,运用分层结构,在满足检测概率和虚警概率的限制下,提出了一种迭代的能耗算法,极大地减小了在每个阶段报告次用户的数目。文献[7]提出,对于一定规模的认知无线网络,一定存在特定数目的次用户(例如接收信噪比最高的用户),使得协作性能达到最优。文献[8]主要致力于找出在次用户数及各次用户的接收信噪比已知的情况下,使得虚警概率和误检概率之和最小的最佳融合规则,以及在检测精度限制下使大规模认知无线网络能迅速地进行频谱感知的最少次用户数,但对于大规模认知传感器网络中存在的诸如控制信道带宽的限制问题却没有考虑。传统CR网络的频谱感知技术,没有考虑如WSN网络的节点能力弱、需要节能的要求,因此需要对CR频谱感知技术进行改进,使之适合WSN网络。如限制进行频谱感知的节点数目,使得不必要的节点不进行频谱感知工作而节能,同时又要求尽可能不降低感知精确度。文献[9]提出了一种混合认知网络结构下的双信息融合的协作检测算法,该算法采用了多用户协作感知技术。不同于此,文献[10]基于单一认知网络结构的协作频谱检

测的研究,考虑了实际无线环境中存在的混合认知无线网络结构,提出了一种双信息融合的协作频谱感知算法。文献[10]为延长平均网络生存时间,提出了基于瞬时信道状态信息和剩余能量信息的机会多中继选择策略,避免了过度使用信道条件较好的中继节点,平衡各节点的资源利用。文献[11]介绍了基于梯度算子的小生境遗传算法的簇头选择方式。认知无线网络中无论是认知用户间的协作或是授权用户与认知用户间的协作,都会增加系统吞吐量,提高总的频谱效率。文献[12]基于双门限能量检测的协作频谱感知性能的优化方案,根据信噪比确定最优的检测门限值,使得协作频谱感知的全局错误概率在各信噪比条件下都达到最小值,从而提高了协作频谱感知的性能。文献[13]研究了使能耗最小的最佳协作频谱感知,但是该算法的近似结果中检测错误率相当高。

然而上述算法都没有考虑次用户报告信道误码率的影响而导致融合中心频谱感知的检测性能会下降。由于次用户在感知和发送阶段的能耗限制,检测精确度和能耗效率做出权衡折中很重要。检测概率随着次用户数的提高而提高,同时发送阶段能量消耗也随之增加。因此研究如何找到最优的次用户数使得消耗最小的能量,同时提供可靠的检测结果和发送质量显得非常重要。此外,对误码率如何影响最优的协作感知的次用户数也是值得关注的问题。

为此,可采用以下策略获得最优的次用户数 $N$ ,研究分两个阶段:能耗阶段,在总的检测概率和虚警概率的限制下,通过仿真求最小的次用户数目;能耗效率优化阶段,在固定感知时隙等参数的限制下,设计优化目标函数,迭代算法求得最优用户数,从而使能耗效率最大。

## 2 系统模型

考虑含有 $N$ 个次用户和一个FC的集中式协作频谱感知。假设任意两个次用户的间距远小于次用户到主用户的距离,所以可认为各次用户接收端的信噪比相等。鉴于能量检测具有实现简单且不需要任何先验信息的优点,假设网络中各次用户首先采用能量检测执行本地感知,然后将1 bit 决策信息(“1”或“0”)发往融合中心参与全局决策融合。

### 2.1 错误判决概率

用 $H_0$ 和 $H_1$ 分别表示主用户信道空闲和繁忙的假设,则第 $i$ 个次用户的第 $k$ 个接收信号为:

$$y_i(k) = \begin{cases} n_i(k), H_0 \\ h_i(k)s(k) + n_i(k), H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $s(k)$ 为 $k$ 时刻主用户发送的信号; $h_i(k)$ 为

$k$  时刻主用户和第  $i$  个次用户间的信道增益;  $n_i(k)$  为第  $i$  个次用户的加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN)。

假设感知时间小于信道的相干时间, 则认为信道增益  $h_i(k)$  在感知时间内不变, 不妨记作  $h_i$ , 当各信道衰落相当时,  $h_i = h_j = h$ 。假设各次用户采用相同的能量检测门限, 则所有次用户具有相同的检测性能, 所有次用户的发送错误概率均为  $P_e$ , 记各次用户在感知时间内接收到的采样点数为  $M$ , 则检测统计量为:

$$E = \sum_{k=1}^M |y(k)|^2 \quad (2)$$

当  $N$  较大时, 根据中心极限定理知,  $E$  可近似为一个正态分布。具体而言, 当信号和噪声都是零均值的实值高斯时, 由文献 [14] 可知:

$$E \sim \begin{cases} N(M\sigma_w^2, 2M\sigma_w^4), H_0 \\ N(M(\sigma_w^2 + \sigma_x^2), 2M(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)), H_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\sigma_w^2$  和  $\sigma_x^2$  分别为  $n_i(k)$  和  $s(k)$  的方差。不失一般性, 假设  $\sigma_w^2 = 1$ , 则给定检测门限  $\lambda$ , 虚警概率  $P_f$  和检测概率  $P_d$  分别为:

$$P_f = Q\left(\frac{\lambda - M\sigma_w^2}{\sqrt{2M\sigma_w^4}}\right) \quad (4)$$

$$P_d = Q\left(\frac{\lambda - M(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)}{\sqrt{2M(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)}}\right) \quad (5)$$

协作频谱感知全局检测概率和虚警概率分别为:

$$Q_d = \sum_{i=K}^N \binom{N}{i} P_x^i (1 - P_x)^{N-i} \quad (6)$$

$$Q_f = \sum_{i=K}^N \binom{N}{i} P_y^i (1 - P_y)^{N-i} \quad (7)$$

其中,  $P_x$  为频谱占用时, 融合中心接收本地判决为 1 的概率;  $P_y$  为频谱未被占用时, 融合中心接收本地判决为 0 的概率。

$$P_x = P_d(1 - P_e) + P_e(1 - P_d) \quad (8)$$

$$P_y = P_f(1 - P_e) + P_e(1 - P_f) \quad (9)$$

总的错误概率为:

$$\varepsilon = P_0 Q_f + P_1 (1 - Q_d) \quad (10)$$

## 2.2 能耗效率

考虑的次用户时隙帧结构如图 1 所示。

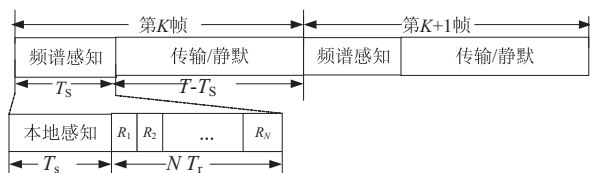


图 1 次用户时隙帧结构

在每个感知周期内, 次用户首先花费  $T_s$  用于频谱感知, 包括本地感知时间  $T_s$  和信息上传时间  $N * T_r$ 。如果 FC 给出的全局决策结果认为主用户不存在, 则

利用剩余的进行数据传输, 否则等待下一个周期。

认知无线传感网的能耗效率  $\mu$  定义为系统平均吞吐量比系统总能耗。平均吞吐量 ( $\overline{TH}$ ) 为平均成功发送的比特数; 总能耗 ( $\bar{E}$ ) 为所有次用户协作频谱感知和数据传送过程消耗的总能量。计算公式如下:

$$\overline{TH} = P_0(1 - Q_f)R(T - T_s - NT_r) \quad (11)$$

其中,  $R$  为数据速率; 因子  $1 - Q_f$  表示成功发送数据的概率。

$$\bar{E} = P_s T_s + NP_t T_r + P_{\text{unused}} P_t (T - T_s - NT_r) \quad (12)$$

其中,  $P_s$  为次用户协作频谱感知消耗的能耗;  $P_t$  为数据传输时消耗的能耗;  $P_{\text{unused}}$  表示频谱未被占用的概率, 需要注意的是, 当且仅当频谱认为未被占用时才进行数据传输。

$$P_{\text{unused}} = P_0(1 - Q_f) + P_1(1 - Q_d) \quad (13)$$

因此, 能耗效率 ( $\mu$ ) 表达式如下:

$$\mu = \frac{P_0(1 - Q_f)R(T - T_s - NT_r)}{NP_s T_s + NP_t T_r + P_{\text{unused}} P_t (T - T_s - NT_r)} \quad (14)$$

## 3 问题及算法分析

协作频谱感知性能随着认知用户的数量增加而增加。然而, 大量的协作用户导致大量的能耗和报告时延。因此, 在满足限制的虚警概率和检测概率下, 找到最优数量的次用户数很重要。检测概率高表示对主用户干扰小, 虚警概率低表示频谱利用率高。下面, 首先得到满足限制干扰下的认知用户范围, 接着得到网络吞吐最大化时的最优用户数。

### 3.1 问题分析

#### 3.1.1 能耗分析

认知无线传感网的检测性能与协作感知的用户数密切相关。认知用户数越高, 检测性能越好, 但同时增加了系统能耗。现在的标准 [15] 给出最低的检测概率和虚警概率要求, 因此, 只要满足这些限制, 再增加参与协作的频谱感知数就相当于增加了认知无线传感网的能量消耗。因此有必要设计一个合适的能耗机制来减少网络能耗, 同时仍保持标准要求。

定义能耗优化问题, 在表决融合算法中, 固定  $K$ , 算法如下:

$$\min_N \quad (15)$$

$$\text{s. t. } Q_f \leq \beta, Q_d \geq \alpha$$

使用表决融合, 根据二项式定理, 式 (6)、(7) 可以写成:

$$Q_f = 1 - \psi(k - 1, P_f, N) \quad (16)$$

$$Q_d = 1 - \psi(k - 1, P_d, N) \quad (17)$$

其中,  $\psi$  是不完全 beta 函数, 定义如下:

$$\psi(k, p, n) = I_{1-p}(n-k, k+1) = (n-k) \int_0^{1-p} t^{n-k-1} (1-t)^k dt \quad (18)$$

$\psi^{-1}$  是  $\psi$  函数的逆函数, 对于给定的  $k, N$ ,  $\psi$  和  $\psi^{-1}$  是单调递增函数, 因此有:

$$P_f = \psi^{-1}(k-1, 1-Q_f, N) \leq \psi^{-1}(k-1, 1-\beta, N) \quad (19)$$

$$P_d = \psi^{-1}(k-1, 1-Q_d, N) \geq \psi^{-1}(k-1, 1-\alpha, N) \quad (20)$$

从式(5)得, 门限  $\lambda = \sqrt{2M(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2} Q^{-1}(P_d) + M(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)$ , 将  $\lambda$  代入式(4)可得,  $P_f = Q(\frac{M\sigma_x^2 + Q^{-1}(P_d) \sqrt{2M(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2}}{\sqrt{2M\sigma_w^4}})$ , 将其代入式(19), 化简后得:

$$P_f \geq Q(\frac{M\sigma_x^2 + Q^{-1}(\zeta_\alpha) \sqrt{2M(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2}}{\sqrt{2M\sigma_w^4}}) \quad (21)$$

其中,  $\zeta_\alpha = \psi^{-1}(k-1, 1-\beta, N)$ ;  $Q^{-1}$  是  $Q$  函数的逆函数。

因此最优数  $N^*$  是从 1 到  $N$  的线性搜索, 首先满足式(21)。

基于式(21), 与融合的最优  $N$  由下式得出:

$$Q(A + BQ^{-1}(\alpha^{1/N})) \leq \beta^{1/N} \quad (22)$$

对于或融合算法, 最优  $N$  由以下不等式得出:

$$Q(A + BQ^{-1}(\alpha')) \leq \beta' \quad (23)$$

其中,  $\alpha' = 1 - (1 - \alpha)^{1/N}$ ;  $\beta' = 1 - (1 - \beta)^{1/N}$ ;  $A =$

$$\gamma \sqrt{\frac{M}{2}}; B = \gamma + 1。$$

### 3.1.2 错误概率对能耗的影响

认为每一个次用户基于本地频谱感知做出判决, 并向融合中心转发 1 bit 报告信息。假设报告信息由 BPSK 调制, 由于信道衰落和阴影效应的影响, 信息发送的过程中会出现一定的错误, 错误概率记为  $\text{Pr}_e$ 。根据文献[16], 采用 BPSK 调制,  $N$  个协作频谱感知次用户的平均报告误码率切诺夫界如下:

$$\text{Pr}_e \leq (\bar{E}_b / (N \cdot N_0))^{-N} \quad (24)$$

其中,  $\bar{E}_b$  为每个次用户报告本地判决平均发送功率, 其值与报告信道误码率有关。

因此, 协作频谱感知报告信道能耗范围由下式得出:

$$E_{\text{sensing}} \leq G(\frac{N \cdot N_0}{\text{Pr}_e}) d_{\text{sensing}}^m \quad (25)$$

其中,  $d_{\text{sensing}}$  为次用户到融合中心的距离; 根据文献[17],  $G \approx 3 \times 10^8$ 。

由式(24)可得:

$$\bar{E}_b \leq \frac{N \cdot N_0}{\text{Pr}_{b, \text{bpsk}}^{\frac{1}{N}}(N, \gamma_b)} \quad (26)$$

其中,  $\text{Pr}_{b, \text{bpsk}}(N, \gamma_b)$  的闭合表达式如下:

$$\text{Pr}_{b, \text{bpsk}}(N, \gamma_b) = \frac{1}{2^N b} (1 - (1 + \beta)^{-\frac{1}{N}})^N \sum_{k=1}^N 2^{-k} \binom{N+k}{k} (1 + (1 + \beta^2)^{-\frac{1}{N}})^k \quad (27)$$

### 3.2 算法分析

在考虑了感知和发送过程中的能耗, 频谱利用率和发送可靠性条件下, 构建了相关的优化问题, 即在总的检测概率、虚警概率以及次用户发送误码率下, 得到能耗效率最大化。优化问题目标函数如下:

$$\begin{aligned} & \max_{\mu} \\ & \text{s. t. } Q_d \geq \alpha, Q_f \leq \beta \\ & \text{Pr}_b(N, \gamma_b) \leq \text{Pr}_{b, \text{req}} \\ & 1 \leq N \leq \lfloor \frac{T - T_s}{T_r} \rfloor \end{aligned} \quad (28)$$

通过对  $\mu$  函数的最优化求解, 能够得到一定值  $N$ , 使得  $\mu$  取得最大值, 而当  $\mu$  最大时, 能使认知传感器网络在检测性能足够好的前提下减少网络的能量消耗<sup>[16]</sup>, 从而在保证检测性能的同时, 延长认知传感器网络的生存时间。计算基于检测概率和能量消耗的最佳用户数  $N$ 。

对于固定的  $\alpha, \beta, T_s, T_r, \mu$  函数必存在  $N^*$ , 使得  $\mu$  函数取最大值,  $N^*$  便是基于检测概率、虚警概率和报告信道可靠性的最佳用户数。计算  $N^*$  的步骤如下:

- (1) 初始化: 设置  $K=1$ , 固定系统虚警概率  $\beta$ , 设置检测概率最小值  $\alpha$  和错误概率  $\text{Pr}_{b, \text{req}}$ ;
- (2) 根据式(6)计算协作系统检测概率  $Q_d(K)$ ;
- (3) 如果  $Q_d(K) > \alpha$ , 则进行步骤(4), 否则  $K = K + 1$ , 并返回步骤(2);
- (4) 根据式(14)计算  $K$  个次用户系统的能耗效率  $\mu(K)$ ;
- (5) 如果  $\mu(K) < \mu(K-1)$ , 则  $K = K + 1$ , 并返回步骤(4), 否则转到步骤(6);
- (6) 跳出循环, 且有  $N^* = K$ 。

### 4 仿真结果及分析

在 MATLAB 仿真环境下, 将提出的融合判决和传统的与融合、或融合两种方法进行比较。在此进行如下设置, 假设只有一个主用户, 出现的概率( $P_0$ )和未出现的概率( $P_1$ )相等,  $P_0 = P_1 = 0.5$ , 每一个次用户采



集  $M=512$  观测值,采用能量检测做本地判决。每个次用户的接收信噪比  $\gamma=-10$  dB,采样频率  $f_s=\tau_s^{-1}=6$  MHz。

仿真参数如表 1 所示,这些参数对所有次用户都相同。

表 1 仿真参数

参数	数值
$\partial$	0.9
$R$	50
$P_i$	10
$B$	0.1
$T$	0.1
$P_s$	1

表 2 说明了误码率对与融合、或融合算法的影响,表 2 检查概率与与融合、或融合的关系

表 2 检查概率与与融合、或融合的关系  
(虚警概率  $Q_f=0.1$ ,  $\gamma=-9$  dB,  $\Pr_e=10^{-4}$ )

检测概率	与融合	或融合
0.9	4	4
0.91	4	4
0.92	5	4
0.93	6	4
0.94	7	4
0.95	9	4
0.96	13	5
0.97	20	5

图 2 显示了最优数量  $N$  与虚警概率  $Q_f$  之间的关系。

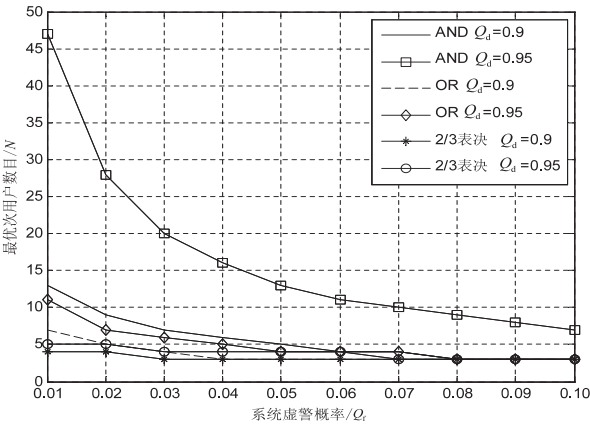


图 2 虚警概率限制下的最优次用户数  $N$

从图中可得,随着虚警概率的增加,三种融合方式需要的用户数目都随之减少;相同虚警概率,相同融合方式,检测概率大的需要的最优次用户数越大;在整个虚警范围内,OR 融合准则优于与融合,表决融合方式最优,所需的最优用户数最少。

图 3 显示了最优数量  $N$  与检测概率  $Q_d$  之间的关系。

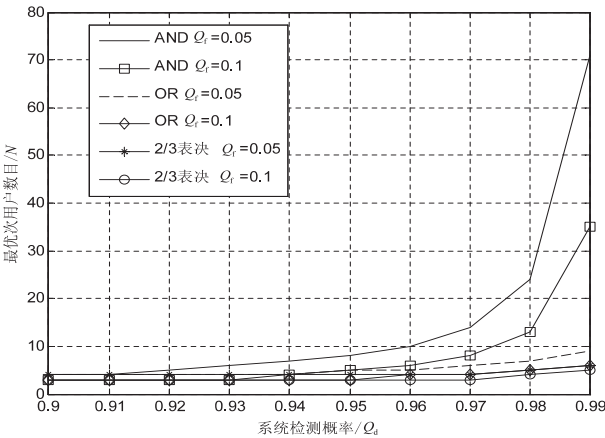


图 3 检测概率限制下的最优次用户数  $N$

从图中可得,随着检测概率的增加,三种融合方式需要的用户数目都随之增多;相同检测概率,相同融合方式,虚警概率大的需要的最优次用户数越小;在整个检测概率范围内,OR 融合准则优于与融合,表决融合方式最优,所需的最优用户数最少。

图 4 显示了能耗效率与次用户数量  $N$  之间的关系。

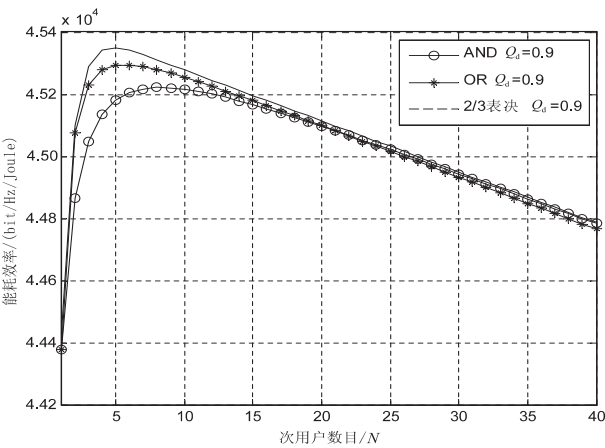


图 4 不同次用户数的能耗效率

从图中可得,次用户数量存在最优值使能耗效率最优;在整个次用户数范围内,表决融合方式最优,能耗效率最大,OR 融合次之。

5 结束语

为了提高能耗效率,考虑到信道存在错误概率的情况,提出了 CWSN 网络中协作频谱感知次用户数的优化方法,通过迭代算法得到融合最优次用户数。基于信道信息误码率对能耗影响的分析,进行了硬判决融合算法与传统算法的对比仿真实验。仿真结果表明,该算法需要的感知节点最少,且能耗效率可达到最优。此外,对比验证并分析与融合、或融合以及表决融合的最优次用户感知数目可知,表决融合的能耗效率

最优。

参考文献:

[1] Peh E C Y, Liang Y C, Guan Y L, et al. Optimization of cooperative sensing in cognitive radio networks: a sensing-throughput tradeoff view[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 5294–5299.

[2] Mishra S M, Sahai A, Brodersen R W. Cooperative sensing among cognitive radios[C]//International conference on communications. [s. l.]: IEEE, 2006: 1658–1663.

[3] Varshney P K. Distributed detection and data fusion[M]. New York: Springer-Verlag, 1997: 216–232.

[4] Viswanathan R, Varshney P K. Distributed detection with multiple sensors[J]. Proceedings of IEEE, 1997, 85(1): 64–79.

[5] Zhang W, Mallik R, Letaief K. Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12): 5761–5766.

[6] Muta R, Kohno R. Throughput analysis for cooperative sensing in cognitive radio networks[C]//International symposium on personal, indoor and mobile radio communications. [s. l.]: IEEE, 2009: 2916–2920.

[7] Peh E C Y, Liang Y C, Guan Y L. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 58(9): 27–32.

[8] Zhang W, Mallik R, Letaief K. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks[C]//IEEE international conference on communications. [s. l.]: IEEE, 2008:

3411–3415.

[9] 杜 红. 认知无线电中频谱感知优化与无线资源管理的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.

[10] 陈 丹. 协作与认知无线通信网络中若干关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.

[11] 郅希云. 认知无线网络协作频谱感知、协作传输、频谱切换技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.

[12] 金燕君. 认知无线传感器网络协作频谱感知技术的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.

[13] Hai N P, Zhang Y, Engelstad P E, et al. Optimal cooperative spectrum sensing in cognitive sensor networks[C]//International conference on wireless communications and mobile computing: connecting the world wirelessly. [s. l.]: [s. n.], 2009: 1073–1079.

[14] Liang Y C, Zeng Y, Peh E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1326–1337.

[15] Functional requirements for the 802. 22WRAN standard[S]. [s. l.]: [s. n.], 2006.

[16] Cui S, Goldsmith A J, Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(6): 1089–1098.

[17] Xu X, Bao J, Cao H, et al. Energy efficiency based optimal relay selection scheme with a BER constraint in cooperative cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(1): 191–203.

(上接第 129 页)

参考文献:

[1] 王 沛, 谭跃进. 卫星对地观测任务规划问题简明综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2893–2897.

[2] Kazansky Y, Wood D, Sutherland J. The current and potential role of satellite remote sensing in the campaign against malaria[J]. Acta Astronautica, 2016, 121: 292–305.

[3] 杜耀珂. 基于 STK 的卫星实时视景仿真系统设计[J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35(2): 60–64.

[4] 何 威, 张世杰, 曹喜滨. 基于软件接口的卫星多领域建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 7–12.

[5] 朱惠娟. 基于 Unity3D 的虚拟漫游系统[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(10): 36–39.

[6] Berger M, Cristie V. CFD post-processing in Unity3D[J]. Procedia Computer Science, 2015, 51: 2913–2922.

[7] Heo M H, Kim D. The development of a curling simulation for performance improvement based on a physics engine[J]. Procedia Engineering, 2013, 60(11): 385–390.

[8] 刘 卫, 王荣兰, 刘四清, 等. TLE 预报精度改进及碰撞预警中的应用[J]. 空间科学学报, 2014, 34(4): 449–459.

[9] 刁宁辉, 刘建强, 孙从容, 等. 基于 SGP4 模型的卫星轨道计算[J]. 遥感信息, 2012, 27(4): 64–70.

[10] Dong W, Zhao C Y. An accuracy analysis of the SGP4/SDP4 model[J]. Chinese Astronomy & Astrophysics, 2010, 34(1): 69–76.

[11] 韩 琼. 多星联合成像任务规划技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.

[12] 方 沁. 基于 Unity 和 3dmax 的虚拟实验室三维建模设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.

[13] 相茂英, 马纯永, 韩 勇, 等. 基于 Unity3D 的化工设备虚拟培训系统研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(7): 196–200.

[14] 周梦园. 基于 Unity3D 的球幕实时交互显示系统[J]. 现代计算机, 2016(20): 69–72.

[15] 谢吉刚. 基于 Unity3D 的第三人称摄像机被遮挡的处理[J]. 电子测试, 2016(21): 71–72.