

认知无线电系统的动态双门限协作能量检测算法^①吴进波^{②*} 罗 涛* 林 霏** 乐光新*

(* 北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

(** 山东轻工业学院电子信息与控制学院 济南 250353)

摘 要 认知无线电系统中,认知用户间协作检测有利于提高频谱检测的准确性。基于 OR(或)协作方式和多门限能量检测算法,提出了一种动态双门限协作能量检测算法,并根据认知用户接收到的主用户信噪比确定检测门限。理论分析和仿真结果表明,该算法可以有效提高频谱检测概率,降低系统漏检概率。

关键词 认知无线电,协作检测,动态双门限检测

0 引 言

认知无线电系统的频谱检测方法^[1]主要有匹配滤波器检测、能量检测和循环平稳检测。匹配滤波器检测要求事先知道主用户信号的特征(如调制方式、脉冲成型以及数据包格式等),否则,匹配滤波器的性能会有明显下降;能量检测算法虽不需要事先知道主用户信号的特征,但由于噪声信号的不确定性和阴影衰落等影响,检测性能会受到一定限制;调制后的信号一般都具有循环平衡特性,而噪声不具备这一特性,所以循环平稳检测算法能够较好地检测出主用户信号的出现,但实现复杂度较高且需要比较长的观测时间,对主用户可能产生的干扰比较明显。相对而言,由于能量检测算法的复杂度较低且易于实现,因而广泛应用于主用户信号的检测^[2-5]。

能量检测算法中,单门限能量检测算法对噪声等干扰比较敏感,多门限能量检测算法虽能降低认知用户与主用户间的碰撞概率,但是空闲频谱未得到充分应用,频谱使用效率还有提升空间。多个认知用户间协作检测^[6,7]有助于改善单用户能量检测算法的不足(阴影衰落、隐藏站点、暴露站点等)。文献[8-11]用传感器作为检测工具,采用单门限等增益合并的协作检测算法;文献[12]提出两门限能量检测方法,但是没有给出门限如何确定,并且,没有给出检测结果处于两门限之间时的处理方法,这很

可能造成对主用户的干扰。因此,结合多门限能量检测算法和协作方法,本文提出一种动态双门限协作能量检测算法,该算法能使认知用户根据接收到主用户的信噪比动态地确定检测门限,每个认知用户可独立检测主用户信号,然后把本地检测结果发送到中心节点,当检测结果落在两门限之间时,把检测到的检测值发到中心节点,中心节点使用最大比合并的数据融合方法做出判决,最后,中心节点使用 OR 准则进行最后判决融合。理论分析和仿真结果表明,动态双门限协作能量检测算法具有更优的频谱检测概率,同时,系统的漏检概率也有明显下降。

1 双门限能量检测及门限值的确定

传统的能量检测方法多采用如图 1(a)所示的单门限能量检测算法。

当认知用户接收到主用户的能量大于门限 V_{th} 时,判决为有主用户信号出现,否则,判决为无主用户信号出现(分别用 H_1 和 H_0 来描述),这样可求出单个认知用户的检测概率、虚检概率和漏检概率^[13],它们分别是:

$$p_d = \Pr\{V > V_{th} | H_1\} = Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{V_{th}}) \quad (1)$$

$$p_f = \Pr\{V > V_{th} | H_0\} = \frac{\Gamma(u, V_{th}/2)}{\Gamma(u)} \quad (2)$$

$$p_m = \Pr\{V > V_{th} | H_1\} = 1 - p_d \quad (3)$$

其中, γ 表示认知用户接收到主用户信号信噪比的

① 863 计划(2007AA10Z235),国家自然科学基金(60872049, 60871042)和教育部留学归国人员教学、科研建设项目资助。

② 男,1974 年生,博士生;研究方向:通信与信息系统;联系人, E-mail: hyxwu@163.com

(收稿日期:2009-04-17)

统计平均, $Q_u(a, b)$ 表示阶数为 u 的归一化 marcum 函数, $\Gamma(a, b)$ 表示非完全 gamma 函数, $\Gamma(a)$ 表示完全 gamma 函数。



图 1 能量检测

多个认知用户使用单门限协作检测时,假设有一个中心节点接收认知用户发来的检测结果,然后中心节点对接收到的检测结果进行协作检测。常用的协作规则是 OR 准则^[9],即至少有一个认知用户检测到有主用户信号出现,就判决为有主用户信号出现,只有当所有认知用户都检测到没有主用户信号出现时,才判决为没有主用户信号出现。根据 OR 准则,可求出 N 个认知用户使用单门限协作检测的检测概率、虚检概率和漏检概率:

$$Q_d = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_{d,i}) \quad (4)$$

$$Q_f = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_{f,i}) \quad (5)$$

$$Q_m = \prod_{i=1}^N p_{m,i} \quad (6)$$

其中 $p_{d,i}$, $p_{f,i}$, $p_{m,i}$ 分别表示第 i 个认知用户的检测概率、虚检概率和漏检概率,分别对应着式(1)、(2)、(3)。

多门限能量检测算法是在单门限能量检测算法的基础上增加检测门限的数量,变成多门限能量检测算法,如图 1(b)所示,图 1(b)中,有两个检测门限 V_{th0} 和 V_{th1} ,当 $V > V_{th1}$ 或者 $V < V_{th0}$ 时,检测出主用户信号出现或没有出现;当 $V_{th0} < V \leq V_{th1}$ 时,记下本次的检测值 V' 。

当 N 个认知用户使用双门限协作检测时,假设每个认知用户的能量检测取样值为 M ,则第 j 个认知用户接收到第 i 个取样信号 U_{ji} ($1 \leq j \leq N, 1 \leq i \leq M$) 可表示为

$$U_{ji} = \begin{cases} n_{ji} & H_0 \\ \sqrt{\gamma_j} u_{ji} + n_{ji} & H_1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\sqrt{\gamma_j} u_{ji}$ 表示接收到平均功率为 γ_j 的主用户信号, n_{ji} 表示高斯白噪声且均值为零,方差为 1。假

设对不同的 i, j , u_{ji} 是独立同分布的,且是均值为零,方差为 1 的高斯随机变量,假设认知用户与主用户之间是平坦瑞利衰落信道,根据中心极限定理,认知用户接收到主用户信号的取样信号近似服从高斯分布。假设噪声与主用户信号相互独立,因此可认为 γ_j 是第 j 个认知用户在当前检测周期内接收到的瞬时信噪比,那么接收信号 U_{ji} 服从高斯分布,并表示为

$$U_{ji} \sim \begin{cases} N(0, 1) & H_0 \\ N(0, 1 + \gamma_j) & H_1 \end{cases} \quad (8)$$

每个认知用户进行独立检测,那么,第 j 个认知用户接收到的检测能量表示为

$$Y_j = \sum_{i=1}^M U_{ji}^2 \sim \begin{cases} b_{j0} & H_0 \\ (1 + \gamma_j) b_{j1} & H_1 \end{cases} \quad (9)$$

其中,随机变量 b_{j0} , b_{j1} 分别服从自由度为 M 的中心 χ^2 分布。假设在 H_0 或 H_1 状态下接收到的 Y_j 是互相独立的,即有 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_N)$, 根据 Neyman-Pearson 定理,对应的似然比可表示为 $\Lambda(Y) = \frac{\Pr(Y | H_1)}{\Pr(Y | H_0)}$, 由于 Y_j 是相互独立的,所以有 $\Lambda(Y) = \prod_{j=1}^N \frac{\Pr(Y_j | H_1)}{\Pr(Y_j | H_0)}$, 又由于 Y_j 服从 χ^2 分布,所以有

$$\Pr(Y_j | H_0) = \frac{(\frac{1}{2})^{M/2}}{\Gamma(M/2)} Y_j^{M/2-1} e^{-\frac{1}{2}Y_j} \quad (10)$$

$$\Pr(Y_j | H_1) = \frac{1}{1 + \gamma_j} \frac{(\frac{1}{2})^{M/2}}{\Gamma(M/2)} \left(\frac{Y_j}{1 + \gamma_j}\right)^{M/2-1} e^{-\frac{1}{2}(\frac{Y_j}{1 + \gamma_j})} \quad (11)$$

所以有

$$\begin{aligned} \Lambda(Y) &= \prod_{j=1}^N \frac{\Pr(Y_j | H_1)}{\Pr(Y_j | H_0)} \\ &= \left(\prod_{j=1}^N \frac{1}{1 + \gamma_j} \right)^{M/2} e^{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \frac{Y_j}{1 + \gamma_j}} \end{aligned} \quad (12)$$

认知无线电系统中,为了保证主用户优先占用频谱和尽量避免认知用户对主用户的干扰,通常情况下,对认知用户的虚检概率和漏检概率进行界限设定,如果认知用户的虚检概率设定为不得高于 α , 即 $p_f \leq \alpha$, 漏检概率不得高于 β , 即 $p_m \leq \beta$, 则可以求出两门限检测算法的两个检测门限^[14]:

$$\eta_0 = \frac{\beta}{1 - \alpha} \quad (13)$$

$$\eta_1 = \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (14)$$

即当 $\Lambda(Y) < \eta_0$ 时,判决落在 H_0 , 当 $\Lambda(Y) > \eta_1$ 时,判决落在 H_1 , 当 $\eta_0 \leq \Lambda(Y) \leq \eta_1$ 时,不能确定

检测结果。分别代入 $\Lambda(Y)$ 并化简,可得如下结论:

当 $\sum_{j=1}^N \frac{\gamma_j}{1+\gamma_j} Y_j > 2 \cdot \ln \eta_1 + M \cdot \sum_{j=1}^N \ln(1+\gamma_j)$ 时, 判决为 H_1 ; 当 $\sum_{j=1}^N \frac{\gamma_j}{1+\gamma_j} Y_j < 2 \cdot \ln \eta_0 + M \cdot \sum_{j=1}^N \ln(1+\gamma_j)$ 时, 判决为 H_0 ; 当 $\sum_{j=1}^N \frac{\gamma_j}{1+\gamma_j} Y_j$ 落在二者之间时,则使用其它检测方法。取

$$V_{th1} = 2 \cdot \ln \eta_1 + M \cdot \sum_{j=1}^N \ln(1+\gamma_j) \quad (15)$$

$$V_{th0} = 2 \cdot \ln \eta_0 + M \cdot \sum_{j=1}^N \ln(1+\gamma_j) \quad (16)$$

从而得到根据认知用户接收到的主用户信号的信噪比来确定的动态检测门限值,从(15),(16)可知,当 $N = 1$ 时,就是独立检测时检测门限。

假设在 H_0 状态下判决落在 $(V_{th0}, V_{th1}]$ 内和在 H_1 状态下判决落在 $(V_{th0}, V_{th1}]$ 内的不确定概率^[12] 分别为

$$\Delta_0 = \Pr\{V_{th0} < V' \leq V_{th1} | H_0\} \quad (17)$$

$$\Delta_1 = \Pr\{V_{th0} < V' \leq V_{th1} | H_1\} \quad (18)$$

为了研究检测结果落在区间 $(V_{th0}, V_{th1}]$ 时对系统检测性能的影响,双门限单用户独立检测时的检测概率、漏检概率、虚检概率分别求得如下:

$$p'_{d,i} = \Pr\{V'_i > V_{th1} | H_1\} = Q_u(\sqrt{2\gamma'}, \sqrt{V_{th1}}) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} p'_{m,i} &= \Pr\{V'_i \leq V_{th0} | H_1\} \\ &= 1 - \Pr\{V_{th0} < V'_i \leq V_{th1} | H_1\} \\ &\quad - \Pr\{V'_i > V_{th1} | H_1\} \\ &= 1 - \Delta_{1,i} - p'_{d,i} \end{aligned} \quad (20)$$

$$p'_{f,i} = \Pr\{V'_i > V_{th1} | H_0\} = \frac{\Gamma(u', V_{th1}/2)}{\Gamma(u')} \quad (21)$$

其中, V'_i 是认知用户得到的检测值。

2 双门限协作能量检测

结合协作思想和多门限能量检测算法,提出一种基于多用户协作的动态双门限协作能量检测算法:假设认知网络是集中式的,每个认知用户把检测情况上报给中心节点,由中心节点进行最终协作检测。首先,每个认知用户独立检测主用户信号,然后,把本地检测结果发送到中心节点,当检测结果落在两门限之间时,就把检测值发到中心节点,中心节点使用最大比合并的融合方法进行处理,最后,中心节点使用 OR 准则进行最终判决融合。使用 OR 准

则是为了最大限度避免对主用户可能产生的干扰。

双门限协作能量检测算法描述如下:

第一步:每个认知用户独立检测。

当第 i 个认知用户能够检测出主用户信号是否出现时,把本地检测结果送给中心节点;当第 i 个认知用户的检测结果落在 $(V_{th0}, V_{th1}]$ 时,认知用户把检测值 V_i 发给中心节点。用 R_i 表示第 i 个认知用户送给中心节点的信息, S_i 表示第 i 个认知用户的本地检测结果, V_i 表示第 i 个认知用户检测结果落在区间 $(V_{th0}, V_{th1}]$ 中的检测值。 R_i 表示如下:

$$R_i = \begin{cases} V_i & V_{th0} < V_i \leq V_{th1} \\ S_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

且有

$$S_i = \begin{cases} 0 & 0 \leq V_i \leq V_{th0} \\ 1 & V_i > V_{th1} \end{cases} \quad (23)$$

$S_i = 0$ 表示没有主用户信号出现, $S_i = 1$ 表示检测到主用户信号出现。

第二步:假设 N 个认知用户中有 $N - K$ 个认知用户的检测结果落在 $(V_{th0}, V_{th1}]$ 中,则中心节点收到 $N - K$ 个检测值。中心节点对 $N - K$ 个检测值按最大比合并进行数据融合:

$$A = \begin{cases} 0 & 0 \leq \sum_{i=1}^N w_i \cdot V_i \leq V_{th} \\ 1 & \sum_{i=1}^N w_i \cdot V_i > V_{th} \end{cases} \quad (24)$$

其中 $w_i = \frac{\gamma_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^{N-K} \gamma_j^2}}$ 是最大比合并的加权因子。

中心节点接收到的能量分别服从自由度为 $N - K$ 的中心和非中心 χ^2 分布,因此有

$$\sum_{i=1}^{N-K} w_i \cdot V_i \sim \begin{cases} \chi_{(N-K)}^2 & H_0 \\ \chi_{(N-K)}^2(2 \cdot \sum_{i=1}^N (w_i \cdot \gamma_i)) & H_1 \end{cases} \quad (25)$$

第三步:中心节点使用 OR 准则对接收到的本地检测结果与检测值融合后的检测结果进行最终判决,最终检测判决如下:

$$RES = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^K S_i + A > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

$RES = 1$, 表示最终检测有主用户信号出现,对应 H_1 ; $RES = 0$, 表示最终检测没有主用户出现,对应

H_0 。

根据上述协作算法,中心节点最终协作检测的漏检概率 Q'_m 、检测概率 Q'_d 和虚检概率 Q'_f 分别表示如下(计算过程见附录 I):

$$Q'_m = \sum_{k=0}^{N-1} C_N^k \cdot \prod_{i=1}^k p'_{m,i} \cdot \prod_{l=k+1}^N \Delta_{1,l} \cdot [1 - Q_{(N-K) \cdot u'} (\sqrt{2 \cdot \sum_{j=1}^{N-K} w_j \cdot \gamma_j}, \sqrt{V_{th}})] + \prod_{n=1}^N p'_{m,n} \quad (27)$$

$$Q'_d = \Pr\{RES = 1 | H_1\} = 1 - \Pr\{RES = 0 | H_1\} = 1 - Q'_m \quad (28)$$

$$Q'_f = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \Delta_{0,i} - p'_{f,i}) - \sum_{k=0}^{N-1} C_N^k \cdot \prod_{i=1}^k (1 - \Delta_{0,i} - p'_{f,i}) \cdot \prod_{n=k+1}^N \Delta_{0,n} \cdot [1 - \frac{\Gamma[(N-k) \cdot u', V_{th}/2]}{\Gamma[(N-k) \cdot u']}] \quad (29)$$

从式(27)、(28)、(29)可知, $\Delta_{0,i}, \Delta_{1,i}, w_i$ 对 Q'_m, Q'_d, Q'_f 结果有着直接的影响。比较式(6)和(27),可以求出 $Q'_m < Q_m$ (证明见附录 II), 所以有 $Q'_d < Q_d$, 即双门限协作检测概率大于单门限协作检测概率。

3 仿真分析

本节通过计算机仿真验证动态双门限协作能量检测算法的优越性。

在蒙特卡罗仿真中,参加协作的认知用户数 $N = 10$, 自由度 $u = u' = 5$, 不确定概率 $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i}$, 使用 5000 个信号,主用户使用信道的概率为 50%, 信道模型采用平坦瑞利衰落信道。

图 2、图 3 给出了 $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i}$ 分别取 0.05、0.15 时, Q_d 与 Q_f 之间的变化关系曲线。由于双门限检测的检测概率门限值大于单门限检测概率门限值, 所以单用户独立检测时,单门限检测概率大于双门限检测概率;认知用户间协作检测时可以产生协作增益,所以无论是单门限还是双门限协作检测,协作检测概率都好于单用户独立检测;协作检测时,由于使用 OR 准则且中心节点进行两种数据融合,所以在计算漏检概率时,双门限能量检测算法的漏检门限值相对于单门限能量检测算法产生了下降,所以双门限能量检测的漏检概率小于单门能量检测算法的漏检概率,即双门限能量检测概率大于单门限能量检测概率。例如,在图 2 中,当 $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i} = 0.05, Q_f = 10^{-3}$ 时,双门限单用户独立检测概率是

20.44%,单门限单用户独立检测概率是 40.46%,单门限协作能量检测算法的检测概率是 69.78%,双门限协作能量检测概率是 86.79%,双门限协作能量检测比单门限协作能量检测的检测概率提高近 15 个百分点;在图 3 中,当 $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i} = 0.15$ 时,同样在 $Q_f = 10^{-3}$, 双门限协作能量检测的检测概率可以达到 93.15%,从仿真结果可得,双门限协作能量检测算法具有最好的测概率。

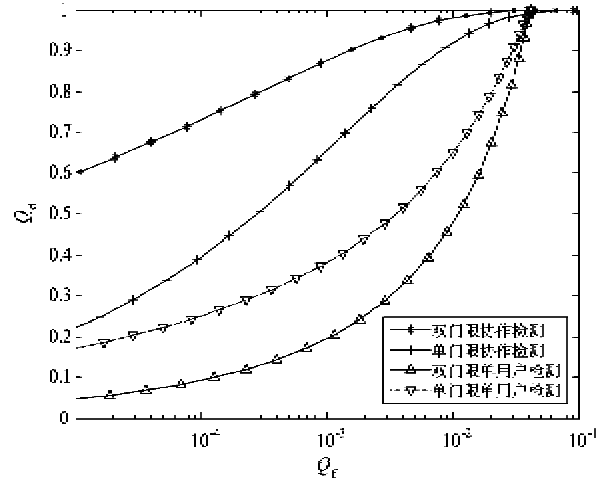


图 2 $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i} = 0.05$ 时 Q_d 和 Q_f 的关系

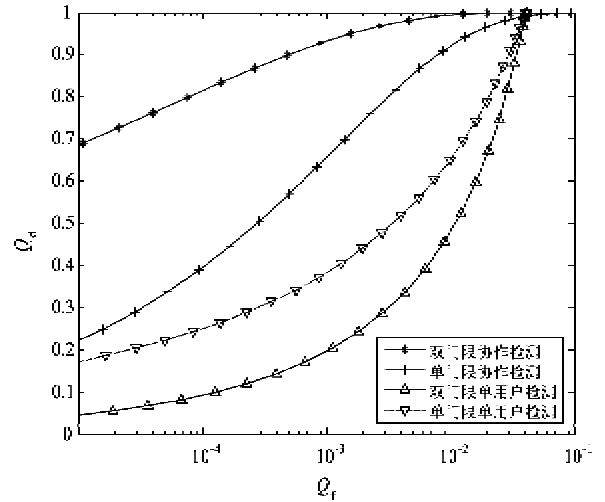


图 3 $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i} = 0.15$ 时 Q_d 和 Q_f 的关系

图 4、图 5 给出 $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i}$ 分别取 0.05、0.15 时, Q_m 与 Q_f 之间的变化关系曲线,双门限协作检测的漏检概率低于单门限协作检测的漏检概率,并且协作检测的漏检概率小于单用户独立检测。例如,在图 4 中,当 $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i} = 0.05, Q_f = 10^{-3}$ 时,单门限协作能量检测的漏检概率是 34.62%,双门限协作能量检测的漏检概率是 13.21%,双门限协作能

量检测比单门限协作能量检测的漏检概率下降近10个百分点;在图5中, $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i} = 0.15$, $Q_f = 10^{-3}$ 时,双门限协作能量检测的漏检概率减小到6.81%。从仿真结果可得,双门限协作能量检测算法的漏检概率低于单门限协作能量检测算法。

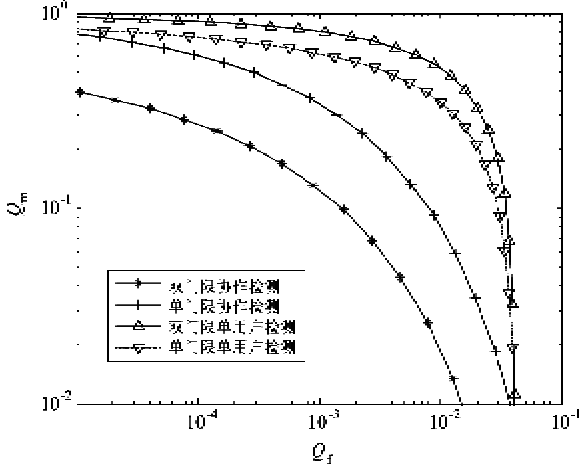


图4 $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i} = 0.05$ 时 Q_m 和 Q_f 的关系

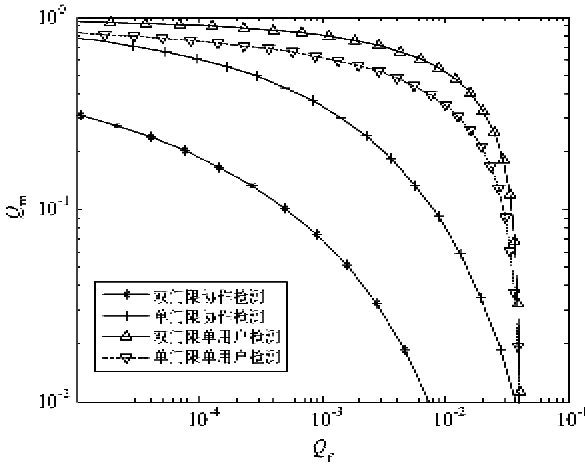


图5 $\Delta_{0,i} = \Delta_{1,i} = 0.15$ 时 Q_m 和 Q_f 的关系

4 结论

本文使用 OR 协作方式,综合使用两种数据融合方法,在中心节点使用最大比合并方法对所接收到的检测值进行融合,对基于协作的多门限能量检测算法进行研究,提出动态双门限协作能量检测算法并根据认知用户接收到的主用户信噪比动态确定检测门限,该算法能够提高频谱检测概率。通过理论分析和仿真分析得到了以下结论:第一,单个认知用户独立检测时,单门限检测性能好于双门限检测方法;第二,动态双门限协作能量检测算法比单门限

协作能量检测算法有更优的检测性能。如何处理检测结果落在不确定区域时情况是下一步的研究工作。

附录 I: 双门限最大比合并协作检测的漏检概率 Q'_m 、检测概率 Q'_d 和虚检概率 Q'_f 计算过程:

中心节点接收到 N 个认知用户的信息中,有 K 个认知用户的本地检测结果和 $N - K$ 个认知用户的检测值。本地检测结果的个数 K 服从二项分布,有:

$$\begin{aligned} \Pr\{K \leq k | H_0\} &= C_N^k \cdot [1 - \Pr\{V_{th0} \leq V_i \leq V_{th1} | H_0\}]^k \\ &\quad \cdot [\Pr\{V_{th0} \leq V_i \leq V_{th1} | H_0\}]^{N-k} \\ &= C_N^k \cdot (1 - \Delta_{0,i})^k \cdot (\Delta_{0,i})^{N-k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pr\{K \leq k | H_1\} &= C_N^k \cdot [1 - \Pr\{V_{th0} \leq V_i \leq V_{th1} | H_1\}]^k \\ &\quad \cdot [\Pr\{V_{th0} \leq V_i \leq V_{th1} | H_1\}]^{N-k} \\ &= C_N^k \cdot (1 - \Delta_{1,i})^k \cdot (\Delta_{1,i})^{N-k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q'_m &= \Pr\{RES = 0 | H_1\} \\ &= \Pr\{RES = 0, k \neq N | H_1\} \\ &\quad + \Pr\{RES = 0, k = N | H_1\} \\ &= \Pr\{\sum_{i=1}^k S_i = 0, k \neq N | H_1\} \\ &\quad \cdot \Pr\{A = 0, k \neq N | H_1\} \\ &\quad + \Pr\{\sum_{i=1}^k S_i = 0, k = N | H_1\} \\ &\quad \cdot \Pr\{A = 0, k = N | H_1\} \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} C_N^k \cdot \prod_{i=1}^k p'_{m,i} \cdot \prod_{i=k+1}^N \Delta_{1,i} \\ &\quad \cdot [1 - Q_{(N-k)} \cdot \sqrt{2 \cdot \sum_{j=1}^{N-k} (w_j \cdot \gamma_j)} \cdot \sqrt{V_{th}}] + \prod_{n=1}^N p'_{m,n} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q'_d &= \Pr\{RES = 1 | H_1\} \\ &= 1 - \Pr\{RES = 0 | H_0\} \\ &= 1 - Q'_m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q'_f &= \Pr\{RES = 1 | H_0\} \\ &= 1 - \Pr\{RES = 0 | H_0\} \\ &= 1 - \Pr\{RES = 0, k = N | H_0\} \\ &\quad - \Pr\{RES = 0, k \neq N | H_0\} \\ &= 1 - \prod_{i=1}^N \Pr\{V_i \leq V_{th0} | H_0\} \\ &\quad - \sum_{K=0}^{N-1} C_N^k \cdot \prod_{i=1}^k \Pr\{V_i \leq V_{th0} | H_0\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot \prod_{l=k+1}^N \Pr\{V_{th0} \leq V_l \leq V_{th1} \mid H_0\} \\
 & \cdot \Pr\left\{\sum_{j=1}^{N-k} (w_j \cdot V_j) \leq V_{th} \mid H_0\right\} \\
 & = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \Delta_{0,i} - p'_{f,i}) \\
 & \quad - \sum_{k=0}^{N-1} C_N^k \cdot \prod_{l=1}^k (1 - \Delta_{0,l} - p'_{f,l}) \\
 & \quad \cdot \prod_{n=k+1}^N \Delta_{0,n} \\
 & \quad \cdot \left[1 - \frac{\Gamma[(N-k) \cdot u', V_{th}/2]}{\Gamma[(N-k) \cdot u']}\right]
 \end{aligned}$$

附录 II: 用数学归纳法证明 $Q'_m < Q_m$

第一步: 两个认知用户协作检测时 ($N = 2$), 证明 $Q_m^{(2)} - Q_m^{(2)} < 0$

由式(6)可知当 $N = 2$ 时, 有 $Q_m^{(2)} = p_{m,1} \cdot p_{m,2} = (1 - p_{d,1}) \cdot (1 - p_{d,2})$, 把式(1)代入上式得:

$$\begin{aligned}
 Q_m^{(2)} &= (1 - Q_u(\sqrt{2 \cdot \gamma_1}, \sqrt{V_{th}})) \\
 & \quad \cdot (1 - Q_u(\sqrt{2 \cdot \gamma_2}, \sqrt{V_{th}})) \\
 &= 1 - Q_u(\sqrt{2 \cdot \gamma_1}, \sqrt{V_{th}}) - Q_u(\sqrt{2 \cdot \gamma_2}, \sqrt{V_{th}}) \\
 & \quad - Q_u(\sqrt{2 \cdot \gamma_1}, \sqrt{V_{th}}) \cdot Q_u(\sqrt{2 \cdot \gamma_2}, \sqrt{V_{th}})
 \end{aligned}$$

由式(27)可知: 当 $N = 2$ 时, 有:

$$\begin{aligned}
 Q_m^{(2)} &= C_2^0 \cdot \prod_{l=1}^2 \Delta_{1,l} \\
 & \quad \cdot [1 - Q_{2,u'}(\sqrt{2 \cdot \sum_{j=1}^2 (w_j \cdot \gamma_j)}, \sqrt{V_{th}})] \\
 & \quad + C_2^1 \cdot p'_{m,1} \prod_{l=2}^2 \Delta_{1,l} \\
 & \quad \cdot [1 - Q_{u'}(\sqrt{2 \cdot \gamma_1}, \sqrt{V_{th}})] \\
 & \quad + p'_{m,1} \cdot p'_{m,2}
 \end{aligned}$$

式(20)中取 $\Delta_{1,i} = \Delta_{0,i} = \Delta$ 代入上式化简可得:

$$\begin{aligned}
 Q_m^{(2)} &= \Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th1}}) + \Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_2}, \sqrt{V_{th1}}) \\
 & \quad - \Delta^2 \cdot Q_{2u}(\sqrt{2\sqrt{\gamma_1 + \gamma_2}}, \sqrt{V_{th}}) \\
 & \quad - 2\Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}}) \\
 & \quad + 2\Delta^2 \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}}) \\
 & \quad - 2\Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th1}}) \\
 & \quad + 2\Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th1}}) \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}}) \\
 & \quad + [1 - Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th1}})] \\
 & \quad \cdot [1 - Q_u(\sqrt{2\gamma_2}, \sqrt{V_{th1}})]
 \end{aligned}$$

取 $p_{f,i} = p'_{f,i}$, 由于 $u = u'$, 所以 $V_{th} = V_{th1}$, 假设:

$$\sqrt{V_{th}} = \sqrt{V_{th1}} = th, \text{ 那么:}$$

$$\begin{aligned}
 Q_m^{(2)} - Q_m^{(2)} &= \Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_2}, th) - \Delta^2 \cdot Q_{2u}(\sqrt{2\sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}}, th) \\
 & \quad - 3\Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, th) + 2\Delta^2 \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, th) \\
 & \quad + 2\Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, th) \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, th) \\
 &= \Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_2}, th) - \Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, th) \\
 & \quad - \Delta^2 \cdot Q_{2u}(\sqrt{2\sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}}, th) \\
 & \quad + 2\Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, th) \cdot [Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, th) + \Delta - 1]
 \end{aligned}$$

因为两个认知用户协作检测, 它们应该离的较近, 所以它们接收到信噪比近似相等, 即有: $\gamma_1 \approx \gamma_2$, 所以有:

$$\begin{aligned}
 \Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_2}, th) - \Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, th) &\approx 0 \\
 \Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_2}, th) - \Delta \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, th) \\
 & \quad - \Delta^2 \cdot Q_{2u}(\sqrt{2\sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}}, th) < 0
 \end{aligned}$$

且 $Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, th) + \Delta - 1 < 0$, 所以: $Q_m^{(2)} - Q_m^{(2)} < 0$, 即 $Q_m^{(2)} < Q_m^{(2)}$ 。

第二步: 假设 N 个认知用户协作检测时, $Q_m^{(N)} < Q_m^{(N)}$ 成立;

第三步: 证明当 $N + 1$ 个认知用户协作检测时, $Q_m^{(N+1)} < Q_m^{(N+1)}$ 也成立。

根据 III 有:

$$\begin{aligned}
 Q_m^{(N+1)} &= Q_m^{(N)} \cdot \Delta \cdot [1 - Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}})] \\
 & \quad + Q_m^{(N)} \cdot p'_m \\
 &= Q_m^{(N)} \cdot \Delta \cdot [1 - Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}})] \\
 & \quad + Q_m^{(N)} \cdot [1 - \Delta - Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th1}})] \\
 &= Q_m^{(N)} - Q_m^{(N)} \cdot \Delta \cdot Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}}) \\
 & \quad - Q_m^{(N)} \cdot Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th1}}) \\
 Q_m^{(N+1)} &= Q_m^{(N)} \cdot p_m = Q_m^{(N)} \cdot (1 - p_d) \\
 &= Q_m^{(N)} \cdot [1 - Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}})] \\
 Q_m^{(N+1)} - Q_m^{(N+1)} &= Q_m^{(N)} - Q_m^{(N)} \cdot \Delta \cdot Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}}) \\
 & \quad - Q_m^{(N)} \cdot Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th1}}) \\
 & \quad - (Q_m^{(N)} - Q_m^{(N)} \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}})) \\
 &= -\Delta \cdot Q_m^{(N)} \cdot Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}}) + Q_m^{(N)} - Q_m^{(N)} \\
 & \quad - Q_m^{(N)} \cdot Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th1}}) \\
 & \quad + Q_m^{(N)} \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}})
 \end{aligned}$$

令 $F = Q_m^{(N+1)} - Q_m^{(N+1)}$ 是关于 $\Delta \in [0, 1]$ 的函数, 则有:

$$\begin{aligned}
 F &= -\Delta \cdot Q_m^{(N)} \cdot Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}}) + Q_m^{(N)} - Q_m^{(N)} \\
 & \quad - Q_m^{(N)} \cdot Q_{u'}(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th1}})
 \end{aligned}$$

$$+ Q_m^{(N)} \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}})$$

$F' = -Q_m^{(N)} \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}})$, 由文中定义可知 $F' < 0$, 所以 F 是关于 Δ 的单调减函数, 所以有:

$$\begin{aligned} F_{\max} &= F(\Delta = 0) \\ &= Q_m^{(N)} - Q_m^{(N)} - Q_m^{(N)} \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th1}}) \\ &\quad + Q_m^{(N)} \cdot Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}}) \end{aligned}$$

当 $Q_f' = Q_f$ 时, 有 $V_{th1} = V_{th}$, 所以:

$$F_{\max} = (Q_m^{(N)} - Q_m^{(N)})[1 - Q_u(\sqrt{2\gamma_1}, \sqrt{V_{th}})]$$

由第二步: $Q_m^{(N)} - Q_m^{(N)} < 0$

所以 $Q_m^{(N+1)} - Q_m^{(N+1)} < 0$, 即 $Q_m' < Q_m$

参考文献

- [1] Ian Akyildiz F, Lee W, Mehmet C, et al. Next generation dynamic spectrum access cognitive radio wireless networks a survey. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159
- [2] Digham F, Simon M. On the energy detection of unknown signals over fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(1): 21-24
- [3] Sahin M, Guvenc I, Arslan H. Optimization of energy detector receivers for UWB systems. In: Proceedings of the Vehicular Technology Conference, Stockholm, Sweden: IEEE VTS, 2005. 1386-1390
- [4] Kostylev V. Energy detection of a signal with random amplitude. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, New Delhi, India, 2002. 1606-1610
- [5] Bovik A, Maragos P, Quatieri T. AM-FM energy detection and separation in noise using multiband energy operators. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(22): 3245-3265
- [6] Cabric S, Mishra M, Brodersen R. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios. In: Proceedings of the Process of Asilomar Conference On Signals, Systems, and Computers, CA, USA: Pacific Grove, 2004. 772-776
- [7] Ghasemi A, Sousa E. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments. In: Proceedings of the 1st IEEE Symposium New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Baltimore, USA: 2005. 131-136
- [8] Jean-François C, Venugopal V. Decentralized detection in sensor networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 2(51): 407-416
- [9] Jiang R X, Chen B. Fusion of censored decisions in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 6(4): 2668-2673
- [10] Unnikrishnan J, Venugopal V. Cooperative sensing for primary detection in cognitive radio. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 1(2): 18-27
- [11] Zhang Wei, Ranjan K, Mallik L, et al. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Beijing China, 2008. 3411-3415
- [12] Sun C H, Zhang W, Letaief B. Cooperative spectrum sensing for cognitive radios under bandwidth constraints. In: Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference, Hong Kong, China, 2007. 1-5
- [13] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals. *IEEE Proceedings*, 1967, 4(55): 523-531
- [14] Barkat M. Signal Detection and Estimation. 2nd edition. Boston, London: Artech House Publishers, 2005. 291-337

A dynamic double-threshold cooperative energy detection algorithm for cognitive radio systems

Wu Jinbo*, Luo Tao*, Lin Fei**, Yue Guangxin*

(* School of Information and Telecommunication Engineering,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

(** College of Electronic Information and Control Engineering, Shandong Institute of Light Industry, Jinan 250353)

Abstract

As is well-known, cooperative detection among cognitive users can improve the accuracy of spectrum detection. And then it proposes, a dynamic double-threshold cooperative energy detection algorithm based on the OR rule and the multi-threshold energy detection algorithm, and the detection thresholds are determined according to the SNR (Signal-Noise-Ratio), which is received from the primary user. The theoretical analysis and simulation results indicate that this strategy can improve the probability of spectrum detection, and can simultaneously depress the probability of missing detection.

Key words: cognitive radio, cooperation detection, dynamic double-threshold detection