

宽带能量检测性能及噪声不确定度约束下的观测时长分析

袁龙* 刘子扬 彭涛 王文博

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘要: 该文针对基于最小错判概率准则对宽带采样信号进行判决的情况,讨论了检测概率、虚警概率与观测时长的置换关系,得到了在采用上述判决门限条件下,达到规定的检测概率和虚警概率所需要的最小观测时长的闭式表达式。此外,该文还讨论了噪声不确定性对检测性能约束条件下的最小观测时长的影响,得到了在噪声峰值不确定度给定情况下的最小观测时长表达式。数值仿真结果验证了该文结论的正确性。

关键词: 认知无线电; 虚警概率; 检测概率; 观测时长; 噪声不确定性

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)11-2560-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01718

Analysis of Observation Time for Broadband-based Energy Detection with Performance Constraints and Noise Uncertainty

Yuan Long Liu Zi-yang Peng Tao Wang Wen-bo

(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: This paper discusses about the trade-off between detection probability, false alarm probability and observation period for the broadband spectrum energy detection. By utilizing the threshold based on the minimum-error-rate criterion, the closed-form expression of the minimum watching time for the detection is derived, which can make the detection satisfy the performance constraints. Besides, the effect of noise uncertainty is also considered in the detection and the expression of watching period with peak noise uncertainty is provided. All conclusions are verified by the numerical simulations.

Key words: Cognitive radio; False alarm probability; Detection probability; Observation time; Noise uncertainty

1 引言

频谱感知技术作为认知无线电^[1]的一种关键技术,可以通过对无线频谱使用情况的分析,找出适合次用户(secondary user)使用的频谱空洞,在保证不影响主用户(primary user)正常通信的前提下,使次用户工作在已分配给主用户的频段上^[2,3]。宽带频谱感知技术则可以在整个感知频带内为次用户提供接入机会。

能量检测^[4]作为一种基本的感知技术,目前得到了广泛的应用。该算法复杂度低,工程实现简单,并且不需要知道主用户信号的任何先验信息,只需要将检测器的输出值与根据噪声水平设定的门限进行比较,就能对主用户信号的有无进行快速判决。

能量检测的性能主要由虚警概率和漏检概率这

两个参数来衡量^[5]。一般来说,较高的检测门限会导致较低的虚警概率和较高的漏检概率,而较低检测门限则会带来较高的虚警概率和较低的漏检概率。文献[6]指出降低总的错判概率是提高检测性能的首要手段。

文献[7]综合考虑了检测概率和虚警概率,给出了基于最小错判率判决的宽带能量检测模型,并通过推导得到了最小错判率门限。然而文献[7]却没有考虑虚警概率、检测概率等约束条件对检测的影响。采用最小错判率门限进行检测时,虽然满足了最小错判率,却可能无法同时达到虚警概率和检测概率的指标要求,这时就需要增加抽样点数(即时域观测时长)来进行弥补。另外,文献[7]中假定高斯白噪声的方差为一个定值,然而在实际中这个前提假设往往是无法满足的^[8]。目前针对噪声不确定性引起的“噪声墙”问题得到了较多的研究。文献[9]指出在给定噪声不确定性条件下,当被检测信号的信噪比低于某一门限时,检测器就不再具备稳健性;文献[10]分析了噪声不确定性对能量检测的稳定性和持续性的影响。

2012-12-27 收到, 2013-05-24 改回

国家科技重大专项项目(2012ZX03003011, 2012ZX03003007), 国家973 计划项目(2012CB316005)和国家自然科学基金-广东联合基金(U1035001)资助课题

*通信作者: 袁龙 yuanlong5787@163.com

本文基于文献[7]的最小错判率门限，推导并给出了虚警概率、检测概率等约束条件与时域观测时长的置换关系式。另外，还通过引入噪声的峰值不确定度，讨论了噪声不确定性对于上述能量检测算法造成的影响。文中首先给出了上述问题的具体结论以及相关证明的具体过程，然后通过仿真分析验证了理论推导的正确性。

2 宽带信号模型

因为干扰系统信息未知，所以对宽带检测信号建立如图 1 所示的采样模型。对某一段频带进行符合奈奎斯特速率的 N_t 次采样(这里的 N_t 即时域观测时长，单位为次)，每次时域采样点数为 N ，并且认为采样是理想的，即当频谱上存在主用户信号时，频域样值为信号值与高斯白噪声的叠加，并且在整个采样期间内信号出现的位置是不变的。当信号不存在的时候，采样值则仅为高斯白噪声。在完成每次时域采样后，对采样数据进行 FFT 变换得到相应的能量谱。

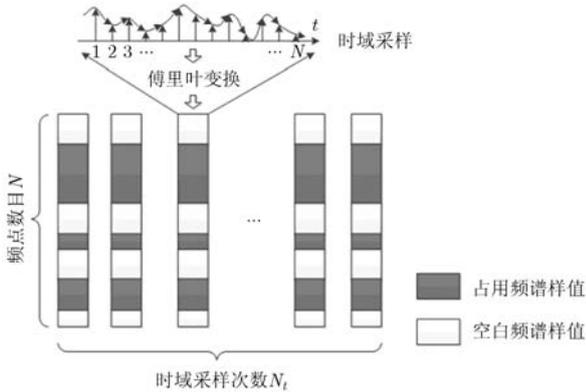


图 1 宽带信号频谱示意图

宽带频谱占用率 η 定义为一次采样中出现主用户信号的样值数目与采样点数之比，即： $\eta = \sum f_k / N$ (η 在一定范围内波动，并且满足 $\eta \in [\eta_{\min}, \eta_{\max}]$)。频率标记 f_k 表示时域采样信号在频域中对应频点位置的值， $f_k = 0$ 表示该频点不存在主用户信号，只有高斯白噪声， $f_k = 1$ 则表示该频点存在主用户信号。

3 约束条件下的宽带能量检测

3.1 基于最小错判率的宽带能量检测

宽带采样条件下能量检测流程如图 2 所示，这里处理的信号为通带信号。

在宽带信号能量检测中，对每一路抽样信号的判决都是一个二元假设检验问题，即

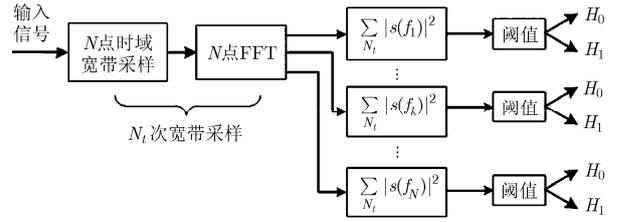


图 2 宽带信号能量检测流程

$$\begin{cases} H_0: Y[n] = W[n], & \text{主用户不存在} \\ H_1: Y[n] = X[n] + W[n], & \text{主用户存在} \end{cases}$$

式中 $n = 1, 2, \dots, N$ ， N 为一次抽样的点数。这里的信道条件为 AWGN 信道，如果是衰落信道，当 H_1 为真时，信号需要乘上一个衰落因子 h 。每一路抽样信号的检测统计量为

$$T = \sum_{N_t} (Y[n])^2 \quad (1)$$

假设高斯白噪声均值为零，方差为 σ_w^2 ，信号的平均功率为 σ_s^2 ，则每一个抽样点上的检测统计量 T 近似符合如下高斯分布^[11]：

$$H_0: T \sim \text{Normal}(N_t \sigma_w^2, 2N_t \sigma_w^4)$$

$$H_1: T \sim \text{Normal}(N_t (\sigma_w^2 + \sigma_s^2), 2N_t (\sigma_w^2 + \sigma_s^2)^2)$$

由于在宽带采样信号中，既存在主用户信号，又存在空白频谱，因此出现错判的概率 P_e 是将主用户信号误判为空白频谱的概率与将空白频谱误判为主用户信号的概率之和，即

$$P_e = P(x > V_{th} | H_0) \cdot P(H_0) + P(x < V_{th} | H_1) \cdot P(H_1) \quad (2)$$

其中 V_{th} 为判决门限， $P(H_0) = 1 - \eta$ ， $P(H_1) = \eta$ 。

根据文献[7]中的定理 1，最小错判率的最优判决门限 $V_{th,opt}$ 为

$$V_{th,opt} = \begin{cases} 0, & \text{SNR} < \frac{2\eta - 1}{1 - \eta}, \quad 0 < N_t < N_{t,0} \\ \frac{B' + \sqrt{B'^2 + 4C'}}{2}, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$B' = \frac{2N_t \sigma_w^2 (1 + \text{SNR})}{(2 + \text{SNR})}$$

$$C' = \frac{4N_t \sigma_w^4 (1 + \text{SNR})^2}{\text{SNR} (2 + \text{SNR})} \ln \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \cdot (1 + \text{SNR}) \right)$$

并且

$$N_{t,0} = \max \left\{ \frac{2(2 + \text{SNR})^2}{\text{SNR}^2} (Q^{-1}(1 - \eta))^2, \right.$$

$$\left. \frac{4(2 + \text{SNR})}{\text{SNR}} \ln \left(\frac{\eta}{(1 - \eta)(1 + \text{SNR})} \right) \right\}$$

对 $N_{t,0}$ 的理解为: 当信噪比 $\text{SNR} < \frac{2\eta-1}{1-\eta}$ 时, 如果

时域观测时长 $N_t \geq N_{t,0}$, 那么采用 $\frac{B' + \sqrt{B'^2 + 4C'}}{2}$

进行判决得到的错判概率, 仍然是全局最小的; 如果时域观测时长 $N_t < N_{t,0}$, 那么采用 0 进行判决的错判概率才是全局最小的。

3.2 观测时长与约束条件的置换关系

宽带采样信号的频谱感知, 在满足最小错判概率的前提下, 为了使检测概率和虚警概率达到一定的指标, 需要对时域采用最小次数 N_t 做出限制, 上述问题建模如下:

$$\left. \begin{array}{l} \min P_e \\ \text{s.t. } P_f \leq P_{f,\text{des}} \\ P_d \geq P_{d,\text{des}} \end{array} \right\} \quad (4)$$

其中 $P_{f,\text{des}}$ 是虚警概率指标, $P_{d,\text{des}}$ 是检测概率指标。两个约束条件形成一个 2 维的可行域空间, 如果最小错判概率准则的门限不在可行域范围内, 则需要增加观测时长 N_t 来弥补。

首先我们先给出如下定理:

定理 1 如果采用最小错判率门限, 并且使检测性能满足 $P_{d,\text{des}}, P_{f,\text{des}}$ 的指标要求, 那么时域观测时长 N_t 应满足如下关系:

$$N_t \geq N_{t,\min} = \max \{N_{t,P_{f,\text{des}}}, N_{t,P_{d,\text{des}}}\} \quad (5)$$

其中

$$N_{t,P_{f,\text{des}}} = \left(B + \sqrt{B^2 - 4AC} / (2A) \right)^2$$

$$N_{t,P_{d,\text{des}}} = \left(-D + \sqrt{D^2 - 4AE} / (2A) \right)^2$$

$$A = \text{SNR}, B = 2\sqrt{2} \cdot Q^{-1}(P_{f,\text{des}})$$

$$C = \frac{4(1+\text{SNR})^2}{\text{SNR}} \ln \left[\frac{1-\eta_{\max}(1+\text{SNR})}{\eta_{\max}} \right]$$

$$- 2(2 + \text{SNR})(Q^{-1}(P_{f,\text{des}}))^2$$

$$D = 2\sqrt{2}(1 + \text{SNR})Q^{-1}(P_{d,\text{des}})$$

$$E = 2(2 + \text{SNR})(Q^{-1}(P_{d,\text{des}}))^2$$

$$- \frac{4}{\text{SNR}} \ln \left[\frac{1-\eta_{\min}(1 + \text{SNR})}{\eta_{\min}} \right]$$

$N_{t,P_{f,\text{des}}}$ 表示如果频谱占用率在某一个范围内波动, 当采用最小错判率门限时, 在只考虑 $P_{f,\text{des}}$ 的条件约束情况下, 所需的最小时域观测时长。 $N_{t,P_{d,\text{des}}}$ 表示在只考虑 $P_{d,\text{des}}$ 的条件约束情况下, 所需的最小时域观测时长。

证明 首先可以确定, 在检测性能约束条件下的宽带能量检测的判决门限不能为 0, 因为如果 $V_{\text{th}}=0$, 那么所有的噪声都将被误判为信号, P_f 将

等于 1, 不能满足性能要求。

在满足检测性能约束的前提下, 为了使错判概率最小化, 根据不同的约束条件, 可以分成两种情况进行讨论:

情况 1 虚警率约束条件对于最小观测时长的要求。

在给定一定频谱占用率 η 的条件下, 采用最小错判率门限, 如果只考虑满足虚警概率 $P_{f,\text{des}}$ 的指标要求, 需要满足:

$$Q^{-1}(P_{f,\text{des}}) = \frac{V_{\text{th,opt}} - N_t \sigma_w^2}{\sqrt{2N_t \sigma_w^2}} \quad (6)$$

将式(3)中的 $V_{\text{th,opt}}$ 代入式(6), 并且进一步化简得到

$$\text{SNR} \cdot N_t - 2\sqrt{2} \cdot Q^{-1}(P_{f,\text{des}}) \cdot \sqrt{N_t} + \frac{4(1 + \text{SNR})^2}{\text{SNR}} \cdot \ln \left[\frac{1-\eta}{\eta} (1 + \text{SNR}) \right] - 2(2 + \text{SNR})(Q^{-1}(P_{f,\text{des}}))^2 = 0$$

令 $N_t = t^2, t > 0, A = \text{SNR}, B = 2\sqrt{2} \cdot Q^{-1}(P_{f,\text{des}}), C = \frac{4(1 + \text{SNR})^2}{\text{SNR}} \ln \left[\frac{1-\eta}{\eta} (1 + \text{SNR}) \right] - 2(2 + \text{SNR})(Q^{-1}(P_{f,\text{des}}))^2$

代入上式中整理得到 $At^2 - Bt + C = 0, t > 0$ 。

解得

$$t = B + \sqrt{B^2 - 4AC} / (2A) \quad (7)$$

当 $B^2 - 4AC < 0$ 时, 任意大小的 N_t 都可以满足性能要求。意味着对于某个频谱占用率 η , 信噪比已经足够高, 从而对于任意观测时长, 只要采用最小错判率门限, 就能够满足 $P_{f,\text{des}}$ 的指标要求。

当 $B^2 - 4AC > 0$ 时, 解得

$$\text{SNR} < \frac{\eta}{1-\eta} e^{(Q^{-1}(P_{f,\text{des}}))^2 / 2} - 1$$

即在低信噪比下为了继续保证虚警概率达到性能要求, 需要对观测时长加以限制。如果频谱占用率在某一个范围内波动, 即 $\eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max}$, 则当 $\eta = \eta_{\max}$ 时 t^2 最大。因此如果给定某一个 $P_{f,\text{des}}$ 后, 只要时域观测时长大于在频谱占用率最高时需要的观测时长, 就可以在整个频谱波动的范围内严格满足某一个 $P_{f,\text{des}}$ 的指标要求。此时的时域最小观测时长为

$$N_{t,P_{f,\text{des}}} = t^2 \Big|_{\eta=\eta_{\max}} \quad (8)$$

情况 2 检测率约束条件对于最小观测时长的要求。

在给定一定频谱占用率 η 的条件下, 采用最小错判率门限, 如果只考虑满足检测概率 $P_{d,\text{des}}$ 的指标要求, 需要满足:

$$Q^{-1}(P_{d,\text{des}}) = \frac{V_{\text{th,opt}} - N_t (\sigma_w^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2N_t (\sigma_w^2 + \sigma_s^2)}} \quad (9)$$

令 $N_t = t^2, t > 0$ ，类似情况 1 的推导可得

$$t = -D + \sqrt{D^2 - 4AE}/(2A) \quad (10)$$

当 $\eta = \eta_{\min}$ 时 t^2 最大，因此要想在整个频谱波动的范围内严格满足某一个 $P_{f,\text{des}}$ 的指标要求，时域观测时长要大于在频谱占用率最低时需要的观测时长。则此时域最小观测时长为

$$N_{t,P_{d,\text{des}}} = t^2 \big|_{\eta=\eta_{\min}} \quad (11)$$

所以，约束条件下的宽带能量检测，如果要求错判概率最低，并且需要同时满足一定 $P_{d,\text{des}}, P_{f,\text{des}}$ 的指标要求，那么时域最小观测时长 $N_{t,\min}$ 为

$$N_{t,\min} = \max \{N_{t,P_{f,\text{des}}}, N_{t,P_{d,\text{des}}}\}$$

如果只考虑 $P_{d,\text{des}}, P_{f,\text{des}}$ 的指标要求，而不考虑最小错判率的限制，那么时域观测时长 N_t 应该不小于某个最小观测时长 N_0 ，这个最小观测时长 N_0 完全由 $P_{d,\text{des}}, P_{f,\text{des}}$ 指标确定。

由约束条件 $P_f \leq P_{f,\text{des}}$ 和 $P_d \geq P_{d,\text{des}}$ 可得 N_0 的表达式为

$$N_0 = \frac{2[Q^{-1}(P_{f,\text{des}}) - Q^{-1}(P_{d,\text{des}})(1 + \text{SNR})]^2}{\text{SNR}^2} \quad (12)$$

由于 N_0 的约束条件只考虑 $P_{d,\text{des}}, P_{f,\text{des}}$ 的指标要求，而没有考虑最小错判率的限制，所以 $N_{t,\min}$ 约束条件要比 N_0 的约束苛刻，由此可得如下推论：

推论 1 定理 1 给出的最小观测时长 $N_{t,\min}$ 要大于等于只需满足 $P_{d,\text{des}}, P_{f,\text{des}}$ 条件约束的观测时长 N_0 ，即： $N_0 \leq N_{t,\min} = \max \{N_{t,P_{f,\text{des}}}, N_{t,P_{d,\text{des}}}\}$ 。

3.3 宽带信号能量检测中噪声不确定性对所需观测时长的影响

在目前大部分能量检测中，往往假设噪声为高斯白噪声，并且噪声方差为某个恒定值 σ_w^2 ，然而在实际应用中，高斯白噪声的方差并不是确定不变的。天线的噪声温度会随着环境温度、天线方向及频率的变化而变化，接收端对噪声方差的估计也会产生一定的估计误差，而且信道中也会存在一些其它信号泄漏的能量，这些影响因素都会造成高斯白噪声的方差波动，因此将这些因素统称为噪声的不确定性。

对于实际中接收机检测到的噪声功率，给出估计噪声的表达式为

$$(1 - \varepsilon_1)\sigma_w^2 \leq \hat{\sigma}_w^2 \leq (1 + \varepsilon_2)\sigma_w^2 \quad (13)$$

其中 $0 \leq \varepsilon_1 < 1, \varepsilon_2 \geq 0$ 。如果低估噪声水平会造成虚警概率上升 ($P_f > P_{f,\text{des}}$)，因此需要在式(13)给出的全部估计值范围内都要保证 $P_f > P_{f,\text{des}}$ ，估计值要做式(14)的处理：

$$\sigma_{\text{est}}^2 = \hat{\sigma}_w^2 / (1 - \varepsilon_1) \quad (14)$$

同理，如果高估噪声水平会造成检测概率的下降，因此为了保证检测概率性能，需要对噪声估计值做式(15)的处理：

$$\sigma_{\text{est}}^2 = \hat{\sigma}_w^2 / (1 + \varepsilon_2) \quad (15)$$

这里定义噪声峰值不确定度为^[12]

$$U \triangleq \frac{1 + \varepsilon_2}{1 - \varepsilon_1} \geq 1 \quad (16)$$

因此可以得到

$$\sigma_{\text{est,worst}}^2 = U\sigma_w^2 \quad (17)$$

那么最差情况的信噪比变成 $\text{SNR}_{\text{worst}} = \text{SNR} / U$ ，代入式(7)，式(8)及式(10)，式(11)中，得到在噪声不确定情况下的时域最小观测时长分别为 $N'_{t,P_{d,\text{des}}}, N'_{t,P_{f,\text{des}}}$ 。因此在噪声不确定条件下，满足某 $P_{d,\text{des}}, P_{f,\text{des}}$ 指标要求的时域最小观测时长为

$$N_{t,\min,\text{worst}} = \max \{N'_{t,P_{f,\text{des}}}, N'_{t,P_{d,\text{des}}}\} \quad (18)$$

4 仿真分析

本节将针对本文所给出的结论，使用 Matlab 软件进行仿真验证。仿真分成两部分：首先在噪声方差确定的情况下，给出最小观测时长与频谱占用率及性能约束条件的数值关系结果，并进行相应的分析。然后在此基础上给出噪声不确定情况下，噪声峰值不确定度与时域最小观测时长之间的仿真结果及分析。仿真中检测性能约束条件的设定为一般工程应用中的性能指标，也可以设定为其它的性能约束条件，可以得到类似的仿真结果。

4.1 噪声方差确定情况下的最小观测时长分析

在仿真中，先不考虑噪声的不确定性，即认为噪声方差 σ_w^2 是恒定值。检测模型采用文献[7]提出的基于最小错判率的宽带能量检测模型，其中检测性能约束条件设为 $P_{d,\text{des}}=0.9, P_{f,\text{des}}=0.01$ ，信噪比设为 $\text{SNR}=0 \text{ dB}$ 。图 3 所示的两条曲线分别代表着判决门限采用最小错判率门限，在只满足 $P_{d,\text{des}}$ 约束和只满足 $P_{f,\text{des}}$ 约束情况下，所需的时域最小观测时长与频率占用率之间的关系。

从图 3 中可以看出，当采用最小错判率门限时，在只满足 $P_{d,\text{des}}$ 的约束条件下，所需的最小时域观测时长随频域占用率增加而减小。而在只满足 $P_{f,\text{des}}$ 约束条件下，最小观测时长与频谱占用率的关系曲线变化趋势正好相反。这里假定两条曲线交点的横坐标为 η_0 ，那么当 $\eta < \eta_0$ 时， $P_{d,\text{des}}$ 的约束条件决定了时域要求的最小观测时长，而当 $\eta > \eta_0$ 时， $P_{f,\text{des}}$ 的约束条件决定了时域要求的最小观测时长。当频谱占用率为 1 时，整个频带不存在噪声点，此时研究噪声的虚警概率已经失去了意义。而当频谱占用率为 0 时，最小错判率门限为正无穷，此时无论时域

观测时长为多少,虚警概率都为0。对于检测概率约束曲线的分析类似。

图4为时域最小观测时长随信噪比的变化关系图,此时检测性能约束条件仍然设为 $P_{d,des}=0.9$ 或 $P_{f,des}=0.01$,频域的占用率设为 $\eta=0.3$ 。从图中可以看出无论哪种约束关系,最小时域观测时长都随信噪比的升高而降低,且信噪比越高,对时域的观测时长要求就越低。

从图4中还可以看出,仅满足 $P_{d,des}, P_{f,des}$ 的约束条件而不考虑最小错判率的最小观测时长(曲线3)要么处于曲线1下面,要么处于曲线2下面,从而验证了3.2节中的推论 $N_{t,min} \geq N_0$ 的正确性。

图5反映了在满足 $P_{d,des}, P_{f,des}$ 的约束条件下,采用最小错判率门限的时域最小观测时长随信噪比的变化规律,曲线1,曲线2和曲线3分别表示不同检测性能约束下的情况。

通过曲线1($P_{d,des}=0.9, P_{f,des}=0.01$)和曲线2($P_{d,des}=0.8, P_{f,des}=0.01$)的对比,反映了在 $P_{f,des}$ 约束条件相同, $P_{d,des}$ 约束条件不同的情况下,时域最小观测时长随信噪比的变化关系。假定曲线1和曲线2的交点横坐标为 SNR_1 ,当 $SNR < SNR_1$ 时,两条曲线重合。这是因为在 $SNR < SNR_1$ 时, $P_{f,des}$ 的约束条件起主要作用,由于两者的 $P_{f,des}$ 相同,故而曲线重合。而当 $SNR > SNR_1$ 时, $P_{d,des}$ 的约束起主要作用,由于曲线1的 $P_{d,des}$ 约束值较曲线2的要高,所以曲线1对时域观测时长的要求也要比曲线2的高。

而通过曲线2($P_{d,des}=0.8, P_{f,des}=0.01$)和曲线3($P_{d,des}=0.8, P_{f,des}=0.1$)的对比,反映了在 $P_{d,des}$ 约束条件相同, $P_{f,des}$ 约束条件不同的情况下,时域最小观测时长随信噪比的变化关系。假设两条曲线交点横坐标为 SNR_2 ,当 $SNR < SNR_2$ 时, $P_{f,des}$ 的约束条件起主要作用,且 $P_{f,des}$ 值越小,时域的最

小观测时长越大。当 $SNR > SNR_2$ 时, $P_{d,des}$ 的约束起主要作用,由于两者 $P_{d,des}$ 的值相同,所以两条曲线重合。

4.2 噪声不确定情况下的最小观测时长分析

下面通过仿真分析噪声不确定性对于检测的影响。图6反映了在检测性能约束条件设为 $P_{d,des}=0.9, P_{f,des}=0.1$ 的情况下,最小观测时长随噪声峰值不确定度的变化关系。

图6中不同的曲线代表在不同信噪比下噪声不确定对所需的时域最小观测时长的影响。当 U 等于1时对应的纵坐标的值,就是由定理1给出的噪声确定情况下达到检测性能所需的最小观测时长。由于噪声不确定度的存在,实际需要的时域最小观测时长要比噪声确定情况下的时域最小观测时长要大,且噪声的不确定程度越高,对最小观测时长的影响越大。

从3条曲线的对比中可以发现,信噪比越低,时域最小观测时长随噪声峰值不确定度增加而上升的速度越快。这是由于信噪比越低,噪声在判决中起的作用越明显,噪声方差的波动带来的影响也就越大,所以图6中信噪比越低的曲线变化要比其它曲线快,斜率也较大。

5 结论

本文推导得出了采用最小错判率门限进行检测时,若要满足 $P_{d,des}, P_{f,des}$ 指标要求所需的时域最小观测时长的闭式表达式,并通过仿真的方式对影响 $N_{t,min}$ 的因素进行了分析。另外,实际中的噪声方差可能不是一个确定值,而是在一定范围内波动的变量,这种噪声不确定性会对检测的性能造成一定影响。因此本文分析了噪声的不确定性对 $N_{t,min}$ 产生的影响,推导得出了在噪声不确定性情况下达到性能要求所需的最小观测时长的表达式,并通过仿真结果分析了噪声不确定性的具体影响。

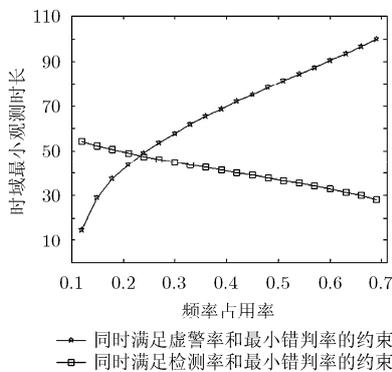


图3 时域最小观测时长与频域占用率的关系

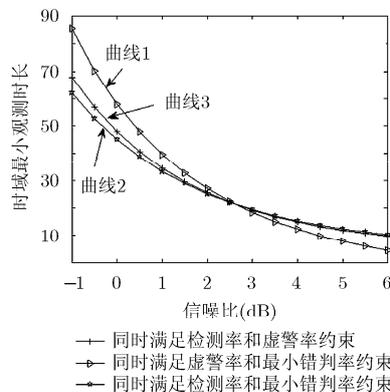


图4 各种约束情况下信噪比与时域最小观测时长的关系

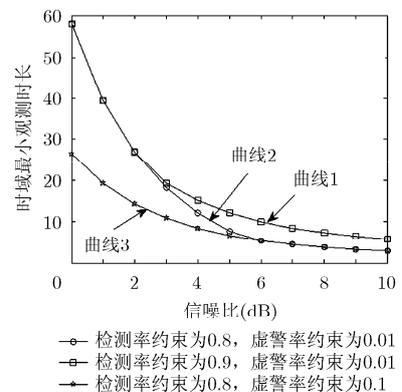


图5 时域最小观测时长与信噪比的对应关系

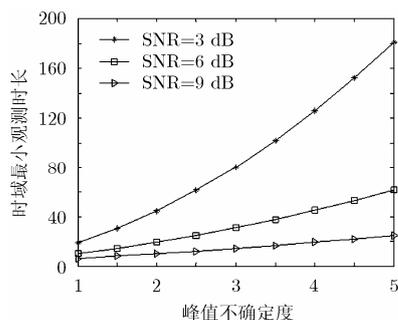


图 6 时域最小观测时长与噪声不确定度的关系

参 考 文 献

- [1] Joseph M. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Quan Zhi, Cui Shu-guang, Vincent P H, *et al.* Collaborative wideband sensing for cognitive radios[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 25(6): 60-73.
- [3] Zhang Wei, Mallik R K, and Leraief K B. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Beijing, 2008: 3411-3415.
- [4] Kim Kyungtae, Xin Yan, and Rangarajan S. Energy detection based spectrum sensing for cognitive radio: an experimental study[C]. Proceedings of Global Telecommunications Conference, Miami, FL, 2010: 1-5.
- [5] 张晓, 王金龙, 吴启晖. 认知无线电中一种基于循环谱的能量检测算法[J]. *电路与系统学报*, 2010, 15(3): 75-80.
Zhang Xiao, Wang Jin-long, and Wu Qi-hui. An energy detection algorithm based on cyclic spectrum theory in cognitive radio[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2010, 15(3): 75-80.
- [6] Liu Yi-xian, Zeng Chun-yan, Wang Hong-jiang, *et al.* Energy detection threshold optimization for cooperative spectrum sensing[C]. Proceedings of 2nd International Conference on ICACC, Shenyang, 2010: 566-570.
- [7] 刘子扬, 彭涛, 郭海波, 等. 干扰系统先验信息未知的宽带能量检测[J]. *北京邮电大学学报*, 2012, 35(5): 31-35.
Liu Zi-yang, Peng Tao, Guo Hai-bo, *et al.* Energy detection about broadband signal without priori information of interference system[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 35(5): 31-35.
- [8] Kozal A S B, Merabti M, and Bouhafs F. An improved energy detection scheme for cognitive radio networks in low SNR region[C]. Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Cappadocia, 2012: 684-689.
- [9] Atapattu S, Tellambura C, and Hai Jian. Energy detection based cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(4): 1232-1241.
- [10] 刘鑫, 谭学治, 徐贵森. 噪声不确定下认知无线电能量检测性能的分析[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(6): 168-172.
Liu Xin, Tan Xue-zhi, and Xu Gui-sen. Performance analysis of energy detection for cognitive radio under noise uncertainty[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(6): 168-172.
- [11] Lin Wei and Zhang Qin-yu. A design of energy detector in cognitive radio under noise uncertainty[C]. Proceedings of 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems, Guangzhou, 2008: 213-217.
- [12] Shent B, Huang Long-yang, Zhao Cheng-shi, *et al.* Energy detection based spectrum sensing for cognitive radios in noise of uncertain power[C]. Proceedings of International Symposium on Communications and Information Technologies, Lao, 2008: 628-633.
- 袁 龙: 男, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为信号检测与分析、宽带认知无线电系统设计与实现。
- 刘子扬: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为宽带认知无线电通信系统设计、蜂窝与 D2D 混合网络研究。
- 彭 涛: 男, 1977 年生, 副教授, 研究方向为无线通信原理与技术研究、下一代无线通信网络技术研究、认知无线电通信技术研究。
- 王文博: 男, 1965 年生, 教授, 研究方向为新一代移动通信体制的研究、信号处理在移动通信中的应用。