

基于序贯检测的认知无线电系统的吞吐量优化

张 雯 杨家玮 闫 琦 肖丽媛

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室信科所 西安 710071)

摘 要 研究了认知无线电用户采用序贯检测时认知系统吞吐量的优化问题。首先给出了认知无线电中序贯检测器的形式;然后在充分保护主用户的条件下,建立了系统吞吐量的数学模型,并利用最优化理论证明了存在唯一最优的参数设置,它可使吞吐量达到最大;最后给出最优参数的搜索方法。

关键词 认知无线电,频谱检测,序贯检测,检测时间,吞吐量

中图分类号 TN911.23 **文献标识码** A

Throughput Optimization of Cognitive Radio Based on Sequential Detection

ZHANG Wen YANG Jia-wei YAN Qi XIAO Li-yuan

(Information Science Institute, State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract The throughput optimization of cognitive radio based on sequential detection was studied. The form of sequential detection in cognitive radio was given, then the mathematical model of throughput was established with the constraint that the primary users are sufficiently protected. Furthermore, it is proved that there is a unique optimal parameter setting which achieves the maximal throughput by optimization theory. At last, a searching method was given to obtain the optimal parameter setting.

Keywords Cognitive radio, Spectrum detection, Sequential detection, Sensing time, Throughput

1 引言

随着无线技术及应用的迅猛发展,人们对无线频谱的需求也越来越大。而传统的静态频谱分配策略下的频谱利用率非常低,造成了无线频谱的短缺^[1]。近年来研究人员提出的认知无线电(CR)技术^[2],为这个问题提供了解决办法。CR采用一种灵活的频谱管理方法,允许次级用户(CR用户)接入分配给主用户但当前没有被主用户使用的频谱,这一方法将大大提高频谱利用率。

确保认知无线电技术成功应用的一个关键是设计速度快、性能好的频谱检测算法。由于能量检测器不需要太多的先验知识并且系统复杂度最低,因此常被应用在认知无线电中^[3,4]。为达到相同的检测性能,Wald首次提出的序贯检测(sequential detection)^[5]需要更少的采样点数,即需要更短的检测时间,因而越来越多的文献^[6-8]将序贯检测的思想引入到认知无线电频谱检测中。

除了检测算法的设计,算法中各参数的设置也是一个非常重要的问题。在认知无线电检测中,衡量检测性能的两个参数是检测概率和虚警概率。检测概率对应对主用户的保护程度;虚警概率对应次级用户可得到的频谱机会。在对主用户的保护程度一定的情况下,虚警概率越小,CR用户可接入

主用户频谱的概率越大,系统的吞吐量越大;但同时,要达到更小的虚警概率需要的检测时间就越长,因此在一定帧长下,允许CR用户进行数据传输的时间就越短,从而导致系统吞吐量的下降。基于此,本文研究认知无线电中使系统吞吐量最大的序贯检测算法。文中首先给出了CR用户采用序贯检测时的检测时间,进而得到CR用户吞吐量的表达式。然后证明了存在唯一的参数设置,它可使吞吐量达到最大。

2 系统模型

2.1 信号模型

在认知无线电环境中,为了与现有无线系统兼容,不能对主用户的系统做任何改变,因此在主用户与CR之间缺少必要的协商与交互,从而使CR不能获得主用户信号的调制方式以及两者间的信道条件等信息。因此,在有限的信息条件下,为了能够鲁棒地检测主用户的信号,我们采用目前文献中普遍应用的认知无线电中的主用户信号模型,即假设CR用户接收到的主用户信号为最难检测的——与零均值高斯白噪声形式相同的零均值高斯白信号^[3,4]。

在高斯白噪声信道下,CR用户的检测问题可以表示为一个二进制假设检验问题如下:

$$r(n) = \begin{cases} \omega(n), & H_0 \\ s(n) + \omega(n), & H_1 \end{cases}, n=1,2,\dots \quad (1)$$

到稿日期:2010-10-25 返修日期:2011-01-17 本文受基金项目国家 973 计划项目(2009CB320404),国家自然科学基金(60902032,60902033)资助。

张 雯(1983—),女,博士生,主要研究方向为认知无线电关键技术,E-mail:zhangw83@gmail.com;杨家玮(1946—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线通信;闫 琦(1982—),男,博士生,主要研究方向为认知无线电频谱感知技术;肖丽媛(1981—),女,博士生,主要研究方向为移动 IPv6、WiMax 系统以及认知网络的切换。

式中,假设 H_1 表示信道被主用户占用,假设 H_0 表示信道空闲, $r(n), s(n), \omega(n)$ 分别表示接收信号、接收到的主用户信号及噪声的第 n 个采样点。 $s(n)$ 是独立同分布(i. i. d.)的高斯随机变量,且均值为零,功率为 P ,即 $s(n) \sim N(0, P)$ 。 ω_n 也是独立同分布的高斯随机变量,均值为零,方差为 σ^2 ,即 $\omega(n) \sim N(0, \sigma^2)$,且其与 $s(n)$ 相互独立。由以上假设可知, $r(n)$ 在两种假设下均为独立同分布的。

2.2 CR 用户的序贯检测器

序贯检测是一种采样点数可变的基于似然比的双门限检测算法^[5]。在序贯检测中,需要的采样点数不是预先确定的,而是由接收到的采样点的值及性能要求决定的。每接收到一个采样点,检测器就计算一次似然比,然后将其与两个门限进行比较。当似然比落在两个门限之间时,不做出判决且继续进行采样;反之,判决为两种假设中的一个,从而停止检测。下面简要介绍 CR 采用序贯检测器时的检测过程。

由信号及噪声模型可得接收信号采样点值 r_n 的对数似然比为:

$$L(r(n)) = \ln \frac{p(r(n); H_1)}{p(r(n); H_0)} = \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{\sigma^2}{\sigma^2 + P} \right) + \frac{P \cdot r^2(n)}{\sigma^2 (\sigma^2 + P)} \right] \quad (2)$$

设 $r_n = [r(1), r(2), \dots, r(n)]^T$ 为接收到的信号采样点值组成的列向量。根据 1.1 节中的假设可知, r_n 中元素在两种假设下分别都是独立同分布的,则 r_n 的对数似然比为:

$$L(r_n) = \sum_{i=1}^n \ln L(r(i)) \quad (3)$$

设序贯检测的目标虚警概率是 $P_f (0 < P_f \leq 0.5)$, 目标检测概率是 $P_d (0.5 \leq P_d < 1)$, 则序贯检测的两个门限分别为^[5]:

$$\eta = \ln \left(\frac{1 - P_d}{1 - P_f} \right), \quad \gamma = \ln \left(\frac{P_d}{P_f} \right) \quad (4)$$

那么,序贯检测器的流程为:

- (1) 初始化,根据给定目标虚警概率与目标检测概率的值计算 η 和 γ ,令 $n=1$;
- (2) 计算 $L(r_n)$;
- (3) 若 $L(r_n) \geq \eta$,判 H_1 ,若 $L(r_n) \leq \gamma$,判 H_0 ,转第(5)步;
- (4) 若 $\eta < L(r_n) < \gamma$,令 $n=n+1$,继续采样得到采样点 $r(n)$,转第(2)步;
- (5) 停止检测。

3 吞吐量的优化

3.1 基于序贯检测的 CR 系统的吞吐量

在认知无线电技术中,往往采用周期检测,典型的帧结构如图 1 所示。

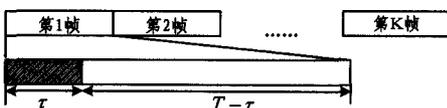


图 1 认知无线电帧结构

由图 1 可见,CR 的帧长为 T ,每帧由两部分组成:一部分用于检测,另一部分用于 CR 用户的数据传输。检测时间用 τ 表示,数据传输时间用 $T - \tau$ 表示。CR 用户可以在两种情况下接入主用户信道,下面分别介绍这两种情况下的吞吐量:

(1) CR 用户检测到主用户未占用信道,且实际上主用户确实未占用信道。这种情况发生的概率 P_0 为 $P(H_0)(1 - P_f)$,其中, $P(H_0)$ 表示 H_0 发生的概率。这种情况下 CR 系统的吞吐量 T_0 为 $\frac{T - \tau_0(P_f, P_d)}{T} C_0$,其中, C_0 表示这种情况下单位带宽上 CR 系统的容量,单位是比特/秒/赫兹(bits/(s · Hz))。 $\tau_0(P_f, P_d)$ 是 H_0 条件下的平均检测时间,为 P_f 和 P_d 的函数,根据文献^[5],可得其表达式为

$$\tau_0(P_f, P_d) = \frac{P_f \ln \eta + (1 - P_f) \eta_0}{f_s \cdot E[L(r(n)) | H_0]} \quad (5)$$

式中, f_s 为采样速率, $E[\cdot]$ 表示数学期望, $E[L(r(n)) | H_0]$ 的表达式为:

$$E[L(r(n)) | H_0] = \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{1}{1 + \gamma} \right) + \frac{\gamma}{1 + \gamma} \right] \quad (6)$$

式中, $\gamma = P/\sigma^2$ 为接收信噪比。

(2) CR 用户检测到主用户未占用信道,但实际上主用户正在占用信道。这种情况发生的概率 P_1 为 $P(H_1)(1 - P_d)$,其中, $P(H_1)$ 表示 H_1 发生的概率。这种情况下 CR 系统的吞吐量 T_1 为 $\frac{T - \tau_1(P_f, P_d)}{T} C_1$,其中, C_1 表示这种情况下单位带宽上 CR 系统的容量,单位是比特/(秒 · 赫兹)(bits/(s · Hz))。 $\tau_1(P_f, P_d)$ 是 H_1 条件下的平均检测时间,其为 P_f 和 P_d 的函数,根据文献^[5],可得其表达式为:

$$\begin{aligned} \tau_1(P_f, P_d) &= \frac{P_d \ln \eta + (1 - P_d) \eta_0}{f_s \cdot E[L(r(n)) | H_1]} \\ &= \frac{P_d \ln \left(\frac{P_d}{P_f} \right) + (1 - P_d) \ln \left(\frac{1 - P_d}{1 - P_f} \right)}{f_s \cdot \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{1}{1 + \gamma} \right) + \gamma \right]} \end{aligned} \quad (7)$$

显然,上述两种情况要求检测时间小于帧长,即:

$$T - \tau_i(P_f, P_d) > 0, i=0,1 \quad (8)$$

那么 CR 系统的平均吞吐量 $R(P_f, P_d)$ 为:

$$R(P_f, P_d) = P_0 \cdot T_0 + P_1 \cdot T_1 \quad (9)$$

作如下定义:

$$\begin{aligned} R_0(P_f, P_d) &= P_0 \cdot T_0 \\ &= \frac{T - \tau_0(P_f, P_d)}{T} C_0 P(H_0) (1 - P_f) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} R_1(P_f, P_d) &= P_1 \cdot T_1 \\ &= \frac{T - \tau_1(P_f, P_d)}{T} C_1 P(H_1) (1 - P_d) \end{aligned} \quad (11)$$

则 CR 系统的平均吞吐量 $R(P_f, P_d)$ 可表示为:

$$R(P_f, P_d) = R_0(P_f, P_d) + R_1(P_f, P_d) \quad (12)$$

3.2 建立优化问题

优化问题为:在对主用户有足够保护的条件下,即在 $P_d \geq P_{d0}$ 的条件下,是否存在最优的 P_f 和 P_d 使 CR 系统达到最大的吞吐量。其中, P_{d0} 为检测概率下限,表示对主用户的最低保护程度。在数学上可将该优化问题表示为:

$$\max_{P_f, P_d} R(P_f, P_d) = R_0(P_f, P_d) + R_1(P_f, P_d) \quad (13)$$

$$s. t. P_d \geq P_{d0}$$

容易证明, $\tau_i(P_f, P_d) (i=0,1)$ 是 P_d 的增函数,则由式(10)和式(11),可得 $R_0(P_f, P_d)$ 和 $R_1(P_f, P_d)$ 均为 P_d 的减函数,所以,由式(12)可知 CR 的平均吞吐量 $R(P_f, P_d)$ 是 P_d 的减函数。因此,当 $P_d = P_{d0}$ 时吞吐量达到最大。故式(13)中的优化问题等价于:

$$\max_{P_f} R(P_f, P_d) = R_0(P_f, P_d) + R_1(P_f, P_d) \quad (14)$$

$$s. t. P_d = P_{d0}$$

在式(14)的优化目标函数中,有 $R_0(P_f, P_d) \gg R_1(P_f, P_d)$,原因如下:

1)通常将CR系统应用到主用户对考察频段的频谱利用率很低的情况,所以 $P(H_1) < 0.5$ 。

2)在上述的第二种情况下CR的传输受到主用户传输的干扰,所以单位带宽上CR系统的容量要比第一种情况小,因此可假设 $C_1 < C_0$ 。

3)在CR检测中,一般来说有 $P_f < P_d$ (例如 $P_f = 0.1, P_d = 0.9$)。

结合以上几点可知,2.1节中第一种情况下CR的吞吐量占主导地位,因此可将式(14)中的优化问题近似为:

$$\max_{P_f} R_0(P_f, P_d) \quad (15)$$

$$s. t. P_d = P_{d0}$$

3.3 吞吐量的优化

结合式(5)、式(6)和式(10),并将式(15)中的约束条件代入目标函数,则式(15)中的优化问题可以表示为:

$$\max_{P_f} R_0(P_f) = C_0 P(H_0) (1 - P_f) \times \left\{ 1 - \alpha \left[P_f \ln \left(\frac{P_{d0}}{P_f} \right) + (1 - P_f) \ln \left(\frac{1 - P_{d0}}{1 - P_f} \right) \right] \right\} \quad (16)$$

式中, $\alpha = \frac{2}{f_s T} \left[\ln \left(\frac{1}{1 + \gamma} \right) + \frac{\gamma}{1 + \gamma} \right]$,容易证明 $\alpha < 0$ 。对于式(16)中的优化问题有下面的定理。

定理 1 式(16)中的优化问题存在唯一的解 $P_f^* \in (0, 0.5)$ 使 $R_0(P_f)$ 达到最大。

由文献[9]可知定理1可由以下3个条件来证明:

- 1) $R_0(P_f)$ 在 $P_f \rightarrow 0$ 时是增函数;
- 2) $R_0(P_f)$ 在 $P_f \rightarrow 0.5$ 时是减函数;
- 3) $R_0(P_f)$ 是凹函数。

下面分别给出这3个条件的证明过程。

1)求 $R_0(P_f)$ 对 P_f 的一阶导数为:

$$R_0'(P_f) = C_0 P(H_0) \times \left\{ \alpha (2P_f - 1) \ln \frac{P_{d0}}{P_f} + 2\alpha (1 - P_f) \ln \frac{1 - P_{d0}}{1 - P_f} - 1 \right\} \quad (17)$$

对于式(17)中的一阶导数表达式,当 $P_f \rightarrow 0$ 时有

$$\begin{aligned} \lim_{P_f \rightarrow 0} R_0'(P_f) &= \lim_{P_f \rightarrow 0} C_0 P(H_0) \times \left[-\alpha \ln \frac{P_{d0}}{P_f} + 2\alpha \ln(1 - P_{d0}) - 1 \right] \\ &= +\infty > 0 \end{aligned} \quad (18)$$

则条件1成立。

2)当 $P_f \rightarrow 0.5$ 时,有:

$$\lim_{P_f \rightarrow 0.5} R_0'(P_f) = C_0 P(H_0) \{ \alpha \ln [2(1 - P_{d0})] - 1 \} \quad (19)$$

式(19)的正负性不易看出,但可以通过分析式(8)得到。

将 $P_f = 0.5$ 及 $\tau_0(P_f, P_d)$ 的表达式带入式(8),可得:

$$T - \alpha T \{ 0.5 \ln(2P_{d0}) + 0.5 \ln[2(1 - P_{d0})] \} > 0 \quad (20)$$

整理式(20)可得:

$$\alpha \ln [2(1 - P_{d0})] - 1 < \frac{2}{\alpha} - \ln(2P_{d0}) - 1 < 0 \quad (21)$$

因此有

$$\lim_{P_f \rightarrow 0.5} R_0'(P_f) < 0 \quad (22)$$

则条件2成立。

3)对 $R_0(P_f)$ 求二阶导数:

$$R_0''(P_f) = 2\alpha \left[\ln \left(\frac{P_{d0}}{P_f} \right) - \ln \left(\frac{1 - P_{d0}}{1 - P_f} \right) \right] + \frac{\alpha}{P_f} < 0 \quad (23)$$

那么可得 $R_0(P_f)$ 是 P_f 的凹函数^[9],则条件3成立。因此,在 $(0, 0.5)$ 之间一定存在唯一最优的 P_f^* 使CR系统的吞吐量达到最大。 P_f^* 的值即为式(17)中 $R_0'(P_f)$ 等于零时 P_f 的解。该解不能通过解析的方法得到,但由于 $R_0(P_f)$ 是凹函数,因此可以采用黄金分割法或者二分法^[10]搜索得到 P_f^* 。下面给出二分法解 P_f^* 的过程。其中 ϵ 表示容许误差。

(1)初始化,令 $a = 0, b = 0.5$ 。

$$(2) m = \frac{(a+b)}{2}。$$

(3)计算 $R_0'(m)$ 。

a)若 $R_0'(m) = 0$,则 $P_f^* = m$,搜索停止;

b)若 $R_0'(a) \times R_0'(m) < 0$,则 $b = m$;

c)若 $R_0'(a) \times R_0'(m) > 0$,则 $a = m$ 。

(4)若 $|a - b| \leq \epsilon$,则 $P_f^* = (a + b)/2$,搜索停止,否则重复步骤(2)~(4)。

因此,在对主用户有足够保护的条件下,即在 $P_d \geq P_{d0}$ 的条件下,CR用户的最优序贯检测器的检测概率为 P_{d0} ,虚警概率为上面的二分法的搜索结果,此时CR系统达到最大的吞吐量。

4 数值结果

假设CR系统的考察频带带宽是6MHz,采样频率为12MHz,帧长 $T = 20\text{ms}$,接收信噪比 $\gamma = -20\text{dB}$ 。在CR系统中, C_0 和 $P(H_0)$ 一般是常数,因此定义一个对 $C_0 P(H_0)$ 进行归一化的吞吐量 $\overline{R_0(P_f)}$,即:

$$\overline{R_0(P_f)} = \frac{R_0(P_f)}{C_0 P(H_0)} \quad (24)$$

并定义归一化检测时间,即:

$$\overline{\tau_0(P_f)} = \frac{\tau_0(P_f)}{T} \quad (25)$$

图2中给出了归一化吞吐量随 P_f 的变化曲线。其中, P_f 的取值范围从 10^{-3} 到0.5,可以看出归一化吞吐量是 P_f 的凹函数。对于给定的检测概率下限 P_{d0} ,存在一个最优的 P_f^* 使归一化吞吐量达到最大。并且当检测概率下限 P_{d0} 增大时,归一化吞吐量变小。从图2可以看出,当 P_{d0} 分别为0.9, 0.95, 0.99和0.995时,达到的最大归一化吞吐量分别是0.63, 0.54, 0.39和0.35,对应的最优 P_f^* 分别为0.08, 0.16, 0.34和0.39。可见,当检测概率下限 P_{d0} 增大时,最大的归一化吞吐量对应的最优的 P_f^* 也随之增大。

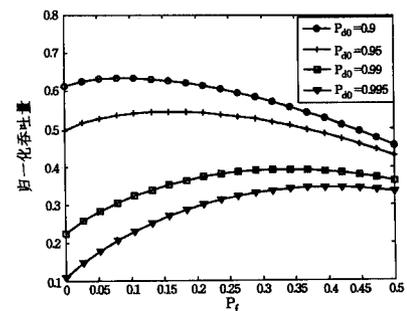


图2 归一化吞吐量随 P_f 的变化曲线

ture, and Applications for Network-based Parallel Computing (CANPC99). Orlando, FL; IEEE Springer, Jan. 1999

[7] Bergmans L, Halteren A V, Pires L, et al. A QoS Control Architecture for Object Middleware[C]//7th Intl. Workshop on Interactive Distributed Multimedia Systems and Telecommunication Services (IDMS 2000). Enschede, The Netherlands, LNCS 1905, Oct. 2000; 117-131

[8] Shankaran N, Roy N, Schmidt D C, et al. Design and performance evaluation of an adaptive resource management framework for distributed real-time and embedded systems[J]. EURASIP J. Embedded Syst., 2008

[9] de Niz D, Rajkumar R. Partitioning bin-packing algorithms for distributed real-time systems[J]. International Journal of Embedded Systems, 2006, 2(3/4); 196-208

[10] Mart' l P, Lin Cai-xue, Brandt S A, et al. Draco: Efficient resource Management for Resource-Constrained Control Tasks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2009, 58(1)

[11] Sun J, Liu J W-S. Synchronization Protocols in Distributed Real-Time Systems[C]//Proc. IEEE Int'l Conf. Distributed Computing Systems(ICDCS '96). 1996

[12] Harada F, Ushio T, Nakamoto Y. Adaptive Resource Allocation Control for Fair QoS Management[J]. IEEE Transaction on Computers, 2007, 56(3); 344-357

[13] Juedes D, Drews F, Welch L, et al. Heuristic resource allocation algorithms for maximizing allowable workload in dynamic, distributed, real-time systems[C]//12th Workshop on Parallel and Distributed Real-time Systems. 2004

[14] Lehoczky J P. Fixed Priority Scheduling of Periodic Task Sets with Arbitrary Deadline[C] // Proc. IEEE Real-time Systems Symp(RTSS '90). 1990.

[15] Wang X, Jia D, Lu C, et al. DEUCON: Decentralized end-to-end utilization control for distributed real-time systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(7)

[16] Shankaran N, Kinnebrew J, Koutsoukos X, et al. An Integrated Planning and Adaptive Resource Management Architecture for Distributed Real-time Embedded Systems[J]. IEEE Transactions on Computers, Special Issue on Autonomic Network Computing, 2009

[17] Ver'issimo P, Rodrigues L. Distributed Systems for System Architects[M]. Norwell, MA, USA; Kluwer Academic Publishers, 2001

[18] Brandt S A, Banachowski S, Lin C, et al. Dynamic Integrated Scheduling of Hard Real-time, Soft Real-time and Non-Real-time Processes[C] // Proc. 24th IEEE Real-time Systems Symp (RTSS '03). Dec. 2003; 396-407

(上接第 78 页)

图 3 是归一化吞吐量随归一化检测时间的变化曲线,并比较了采用序贯检测与采用能量检测时的归一化吞吐量。其中“SD”代表序贯检测,“ED”代表能量检测。在图 3 中,归一化检测时间的取值范围并非 0 到 1,这是由于检测概率必须为 P_{d0} 的限制条件造成的。从图 3 中可以看出,对于相同的检测概率下限 P_{d0} ,采用序贯检测的归一化吞吐量明显大于采用能量检测器的,这一现象也恰恰说明了序贯检测较能量检测的优越性。当 $P_{d0}=0.9$ 时,采用序贯检测器的最大归一化吞吐量 $\overline{R_{0_SD_Opt}}$ 比采用能量检测器的最大归一化吞吐量 $\overline{R_{0_ED_Opt}}$ 大 25%;当 $P_{d0}=0.95$ 时,最优的 $\overline{R_{0_SD_Opt}}$ 比最优的 $\overline{R_{0_ED_Opt}}$ 大将近 30%;当 $P_{d0}=0.99$ 时,最优的 $\overline{R_{0_SD_Opt}}$ 比最优的 $\overline{R_{0_ED_Opt}}$ 大 45%。

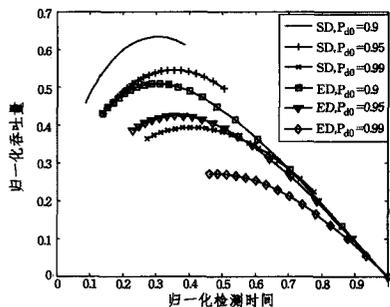


图 3 归一化吞吐量随归一化检测时间的变化曲线

结束语 在 CR 系统中,CR 用户需要检测主用户是否存在,若检测到主用户不存在,则可以接入主用户的频段进行数据传输。在参数设置时,CR 用户一方面要对主用户有足够的保护,另一方面要保证 CR 系统的吞吐量达到最大。本文研究了 CR 用户采用序贯检测时 CR 系统吞吐量的优化问题。文中首先分析了 CR 用户采用序贯检测器时系统的吞吐量,证明了在对主用户有足够保护的条件下,存在唯一最优的

目标虚警概率和目标检测概率使得系统吞吐量最大,并给出最优参数设置的搜索方法。仿真结果验证了分析结果,并表明在 CR 系统中,采用序贯检测比采用能量检测可达到更大的吞吐量。

参考文献

[1] Spectrum policy task force report[R]. 02-135. Federal Communications Commission, Nov. 2002

[2] Haykin S. Cognitive radio; Brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal Selected Areas in Communications, 2005, 23(2); . 201-220

[3] Cabric D, Mishra, S M, Broderse R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios [C]//Proc. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. USA; IEEE Press, 2004; 772-776

[4] Tandra R, Sahai A. SNR Walls for Signal Detection [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1); 4-17

[5] Wald A. Sequential Analysis [M]. New York: Dover Publications, 2004; 1-224

[6] Choi K W, Jeon W S, Jeong D G. Sequential detection of cyclostationary signal for cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(9); 4480 - 4485

[7] Yan Xin, Zhang Hong-hai, Rangarajan S. SSCT; A Simple Sequential Spectrum Sensing Scheme for Cognitive Radio[C]// Global Telecommunications Conference. Honolulu; IEEE Press, 2009; 1-6

[8] Nikhil K, Ahmed T. A performance study of novel sequential energy detection methods for spectrum sensing[C]// IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP). Dallas, Texas, USA; IEEE Press, 2010; 3090-3093

[9] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization [M]. UK; Cambridge University Press, 2004; 1-716

[10] 陈宝林. 最优化理论算法[M]. 北京, 清华大学出版社, 2005; 1-468