文章编号：1672-2892(2011)05-0560-05

基于能量和循环谱的两步频谱感知

曹 蒙，余志勇，谭武端

(第二炮兵工程学院，陕西 西安 710025)

摘 要：频谱感知是认知无线电的重要技术之一，它通过实时感知电磁环境以判断频谱空穴的存在。根据能量检测的检测时间短，以及循环平稳特征检测在低信噪比情况下的检测准确性高的优点，提出了基于能量和循环谱的两步检测算法。通过实验仿真表明，与循环平稳特征检测相比，两步检测的检测时间大幅度缩短，同时检测准确性也得到了提高。

关键词：能量检测；循环平稳特征检测；两步检测

中图分类号：TN92 **文献标识码：**A

Two steps spectrum sensing based on energy and cyclostationary spectrum

CAO Meng，YU Zhi-yong，TAN Wu-duan

(The Second Artillery Engineering College，Xi'an Shaanxi 710025，China)

Abstract: Spectrum sensing is one of the important techniques for cognitive radio. It detects the surrounding electromagnetic environment in real-time to make sure whether 'spectrum hole' exists or not. According to the advantages including less detection time of energy detection and the higher detection accuracy of cyclostationary detection, this paper puts forward two steps detection method based on energy and cyclostationary spectrum. The results of simulation show that, contrasted to cyclostationary detection, the two steps detection reduces the detection time effectively, and its detection accuracy also gets improved.

Key words: energy detection; cyclostationary detection; two steps detection

随着用频仪器设备的增加，有限的频谱资源与对频谱资源需求持续增长之间的矛盾不断突出，频谱资源短缺的问题已引起国际社会的关注。美国联邦通信委员会(FCC)的研究表明[1]，固定指配给授权用户的频谱资源利用率在不同地区、不同时间内有很大的波动，从15%~85%不等。通过提高频谱资源利用率以缓解频谱资源短缺成为了国内外研究的热点。认知无线电(Cognitive Radio，CR)[2]就是在此背景条件下提出的，它是在软件无线电的基础上，通过对周围电磁环境信号进行实时检测，能够准确、快速地检测授权信号的存在，从而为频谱的再利用提供依据。

现阶段频谱感知方法主要有：匹配滤波器法、能量检测法、循环平稳特征检测等。匹配滤波器检测是相关检测的最优检测算法，但必须知道被检测用户信号的先验知识以及要求精确的信息同步[3]。能量检测具有计算简单，无需用户先验信息等优点，但在低信噪比情况下检测的准确性偏低，而且受到噪声模型的限制[4-5]。循环平稳特征检测[6]也无需先验知识，且在弱信号下能够检测出授权信号的存在，但计算量较大，需要较长的检测时间，不能满足快速性的要求。

根据能量检测算法具有的检测时间短和循环平稳特征检测算法具有在低信噪比情况下检测准确性高的特点，提出了两步检测算法。通过理论分析和仿真实验表明，两步检测算法较好地解决了检测时间和检测准确性的问题。

1 两步检测

频谱感知技术要求快速、准确地感知到频谱空穴的存在，而现阶段单一的频谱感知算法不能同时满足要求。

1.1 能量检测

能量检测是一种盲信号检测，它通过检测一段观测空间(时域或频域)内接收到信号总能量来判断是否有授

收稿日期：2010-06-02；修回日期：2010-08-04

权用户出现，其基本出发点是噪声的能量小于信号加噪声的能量。根据能量检测算法原理，建立二元假设模型[7]：

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

式中：H_0, H_1分别代表授权用户不存在和存在 2 种情况；$y(t)$,$x(t)$和 $n(t)$分别表示检测系统所接收到的信号、授权用户信号以及噪声。能量检测的基本原理结构如图 1 所示。

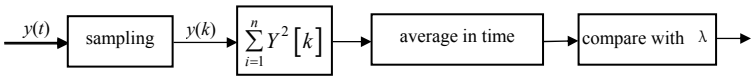

Fig.1 Energy detection
图 1 能量检测算法

判决统计量 T 为：

$$T=\sum_{n=1}^{N} Y^2[n] \tag{2}$$

判决统计量 T 是由服从高斯分布的信号平方和求得的，因此它服从非中心分布的 χ^2_{2u}。由中心极限定理，当 N 趋于无穷大时，T 服从正态分布，可表示为：

$$T \sim \begin{cases} N^{\mathrm{c}}(N\sigma_n^2, 2N\sigma_n^4) & H_0 \\ N^{\mathrm{c}}(N(\sigma_x^2+\sigma_n^2), 2N(\sigma_x^2+\sigma_n^2)^2) & H_1 \end{cases} \tag{3}$$

根据恒虚警检测理论，这时检测概率和虚警概率分别为：

$$P_{\mathrm{f}}^{\mathrm{c}} = Q\left(\frac{\lambda - N\sigma_n^2}{\sqrt{2N\sigma_n^4}}\right) \tag{4}$$

$$P_{\mathrm{d}}^{\mathrm{c}} = Q\left(\frac{\lambda - N(\sigma_x^2+\sigma_n^2)}{\sqrt{2N(\sigma_x^2+\sigma_n^2)^2}}\right) \tag{5}$$

其中，$Q(a)=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\frac{a}{\sqrt{2}}\right)$，erfc ()为互补误差函数。根据公式(5)，可以看到检测概率与信号和噪声的功率都相关，也就是与信噪比有直接的联系。

1.2 循环平稳特征检测

对于一个随机过程 $x(t)$，若其均值和自相关函数满足：

$$m_x(t+k/\alpha)=m_x(t) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{R}_x(t+k/\alpha, u+k/\alpha)=\boldsymbol{R}_x(t,u) \tag{7}$$

则称 $x(t)$为广义循环平稳信号，式中 α 为信号的循环频率，$\alpha=k/T$ 且 α 满足 $\Omega=\{\alpha: \boldsymbol{R}_x^{\alpha}(\tau)\neq 0\}$，$k$ 为整数，T 为信号的周期。由于人工发射的信号都经过调制、编码等使信号具有统计上的周期特征，而背景噪声不存在周期性，当 $\alpha\neq 0$ 时，噪声的自相关函数为 0，授权信号的自相关函数 $\boldsymbol{R}_x(t,u)\neq 0$，循环自相关函数 $\boldsymbol{R}_x^{\alpha}(t)\neq 0$，这是循环平稳特征检测的出发点。然而在实际的信号采样过程中，采集到的信号长度是有限的，即使 α 不是循环频率，$\boldsymbol{R}_x^{\alpha}(t)$ 也不等于 0。因此通过构建统计量 $\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha}(\tau)$ 的二维向量：

$$\boldsymbol{R}_x^{\alpha}(\tau)=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} x(t)x(t+\tau)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\alpha t}=[\mathrm{Re}\{\boldsymbol{R}_x^{\alpha}(t)\}, \mathrm{Im}\{\boldsymbol{R}_x^{\alpha}(t)\}]=[\mathrm{Re}\{\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha}(\tau)\}, \mathrm{Im}\{\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha}(\tau)\}]+[\mathrm{Re}\{\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_x^{\alpha}(\tau)\}, \mathrm{Im}\{\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_x^{\alpha}(\tau)\}]=\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha}(\tau)+\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_x^{\alpha}(\tau) \tag{8}$$

这样 $\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha}(\tau)$ 可以构建新的判决统计量：

$$\Gamma = N\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha}(\tau)\hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{-1}\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha'} \tag{9}$$

式中：$\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha'}$ 是 $\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha}(\tau)$ 的转置；$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{-1}$ 是 $\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha}(\tau)$ 的广义逆协方差矩阵，其表达式为：

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}}_{R_x^{\alpha}}=\begin{bmatrix} \mathrm{Re}\left\{\frac{S_{f,\tau}^{(T)}(2\alpha;\alpha)+S_{f,\tau}^{(*T)}(0;-\alpha)}{2}\right\}, \mathrm{Im}\left\{\frac{S_{f,\tau}^{(T)}(2\alpha;\alpha)-S_{f,\tau}^{(*T)}(0;-\alpha)}{2}\right\} \\ \mathrm{Im}\left\{\frac{S_{f,\tau}^{(T)}(2\alpha;\alpha)+S_{f,\tau}^{(*T)}(0;-\alpha)}{2}\right\}, \mathrm{Re}\left\{\frac{S_{f,\tau}^{(*T)}(0;-\alpha)-S_{f,\tau}^{(T)}(2\alpha;\alpha)}{2}\right\} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式(10)中 $S^{(T)}{}_{f,\tau}(2\alpha;\alpha)$，$S^{(*T)}{}_{f,\tau}(0;-\alpha)$的计算表达式为：

$$S^{(T)}{}_{f,\tau}(2\alpha;\alpha)=\frac{1}{NL}\sum_{s=-(L-1)/2}^{(L-1)/2}W^{(T)}(s)\times F_{N,\tau}(\alpha-\frac{2\pi s}{T})F_{N,\tau}(\alpha+\frac{2\pi s}{T}) \tag{11}$$

$$S^{(*T)}{}_{f,\tau}(0;-\alpha)=\frac{1}{NL}\sum_{s=-(L-1)/2}^{(L-1)/2}W^{(T)}(s)\times F^{*}_{N,\tau}(\alpha+\frac{2\pi s}{T})F_{N,\tau}(\alpha+\frac{2\pi s}{T}) \tag{12}$$

式中 $F_{N,\tau}(f)=\sum_{t=0}^{N-1}x(t)x(t+\tau)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi ft}$，$W^{(T)}(s)$为长度为 L 的 Kaiser 窗。

文献[8]证明统计判决量 Γ 服从分布为：

$$\Gamma=\begin{cases}\chi^2_{2N} & H_0\\ N(NR_x\Sigma^{-1}R'_x,\,4NR_x\Sigma^{-1}R'_x) & H_1\end{cases} \tag{13}$$

在实际测试中，信号的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 用公式表示为：

$$P_\mathrm{f}=P(\Gamma>\gamma|H_0)=\frac{\Gamma(\gamma/2,N)}{\Gamma(N)} \tag{14}$$

$$P_\mathrm{d}=P(\Gamma>\gamma|H_1)=Q(\frac{\gamma-NR_x\Sigma^{-1}R'_x}{\sqrt{4NR_x\Sigma^{-1}R'_x}}) \tag{15}$$

当虚警概率一定时，通过式(14)，计算出检测门限 γ，将 γ 与信号统计量 Γ 相比较，判断信号中是否有授权用户。循环平稳特征检测的基本原理结构如图 2。

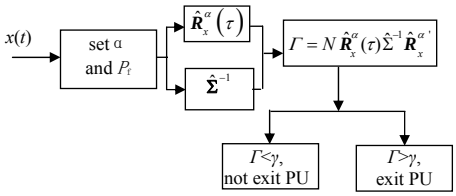

Fig.2 Cyclostationary detection
图 2 循环平稳特征检测

1.3 两步检测

对能量检测和循环平稳特征检测进行的理论分析表明，能量检测的检测时间短，循环平稳特征检测的检测准确性高，根据这两种算法的各自优点设计出两步检测算法。

两步检测方法基本原理为：根据能量检测的时间短以及检测的盲目性，首先对信号进行能量检测，实现对信号的整体检测，从而粗略地判断出信号中是否有授权用户存在。第 2 步则是对判断结果为没有授权用户存在的频段，进行循环平稳特征检测，以实现对信号的精细检测，从而更确切地判定授权信号的存在。两步检测原理如图 3 所示。

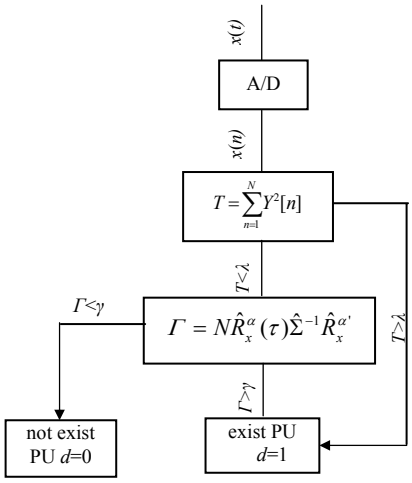

Fig.3 Two steps detection
图 3 两步检测

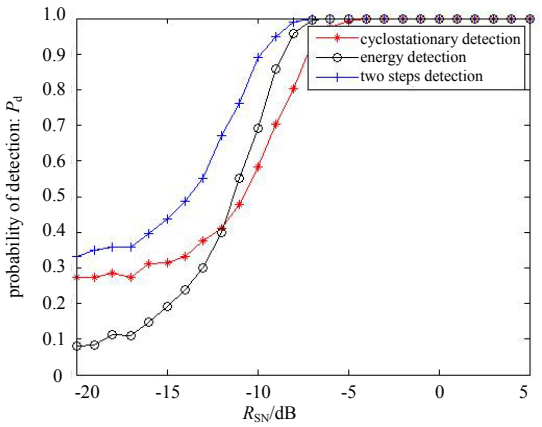

Fig.4 Detection performance
图 4 检测性能比较

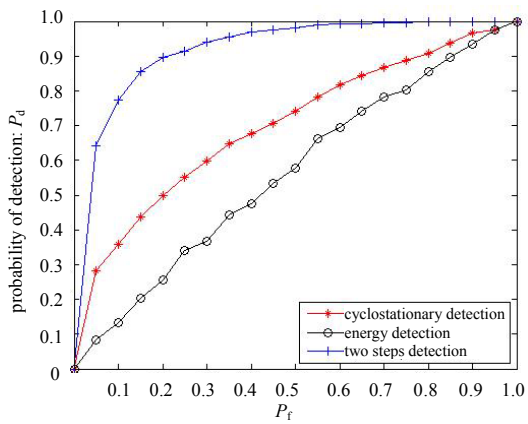

Fig.5 P_d changing following P_f
图 5 检测概率随虚警概率变化

2　仿真分析

假设授权信号采用 BPSK 调制方式，噪声为理想的加性高斯白噪声，噪声方差为 σ^2。仿真所用参数为：采样频率 f =1(归一化)，载频 $f_c = f/8$，码率 $f_0 = f/16$，样本数 N=1 024，选取参数为 10 的 Kaiser 窗，窗长 L=N/4−1。采用蒙特卡罗仿真，仿真次数为 Num=1 000。

为比较两步检测与能量检测和循环平稳特征检测的优缺点，在仿真中，选取 $t_0 = 0, \phi_0 = 0, \alpha = 2f_c$。通过比较：

1) 检测概率随信噪比变化情况。设定虚警概率 P_f =0.05，信噪比范围[−20,5]内，检测概率 P_d 变化曲线图如图 4 所示。

可以看到，在低信噪比情况下，能量检测的检测概率 P_d 较低，两步检测比循环平稳特征检测的检测概率略高，同时还可以看到，随着信噪比 SNR 增大，能量检测的检测概率 P_d 上升很快，在 R_{SN}=−11 dB 时，能量检测的检测概率超过循环平稳特征检测。这是由于能量检测的盲目性和检测概率与信噪比 SNR 直接相关决定的。但是可以看到两步检测的检测概率相对于能量检测和循环平稳特征检测都较好，且能够在 R_{SN}=−8 dB 时已实现检测概率 P_d =1。

2）当信噪比 SNR 一定时，检测概率随虚警概率变化情况。选取 R_{SN}=−20 dB 时，变化曲线如图 5 所示。

从图 5 可知在低信噪比情况下，两步检测的检测概率，在 P_f=0.1 时，P_d =0.8，远远高于能量检测和循环平稳特征检测。这说明两步检测在低信噪比情况下的检测性能更好。

3）计算量分析。以乘法计算量为主，分析各算法计算量：能量检测的计算量 $\Psi n = N+1$ 次乘法。循环平稳特征检测的计算量为：$\hat{\boldsymbol{R}}_x^{\alpha}(\tau)$ 的计算量为 $2N$，$\hat{\Sigma}^{-1}$ 的计算量为 $8N(N/4-1)+4$，总的循环计算量为：$\Psi x = 2N^2 - 6N + 11$。两步检测算法的计算量由能量检测以及进行循环平稳特征检测的概率下的检测组成，所以两步检测的计算量 $\Psi_l = N+1+(1-P_d)(2N^2-6N+11)$，其中 P_d 为能量检测的检测概率。当 R_{SN}=−10 dB 时，P_d=0.71，乘法计算量如图所示。

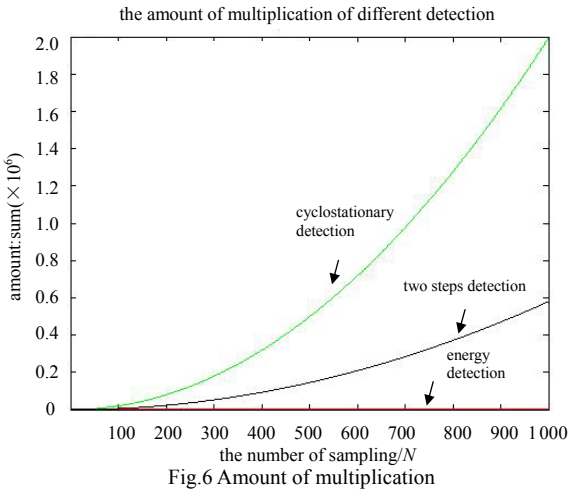

Fig.6 Amount of multiplication

图 6 乘法计算量

从图 6 中知道随着采样数据的增加，两步检测的乘法计算量与循环平稳特征相比减少了很多。这说明两步检测所需要的时间将比循环平稳特征检测所需要的时间更短。

3　结论

针对认知无线电技术中的频谱感知技术，本文在对能量检测和循环平稳特征检测进行详细分析的基础上，提出了将这 2 种频谱感知方法进行结合，进行两步检测。通过仿真分析表明，在相同情况下，两步检测的检测概率相对于能量检测和循环平稳特征检测都较高。特别是在低信噪比情况下该方法克服了能量检测概率偏低的问题，在计算的快速性上，通过仿真所需要的时间作对比可以发现，虽然相对于能量检测的时间较长，但与循环平稳特征相比，检测时间缩短很多。在要求保障检测概率和检测时间限制条件下，两步检测是一种很好的检测方法。

参考文献：

[1] Federal Communications Commission. Establishment of Interference Temperature Metric to Quantify and Manage Interference and to Expand Available Unlicensed Operation in Certain Fixed Mobile and Satellite Frequency Bands[Z]. ET Docket 03-289,Notice of Inquiry and Proposed Rulemaking, 2003.

[2] Mitola J, Maguire G Q. Cognitive Radio: Making Software Radios more Personal[J]. IEEE Personal Common., 1999,6(4): 13-18.

[3] Cabric D,Tkachenko A,Brodersen R W. Spectrum Sensing Measurements of Pilot,Energy,and Collaborative Detection[C]// IEEE Military Communications Conference(MILCOM). Washington, DC:[s.n.], 2006:1-7.

(下转第 568 页)