

基于双门限的新型协作频谱感知算法

曾娟^{1*}, 张翠芳¹, 王宇舟²

(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031; 2. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

(* 通信作者电子邮箱 juanzengwjf@163.com)

摘要:针对传统认知无线电双门限能量感知算法在可靠性和带宽受限上存在的不足,提出一种基于两比特硬合并的新型双门限协作频谱感知算法。该算法同时利用了认知用户的单比特局部判决结果和解决感知失败问题的两比特局部判决结果两种信息,并由融合中心结合两种局部判决信息做出最终判决从而确定主用户存在与否。仿真结果表明,与传统双门限算法相比,该算法仅以平均感知比特位略微提高为代价(感知失败概率较低时大约平均提高1%),不仅消除了感知失败问题,而且显著提高了感知性能(虚警概率较低时最大可提高21%)。

关键词:认知无线电;双门限;两比特硬合并;协作频谱感知;感知失败

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

New collaborative spectrum sensing algorithm based on dual-threshold

ZENG Juan^{1*}, ZHANG Cui-fang¹, WANG Yu-zhou²

(1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: Concerning the shortcomings in reliability and limited bandwidth of conventional dual-threshold energy sensing for cognitive radio, this paper introduced a new dual-threshold collaborative spectrum sensing algorithm based on two-bit hard combination. The algorithm made use of two kinds of information which included one-bit local decisions and two-bit local decisions of secondary users for eliminating the sensing failure. Then fusion center made a final decision based on the two kinds of decisions to determine whether the primary user was present or not. Compared to the conventional dual-threshold algorithm, the simulation results indicate that the new algorithm not only eliminates the sensing failure, but also improves the detection performance significantly (maximum increasing by about 21% at low false alarm probabilities) at the cost of slightly increasing the average number of sensing bits (on average increasing by about 1% at low sensing failure probabilities).

Key words: cognitive radio; dual-threshold; two-bit hard combination; collaborative spectrum sensing; sensing failure

0 引言

高速增长的无线业务对频谱资源的需求与有限的频谱资源之间的矛盾,采用传统的固定频谱分配政策已经无法解决,而基于动态频谱接入的认知无线电(Cognitive Radio)技术^[1-3]被认为是解决无线频谱紧缺的一种有效方法。检测感兴趣的频段是否处于空闲状态是认知无线电的首要工作,因此频谱感知技术是实现认知无线电系统的基础和前提^[4-6]。传统的单门限协作频谱感知易受噪声不确定性影响,通常门限值不易设定且容易发生误检。针对这种情况,学者们想到通过增加检测门限的数量来进行改进^[7-11],文献[9]提出一种传统的双门限(Conventional Double Threshold, CDT)协作频谱感知算法,节省了传输带宽开销,但是存在感知失败的隐患;文献[10]在此基础上进行改进,利用认知用户的能量消除了感知失败问题,但也大大增加了传输带宽开销;文献[11]仿真分析了一种新的基于信用度的双门限(Reputation-Based Double Threshold, RBDT)协作频谱感知算法,利用信用度在降低带宽开销的同时解决了感知失败问题,但是性能提升不明显。

本文在以前的研究基础上,从提高检测性能、节省传输带宽^[12]以及解决感知失败问题出发,提出一种新型的基于两比

特硬合并的双门限(Two-Bit Hard Combination Double Threshold, TBHCDT)协作频谱感知算法。该算法分两步完成:首先将接收能量位于双门限区域之外(可靠区域)的认知用户进行能量检测并将其本地判决信息发送至融合中心;其次当发生感知失败时,采用两比特硬合并算法对所有能量位于双门限之间(模糊区域)的认知用户进行协作检测并将所得到的两比特判决信息发送至融合中心;最后由融合中心根据两步判决结果做出最终判决。仿真结果表明,该算法在节省传输带宽开销的同时不仅消除了感知失败问题,而且显著提升了感知性能。

1 能量感知系统模型

在传统的认知无线电能量感知算法中,单个认知用户检测主用户(Primary User, PU)是否存在,可以归结为如下的二元假设模型^[13]:

$$x(t) = \begin{cases} n(t), & H_0 \\ hs(t) + n(t), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t)$ 是认知用户接收的信号, $s(t)$ 是主用户发射的信号, $n(t)$ 是加性高斯白噪声, h 是信道增益, H_0 和 H_1 分别表示主用户不存在和存在两种假设。在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道下,能量统计量的分布如

收稿日期:2011-08-11;修回日期:2011-09-23。

作者简介:曾娟(1986-),女,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向:认知无线电、信号与信息处理;张翠芳(1961-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要研究方向:人工神经网络、智能控制、信号处理;王宇舟(1970-),男,四川三台人,高级工程师,博士,主要研究方向:无线通信信号处理、认知无线电、航天测控。

下:

$$\theta \sim \begin{cases} \chi_{2m}^2, & H_0 \\ \chi_{2m}^2(2\gamma), & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中: χ_{2m}^2 和 $\chi_{2m}^2(2\gamma)$ 分别表示自由度为 $2m$ 的中心和非中心卡方分布, 非中心参数为 2γ ; m 表示时间-带宽乘积; γ 表示信噪比; θ 表示认知用户接收的信号能量。

由 θ 作为检测统计量, 给定检测门限 λ , 可以求得 AWGN 信道下单用户的虚警概率和检测概率^[14] 为:

$$P_f = P\{\theta > \lambda | H_0\} = \frac{\Gamma(m, \lambda/2)}{\Gamma(m)} \quad (3)$$

$$P_d = P\{\theta > \lambda | H_1\} = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (4)$$

其中: $Q_m(a, b)$ 是广义 Marcum Q 函数, $\Gamma(a)$ 和 $\Gamma(a, b)$ 分别表示完全和非完全 gamma 函数。

2 新的双门限协作频谱感知算法

2.1 两比特硬合并算法

在传统的 1 比特硬合并算法中, 仅仅只需要一个门限将观测能量划分为两个区域, 因此所有的认知用户在这两个区域都被分配相同的权值。然而在实际的无线环境中, 每个用户都可能经历不同的衰落和阴影, 因此它们接收到的能量信息通常会有很大的不同, 此时为它们分配相同的权值则不符合实际情况。为了解决这个问题, 文献[15]提出了一种新型的两比特硬合并算法, 将认知用户的观测能量值通过三个门限值划分为 4 个区域, 并根据各个用户接收的能量信息的重要性为它们分配不同的权值 w_0, w_1, w_2, w_3 , 该合并算法的原理如图 1 所示。

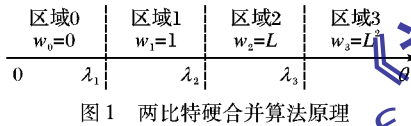


图1 两比特硬合并算法原理

由图 1 可以看出, 三个门限 λ_1, λ_2 和 λ_3 对应三组虚警概率和检测概率 $P_{f1}, P_{d1}, P_{f2}, P_{d2}$ 及 P_{f3}, P_{d3} 将能量划分为 4 个区域, 因此每个认知用户需要反馈两比特信息至融合中心来表示它接收到的能量属于哪个区域。而权值 $w_0 = 0, w_1 = 1, w_2 = L$ 和 $w_3 = L^2$, 表示只要有 1 个用户的观测能量落在区域 3, 或者 L 个用户的观测能量落在区域 2, 或者 L^2 个用户的观测能量落在区域 1 时都判决为主用户存在, 其中 L 是可优化的设置参数。因此可以得到加权求和为:

$$N_c = \sum_{i=0}^3 w_i N_i \quad (5)$$

其中 N_i 表示接收能量落入第 i 个区域的认知用户数目。可以看出如果 $N_c \geq L^2$ 则判决主用户存在, 否则判决主用户不存在。

假设有 N 个认知用户参与合作检测, 首先假定主用户不存在, 为了避免虚警, 区域 3 内必须没有任何用户。假定有 j 个用户的能量落在区域 2, $i-j$ 个用户的能量落在区域 1, 剩余的 $N-i-j$ 个用户的能量落在区域 0, 此时加权求和为 $N_c = (i-j)w_1 + jw_2$ 且必须小于 L^2 以避免虚警, 因此得到:

$$i \leq L^2 - 1 \quad (6)$$

$$j \leq \min\left\{\left\lfloor \frac{L^2 - 1 - i\omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right\rfloor, i\right\} \quad (7)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

通过上面的分析, 可以推得总的虚警概率和检测概率如式(8)(9)所示:

$$Q_f' = 1 -$$

$$\sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^{J_i} \Pr(N_0 = N - i, N_1 = i - j, N_2 = j, N_3 = 0 | H_0) = 1 - \sum_{i=0}^I \binom{N}{i} (1 - P_{f1})^{N-i} \left\{ \sum_{j=0}^{J_i} \binom{i}{j} (P_{f1} - P_{f2})^{i-j} (P_{f2} - P_{f3})^j \right\} \quad (8)$$

$$Q_d' = 1 -$$

$$\sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^{J_i} \Pr(N_0 = N - i, N_1 = i - j, N_2 = j, N_3 = 0 | H_1) = 1 - \sum_{i=0}^I \binom{N}{i} (1 - P_{d1})^{N-i} \left\{ \sum_{j=0}^{J_i} \binom{i}{j} (P_{d1} - P_{d2})^{i-j} (P_{d2} - P_{d3})^j \right\} \quad (9)$$

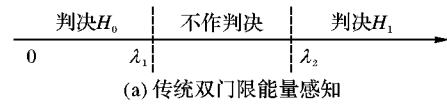
其中: $I = L^2 - 1, J_i = \min\left\{\left\lfloor \frac{L^2 - 1 - i\omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right\rfloor, i\right\}$, 而 P_{f1}, P_{f2}, P_{f3} 及 P_{d1}, P_{d2}, P_{d3} 分别由式(3)及式(4)得到。

2.2 新型的双门限协作频谱感知算法

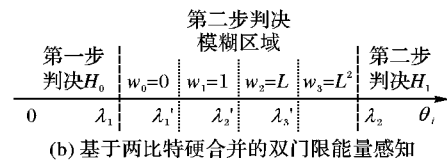
在传统的两门限协作频谱感知算法中, 每个认知用户接收到的能量 θ_i 和预先设定好的门限值 λ_1, λ_2 进行比较, 根据比较的结果进行局部判决^[9], 如图 2(a) 所示。

由图 2(a) 可以看出, 当认知用户 i 接收的能量 $\theta_i > \lambda_2$ 时判决主用户存在; 当 $\theta_i < \lambda_1$ 时判决主用户不存在; 当 $\lambda_1 < \theta_i < \lambda_2$ 时认为该能量值的大小不足以做出主用户信号是否存在的判决, 因此不向融合中心发送任何判决信息。

此值得注意的是, 当认知用户数目很少而且所有用户均经历深度衰落时, 很可能所有用户的接收能量值均落在双门限之间从而发生感知失败。本文提出的基于两比特硬合并的双门限能量感知算法则能够很好地解决这个问题, 如图 2(b) 所示。



(a) 传统双门限能量感知



(b) 基于两比特硬合并的双门限能量感知

图2 传统双门限及新型双门限能量感知算法原理

算法具体执行流程为:

1) 第一步感知。首先每个认知用户独立进行频谱感知, 当 $\lambda_1 < \theta_i < \lambda_2$ 时暂不作判决, 反之则根据 θ_i 的大小作出局部判决: 当 $\theta_i > \lambda_2$ 时判决主用户存在; 当 $\theta_i < \lambda_1$ 时判决主用户不存在, 得到判决结果 L_i 。其次各个用户把局部判决信息发送至融合中心, 则融合中心收到的本地判决如下:

$$L_i = \begin{cases} 0, & 0 < \theta_i < \lambda_1 \\ 1, & \theta_i > \lambda_2 \end{cases} \quad (10)$$

2) 第二步感知。当融合中心没有收到任何局部判决信息, 即所有认知用户均落在双门限之间时, 说明第一步感知失败。此时马上启动第二步感知, 将所有能量位于模糊区域的认知用户采用 2.1 节介绍的两比特硬合并算法进行本地协作检测, 然后将所得到的两比特判决信息 α_i (表示认知用户接收到的能量处于中间的哪个区域) 发送至融合中心, 则融合中心收到的判决如下:

$$L_i = \alpha_i; \lambda_1 < \theta_i < \lambda_2 \quad (11)$$

3) 融合中心收到本地判决信息后, 根据“OR”准则分别对两步感知做出最终判决。具体过程为: 对于第一步感知, 根据“OR”准则, 融合中心只要收到任意 1 个用户的 1 比特信

息,就判决主用户存在或不存在(1表示PU存在,0表示PU不存在);对于第二步感知,各个认知用户将2比特的本地判决信息发送给融合中心后,根据“OR”准则,只要有1个用户的能量落在区域3,或者 L 个用户的能量落在区域2,或者 L^2 个用户的能量落在区域1时都判决为主用户存在,否则判决主用户不存在。

基于以上分析,我们接下来讨论该算法的感知性能。首先分析算法的平均感知比特位,假设有 N 个认知用户参与协作感知, T_K 和 T_{N-K}' 分别代表 K 个认知用户报道1比特判决信息和 $N-K$ 个用户不报道判决信息的事件,则有^[9]:

$$P\{T_K\} = [1 - P(\lambda_1 < \theta_i < \lambda_2)]^K \quad (12)$$

$$P\{T_{N-K}'\} = [P(\lambda_1 < \theta_i < \lambda_2)]^{N-K} \quad (13)$$

当 $K=0$ 时,有 $P\{T_N'\} = [P(\lambda_1 < \theta_i < \lambda_2)]^N$,此时所有认知用户均落在模糊区域,即第一步感知失败,因此启动第二步感知,将所有位于模糊区域的认知用户采用两比特硬合并算法进行本地协作检测。由文献[15]可知,采用两比特硬合并算法需要每个认知用户向融合中心发送两比特判决信息来表示它接收到的能量属于哪个区域,当用户数较多时消耗比特位仍然较多,而本文中的新算法则是当发生感知失败时才采用两比特硬合并算法,即每个认知用户需要向融合中心反馈的比特位与感知失败的概率有关,因此消耗的平均比特位更小。

假设 $P_1 = P\{H_1\}$ 及 $P_0 = P\{H_0\}$ 分别代表主用户存在与不存在的先验概率,可求得算法的平均感知比特位为:

$$\begin{aligned} K_{avg} = & P_0 \sum_{k=1}^N K \binom{N}{K} P\{T_K | H_0\} P\{T_{N-K}' | H_0\} + \\ & 2N \cdot P_0 P\{T_N' | H_0\} + \\ & P_1 \sum_{k=1}^N K \binom{N}{K} P\{T_K | H_1\} P\{T_{N-K}' | H_1\} + \\ & 2N \cdot P_1 P\{T_N' | H_1\} \end{aligned} \quad (14)$$

因此归一化的平均感知比特位为:

$$K_{navg} = K_{avg}/N = 1 - P_0 \Delta_0 - P_1 \Delta_1 + 2P_0 \Delta_0^N + 2P_1 \Delta_1^N \quad (15)$$

其中: $\Delta_0 = P\{\lambda_1 < \theta_i < \lambda_2 | H_0\}$, $\Delta_1 = P\{\lambda_1 < \theta_i < \lambda_2 | H_1\}$, 它们分别表示假设 H_0 和 H_1 条件下单个认知用户不报道判决信息的概率。

接下来分析推导新算法在AWGN信道下的检测概率和虚警概率。假定认知用户与融合中心之间的控制信道是理想信道,设 $F(\lambda)$ 和 $G(\lambda)$ 分别表示假设 H_0 和 H_1 条件下能量值 θ_i 的累积分布函数,即有^[11]:

$$F(\lambda) = \int_0^\lambda f(\theta_i | H_0) d\theta_i = 1 - \frac{\Gamma(m, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(m)} \quad (16)$$

$$G(\lambda) = \int_0^\lambda f(\theta_i | H_1) d\theta_i = 1 - Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (17)$$

显然 $\Delta_0 = F(\lambda_2) - F(\lambda_1)$, $\Delta_1 = G(\lambda_2) - G(\lambda_1)$ 。

这里设定 β_0 和 β_1 分别表示假设 H_0 和 H_1 条件下第一步感知失败的概率,如下所示:

$$\beta_0 \triangleq P\{K=0 | H_0\} = (F(\lambda_2) - F(\lambda_1))^N \quad (18)$$

$$\beta_1 \triangleq P\{K=0 | H_1\} = (G(\lambda_2) - G(\lambda_1))^N \quad (19)$$

显然有 $\beta_0 = \Delta_0^N$, $\beta_1 = \Delta_1^N$,由此可以推导出两步感知总的虚警概率和检测概率为:

$$\begin{aligned} Q_f = & P\{L=1, K \geq 0 | H_0\} = \\ & P\{K \geq 1 | H_0\} P\{L=1 | H_0, K \geq 1\} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & P\{K=0 | H_0\} P\{L=1 | H_0, K=0\} = \\ & (1 - \beta_0)(1 - P_A) + \beta_0 Q_f' \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} Q_d = & P\{L=1, K \geq 0 | H_1\} = \\ & P\{K \geq 1 | H_1\} P\{L=1 | H_1, K \geq 1\} + \\ & P\{K=0 | H_1\} P\{L=1 | H_1, K=0\} = \\ & (1 - \beta_1)(1 - P_B) + \beta_1 Q_d' \end{aligned} \quad (21)$$

这里 $L=1$ 或0分别表示融合中心最终判决主用户存在或不存在, Q_f' 和 Q_d' 分别表示两比特硬合并算法的虚警概率和检测概率,如式(8)(9)所示。而 $P_A = P\{L=0 | H_0, K \geq 1\}$, $P_B = P\{L=0 | H_1, K \geq 1\}$ 分别表示假设 H_0 和 H_1 条件下所有 K 个用户判决为主用户不存在而其他 $N-K$ 个用户不作决策的概率,因此可以求得:

$$\begin{aligned} P_A = & \sum_{k=1}^N K \binom{N}{K} F(\lambda_1)^K (F(\lambda_2) - F(\lambda_1))^{N-K} = \\ & \sum_{k=0}^N \binom{N}{K} F(\lambda_1)^K (F(\lambda_2) - F(\lambda_1))^{N-K} - \\ & (F(\lambda_2) - F(\lambda_1))^N = F(\lambda_2)^N - \beta_0 \end{aligned} \quad (22)$$

同理可求得:

$$P_B = G(\lambda_2)^N - \beta_1 \quad (23)$$

将式(22)(23)分别代入式(20)(21)可求得新的双门限协作频谱感知算法的虚警概率和检测概率如下所示:

$$Q_f = (1 - \beta_0)(1 - F(\lambda_2)^N + \beta_0) + \beta_0 Q_f' \quad (24)$$

$$Q_d = (1 - \beta_1)(1 - G(\lambda_2)^N + \beta_1) + \beta_1 Q_d' \quad (25)$$

仿真分析

下面基于两比特硬合并的双门限(TBHCDT)协作频谱感知算法性能进行Matlab仿真,并与传统的双门限(CDT)协作频谱感知算法以及基于信用度的双门限(RBDT)协作频谱感知算法的性能曲线进行比较。设置AWGN信道下共同仿真参数为: $N=10, m=5, \gamma=10$ dB, $P_0=0.5, P_1=0.5, L=3$ 。图3表示TBHCDT算法、RBDT算法和CDT算法的检测概率和虚警概率曲线,此时设置参数 $\Delta_0=0.1$ 。

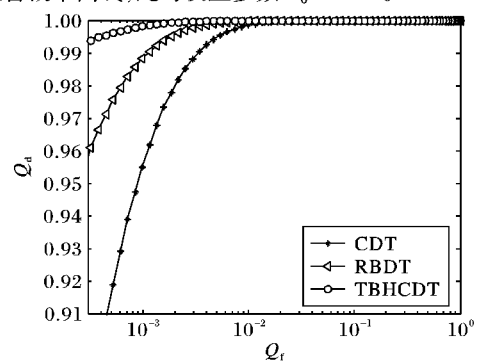


图3 TBHCDT、RBDT及CDT算法的ROC对比曲线($\Delta_0=0.1$)

由图3可以看出,与CDT算法和RBDT算法相比,本文提出的TBHCDT算法的感知性能得到显著提高,例如当 $Q_f=0.001$ 时,TBHCDT算法的检测概率分别比CDT算法和RBDT算法提高5%和1%;当 $Q_f=0.0002$ 时,TBHCDT算法的检测概率分别比CDT和RBDT算法提高21%和6%。明显可以看出虚警概率越小,TBHCDT算法的检测概率提高得越多,这在实际应用中是非常有用的。

图4表示在不同感知失败概率条件下($\beta_0=0, 0.001, 0.01, 0.1$)TBHCDT算法及CDT算法的归一化平均感知比特位 K_{navg} 与 Q_f 的性能对比曲线。

由图4可以看出,当 $\beta_0=0.001, 0.01, 0.1$ 时,与传统1比

特算法($\beta_0 = 0$)相比,无论是TBHCDT算法还是CDT算法, K_{navg} 均大大减小,且随着 β_0 的增加, K_{navg} 降低得越快,因此解决了认知无线电系统带宽受限问题。例如当 $Q_i = 0.01$,TBHCDT算法中 $\beta_0 = 0.001$ 及 $\beta_0 = 0.01$ 时的 K_{navg} 分别比传统1比特算法的 K_{navg} 降低了大约51%及55%,而CDT算法中 $\beta_0 = 0.001$ 及 $\beta_0 = 0.01$ 时的 K_{navg} 分别比传统1比特算法的 K_{navg} 降低了大约52%及72%。当然这里可以看出本文提出的TBHCDT算法相对于CDT算法来说, K_{navg} 略有增加,这是由于发生感知失败时,对所有位于模糊区域的认知用户采用两比特硬合并算法进行协作检测所耗费的比特数决定的,是为了解决感知失败问题所付出的代价。但是可以看到相对于感知性能的显著提高以及感知失败问题的解决,TBHCDT算法以平均感知比特位略微提高为代价是完全值得的。

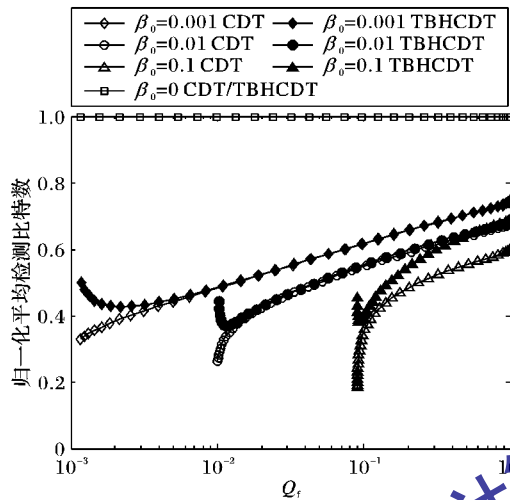


图4 不同 β_0 时TBHCDT及CDT的 K_{navg} 对比曲线

图5表示当 $\Delta_0 = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ 时,TBHCDT算法及CDT算法的归一化平均感知比特位 K_{navg} 与 Q_i 的性能对比曲线。可以看出,当 $\Delta_0 = 0.1, 0.2, 0.3$ 时,与传统1比特算法($\Delta_0 = 0$)相比,可以得到与图4相似的结论,例如当 $Q_i = 0.005$,TBHCDT算法中 $\Delta_0 = 0.1$ 及 $\Delta_0 = 0.2$ 时的 K_{navg} 分别比传统1比特算法的 K_{navg} 降低了大约34%及39%,而CDT算法中 $\Delta_0 = 0.1$ 及 $\Delta_0 = 0.2$ 时的 K_{navg} 分别比传统1比特算法的 K_{navg} 降低了大约35%及40%。可以看出TBHCDT算法相对于CDT算法来说, K_{navg} 仍然略有增加,但是随着 Q_i 的增大,TBHCDT算法与CDT算法的 K_{navg} 差距逐渐缩小。

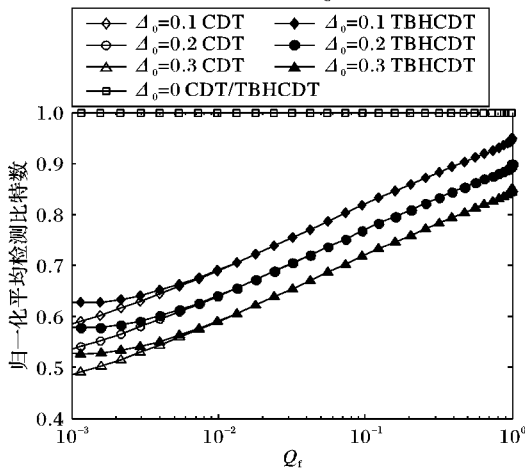


图5 不同 Δ_0 时TBHCDT及CDT的 K_{navg} 对比曲线

4 结语

本文针对传统认知无线电双门限协作频谱感知在可靠性

和带宽受限上存在的不足,提出一种新型的双门限协作频谱感知算法。文章详细分析了新算法的执行流程并推导出了算法的检测概率和虚警概率公式,通过在AWGN信道下的仿真分析表明,新算法仅以平均感知比特位略微提高为代价,不仅解决了传统双门限的感知失败问题,而且在虚警概率较小时显著提升了感知性能,具有一定的理论价值和实际应用前景。

本文主要验证了在预先固定门限下基于两比特硬合并的双门限协作频谱感知算法的有效性,为了使算法对多变的无线环境具有更好的鲁棒性,下一步的研究重点将主要放在双门限的优化设置方法上。

参考文献:

- [1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: Making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6 (4): 13-18.
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio: Brain-empower wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [3] 纪莎莎, 刘学云, 赵平平, 等. 认知无线电中的合作频谱感知性能仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 193-197.
- [4] QUAN Z, CUI S G, SAYED A H. An optimal strategy for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [C]// GLOBECOM'07: Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE, 2007: 2947-2951.
- [5] 石磊, 蒋琳琳, 张中兆. 认知无线电空闲频谱的联合检测算法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(1): 38-42.
- [6] 王海军, 粟欣, 王京. 认知无线电中协作用户数的优化[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(5): 777-783.
- [7] ZHU JIANG, XU ZHENGUANG, WANG FURONG, et al. Double threshold energy detection of cooperative spectrum sensing in cognitive radio [C]// The 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. Piscataway: IEEE, 2008: 1-5.
- [8] HIEP V-V, INSOO K. Cooperative spectrum sensing with double adaptive energy thresholds and relaying users in cognitive radio [C]// AICT: Sixth Advanced International Conference on Telecommunications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 52-56.
- [9] SUN CHUNHUA, ZHANG WEI, LETAIEF K B. Cooperative spectrum sensing for cognitive radios under bandwidth constraints [C]// WCNC 2007: IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE, 2007: 1-5.
- [10] 朱江, 黄本雄, 王芙蓉, 等. 认知无线网络中的一种新型协作频谱感知方法[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(2): 193-197.
- [11] ZHANG L, XIA S Q. A new cooperative spectrum sensing algorithm for cognitive radio networks [C]// ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Sanya, China: [s. n.], 2009: 107-110.
- [12] 张继良, 汪洋, 刘法, 等. 控制信道受限的认知无线电联合频谱感知[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(6): 1113-1116.
- [13] DIGHAM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [C]// IEEE International Conference on Communications. Washington, DC: IEEE Communications Society, 2003: 3575-3579.
- [14] DUAN JIAQI, LI YONG. Performance analysis of cooperative spectrum sensing in different fading channels [C]// ICCET 2010: The 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. Chengdu, China: [s. n.], 2010: 64-68.
- [15] MA JUN, ZHAO GUODONG, LI YE G. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7 (11): 4502-4507.