

# 无线认知传感器网络的节能频谱感知策略

邹丹, 钟国辉, 屈代明, 曹洋

(华中科技大学电子与信息工程系, 湖北武汉 430074)

**摘要:**针对无线认知传感器网络频谱感知过程中的能耗,提出两种节能策略:①使用可信度投票算法来减少传输检测结果的节点个数;②使用基于部分可观测马尔可夫决策过程的检测算法来减少检测次数.仿真结果表明这两种算法均能有效减少检测能耗,而且组合使用时相比一般算法能节省不低于30%的能量,同时保证检测可靠度满足系统要求.

**关键词:**无线传感器网络;认知无线电;频谱感知;节能

**中图分类号:** TN92      **文献标识码:** A

## Energy-efficient spectrum sensing in wireless cognitive sensor networks

ZOU Dan, ZHONG Guo-hui, QU Dai-ming, CAO Yang

(Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Two energy-efficient strategies are proposed to reduce the energy consumed in the spectrum sensing procedure for wireless cognitive sensor networks. One involves using confidence voting algorithm to reduce the detection number, the other is based on Partially Observable Markov Decision Process (POMDP). Simulation results show that both algorithms can reduce the energy consumed in the detection efficiently, and the combination of the two algorithms can save more than 30% energy compared with the general algorithm with system detection reliability requirement guaranteed.

**Key words:** wireless sensor networks; cognitive radio; spectrum sensing; energy-efficient

## 0 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是一种由大量集信息采集、处理和无线传输于一体的微型传感器节点组成的无线自组织网络.近年来,随着微电子技术、通信技术和计算技术的发展,无线传感器网络越来越广泛地应用于国防军事、环境检测、医疗卫生、工业自动化等众多领域<sup>[1]</sup>.现有的无线传感器网络都工作在无需授权的ISM频段(如2.4 GHz频段).研究表明,这些公用频段正随着各种新的无线通信技术的兴起(如WiFi, 蓝牙)

而日益拥挤.公用频段的异构无线系统共存问题已成为无线传感器网络继续发展的瓶颈<sup>[2]</sup>.

与此同时,大量实际测量和调查表明,在当前固定频谱分配模式下,已分配频谱的有效使用率却极其低下<sup>[3]</sup>.为了更充分地利用已分配的频谱资源,实现动态频谱共享,认知无线电技术(cognitive radio, CR)<sup>[4]</sup>应运而生.认知无线电技术是在软件无线电(software defined radio, SDR)的基础上发展起来的一种智能无线电技术.它能够感知无线电环境在时域和地域上的变化,并使用智能技术进行学习,通过实时调整各种工作参数(如传输功率、载波频率和

收稿日期:2009-05-13;修回日期:2009-09-04

基金项目:国家自然科学基金(60702039)资助.

作者简介:邹丹,女,1988年生,学士.研究方向:无线通信. E-mail: zou.dan88@gmail.com

通讯作者:钟国辉,讲师. E-mail: zhonggh@hust.edu.cn

调制方式等)实现对频谱空洞的有效利用.若在无线传感器网络中实现认知无线电技术,不但能缓解公用频段的拥挤状况,而且在降低无线传感器网络的工作频率后还使得节点的单跳覆盖区域变广,从而大大简化了网络拓扑结构<sup>[5]</sup>.

但是认知无线电技术也给无线传感器网络带来了许多挑战.无线传感器网络需要新的算法和协议来实现认知无线电的两大关键技术——频谱感知和动态信道切换<sup>[6]</sup>.对能量受限的无线传感器网络而言,要成功引进认知无线电技术,不仅要实现这两大技术,更要减少实现过程中的能量消耗.频谱感知缩短了传感器节点的休眠时间,增加了节点监听信道的负担和为交换检测结果而产生的通信量.不可避免的检测错误又会造成传感器网络与主要用户冲突,进一步增大额外能耗.另外,频繁的信道切换也要消耗大量能量<sup>[7]</sup>.

目前,将认知无线电技术引入无线传感器网络的文献比较匮乏.文献<sup>[5]</sup>从物理层和数据链路层分析了基于认知无线电技术的无线传感器网络的实现细节,指出认知无线电技术能够扩大无线传感器网络中节点的通信范围,减少多跳通信的路由次数.文献<sup>[7]</sup>考虑在无线传感器网络中实现集中式频谱分配,使用修正博弈论方法同时提高分配公平性和频谱利用率,降低信道切换次数.尚未看到在无线认知传感器网络中研究如何降低频谱感知能耗的文献.本文针对无线认知传感器网络的频谱感知过程提出了两个节能策略.首先,使用可信度投票算法减少合作检测中传输检测结果的传感器节点个数;其次,使用部分可观测马尔可夫决策过程选择空闲概率最大的信道进行检测,减少发现频谱空洞所需的检测次数.仿真结果表明这两个策略都能在保证检测可靠度的情况下有效降低能耗.

## 1 系统模型

### 1.1 主要用户网络

假设一段频谱由  $N$  个信道组成,这  $N$  个信道已授权分配给主要用户.传感器网络按照严格的时隙工作,每个时隙的长度为  $T$ .主要用户在特定时隙  $t$  的状态用  $S_n(t) = \{0, 1\}$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 表示; $S_n(t) = 0$  表示主要用户在时隙  $t$  占用信道  $n$ ,信道  $n$  不能被次要用户系统使用; $S_n(t) = 1$  表示主要用户在时隙  $t$  未占用信道  $n$ ,信道  $n$  可以被次要用户系统使用.所有  $N$  个信道被主要用户占用的情况是相互

独立的.设一个信道上主要用户在相邻时隙间的状态切换服从稳定的马尔可夫过程,如图 1 所示,主要用户从状态 0 切换到状态 1 的概率为  $\alpha_n$ ,从状态 1 切换到状态 0 的概率为  $\beta_n$ .因而,主要用户信道状态的极限概率为  $\pi_n^0 = \alpha_n / (\alpha_n + \beta_n)$  (信道闲)和  $\pi_n^1 = \beta_n / (\alpha_n + \beta_n)$  (信道忙).

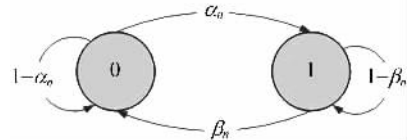


图 1 信道状态转移图

Fig. 1 Channel state transition diagram

### 1.2 无线认知传感器网络模型

传感器网络由 1 个调度节点和  $M$  个传感器节点组成,按照固定的时隙(长度为  $T$ )工作.图 2 为传感器网络的工作流程.在每个时隙开始时,所有节点检查是否有数据要传输;若无,网络在该时隙内进入休眠状态;否则,网络开始进行频谱检测.无线传感器网络的一个显著特点就是拥有大量密集分布的传感器节点,这种拓扑结构非常适合进行合作频谱检测.合作频谱检测比非合作频谱检测具有更高的可靠性,尤其是在有多径衰落和阴影的通信环境中<sup>[8,9]</sup>.假设无线传感器网络中的所有传感器节点同时对一个信道进行合作频谱检测.调度节点再对各节点的检测结果进行融合和判决,得到整个网络最终的检测结果.检测过程中的所有数据都通过无线传感器网络的公共控制信道传输.若检测到某个主要用户信道为空闲状态,则各传感器节点开始在该信道上向调度节点传输数据.通过在数据传输成功时回复确认帧,传感器节点和调度节点均可知数据传输结果.若传感器网络检测到该主要用户信道为忙状态,则在当前时隙的剩余时间进入休眠状态,等到下一时隙再进行频谱检测.

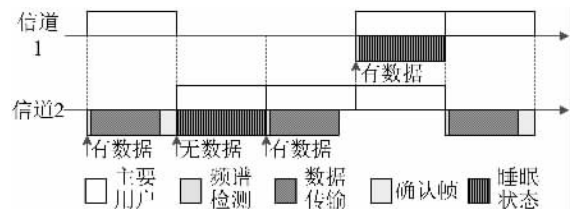


图 2 传感器网络工作流程图

Fig. 2 Workflow of the wireless sensor networks

考虑在某个时隙开始时传感器网络有数据需要

传输而进行频谱检测到传感器网络找到一个真正空闲的主要用户信道的过程. 设在这个过程中传感器网络一共进行了  $N_s$  次检测.  $N_s$  是一个随机变量, 其大小受到检测顺序和信道状态的影响. 每个传感器节点进行一次检测的能耗为  $e_s$ . 在  $N_s$  次检测中, 每次调度节点对各传感器节点的检测结果进行数据融合时, 需要传输检测结果的传感器节点个数为  $M_i$  ( $i=1, 2, \dots, N_s$ ). 每个传感器节点传输一次检测结果的能耗为  $e_t$ . 那么频谱感知过程中的平均每个传感器节点的能耗表示为

$$\bar{E}_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} (M \times e_s + M_i \times e_t)}{M} = \sum_{i=1}^{N_s} \left( e_s + \frac{M_i}{M} \times e_t \right) \quad (1)$$

传感器网络进行合作检测的可靠度用检测概率  $P_{ds}$  和虚警概率  $P_{fas}$  衡量. 为了充分利用空闲的频谱资源, 又不对主要用户网络造成过度干扰, 通常要求次要用户网络的检测可靠度满足:

$$\left. \begin{array}{l} P_{fas} \leq \sigma \\ P_{ds} \geq \epsilon \end{array} \right\} \quad (2)$$

那么无线认知传感器网络的节能频谱感知策略就是要解决以下问题:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{E}_s \downarrow \\ P_{fas} \leq \sigma \\ P_{ds} \geq \epsilon \end{array} \right\} \quad (3)$$

## 2 节能频谱感知策略

从公式(1)可以看出, 要减少平均每个传感器节点的能耗, 需要同时减少检测次数  $N_s$  和每次传输检测结果的传感器节点所占比例  $M_i/M$ . 但如果  $M_i/M$  减少过多, 造成系统检测可靠度降低, 又会增加检测次数  $N_s$ . 可见, 在减少  $M_i/M$  和减少  $N_s$  之间需要找到一个平衡点, 同时还要保证系统检测可靠度满足预定要求. 本文通过两步解决这个问题: 首先在减少传输检测结果的节点所占比例  $M_i/M$  的同时使得系统检测可靠度满足预定要求  $P_{fas} \leq \sigma$ ,  $P_{ds} \geq \epsilon$ ; 其次在已知系统检测可靠度的情况下尽量减少检测次数  $N_s$ .

### 2.1 可信度投票

合作检测的数据融合过程可以抽象成一个二元的综合分类模型. 每个参与合作检测的传感器节点就是一个基分类器, 都能独立完成分类任务, 将信道情况分成忙状态(有主要用户)和闲状态(无主要用

户). 综合多个基分类器最简单的方法就是对它们的输出进行线性加权, 即投票法<sup>[10]</sup>. 在检测判决时, 有的传感器节点只能输出判决结果, 但另外有些传感器节点除了输出判决结果, 还可以输出对该判决结果的可信度. 这种投票方法称为可信度投票法.

设判决空间为  $\mathcal{R} = \{-1(\text{信道忙}), 1(\text{信道闲})\}$ . 传感器网络中第  $m$  ( $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ ) 个传感器的检测结果为  $h_m(x)$ , 其符号表示判决结果, 绝对值表示可信度. 所有的传感器节点都参与检测, 但并不都把检测结果传给调度节点. 设传回检测结果的传感器节点集合为  $TX = \{l_1, l_2, \dots, l_{M_t}\}$ ,  $l_i \in \{1, 2, \dots, M\}$ ,  $l_i \neq l_j$ ,  $i, j \in \{1, 2, \dots, M_t\}$ . 数据融合时, 分配给  $h_{l_i}(x)$  的权值为  $\omega_{l_i}$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, M_t\}$ .

调度节点的数据融合(投票)函数为  $h(x) = \text{sign}(f(x))$ , 其中

$$f(x) = \sum_{i=1}^{M_t} \omega_{l_i} h_{l_i}(x), \quad \sum_{i=1}^{M_t} \omega_{l_i} = 1 \quad (4)$$

假设  $\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_{M_t} = 1/M_t$ , 那么

$$f(x) = \frac{1}{M_t} \sum_{i=1}^{M_t} h_{l_i}(x) \quad (5)$$

为了减少传输检测结果的传感器节点所占比例, 约定只有对检测结果可信度较大的节点才将检测结果传给调度节点. 这种约定不仅能保证检测的可靠度, 还会减少传输检测结果所消耗的能量.

$$TX = \{i, |h_i(x)| \geq h_{th}\}, i \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (6)$$

各个传感器节点对自己检测结果的可信度不固定, 而是随着一次次检测不断更新, 其过程如下:

**情形 1** 传感器节点  $m$  在时隙  $t$  检测信道为闲, 且网络的检测结果也为信道闲. 网络进行数据传输, 传输成功, 那么在时隙  $t+1$ , 传感器节点  $m$  的可信度

$$|h_m(x(t+1))| = |h_m(x(t))| + \Delta a \quad (7)$$

**情形 2** 传感器节点  $m$  在时隙  $t$  检测信道为闲, 且网络的检测结果也为信道闲, 进行数据传输, 传输失败, 那么在时隙  $t+1$ , 传感器节点  $m$  的可信度

$$|h_m(x(t+1))| = |h_m(x(t))| - \Delta a \quad (8)$$

**情形 3** 传感器节点  $m$  在时隙  $t$  检测信道为闲, 而网络最终的检测结果为信道忙. 那么在时隙  $t+1$ , 传感器节点  $m$  的可信度

$$|h_m(x(t+1))| = |h_m(x(t))| \quad (9)$$

**情形 4** 传感器节点  $m$  在时隙  $t$  检测信道为忙, 而网络最终的检测结果为信道闲, 并且数据传输

成功. 那么在时隙  $t+1$ , 传感器节点  $m$  的可信度

$$|h_m(x(t+1))| = |h_m(x(t))| - \Delta a \quad (10)$$

**情形 5** 传感器节点  $m$  在时隙  $t$  检测信道为忙, 而网络最终的检测结果为信道闲, 并且数据传输失败. 那么在时隙  $t+1$ , 传感器节点  $m$  的可信度

$$|h_m(x(t+1))| = |h_m(x(t))| + \Delta a \quad (11)$$

**情形 6** 传感器节点  $m$  在时隙  $t$  检测信道为忙, 而网络最终的检测结果为信道忙. 那么在时隙  $t+1$ , 传感器节点  $m$  的可信度

$$|h_m(x(t+1))| = |h_m(x(t))| \quad (12)$$

以上过程中, 若  $|h_m(x(t+1))| = |h_m(x(t))| - \Delta a < 0$ , 则  $|h_m(x(t+1))| = 0$ .

由于网络是一种半分布式的星型拓扑结构, 各传感器节点只需知道调度节点的检测结果和数据传输结果即可自行更新可信度系数, 决定是否传输检测结果. 调度节点以广播方式传输检测结果和数据传输结果, 不会增加各传感器节点的信息交互负担.

## 2.2 基于部分可观测马尔可夫决策过程(POMDP)的检测

在已知主要用户信道状态转移概率的情况下, 考虑在每个时隙对哪个信道进行检测能使得检测次数最少的问题可以用部分可观测马尔可夫决策过程来解决. 在马尔可夫决策过程中, 所有对决策有利的信息都可以列入系统状态的先验概率向量中<sup>[11]</sup>. 在

$$\lambda_a(t+1) = \frac{P_{fas} \times [\lambda_a(t) \times (1 - \beta_a) + (1 - \lambda_a(t)) \times \alpha_a]}{P_{fas} \times [\lambda_a(t) \times (1 - \beta_a) + (1 - \lambda_a(t)) \times \alpha_a] + P_{ds} \times [\lambda_a(t) \times \beta_a + (1 - \lambda_a(t)) \times (1 - \alpha_a)]} \quad (16)$$

**情形 4** 若网络在时隙  $t$  没有检测信道  $a$ , 那么在时隙  $t+1$  开始时, 信道  $a$  的空闲状态估计概率为

$$\lambda_a(t+1) = \lambda_a(t) \times (1 - \beta_a) + (1 - \lambda_a(t)) \times \alpha_a \quad (17)$$

要使得检测次数  $N_s$  最少, 可以采用一种贪婪策略——总是选择下一时隙空闲概率最大的信道进行检测. 若用  $A(t) \in \{1, 2, \dots, N\}$  表示传感器网络在时隙  $t$  的检测动作, 那么这种基于部分可观测马尔可夫决策过程的贪婪策略所采取的检测动作可表示如下:

$$A(t) = \arg \max_{a=1, \dots, N} (\lambda_a(t) \times (1 - \beta_a) + (1 - \lambda_a(t)) \times \alpha_a) \quad (18)$$

时隙  $t$  开始时, 传感器节点可根据过去的检测动作和观察结果计算各个信道在该时隙开始时为空闲状态的概率. 用  $\Lambda(t)$  表示这个概率向量, 且定义为各信道的空闲状态估计概率, 那么

$$\Lambda(t+1) \triangleq \Gamma(\Lambda(t) | a, \theta) \triangleq [\lambda_1(t+1), \dots, \lambda_N(t+1)] \quad (13)$$

其中  $a$  表示在时刻  $t$  传感器网络检测了信道  $a$  ( $1 \leq a \leq N$ ),  $\theta$  表示对信道  $a$  的观测结果.

每个时隙结束时, 传感器网络根据本时隙的检测动作和检测结果对各信道的空闲状态估计概率进行更新:

**情形 1** 若网络在时隙  $t$  检测了信道  $a$ , 并且合作检测结果  $\Theta_a(t) = 1$  (信道闲), 进行数据传输, 并且传输成功. 那么在时隙  $t+1$  开始时, 信道  $a$  的空闲状态估计概率为

$$\lambda_a(t+1) = 1 \quad (14)$$

**情形 2** 若网络在时隙  $t$  检测了信道  $a$ , 并且合作检测结果  $\Theta_a(t) = 1$  (信道闲), 但数据传输不成功. 那么在时隙  $t+1$  开始时, 信道  $a$  的空闲状态估计概率为

$$\lambda_a(t+1) = 0 \quad (15)$$

**情形 3** 若网络在时隙  $t$  检测了信道  $a$ , 并且合作检测结果  $\Theta_a(t) = 0$  (信道忙), 那么在时隙  $t+1$  开始时, 信道  $a$  的空闲状态估计概率为

## 3 仿真与分析

### 3.1 可信度投票算法

本节对可信度投票算法进行仿真实验. 为了对这种合作检测策略进行一般性的性能分析而无需指定具体的检测手段(能量检测、匹配滤波器检测或循环平稳特征检测), 假设每个传感器节点的正确检测概率为  $P_c$ . 为保证投票结果的正确性, 假设所有节点中至少有一半的节点的正确检测概率  $P_c > 0.5$ . 这部分节点在所有节点中的比例为  $\gamma_{\text{good}}$ , 其正确检测概率为  $P_{c\text{-good}}$ , 其余节点的正确检测概率为  $P_{c\text{-bad}}$ .  $(\gamma_{\text{good}}, P_{c\text{-good}}, P_{c\text{-bad}})$  描述了传感器网络中所有节点的检测性能情况. 算法对所有节点分配的初始可信度为  $h_{\text{init}}$ , 判定是否向调度节点传输检测结果的可

信度门限值为  $h_{th}$ , 可信度的更新增量为  $\Delta\alpha$ . ( $h_{init}$ ,  $h_{th}$ ,  $\Delta\alpha$ ) 可以唯一确定一种可信度投票算法.

仿真参数如下: 检测节点总数  $M = \{10, 20, 30\}$ , 所有节点中检测性能好的节点所占比例  $\gamma_{good} = \{0.6, 0.6, \dots, 1\}$ ,  $(P_{c-good}, P_{c-bad}) = \{(0.8, 0.4), (0.8, 0.2), (0.6, 0.4)\}$ . 信道状态切换概率  $\alpha = \beta = 0.2$ . 每次仿真都产生 1 000 个信道状态序列样本, 对每个信道状态序列进行 500 轮检测. 为分析可信度投票算法的性能, 选取的对比算法是大数投票算法: 所有节点都将检测结果传输给调度节点, 各节点无可信度差异, 调度节点取票数多的信道状态为最终检测结果.

图 3 所示是节点总数和检测性能好的节点所占比例变化时, 可信度投票与大数投票的性能比较. 检测性能好的节点所占比例一定, 节点总数分别取 10, 20 和 30 时, 可信度投票算法相对大数投票算法节省的能量不变, 其虚警概率始终小于大数投票算法, 而检测概率基本持平. 检测节点总数一定, 检测性能好的节点所占比例增加时, 可信度投票算法的相对节省能量线性减少, 其虚警概率和检测概率相对大数投票算法改善程度减小. 这是因为可信度投

票算法的本质就是通过一定时间的学习和训练, 挑出检测性能好的节点传输检测结果. 因而可信度投票算法中传输检测结果的节点所占比例总是近似趋近于检测性能好的节点所占比例, 能量节省相对值就是检测性能差的那部分节点所占比例. 而当检测性能好的节点所占比例较低时, 大数投票的检测可靠度受到检测性能差的节点影响比较严重, 因而检测可靠度远不及可信度投票.

图 4 为  $(P_{c-good}, P_{c-bad}) = \{(0.8, 0.4), (0.8, 0.2), (0.6, 0.4)\}$  时, 可信度投票与大数投票性能比较. 可以看出, 尽管当节点的检测性能差异减小时, 可信度投票算法检测可靠度变差, 但是基本上仍然优于大数投票算法. 只是在  $P_{c-good} = 0.6, P_{c-bad} = 0.4$  时, 可信度投票算法的检测概率略低于大数投票算法. 而不管节点的检测性能差异大小, 可信度投票算法能量节省的相对值总是近似等于所有节点中检测性能差的节点所占比例.

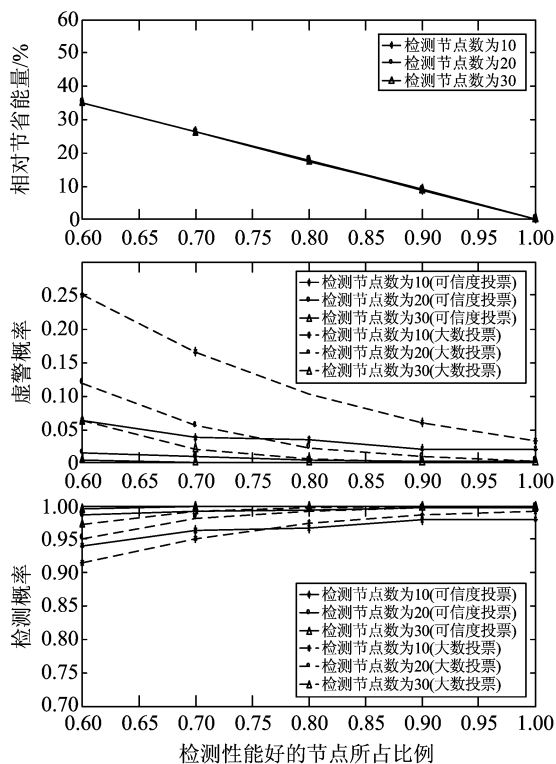


图 3 节点数目不同时可信度投票与大数投票性能比较  
Fig. 3 Performance of confidence voting and majority voting under different numbers of nodes

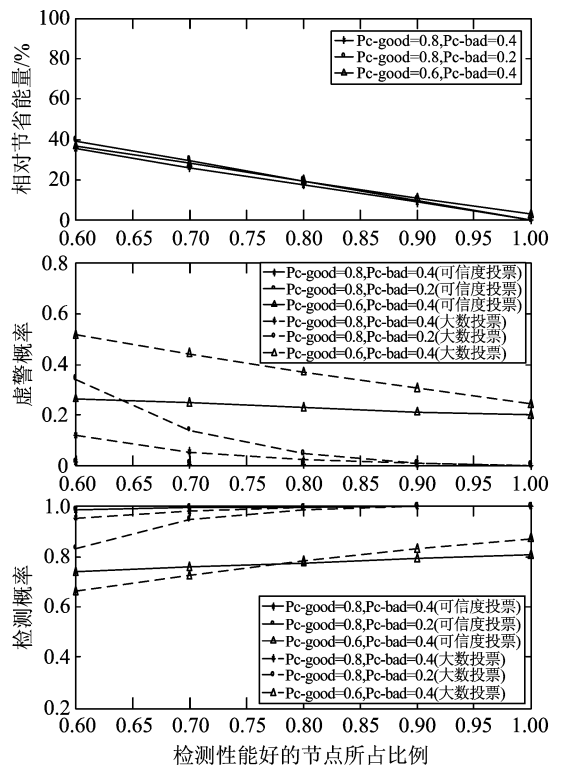


图 4 节点正确检测概率不同时可信度投票与大数投票性能比较

Fig. 4 Performance of confidence voting and majority voting under different detection probabilities

### 3.2 基于 POMDP 的检测算法仿真

本节对基于 POMDP 的检测算法进行仿真实验, 验证算法性能. 仿真参数如下: 调度节点频谱检

测的虚警概率为  $P_{fas} = \sigma = 0.1$ , 检测概率  $P_{ds} = \epsilon = 0.9$ . 频谱中信道总数  $N = \{2, 3, \dots, 12\}$ ; 初始信道空闲估计概率  $\lambda(0) = \{0, 0.1, \dots, 1\}$ ; 信道状态转移概率  $\alpha = \beta = 0.2$ . 为了比较本文算法的性能, 将本文算法与每次检测前不对各信道进行空闲概率估计, 随机选择信道进行检测的一般算法进行比较, 为了方便描述, 将本算法简称为 POMDP 检测算法, 对比算法称为随机检测算法. 每次仿真进行 10 000 次 Monte Carlo 实验.

图 5 为初始信道空闲估计概率为  $\lambda(0) = 1$  时不同信道数目下 POMDP 检测算法相对随机检测算法所节省能量的比率. 从图中可以看出, POMDP 检测算法节省能量的相对比率基本不受信道数目的影响. 当  $N = 2$  时, POMDP 检测算法对随机检测算法的能量节省比率最小, 但也达到了 19.6%. 说明 POMDP 检测算法相比随机检测算法能节省至少 19.6% 的检测能量.

图 6 为信道数目为  $N = 5$  时不同初始信道空闲

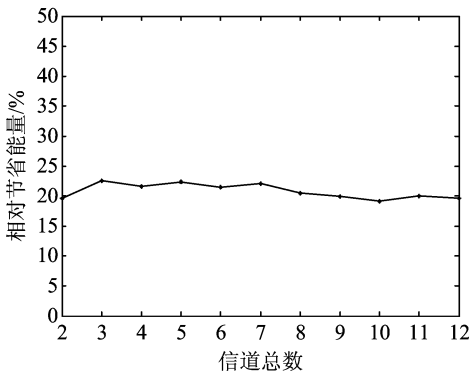


图 5 不同信道数目下的能量节省比率

Fig. 5 Energy saving percentages under different numbers of nodes

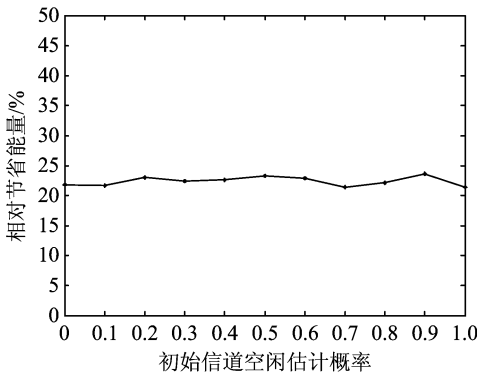


图 6 不同初始信道空闲估计概率下的能量节省比率

Fig. 6 Energy saving percentages under different channel idle initial probabilities

估计概率下 POMDP 检测算法相对随机检测算法所节省能量的比率. 从图中可以看出, 能量节省比率未受到初始信道空闲估计概率的影响. 说明 POMDP 算法是一种稳定的优化算法, 初始信道空闲估计概率不会改变算法的性能.

### 3.3 两种算法的组合仿真

本节将可信度投票算法和 POMDP 检测算法结合起来, 进行仿真实验. 实验过程如下: 首先使用 POMDP 检测算法挑出空闲概率最大的信道, 所有节点都检测该信道; 再根据可信度投票算法产生合作检测结果. 记录从开始检测到检测结果为信道空闲, 并且传感器节点与调度节点在该信道上数据传输成功的过程中的检测能耗. 仿真中, 对一个信道进行检测的能耗  $e_s = 1$ , 一个传感器节点传输一次检测结果的能耗  $e_t = 1.4^{[12]}$ . 信道总数  $N = \{5, 10\}$ , 传感器节点总数  $M = \{20, 30\}$ . 所有节点中检测性能好的节点所占比例  $\gamma_{good} = 0.8$ , 节点的正确检测概率  $(P_{c-good}, P_{c-bad}) = (0.8, 0.4)$ . 信道状态转移概率  $\alpha = \beta = 0.2$ . 检测可靠度要求  $\sigma = 0.1, \epsilon = 0.9$ . 可信度投票算法的参数  $(h_{init}, h_{th}, \Delta a) = (8, 6, 1)$ . POMDP 检测算法的初始信道空闲估计概率  $\lambda(0) = 1$ . 表 1 为不同信道数目和传感器节点数目时组合算法的性能. 其中优化算法即本文提出的两种算法的组合. 一般算法是大数投票算法与随机检测算法的组合. 从表中可以看出, 信道数目和传感器节点数目变化时, 优化算法都能比一般算法节省不低于 30% 的能量, 并且保证检测结果可靠性.

表 1 算法组合仿真

Tab. 1 Simulation results of the combination strategy

$N$	$M$	energy (优化算法)	energy (一般算法)	saved/%	$P_{fas}$	$P_{ds}$
5	20	3.6829	5.3784	31.5%	0.004	0.996
5	30	3.5199	5.3808	34.6%	0.001	0.999
10	20	3.293	5.0544	34.8%	0.004	0.996
10	30	3.3772	4.9752	32.1%	0.001	0.999

虽然本文讨论的可信度投票方法是一种基于合作检测的频谱感知方法, 会在调度节点与检测节点之间产生一定的交互能耗, 但是合作检测能提高系统的检测精度, 提高检测概率, 降低虚警概率, 从而减少了找到空闲信道所需的检测次数. 设进行非合作检测时只有调度节点进行检测. 对非合作检测与 POMDP 检测相结合策略的仿真中, 调度节点的检测性能分别取所有检测节点中检测性能最大值、平

均值、最小值. 信道总数  $N=10$ . 仿真结果如下:

表 2 非合作检测系统性能

Tab. 2 Performance of non-cooperation spectrum sensing system

调度节点检测性能	调度节点消耗能量	$P_{fas}$	$P_{ds}$
0.80	5.277 6	0.202 1	0.798 4
0.72	6.110 4	0.283 6	0.715 1
0.40	10.084 8	0.598 0	0.390 8

尽管从表 2 看来,只用单一节点进行频谱检测时,系统总体检测能耗较少.但此时系统检测精度极差,漏检概率的提高会造成大量数据报文冲突,不仅降低了用户数据的服务质量,而且会带来更严重的能耗.因此,设计节能的频谱感知策略必须首先保证检测可靠度符合系统要求.

## 4 结论

要在无线传感器网络中成功实现认知无线电技术,必须首先解决认知无线电技术带来的能耗问题.本文针对无线认知传感器网络频谱感知过程中的能耗,提出了使用可信度投票算法来减少检测次数,使用 POMDP 检测算法减少检测过程的传输能耗.仿真结果表明这两种算法均能有效减少检测能耗,而且组合使用时相比一般算法能节省不低于 30% 的能量,同时保证虚警概率和漏检概率满足系统要求.

### 参考文献(References)

- [1] Callaway Jr E. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols[M]. US: CRC Press LLC, 2003: 1-17.
- [2] Cavalcanti D, Schmitt R, Soomro A. Achieving Energy Efficiency and QoS for Low-Rate Applications with 802.11e [C]// Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, 2007: 2 143-2 148.
- [3] Federal Communications Commission. Spectrum policy task force report, ET Docket No. 02-155 [R]. Washington, DC: FCC, 2002.
- [4] Mitola J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio[D]. Sweden: Royal Institute of Technology (KTH), 2000.
- [5] Cavalcanti D, Das S, Jianfeng Wang, et al. Cognitive Radio Based Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of 17th International Conference on Computer Communications and Network. IEEE, 2008: 1-6.
- [6] Cordeiro C, Ghosh M, Cavalcanti D, et al. Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Access of TV Bands [C]// Proceedings of 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. IEEE, 2007: 225-233.
- [7] Byun S S, Balasingham I, Liang Xue-dong. Dynamic Spectrum Allocation in Wireless Cognitive Sensor Networks: Improving Fairness and Energy Efficiency [C]// Proceedings of IEEE 68th Vehicular Technology Conference. IEEE, 2008: 1-5.
- [8] Ghasemi A, Sousa E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments [C]// Proceedings of 2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. IEEE, 2005: 131-136.
- [9] Mishra S M, Sahai A, Brodersen R W. Cooperative Sensing among Cognitive Radios [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC '06. IEEE, 2006: 1 658-1 663.
- [10] YAN Ji-Kun, Zheng Hui, Wang Yan, et al. Voting by Confidence [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(8): 1 308-1 313.
- [11] Bertsekas D P. Dynamic Programming and Optimal Control: vol. 1 and 2 [M]. Belmont, MA: Athena Scientific, 2001.
- [12] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]// Proceedings of Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies: vol 3. IEEE, 2002: 1 567-1 576.