文章编号:1001 - 893X(2011)08 - 0075 - 05

基于分形盒维数的双门限合作频谱感知方法*

陈小波,陈 红,蔡晓霞,蒋金波,朱华振

(解放军电子工程学院 信息系,合肥 230037)

摘 要:在信号分形盒维数特征的基础上,提出利用噪声与授权信号分形盒维数的差异对授权用户是否存在进行检测。为了使合作感知性能趋于更优,多用户采用双门限策略进行分步合作。该方法运算复杂度低,对噪声不敏感。仿真结果表明,双门限合作相比单门限分形盒维数检测和能量检测,系统检测率更高,所需频谱感知时长较短,同时减轻了融合控制中心以及传输信道的负荷。

关键词:认知无线电;频谱感知;分形盒维数;双门限

中图分类号:TN92 **文献标识码**:A doi:10.3969/j.issn.1001 - 893x.2011.08.016

Double Threshold Cooperative Spectrum Sensing Method Based on Fractal Box Dimension

CHEN Xiao-bo, CHEN Hong, CAI Xiao-xia, JIANG Jin-bo, ZHU Hua-zhen

(Department of Information, PLA Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Based on fractal box dimension feature of signals, this paper presents a spectrum sensing method employing the difference of fractal box dimension between noise and licensed signals. To achieve a better performance of spectrum sensing, multi-user takes double threshold cooperative strategy step by step. The method has low computational complexity and is not sensitive to the noise. Simulation results show that double threshold method performs better than single threshold method and energy sensing with higher detection probability and less spectrum sensing time. Meanwhile, the method reduces the burden of central controller and transmission channel.

Key words: cognitive radio(CR); spectrum sensing; fractal box dimension; double threshold

1 引 言

认知无线电 (Cognitive Radio, CR)技术的提出为无线通信中频谱短缺的问题提供了一种可行性解决方案[1]。频谱感知作为 CR 中的关键部分,对后续的频谱分配、频谱切换等有重大影响。认知用户(Cognitive User, CU)通过对频谱感知,“见缝插针”切入频谱进行信号传输,能够有效地利用空闲频谱,节省频谱资源。目前,频谱感知的方法主要有能量检测、匹配滤波器检测、循环谱特征检测等,这些方法各有其优缺点[2-4]。

分形是对没有特征长度但是在具有一定意义下的自相似图形和结构的总称,其中分形维数可以定量描述分形集的复杂性。通信信号作为一种时间序列,分形能对它进行有效的刻画,分形维数中的盒维数通常用来描述分形信号的信息度量。由于噪声与信号的盒维数不同,因此,可以利用盒维数的差异构建统计量进行频谱感知。通信信号的不规则程度主要取决于调制类型,而噪声对之影响较小,即在一定 SNR 范围内,分形盒维数对噪声不敏感[5]。由于噪声的盒维数在一定的范围内波动,仅取其中的一个定值作为判决门限不够严谨,特别是在信噪比极低的情况下,易造成误判,因此,本文提出采用双门限检测方法并多用户进行合作,提高了感知结果的可信性和算法的可靠性。

* 收稿日期:2011 - 04 - 14;修回日期:2011 - 05 - 27

2 检测模型描述

CR 系统准确判断频谱环境中授权用户(Licensed User,LU)是否存在,可以描述为如下的二元检测问题:

$$\begin{cases} H_0: s(t) = \eta(t) \\ H_1: s(t) = x(t) + \eta(t) \end{cases} \tag{1}$$

式中,$s(t)$ 为 CU 接收到的有限长信号;$x(t)$ 和 $\eta(t)$ 分别代表授权信号和噪声信号;H_0 表示不存在 LU,CU 可以切入该频段;反之,H_1 表示 LU 存在,该频段正在被 LU 使用,CU 不能切入或者必须立即退出该频段,避免给 LU 造成干扰。

3 双门限合作感知

3.1 本地检测

接收机对接收信号采样为 $s(t_1), s(t_2), s(t_3), \cdots, s(t_N), s(t_{N+1})$,其中 N 取偶数。采样点共 $T = N + 1$ 点,根据盒维数的简化形式[5],令

$$d(\Delta) = \sum_{i=1}^{N} \left| s(t_i) - s(t_{i+1}) \right| \tag{2}$$

$$d(2\Delta) = \sum_{i=1}^{N/2} (\max\{s(t_{2i-1}), s(t_{2i}), s(t_{2i+1})\} - \min\{s(t_{2i-1}), s(t_{2i}), s(t_{2i+1})\}) \tag{3}$$

盒维数定义为

$$D_s = 1 + \mathrm{lb}\left(\frac{d(\Delta)}{d(2\Delta)}\right) \tag{4}$$

由式(4)可知,采样点与盒维数的稳定性之间单调关系。当信噪比(SNR)大于适当的值时,盒维数是稳定的,因此可以将分形盒维数作为统计特征进行信号检测。本文选用高斯白噪声作为信号的噪声源,当噪声方差取值在 0~0.5 时分形盒维数如图 1 所示。

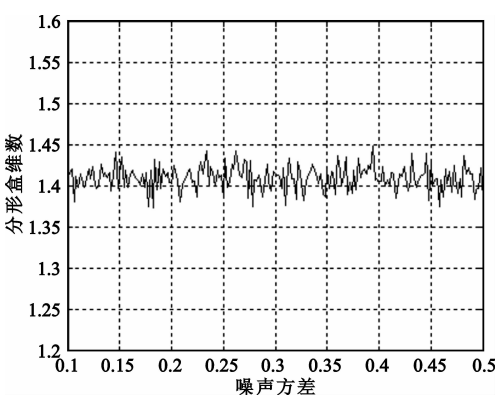

图 1 噪声分形盒维数

Fig.1 Noise fractal box dimension

文献[6]指出:当信噪比较大时,接收到的信号的盒维数接近于本身信号的盒维数,受到噪声影响可以忽略;当信噪比较低时,接收到的信号的盒维数趋近于噪声的盒维数。

3.2 协作优化检测方案

从图 1 可以得知,噪声盒维数作为判决门限,其值在 1.38~1.45 区间,文献[6]单纯地将某一个盒维数值作为判决门限不够严谨,甚至会导致判决出错。特别是在信噪比较低于 -15 dB时,将不能达到区别信号与噪声的目的。因此,借鉴相关文献的双门限思想[7-8],将噪声分形盒维数区间作为判决缓冲区 Ω,设定两个判决门限 λ_1、λ_2,分别对应噪声分形盒维数的最大值和最小值,如图 2 所示。

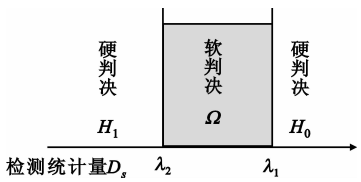

图 2 双门限判决示意图

Fig.2 Double threshold decision diagram

因此,判决准则可以重新定义为

$$\begin{cases} H_0: D_{si} > \lambda_1 \\ \Omega: \lambda_1 < D_{si} < \lambda_2 \\ H_1: D_{si} < \lambda_2 \end{cases} \tag{5}$$

式中,D_{si}表示第 i 个用户接收信号的盒维数。当盒维数在 Ω 中时,进行软判决,本地检测将检测统计量发送给 CR 控制中心;反之,则采用硬判决,发送本地检测结果 D_{si}。

假设 CR 控制中心接收到的 Z 个本地判决信息中,包括硬判决信息 K 个,记为 β,软判决信息 $Z-K$ 个,记为 α,对 α 进行可靠性融合得到 γ:

$$\gamma = \begin{cases} \dfrac{1}{Z-K}\sum_{i=1}^{Z-K} \alpha_i < \Gamma, & H_1 \\ \text{其它}, & H_0 \end{cases} \tag{6}$$

式中,Γ 为可靠性融合的判决门限。Γ 理论上应根据系统给定的虚警概率进行确定,实际应用中可依据式(7)进行计算[9]:

$$\Gamma = \bar{\lambda} + \Delta \tag{7}$$

式中,$\bar{\lambda} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$,$\Delta \in (-1, 1)$为修正量,具体取值根据需要调整。判决门限的选取与频谱环境和噪声背景等因素有关,然后,采用 OR 准则以最大化

全局检测概率。CR 控制中心利用 β 和 γ 进行融合判决,并标记检测率高的用户,建立排队模型,按照检测率高低排队并将队列信息反馈给控制中心;最终,控制中心融合判决给出全局判决结果 O_{result},下一检测周期来临,CR 系统首先检测队列中检测率高的用户。

$$O_{\text{result}} = \begin{cases} \gamma + \sum_{i=1}^{K} \beta_i < 1, & H_1 \\ \text{其它}, & H_0 \end{cases} \tag{8}$$

双门限合作检测模型如图 3 所示。

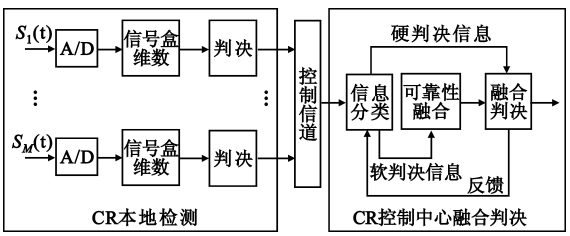

图 3　双门限合作检测模型

Fig.3 Double threshold cooperative sensing model

3.3　理论分析

假设检测统计量 D_{si} 在 H_0 和 H_1 情况下的分布分别为 $f(D_{si} \mid H_0)$ 和 $f(D_{si} \mid H_1)$,则对应的累积分布函数(CDF)为

$$\phi(\lambda) = \int_1^{\lambda} f(D_{si} \mid H_0) \mathrm{d}D_{si} \tag{9}$$

$$\psi(\lambda) = \int_1^{\lambda} f(D_{si} \mid H_1) \mathrm{d}D_{si} \tag{10}$$

定义本地检测的 4 种概率。

(1)检测概率 $P_{d,i}$:

$$P_{d,i} = P\{D_{si} < \lambda_2 \mid H_1\} = \psi(\lambda_2) \tag{11}$$

(2)虚警概率 $P_{f,i}$:

$$P_{f,i} = P\{D_{si} > \lambda_1 \mid H_1\} = 1 - \psi(\lambda_1) \tag{12}$$

(3)漏检概率 $P_{m,i}$:

$$P_{m,i} = P\{D_{si} < \lambda_2 \mid H_0\} = \phi(\lambda_2) \tag{13}$$

(4)认知概率 $P_{c,i}$:

$$P_{c,i} = P\{D_{si} > \lambda_1 \mid H_0\} = 1 - \phi(\lambda_1) \tag{14}$$

令

$$P_1 = P\{\sum_{i=K+1}^{N} D_{si} > \Gamma, \lambda_2 \leqslant D_{si} \leqslant \lambda_1, i = K+1, \cdots, N \mid H_1\} = \iint\limits_{\substack{\sum_{i=K+1}^{N} D_{si} > \Gamma, \\ \lambda_2 \leqslant D_{si} \leqslant \lambda_1}} \cdots \int f(D_{sK+1} \mid H_1) f(D_{sK+2} \mid H_1) \cdots f(D_{sN} \mid H_1) \mathrm{d}D_{sK+1} \mathrm{d}D_{sK+2} \cdots \mathrm{d}D_{sN} \tag{15}$$

$$P_2 = P\{\sum_{i=K+1}^{N} D_{si} > \Gamma, \lambda_2 \leqslant D_{si} \leqslant \lambda_1, i = K+1, \cdots, N \mid H_0\} = \iint\limits_{\substack{\sum_{i=K+1}^{N} D_{si} > \Gamma, \\ \lambda_2 \leqslant D_{si} \leqslant \lambda_1}} \cdots \int f(D_{sK+1} \mid H_0) f(D_{sK+2} \mid H_0) \cdots f(D_{sN} \mid H_0) \mathrm{d}D_{sK+1} \mathrm{d}D_{sK+2} \cdots \mathrm{d}D_{sN} \tag{16}$$

全局检测概率 P_d 和全局虚警概率 P_f 分别表示为

$$\begin{aligned} P_d = {} & P\{\max(D_{s1}, D_{s2}, \cdots, D_{sN}) < \lambda_2 \mid H_1\} + \\ & \sum_{K-1}^{N} P\{D_{s1}, \cdots, D_{sK} < \lambda_2, \lambda_2 \leqslant D_{sK+1}, \cdots, D_{sN} \leqslant \lambda_1 \mid H_1\} * \\ & P\{\sum_{i=K+1}^{N} D_{si} > \Gamma \mid \lambda_2 \leqslant D_{si} \leqslant \lambda_1; H_1\} = \\ & \psi^N(\lambda_2) + \sum_{K=1}^{N} \binom{N}{K} \psi^K(\lambda_2)(\psi(\lambda_1) - \psi(\lambda_2))^{N-K} * \\ & P\{\sum_{i=K+1}^{N} D_{si} > \Gamma \mid \lambda_2 \leqslant D_{si} \leqslant \lambda_1; H_1\} = \\ & (1 - P_{d,i})N + \sum_{K=1}^{N} \binom{N}{K} (P_{f,i})^K P_2 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} P_f = {} & P\{\max(D_{s1}, D_{s2}, \cdots, D_{sN}) < \lambda_2 \mid H_0\} + \\ & \sum_{K-1}^{N} P\{D_{s1}, \cdots, D_{sK} < \lambda_2, \lambda_2 \leqslant D_{sK+1}, \cdots, D_{sN} \leqslant \lambda_1 \mid H_0\} * \\ & P\{\sum_{i=K+1}^{N} D_{si} > \Gamma \mid \lambda_2 \leqslant D_{si} \leqslant \lambda_1; H_0\} = \\ & \phi^N(\lambda_2) + \sum_{K=1}^{N} \binom{N}{K} \phi^K(\lambda_2)(\phi(\lambda_1) - \phi(\lambda_2))^{N-K} * \\ & P\{\sum_{i=K+1}^{N} D_{si} > \Gamma \mid \lambda_2 \leqslant D_{si} \leqslant \lambda_1; H_0\} = \\ & (1 - P_{m,i})^N + \sum_{K=1}^{N} \binom{N}{K} (P_{c,i})^K P_1 \end{aligned} \tag{18}$$

4　仿真实现及分析

假设在加性高斯白噪声(AWGN)环境下,待检测的授权用户信号无信道衰落影响,设授权信号采用 BPSK 调制方式;信号采样点 $T = 2\,000$;虚警概率 P_f 为 0.1,用户数为 $M = 10$,作为对比,对能量检测性能进行了仿真,选取噪声方差为 σ^2 的理想高斯白噪声,判决门限参照文献[10]进行设定。

$$\lambda_{ed} = \sigma^2 \left(1 + \frac{Q^{-1}(P_f)}{\sqrt{T/2}}\right) \tag{19}$$

由于受噪声不确定的影响,可将噪声方差的估计值表示为:$\bar{\sigma}^2 = \xi\sigma^2$,噪声不确定性以分贝的形式表示为

$$b = \max\{10 \lg \xi\}$$

其中,$\xi \in [10^{-b/10}, 10^{b/10}]$。

(1)能量检测门限 $\lambda_{ed} = 1.08\sigma^2$,噪声不确定性

为1 dB,设定信噪比范围为 - 15 ~ 5 dB,蒙特卡罗仿真 500 次,由图 4 可知,双门限合作检测提高了频谱检测率,尤其提高了在极低信噪比情况下的检测率。

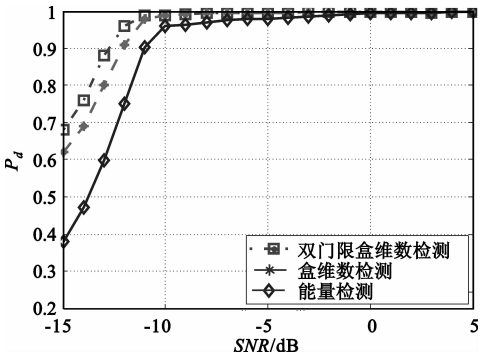

图 4 不同方法检测效果对比
Fig.4 Detection performance comparison

(2)固定 SNR 为 - 12 dB,图 5 给出了 3 个方法对应的接收机工作特性(Receiver Operating Characteristic,ROC)曲线,可以看出,本文方法在性能上具有显著优势。

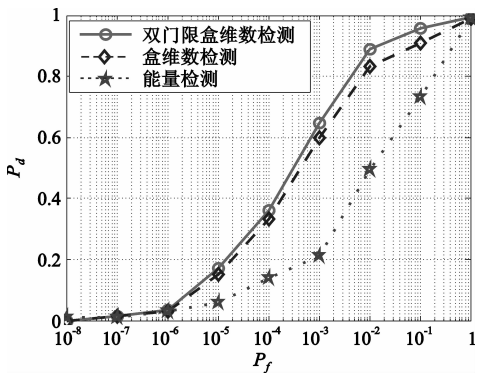

图 5 3 种方法 ROC 变化图
Fig.5 ROC of three detection methods

综上所述,双门限合作检测方法相对于传统能量检测和分形盒维数检测具有良好的频谱检测效能,尤其适合于低信噪比的频谱环境,采用多用户合作,减少甚至有可能避免本地检测多径衰落、遮蔽、隐蔽终端等问题导致的检测不确定性,提高了频谱检测率;建立排队模型,将队列信息反馈给 CR 控制中心,提高了 CR 系统的检测率,同时缩短了频谱感知时长。

5 结 论

本文在分析研究分形盒维数检测的基础上,针对盒维数单一门限检测的不足,采用多用户双门限分步合作方法,有效提高了分形盒维数检测方法的检测率。仿真结果表明,该方法能够弥补单门限方法在极低信噪比检测效果上的不足,算法运算复杂度低,提高了检测的可靠性,整体上提高了 CR 系统的检测能力。后续工作可以对不同类型噪声进行研究,以及利用分形理论中关于信息维数在调制样式识别上的特征,对频谱感知作深入研究。

参考文献:

[1] Mitola J. Cognitive radio:making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications,1999,6(4):13 - 18.

[2] 吉晓东,张士兵,高月红.认知无线电中衰落环境下的能量检测性能分析[J].电讯技术,2010,50(2):26 - 32.
JI Xiao - dong, ZHANG Shi - bing, GAO Yue - hong. Performance Analysis of Energy Detection for Cognitive Radio in Fading Channels[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(2):26 - 32.(in Chinese)

[3] Cabric D,Brodersen R W. Physical layer design issues unique to cognitive radio systems[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Berlin,Germany:IEEE,2005:759 - 763.

[4] Digham F F, Alouini M S, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(1):21 - 24.

[5] 吕铁军,郭双冰,肖先赐.调制信号的分形特征研究[J]. 中国科学(E 辑), 2001,31(6):508 - 513.
LV Tie - jun,GUO Shuang - bing,XIAO Xian - chi. Fractal box feature research of modulated signal [J].Science in China (Series E), 2001, 31(6):508 - 513.(in Chinese)

[6] 赵春晖,马爽,杨伟超.基于分形盒维数的频谱感知技术研究[J].电子与信息学报,2011,33(2):475 - 478.
ZHAO Chun - hui,MA Shuang,YANG Wei - chao. Spectrum sensing in cognitive radios based on fractal box dimension [J].Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(2):475 - 478. (in Chinese)

[7] Zhu J, Xu Z G, Wang F R,et al. Double Threshold Energy Detection of Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. Singapore: IEEE, 2008:1 - 5.

[8] Zheng X, Wang J, Wu Q, et al.A novel cooperative spectrum sensing algorithm in cognitive radio systems[J].Journal of Communications and Networks, 2009, 11(2):115 - 121.

[9] 焦传海,王可人,冯辉.认知无线电中基于自相关矩阵的协作盲感知[J].电路与系统学报,2011,16(1):12 - 19.
JIAO Chuan - hai,WANG Ke - ren, FENG Hui. Cooperative blind spectrum sensing based on autocorrelation matrix for cognitive radio [J]. Journal of Circuits and Systems,2011,16

(1):12 – 19. (in Chinese)

[10] Ye Z, Memik G, Grosspietsch J. Energy detection using estimated noise variance for spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Proceedings of 2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Las Vegas, USA: IEEE, 2008:711 – 716.

作者简介:

陈小波(1986—),男,贵州遵义人,2009 年于西安电子科技大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为无线通信和认知超宽带系统;

CHEN Xiao – bo was born in Zunyi, Guizhou Province, in 1986. He received the B. S. degree from Xidian University in 2009. He is now a graduate student. His research interests include wireless communication and cognitive ultra – wideband system.

Email:chenjin7255468@163.com

陈　红(1965—),女,安徽东至人,副教授,主要研究方向为通信与通信对抗等;

CHEN Hong was born in Dongzhi, Anhui Province, in 1965. She is now an associate professor. Her research interests include communication and communication countermeasure.

蔡晓霞(1965—),女,安徽淮南人,教授,主要研究方向为通信与通信对抗等;

CAI Xiao – xia was born in Huainan, Anhui Province, in 1965. She is now a professor. Her research interests include communication and communication countermeasure.

蒋金波(1987—),男,安徽六安人,2009 年于桂林电子科技大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为认知无线电。

JIANG Jin – bo was born in Liu′an, Anhui Province, in 1987. He received the B. S. degree from Guilin University of Electronic Technology in 2009. He is now a graduate student. His research direction is cognitive radios.

Email:15856975722@163.com

诚聘审稿专家启事

为了进一步加大审稿力度,充实审稿专家数据库,提高办刊质量,本刊常年面向社会诚聘电子信息领域的专家、学者担任本刊的审稿专家。审稿专家将享有如下权利:

(1)向本刊投稿通过评审后优先安排发表,并免收审稿费和版面费;

(2)向本刊推荐稿件通过评审后优先安排发表,并酌情减免版面费;

(3)获得每期免费赠阅的《电讯技术》及本刊编辑部编辑出版的《电讯技术动态》(月刊,内部交流,全彩色铜版纸印刷);

(4)获得按最高标准支付的审稿费;

(5)参加本刊举办的学术活动。

如果您有意应邀加入到本刊的审稿专家行列,敬请填写附表(可向编辑部索要电子版或在本刊网站 www.teleonline.cn 下载)后通过电子邮件发送到本刊编辑部邮箱。我们承诺为您的个人信息保密,对于您的支持表示衷心感谢。

电　话:028 – 87555632　**传　真**:028 – 87538378　Email:dianxunjishu@china.com

《电讯技术》审稿专家登记表

姓　名			单　位			
基本信息	职务		联系方式	通讯地址		邮　编
	职称			电　话		
	学历学位			传　真		
	从事专业			Email		
				QQ 号		
个人简介(科研及学术成就、社会兼职等)						