

# 采用离散小波变换的认知无线电频谱能量检测

魏东兴 殷福亮

(大连理工大学信息与通信工程学院, 辽宁大连 116024)

**摘 要:** 在认知无线电系统中, 频谱检测是搜索空闲信道, 避免对授权用户产生干扰的关键环节。本文提出了一种离散小波变换与时域能量检测相结合的频谱检测方法, 对认知用户共享的宽带信道中的窄带授权用户信号进行预检测。首先对接收信号进行离散小波变换, 获得能够反映信道频谱变化的细节小波系数, 然后以该系数作为统计量, 对其进行时域能量统计计算, 以进行频谱检测。该方法计算量较小, 易于实现, 可进行多分辨率分析, 能够提高检测的灵敏度和低信噪比下的检测性能且不需要被检测信号的先验知识, 适用于检测各种未知信号。仿真实验对无线麦克信号和地面无线数字电视信号进行了检测, 验证了该方法的正确性。

**关键词:** 认知无线电; 频谱检测; 离散小波变换; 能量检测

中图分类号: TN92 文献标识码: A 文章编号: 1003-0530(2014)03-0306-08

## Spectrum Energy Detection Using Discrete Wavelet Transform for Cognitive Radios

WEI Dong-xing YIN Fu-liang

(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In a cognitive radio (CR) context, spectrum detection is a key task for searching white space and avoiding harmful interference to primary users. A spectrum sensing scheme of time domain energy detector based on discrete wavelet transform (DWT) is proposed for sensing a narrow band PU signal in the channel accessed by SU. DWT is first to used to decompose the received signals, and one of the wavelet detail spaces may show the irregularities in channel signals, then calculate the energy of the detail space in time domain. The proposed scheme which has lower computational complexity, can perform multi-resolution spectrum sensing and exhibits a good detection performance at low SNR. Because of easy to implement and no requirement of any priori information about signals, it can be used to detect unknown signals. Simulations for wireless microphone signals and terrestrial digital TV channels are carried to verify the proposed scheme.

**Key words:** cognitive radio; spectrum sensing; discrete wavelet transform; energy detection

### 1 引言

在现行的无线电频谱分配政策中, 无线信道资源授权给特定用户, 其他用户无权使用, 当授权的无线频谱利用率较低时, 会造成频谱资源的浪费。近年来, 随着移动数据业务的快速增长, 对无线接入业务的需求与日俱增, 使得频率资源紧张的问题日益严重。认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 技术是缓解无线电频谱资源紧张的理想方案之一<sup>[1]</sup>, 它通过非授权用户机会地接入授权频谱的方式, 有效地提高既有的授权无线信道的利用率。

在 CR 系统中, 要求认知用户 (Secondary User, SU) 在不影响授权用户 (Primary User, PU) 正常通信的前提下, 机会地与 PU 共享授权频谱。SU 接入 PU 信道的前提是不对 PU 通信造成有害的干扰, 因此在 CR 系统中要对信道进行频谱检测。

频谱检测的主要性能指标是检测速度和检测精度。检测速度由检测时间决定, 检测时间包括两部分, 一是检测的时间间隔, 即多长时间重复一次检测; 二是每次进行频谱检测运算所需要的时间, 这两部分时间直接影响 SU 对 PU 干扰的时间长短以及 SU 本身的通信质量。检测精度是用检测概率

和虚警概率这两个指标来衡量,在一定信噪比、信道衰落等条件下,以最小的虚警概率获得最大的检测概率是频谱检测器追求的目标,通常可用接收机工作特性曲线(Receiver Operating Characteristics, ROC)来确定<sup>[2]</sup>。CR系统频谱检测主要有三种实现方法:能量检测方法、匹配滤波检测方法和循环平稳检测方法<sup>[3-4]</sup>。匹配滤波检测方法和循环平稳检测方法均利用信号的部分特征信息,对未知信号或不同类型的信号,其适应能力较差。能量检测是一种盲检测方法,只需要对信号能量进行统计计算即可。与匹配滤波检测方法和循环平稳检测方法相比,虽然在信道噪声干扰下,能量检测方法的检测阈值选定比较困难,在低信噪比下的检测性能不够理想,但是该方法不需要知道信号的先验信息,可适用于多种信号的检测,且算法实现开销小,计算复杂度低。

小波变换具有计算量相对较小,可进行多分辨率分析等特点,能够在相对较低的计算复杂度下提高检测的灵敏度,可有效地应用于CR系统频谱检测技术中<sup>[5-13]</sup>。Arianandad等将小波包变换用于频谱检测,在改善检测速度和精度的同时,可以综合考虑小波检测时间的分辨率和频率分辨率进行折中处理,实现对信道状态的扫描,完成频谱的动态管理<sup>[5]</sup>。Youn等提出了小波包变换与能量检测结合的频谱检测方法,实现多分辨率频谱检测<sup>[6-8]</sup>。Chen等将小波变换结合压缩感知技术用于克服宽带信号频谱检测的高采样率问题<sup>[9]</sup>。Venkat等提出了基于小波包分解的频谱检测方法,可以在保证频谱检测性能的前提下,降低所需的采样数量,即在一定采样速率下,检测过程所需的时间更少<sup>[10]</sup>。李晓艳等和曾文娟等分别在文献[11]和[12]中利用小波变换对被检测信号进行去噪,减小噪声对频谱检测的影响,尤其能提高低信噪比下的频谱检测性能;其中,前者采用连续小波变换实现去噪,后者则将小波变换结合协作频谱检测方法实现频谱检测。Chantaraskul等利用连续小波变换对宽带信号在频域进行边缘检测,通过检测信号在频域的突变,得到信道是否空闲的信息<sup>[13]</sup>。Adoum等将基于小波包变换的多分辨率检测与循环平稳检测相结合,实现对DVB-T信号的频谱检测<sup>[14]</sup>。上述这些利用小波变换的频谱检测方法大都能获得较好的检测性

能,但其所用的小波分析工具大多是连续小波变换或小波包变换,与离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)相比,其计算量仍然偏大;这些方法通常在频域进行检测,为了获得一定的频谱分辨率,需要较多的采样值,因此其检测时间较长,不能保证检测的实时性。此外,小波变换所结合的其他方法,如压缩感知、循环平稳、协作检测等,还存在复杂度偏高或需要已知信号特定的验知识等问题。

本文所研究的频谱检测问题是针对CR系统中,SU信号所占据的带宽大于单一PU信道带宽的情况,如无线麦克信号带宽为200KHz<sup>[15]</sup>,通常SU信号所占用的信道带宽远大于该PU信号带宽。针对这种应用场景的频谱检测问题,本文提出了一种基于离散小波变换和能量检测的方法,实现对期望信道上的窄带信号进行快速检测。该方法利用小波变换对期望PU信道中的信号状态在时间域上进行检测,首先利用离散小波变换对PU信号进行分析,然后对小波近似系数分量和细节系数分量在时域重构,再进行时域能量统计判决,检测出PU信号占用信道的状态,判定该期望PU信道是否空闲。该方法可用Mallat算法实现小波变换的快速计算,其计算复杂度较低;可进行多分辨率分析,突出了被检测信号时域上的突变特性,具有良好的检测灵敏度。此外,由于与能量检测方法相结合,该方法不需要被检测信号的先验知识,对不同类型的PU信号检测均具有良好的适应性。

## 2 频谱检测模型

对PU信道进行频谱检测的假设检验模型可表示为下式的二元假设检验<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} H_0: y(n) = \nu(n) \\ H_1: y(n) = s(n) + \nu(n) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $H_0$ 和 $H_1$ 分别表示期望PU信道空闲和被PU占用时的假设检验; $y(n)$ 表示信道检测器收到的信号采样值,即信号的时间离散表示形式; $s(n)$ 和 $\nu(n)$ 分别表示SU信号和信道加性白噪声的采样值。

用能量检测器实现的频谱检测过程如图1(a)所示,首先通过工作频段与PU信号相同的信道带通滤波器(BPF)选定所检测的PU信道,然后在时域对接收信号能量进行统计,即

$$E = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} |y(n)|^2 \quad (2)$$

其中,  $L$  为观测的采样点数。

针对宽带信道中的窄带 PU 信号频谱检测问题, 本文给出的检测模型如图 1(b) 所示, 其中信道 BPF 的频率参数与 SU 信号相同, 而 SU 的工作频率、带宽  $B_s$  与被检测的 PU 信号不同, 典型的例子是 PU 信号为广播电视信道中的无线麦克风信号时, 其单信道带宽仅为 200KHz, 而共享信道的 SU 信号带宽可能远远大于 PU 的带宽, 所以, 在 SU 所占据的信道上可能存在一个或几个 PU 信号, 此时有  $B_s \gg B_p$ 。

对这种宽带 SU 共享信道进行检测时, 如果用循环平稳检测方法和匹配滤波检测方法, 由于缺少信号的先验知识, 其检测性能会很差, 此时可使用能量检测器。能量检测器有两类实现方式, 一是将观测到的信号变换到频域, 然后进行能量统计检测, 其中频域变换所用的快速傅立叶变换 (FFT), 计算复杂度为  $O(L \log L)$ 。二是在时域按照式(2)进行一步检测, 此时, 为了监测整个 SU 共享的信道, 不能使用窄带滤波器, 这样由于没有对 PU 信号进行预滤波, 使得检测器的观测量中含有带外噪声, 从而降低了检测器的输入信噪比, 造成检测性能恶化; 解决该方法通常不是一步检测法, 而是用可调整滤波器或滤波器组与检测器相结合, 对特定的窄带 PU 信号进行扫描检测。

变换技术, 对信道进行能量统计, 实现一步法检测。小波变换本身等价于一个滤波器组, 将其中能够反映被检测信道内窄带信号特性的小波分解细节系数作为统计量, 可实现快速预检测, 其性能也会优于不加任何滤波措施的一步普通能量检测器。

### 3 基于小波分析的时域能量频谱检测方法

#### 3.1 PU 信号的小波分析

小波变换作为一种重要的信号处理手段具有多分辨率分析的特点, 通过对小波函数进行缩放和平移, 可在时域和频域实现信号细节特征分析。它可根据需要对时间窗和频率窗进行动态调整, 在信号的低频部分, 采用较低的时间分辨率进行分析, 以获得较高的频率分辨率; 在信号的高频部分, 用较高的时间分辨率进行分析, 以获取精细的时间定位, 使小波分析更适合于瞬变信号, 即检测信号的时间突变<sup>[16-17]</sup>。小波变换主要分为连续小波变换 (CWT)、离散小波变换 (DWT)、离散小波包变换 (DWPT) 等方法<sup>[16]</sup>, CWT 需要进行连续积分运算, 计算过程存在冗余信息, 其复杂度相对较高; DWPT 的计算复杂度则为  $O(L \log L)$ ; DWT 是对 CWT 的离散化处理, 结合 Mallat 算法, 可使其计算复杂度降低为  $O(L)$ 。

离散小波变换的表达式为<sup>[16]</sup>

$$y(n) = \sum_{k=1}^{N/2^J} a_j(k) \varphi_{j,k}(n) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{N/2^j} d_j(k) \psi_{j,k}(n) \quad (3)$$

式中,  $\varphi_{j,k}(n)$  和  $\psi_{j,k}(n)$  分别是尺度函数和小波函数;  $J$  表示小波分解的级数,  $N$  表示小波分解的系数的总数;  $a_j(k)$  和  $d_j(k)$  分别是近似系数部分和细节系数部分, 可表示为

$$\begin{cases} a_j(k) = \langle y(n), \varphi_{j,k}(n) \rangle \\ d_j(k) = \langle y(n), \psi_{j,k}(n) \rangle \end{cases} \quad (4)$$

图 2 是根据式 (3) 和式 (4) 对 PU 信道中无线麦克风信号的时域波形进行 3 层离散小波变换的结果。PU 信号为无线麦克风信号, 图 2(a) 和 (b) 表示从信道接收的原始信号, 其中图 2(a) 为理想的无噪声信号, 图 2(b) 为信道有噪声时接收到的信号, 其信噪比  $SNR = 0\text{dB}$ , 它在时域上分三段, 第一段为采样点 1 ~ 1000, 此时无 PU 信

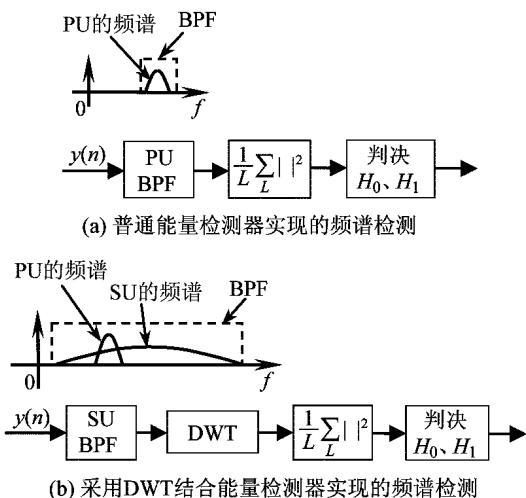


图 1 能量检测器实现的频谱检测

Fig. 1 Energy detector based spectrum sensing scheme

本文考虑在 SU 的工作频带内, 结合离散小波

号,表示在该时间段信道空闲,这对应式(1)中的假设检验  $H_0$ ;第二段为采样点 1001 ~ 3000,表示出现了 PU 信号,这对应式(1)中的假设检验  $H_1$ ,表示 PU 在信道中重新出现;第三段为采样点 3001 ~ 4000,表示 PU 信号不存在,即 PU 信号从信道中消失,此时信道变为空闲状态。由于 SNR 较低,从图(b)可见,要分辨出 PU 信号很困难。选取小波函数为 Symlets 小波<sup>[17]</sup>,对图 2(b)的信号进行离散小波变换,并对近似系数和细节系数按照补零扩展模式进行重构,使重构的系数长度与原始信号长度相等,得到近似信号 a3 和细节信号 d1、d2、d3,如图 2(c)~2(f)所示。与图 2(b)相比,根据图 2(c)所示的细节系数 d3,可以清晰分辨出第二段 PU 信号的存在,这说明信号的信噪比得到了明显改善。从图 2 可以看出,信号经过离散小波变换处理后再进行能量检测,其检测性能会明显优于使用普通能量检测器在时域对图(b)的信号直接进行检测。

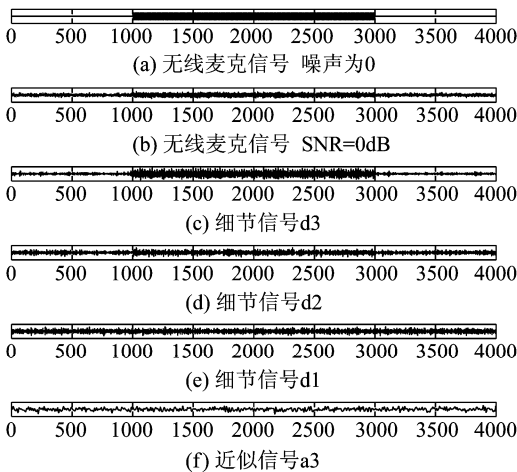


图2 对无线麦克风信号进行三层 DWT 的结果

Fig.2 Three level DWT decomposition of wireless microphone signals

### 3.2 基于小波分析的时域能量频谱检测方法

频谱检测是 CR 系统的关键环节,在各种频谱检测方法中,能量检测作为一种盲检测方法,具有算法简单、计算复杂度低的特点,适用于检测信道中存在多种不同的 PU 信号。能量检测可以在时域实现,也可以在频域实现。

根据 Parseval 定理,信号的功率与其在完备正交基中分解的各个分量的功率之和相等。根据信号  $y(n)$  的时域能量与频域能量守恒,有

$$\sum_k |Y(k)|^2 = \sum_n |y(n)|^2 \quad (5)$$

式中,  $Y(k)$  是信号  $y(n)$  的离散傅氏变换。

根据信号  $y(n)$  的时域能量与其小波变换域的能量守恒,则有

$$|y(n)|^2 = \sum |a_j(k)|^2 + \sum \sum |d_j(k)|^2 \quad (6)$$

式(6)表示信号  $y(n)$  的能量可以由其小波分解系数的能量统计表示<sup>[16]</sup>。

在认知无线电系统中,对信道的频谱检测通常应在频域中求信号的能量,由式(5)可知,这一过程也可以在时域中实现。当然,在时域进行频谱检测前,应该先设计一个通频带为检测频谱范围的数字滤波器,并用该信道滤波器对信号进行滤波处理。实际上,如果应用小波变换技术,则可以简化这个过程,更有效地实现信道的频谱检测。根据小波域的能量守恒式(6),对能够准确反映信道频谱状态变化的小波系数求其能量,将其作为小波分析结合能量检测的统计量进行判决即可。根据小波分析的特点,可以找到一个细节系数  $d_j(n)$  能够表示信道的频谱变化状态,将  $d_j(n)$  代入式(2),则统计量为

$$E = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} |d_j(n)|^2 \quad (7)$$

式中,  $d_j(n)$  是小波变换式(3)中  $d_j(k)$  经过补零扩展重构的结果,重构后的系数长度与原始信号长度相等,这样可以同步地得到 PU 信号占用信道状态的变化时刻,有利于提高频谱检测的实时性。统计时间长度即采样点数  $L$  可根据检测精度和检测速度的需要折中考虑选定。

本文频谱检测阈值  $E_{th}$  的确定方法与经典能量检测器一致。频谱检测器的性能可用检测概率  $P_d$  与虚警概率  $P_{fa}$  的关系曲线(ROC)来衡量,其中

$$P_d = P(D_1 | H_1) = \int_{E_{th}}^{\infty} p_1(E) dE \quad (8)$$

$$P_{fa} = P(D_1 | H_0) = \int_{E_{th}}^{\infty} p_0(E) dE \quad (9)$$

式中,  $p_0(E)$  和  $p_1(E)$  分别是假设检验  $H_0$  和  $H_1$  下对应的检测统计量  $E$  的概率密度分布函数,检测阈值  $E_{th}$  则为 ROC 切线的斜率,即

$$E_{th} = \frac{dP_d}{dP_{fa}} \quad (10)$$

因为  $P_{fa}$  与 SNR 无关,故可以很方便地根据  $P_{fa}$

来确定检测阈值  $E_{th}$ , 然后得到频谱检测器在各种 SNR 下的  $P_d$  值。

式(7)的统计计算是在时域实现, 因此可避免频域能量检测中傅立叶变换(FFT)的计算量过大, 以及为保证频率分辨率需要采样数较多的问题; 同时, 在时域进行检测也有利于提高频谱检测的实时性。

下面将本文方法的具体步骤总结如下:

- (1) 用式(4)对接收信号进行离散小波变换, 得到能反映出信道频谱状态变化的小波细节系数;
- (2) 对该细节系数进行补零重构, 使其长度与被检测信号的检测时间长度相等;
- (3) 将重构的细节系数作为统计量, 按式(7)对其进行时域能量统计;
- (4) 根据虚警概率确定检测阈值  $E_{th}$ ;
- (5) 如果  $E > E_{th}$ , 则检测判决为 PU 信号存在; 否则, 检测判决为 PU 信号不存在。

该方法将小波变换分析与时域能量检测相结合, 可利用小波变换具有的多分辨率分析的优点, 改善能量检测技术在低信噪比下的检测性能, 离散小波变换用 Mallat 算法快速计算, 具有较低的计算复杂度; 该方法应用了能量检测技术, 因此不需要被检测信号的先验知识, 对不同类型 PU 信号的检测均具有良好的适应性。

## 4 仿真与讨论

用 Monte Carlo 法对基于离散小波变换的时域能量检测方法进行了仿真实验。仿真实验分别针对两种典型的 PU 信号: 无线麦克风信号和地面无线数字电视信号(Digital Television, DTV)。其中, 无线麦克风信号的载波频率为 100MHz, 带宽为 200KHz, SU 共享的信道带宽为 20MHz; 地面无线 DTV 信号的中心频率为 100MHz, 带宽为 8MHz, SU 共享信道带宽为 80MHz, 在无线 DTV 的仿真实验中, 采用 32 个子载波的 OFDM 调制, 子载波间隔为 250KHz, DTV 信号的码速率为 15Mbps, 数字调制方式为 QPSK, 不失一般性, 用该 DTV 信号在仿真实验中模拟地面无线 DTV 传输标准定义的信号形式; 信道噪声为加性高斯白噪声; 离散小波变换采用常用的三种小波 Coiflet (coif5)、Daubechies (db6) 和 Symlets(sym6)作为小波函数, 如图 3 所示。

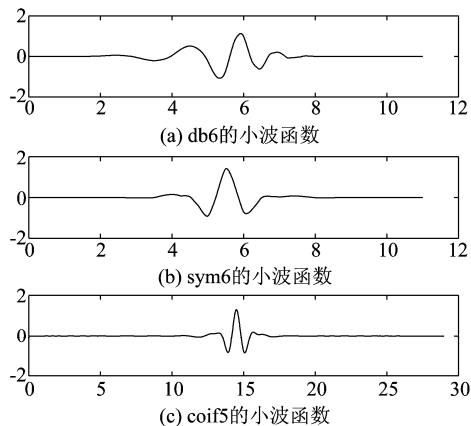


图3 仿真实验所使用的三种小波函数

Fig. 3 There types of wavelet function adopted in the simulations

用上述小波对信号进行 3 级 DWT 运算, 对存在上述两种 PU 信号的信道进行检测, 信噪比设定范围为  $-20\text{dB} \sim 0\text{dB}$ , 并与普通时域能量检测法的性能进行比较。需要指出的是, 针对两种典型的 PU 信号, 它们的信号带宽不同, 设定的 SU 共享信道带宽也不同, 这可以充分验证该检测方法检测不同信号的适应能力。

对上述两种 PU 信号分别用本文的小波变换方法和普通能量检测方法进行频谱检测, 得到的检测概率  $P_d$  与输入 SNR 的关系分别如图 4 和图 5 所示, 其中仿真中设定的虚警概率  $P_{fa} < 0.1$ 。由图 4 和图 5 可见, 本文方法对两种 PU 信号均可以实现可靠的频谱检测, 说明该方法对不同信号的检测均具有良好的适应性。从图 4 和图 5 还可以看出, 在同一信噪比下, 与普通能量检测法相比, 本文的小波变换检测方法可将检测概率  $P_d$  提高大约 15% ~ 20%; 在同一检测概率下, 本文的小波变换检测方法比普通能量检测法的信噪比向下移动了 1 ~ 2dB, 即提高了检测灵敏度。在低信噪比情况下, 如 SNR =  $-14\text{dB}$  时, 三种小波检测法对两种 PU 信号的检测概率  $P_d$  仍分别达到 80% 和 90% 以上, 而普通能量检测法的  $P_d$  均在 70% 以下, 这说明结合小波变换的能量检测方法的检测性能有明显改善。

图 6 和图 7 分别是对无线麦克风信号和无线 DTV 信号进行检测的 ROC 曲线, 其中信噪比 SNR =  $-15\text{dB}$ 。由图 6 和图 7 可见, 在虚警概率  $P_{fa} = 0.1$  时, 从图上曲线可以读出用三种小波时域检测法对两种 PU 信号检测得到的检测概率分别达到 70% 和 60%

左右,而普通能量检测法得到的检测概率分别为 55% 和 45% 以下,即本文的小波变换时域检测方法在低信噪比条件下,其检测概率改善了 10% 左右,这说明与普通能量检测方法相比,基于小波变换的一步时域能量检测方法可以显著改善频谱检测性能。

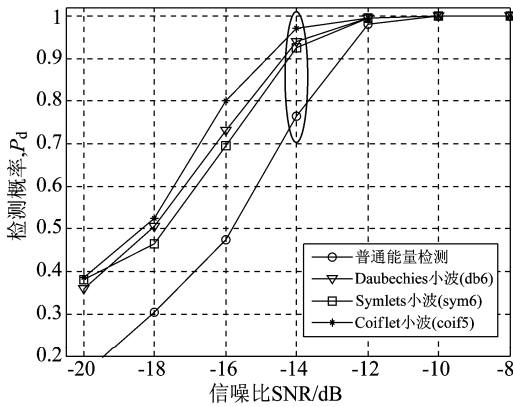


图 4 对无线麦克风信号的检测概率仿真结果

Fig.4 Detection probability versus SNR of wireless microphone signals

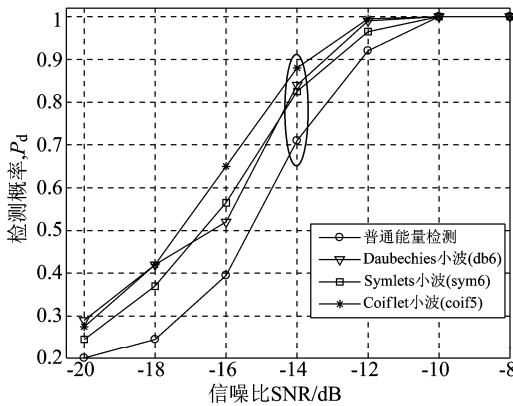


图 5 对无线 DTW 信号的检测概率仿真结果

Fig.5 Detection probability versus SNR of DTW

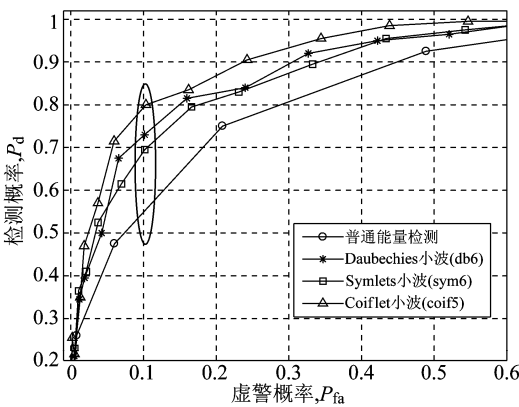


图 6 对无线麦克风信号检测的 ROC 曲线

Fig.6 ROC curve for wireless microphone detection

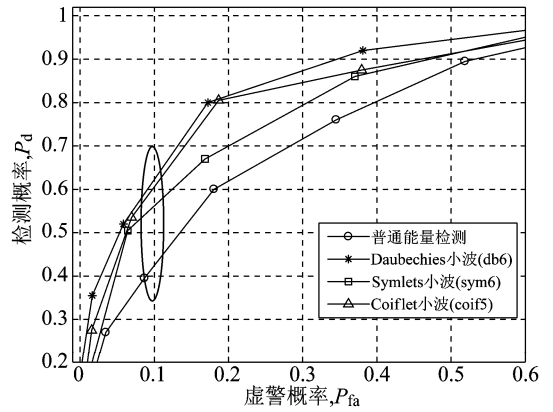


图 7 对无线 DTW 信号检测的 ROC 曲线

Fig.7 ROC curve for wireless DTW signal detection

信噪比  $SNR = -15dB$ , 时间窗宽度  $L$  取值分别为 4000、8000、12000、16000 个采样间隔,用 db6 小波进行 DWT 运算,使用不同的检测时间窗宽度对无线麦克风信号检测的 ROC 曲线如图 8 所示。由图 8 可见,时间窗的长度对检测性能有较大的影响,当  $L = 4000$  时,检测性能最差;随着  $L$  的增加, $L$  对检测性能的影响逐渐减小;当  $L$  增加到一定值时,对 ROC 曲线的改善不再明显。由此可见,增加时间窗宽度对提高检测性能有利,但会增加计算量,延长检测时间,所以应该对这两者进行折中考虑。

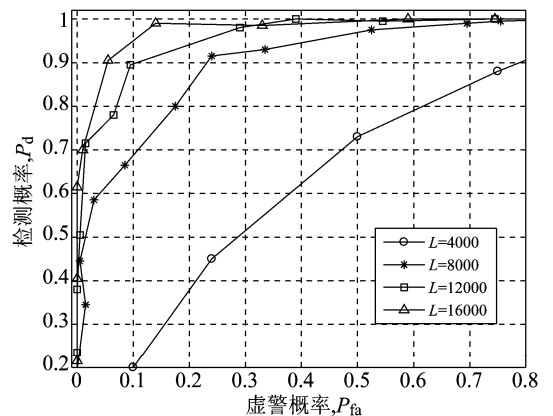


图 8 不同时间窗长度下的 ROC 曲线

Fig.8 ROC curve for detection window width

信噪比  $SNR = -15dB$ , 信道带宽分别取 5MHz、10MHz、20MHz,用 db6 小波进行 DWT 检测处理,当 SU 所共享信道带宽变化时,对无线麦克风信号进行检测的 ROC 曲线如图 9 所示。由图 9 可见,信道带宽对检测性能有一定影响,当信道带宽  $B_s$  较大时,检测性能较差;随着带宽  $B_s$  的减小,其检测性能逐渐

改善。这说明,信道带宽较大时,信道中 PU 信号的带外噪声对检测器性能有一定影响,但由于使用了离散小波变换,该影响不明显,这得益于离散小波变换具有的滤波器组特性。

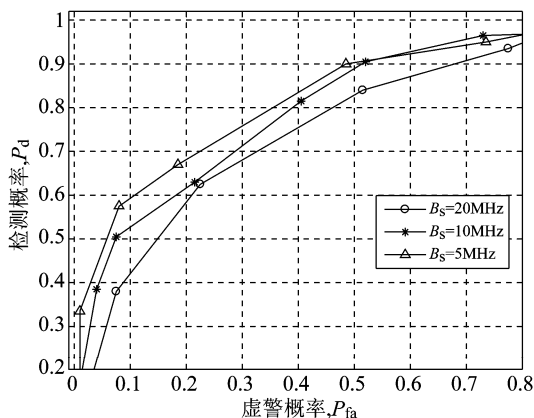


图9 不同信道带宽下的 ROC 曲线

Fig. 9 ROC curve with different channel band

## 5 结论

本文提出了一种基于离散小波变换结合能量检测器的频谱检测方法,对认知无线电系统 SU 共享信道中的窄带 PU 信号进行检测。该方法充分利用了离散小波变换计算量相对较小,可进行多分辨率检测的特点,用细节系数反映信道频谱的状态变化情况,可明显提高检测灵敏度性能,特别在小信噪比情况下,比普通能量检测方法的检测性能有明显改善。此外,本文方法通过结合能量检测器,不需要信号的先验信息就可进行有效检测。仿真实验结果表明,对无线麦克风和地面无线数字电视这两种典型的 PU 信号,本文的频谱检测方法均具有良好的适应能力,且比普通能量检测方法具有更好的检测性能。

## 参考文献

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

[2] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. Proceedings of IEEE, 1967, 55(4): 523-531.

[3] Yucek T, Arslan H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11 (1):

116-130.

- [4] 王红军, 毕国光. 一种改进的认知无线电循环功率谱特征检测算法 [J]. 信号处理, 2010, 26 (7): 1089-1093.
- Wang H J, Bi G G. A Modified Cyclic Power Spectrum Feature Detection Algorithm for Cognitive Radio [J]. Signal Processing, 2010, 26 (7):1089-1093. (in Chinese)
- [5] Ariananda D D, Lakshmanan M K, Nikookar H. A study on the application of wavelet packet transforms to cognitive radio spectrum estimation [C] // The 4th Int. Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Hannover, Germany, 2009:1-6.
- [6] Youn Y, Jeon H, Jung H, Lee H. Discrete wavelet packet transform based energy detector for cognitive radios [C] // IEEE Vehicular Technology Conference, Dublin, Ireland, 2007: 2641-2645.
- [7] Kim S, Yoon Y, Jeon H. Selective discrete wavelet packet transform-based energy detector for cognitive radios [J]. IEEE Military Communications Conference, Daejeon, Korea, 2008: 1-6.
- [8] Chandran A, Anantha K R, Kumar A. Discrete wavelet transform based spectrum sensing in futuristic cognitive radios [C] // The Int. Conf. on Devices and Communications (ICDeCom), Mesra, India, 2011:1-4.
- [9] Chen X, Zhao L, Li J. A modified spectrum sensing method for wideband cognitive radio based on compressive sensing [C] // The Fourth Int. Conf. on Communications and Networking in China, Xi'an, China, 2009: 1-5.
- [10] Venkat R, Homayoun N. Performance evaluation of a wavelet packet-based spectrum estimator for Cognitive Radio applications [C] // IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT), Ghent, Belgium, 2011: 1-6.
- [11] 李晓艳, 张海林, 胡飞. 应用小波变换的认知无线电频谱检测 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(13): 4-7.
- Li X Y, Zhang H L, Hu F. Spectrum sensing based on wavelet transform for cognitive radio [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(13):4-7. (in Chinese)
- [12] 曾文娟, 谢显中. 基于小波去噪的协作空闲频谱检测性能 [J]. 吉林大学学报:信息科学版, 2010, 28(5): 433-438.
- Zeng W J, Xie X Z. Performance of cooperative spectrum sensing based on wavelet transform for cognitive radio [J].

- Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2010, 28(5): 433-438. (in Chinese)
- [13] Chantaraskul S, Moessner K. Implementation of wavelet analysis for spectrum opportunity detection [C] // IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Tokyo, Japan, 2009: 2310-2314.
- [14] Adoum B A, Mossa A M, Jeoti V. Discrete wavelet packet transform based multi-resolution spectrum sensing using cyclostationary feature detector [C] // Int. Conf. on Intelligent and Advanced System, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010: 1-6.
- [15] Dionisio R, Marques P, Rodriguez J. TV white spaces maps computation through interference analysis. Future Network & Mobile Summit 2011 Conference. www.FutureNetworkSummit.eu / 2011.
- [16] Burrus S C, Gopinath R A, Guo H. Introduction to wavelets and wavelets Transforms [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [17] 高成. MATLAB 小波分析与应用(第 2 版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- Gao C. Matlab wavelet analysis and application(2nd Edition) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, China, 2007. (in Chinese)

### 作者简介



魏东兴 男, 1969 年生, 副教授, 主要研究方向为通信信号处理、认知无线电技术。E-mail: weidx@dlut.edu.cn



殷福亮 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为语音处理、图像处理、阵列信号处理和宽带无线通信技术。E-mail: flyin@dlut.edu.cn