

# 基于无线环境图信息辅助的多循环频率协作频谱感知方法<sup>①</sup>



刘高辉, 马李庆

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)  
通信作者: 刘高辉, E-mail: liugh68@xaut.edu.cn

**摘要:** 针对频谱感知中单循环频率检测不能充分利用信号循环谱信息的缺点, 本文提出一种基于无线环境图 (radio environment map, REM) 信息辅助的多循环频率协作频谱感知方法. 本文方法第 1 步在多个认知用户处分别选取多个相同的循环频率进行循环平稳检测, 选取谱相关函数幅度作为检测统计量, 根据推导的判决门限公式设定恒虚警概率时的门限值, 经判决融合得出单个认知用户处的检测结果; 第 2 步根据 REM 提供的授权用户与认知用户之间的距离信息计算各认知节点处的权值系数, 并通过与对应节点处的检测结果加权融合来提高检测结果的可信度. 仿真结果表明, 改进方法能有效检测到授权用户, 在低信噪比条件下有更好的检测性能且具有更强的实用性.

**关键词:** 协作频谱感知; 无线环境图 (REM); 多循环频率; 循环谱; 循环平稳检测

引用格式: 刘高辉, 马李庆. 基于无线环境图信息辅助的多循环频率协作频谱感知方法. 计算机系统应用, 2022, 31(2): 260-266. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8338.html>

## Multi-cycle-frequency Cooperative Spectrum Sensing Method Based on Radio Environment Map Information

LIU Gao-Hui, MA Li-Qing

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Given that single-cycle frequency detection cannot make full use of the cyclic spectrum information in spectrum sensing, this study proposes a multi-cycle frequency cooperative spectrum sensing method based on radio environment map (REM) information. The first step of this method is to select multiple same cyclic frequencies at multiple cognitive users for cyclostationary detection. The spectral correlation function amplitude is adopted as the detection statistic. The threshold value at a constant false-alarm rate (CFAR) is set according to the derived decision threshold formula, and the detection result at a single cognitive user is obtained through decision fusion. In the second step, the weight coefficient at each cognitive node is calculated according to the distance between the authorized user and the cognitive user provided by the REM. Weighted fusion of the weight coefficients and the detection results of the corresponding nodes are conducted to improve the reliability of the detection results. Simulation results show that the improved method can effectively detect authorized users and has better detection performance and stronger practicability under a low signal-to-noise ratio (SNR).

**Key words:** cooperative spectrum sensing; radio environment map (REM); multi-cycle-frequency; cyclic spectrum; cyclostationary detection

<sup>①</sup> 基金项目: 国家自然科学基金 (61671375)

收稿时间: 2021-04-27; 修改时间: 2021-05-28; 采用时间: 2021-06-08; csa 在线出版时间: 2022-01-17

频谱感知作为认知无线电的关键技术 (cognitive radio, CR) 是解决频谱资源匮乏和授权频段利用率低下这一矛盾最有潜力的通信技术之一<sup>[1,2]</sup>。无线通信信号的统计特性一般呈现周期性变化, 具有循环平稳特征, 而噪声作为随机变量不具备该特征。本文正是通过分析授权用户信号的循环平稳特征来判断授权用户是否存在, 该方法稳健性高, 能有效减少噪声对检测性能带来的影响。

授权用户信号具有分布在多个循环频率上的多个循环平稳特征, 由于受阴影衰落影响, 采用单一循环频率检测不足以充分利用信号的多循环平稳特征; 同时单认知用户的检测不足以克服信道衰落, 隐藏终端等不利因素对检测性能带来的影响。文献 [3] 改进了一种基于主用户随机到达的循环平稳检测方法, 该方法是通过将检测周期内后半部分瞬时采样值累加到前半部分来提高检测性能, 但该算法存在虚警率偏高的缺点; 文献 [4] 提出了一种基于多个循环频率的联合循环谱感知方法, 较单个循环频率检测提高了检测性能; 文献 [5] 研究了一种基于循环平稳的能量检测法, 该方法利用某一循环频率截面的能量来检测信号, 但没有充分利用信号的多循环平稳特征, 也没有考虑各认知节点处判决结果的可信度。

针对现有问题, 本文提出了一种基于无线环境图信息辅助的频谱检测方法。无线环境图可以看作是对复杂无线环境的一种数字化抽象, 能够反应信道参数、无线信号、网络拓扑等多维无线环境信息, 其根本目的是为认知无线电设备和网络提供全面的信息支持<sup>[6]</sup>。REM 所包含的信息有: 地理位置分布; 必须遵循的频谱监管制度; 频谱机会; 合适的信道模型; 阴影衰落分布以及干扰源等; REM 获取无线环境信息主要依赖于: 位置意识、地理环境意识、射频环境意识、移动和跟踪意识、政策意识、功能意识等<sup>[7,8]</sup>。

本文正是利用 REM 提供的授权与认知用户之间的位置信息计算各认知用户处的权值, 通过加权融合来提高检测结果的可信度。第 1 步在多个认知用户处分别选取多个相同的循环频率进行循环平稳检测, 通过比较不同循环频率处谱相关函数幅值与门限值的大小来判断授权用户是否存在, 通过判决融合得到各认知用户处的检测结果; 第 2 步采用集中式协作检测<sup>[9]</sup>, 将各认知用户处的检测结果与根据授权用户发射台和认知用户之间的位置信息计算的各节点处权值进行加

权融合, 从而得到最终检测结果。联合多个循环频率参与检测的难点和挑战在于如何确定具体参与检测的循环频率, 根据信号谱相关理论可知循环频率在二倍载波频率处具有较强的循环平稳特征, 因此可以选择此处的循环频率参与检测, 本文则是通过计算接收信号的循环谱, 选取二倍载波频率处循环谱值较高的多个循环频率参与检测来改善检测性能。

## 1 基于谱相关的频谱检测原理

### 1.1 通信信号的谱相关特性

常用通信信号的调制方式主要包括有 BPSK, QPSK, QAM 等, 因受调制、编码、采样等处理使信号具备了一定的统计特性。当某一通信信号的均值和自相关函数均存在周期性, 且周期性与信号的周期一致, 则称信号  $x(t)$  具有二阶循环平稳特性。其周期自相关函数的傅里叶级数可以表示为:

$$R_x(\tau) = \sum_{\alpha \in \Omega} R_x^\alpha(\tau) e^{j2\pi\alpha\tau} \quad (1)$$

其中, 傅里叶系数  $R_x^\alpha(\tau)$  称为循环自相关函数,  $\alpha$  为循环频率且满足  $\Omega = \{\alpha : R_x^\alpha(\tau) \neq 0\}$ 。  $R_x^\alpha(\tau)$  可由式 (2) 计算:

$$R_x^\alpha(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} R_x\left(t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (2)$$

把循环自相关函数的傅里叶变换定义为谱相关函数, 对  $R_x^\alpha(\tau)$  进行傅里叶变换可得到循环谱密度函数:

$$S_x^\alpha(f) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} R_x^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

### 1.2 循环平稳检测模型

频谱感知的主要目的是在保证授权用户正常通信的前提下, 实现对频谱空洞快速准确的检测。通常频谱感知问题被建模成一个二元假设检测问题:

$$y(t) = \begin{cases} n(t), & H_0 \\ \omega x(t) + n(t), & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $y(t)$  为认知用户接收到的信号,  $x(t)$  为授权用户发射的信号,  $n(t)$  为加性高斯白噪声,  $H_0$  表示授权用户不存在,  $H_1$  表示授权用户存在,  $\omega$  为信道系数。

噪声作为随机变量, 在处理过程中不会出现周期性变化, 因此就不具备循环平稳特征, 所以通过检测信号是否具备循环平稳特征, 就可以有效区分噪声和信号。假设信号与噪声相互独立, 对式 (4) 应用循环平稳特征检测, 可得式 (5) 所示的频谱检测模型:

$$S_y^\alpha(f) = \begin{cases} S_n^0(f), & \alpha = 0, H_0 \\ |H(f)|^2 S_x^0(f) + S_n^0(f), & \alpha = 0, H_1 \\ 0, & \alpha \neq 0, H_0 \\ H\left(f + \frac{\alpha}{2}\right) H^*\left(f - \frac{\alpha}{2}\right) S_x^\alpha(f), & \alpha \neq 0, H_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $H_0$ 表示授权用户不存在时只有噪声的情况,  $H_1$ 表示授权用户存在时噪声和授权用户信号共存的情况,  $H(f)$ 是加性高斯白噪声信道冲击响应的傅里叶变换,  $S_y^\alpha(f)$ 为认知用户接收信号的谱相关函数,  $S_x^\alpha(f)$ 为授权用户信号的谱相关函数,  $S_n^\alpha(f)$ 为噪声谱相关函数。

分析式(5)可知, 通过判断 $\alpha \neq 0$ 处接收信号的谱相关函数幅度是否为零就可以判断授权用户是否存在。但是, 由于信号受到噪声衰落以及多径的影响, 实际上很难得到理想的循环谱, 噪声的循环谱在 $\alpha \neq 0$ 处也就不完全为零。因此, 可以设定一个门限值, 如果接收信号的谱相关函数幅值大于门限值则判定授权用户存在, 如果小于门限值则判定授权用户不存在。可定义判决准则为:

$$\begin{cases} |S_y^\alpha(f)| > \lambda, H_1 \\ |S_y^\alpha(f)| \leq \lambda, H_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\lambda$ 为通过给定虚警概率设定的判决门限<sup>[10]</sup>。

### 1.3 判决门限的推导

对认知用户接收的信号进行采样得到离散信号  $x(n)$ , 将  $x(n)$  分成  $M$  组每组采样  $N$  个点, 然后对每组数据进行  $N$  点快速傅里叶变换, 再进行  $M$  次平滑即可得到循环谱密度函数的离散频域表达式:

$$S_y^\alpha(f) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M Y_m(f + \alpha) Y_m^*(f - \alpha) \quad (7)$$

其中,  $Y_m()$ 和 $Y_m^*()$ 为认知用户接收的第  $m$  组信号的离散傅里叶变换和离散傅里叶变换的共轭;  $M$ 为频域平滑次数;  $N$ 为FFT点数, 对 $S_y^\alpha(f)$ 取模即可得到检测统计量。

当接收信号中只含有噪声时, 式(7)可表示为:

$$S_n^\alpha(f) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M W_m(f + \alpha) W_m^*(f - \alpha) \quad (8)$$

其中,  $W_m()$ 和 $W_m^*()$ 分别为第  $m$  组信号中噪声的  $N$  点傅里叶变换和傅里叶变换共轭,  $S_n^\alpha(f)$ 为噪声循环功率谱密度。当 $\alpha \neq 0$ 时, 噪声的循环功率谱密度期望为:

$$E[S_n^\alpha(f)] = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M E[W_m(f + \alpha) W_m^*(f - \alpha)] \quad (9)$$

令  $Z^\alpha(f) = W(f + \alpha) W^*(f - \alpha)$ , 当  $f = 0$  时, 式(9)可转化为:

$$\begin{aligned} & E[Z^\alpha(\alpha)(Z^\alpha(\alpha))^*] \\ &= E[W(\alpha) W^*(-\alpha) W^*(\alpha) W(-\alpha)] \\ &= E[W(\alpha) W^*(-\alpha)] E[W^*(\alpha) W(-\alpha)] \\ &\quad + E[W(\alpha) W^*(\alpha)] E[W^*(-\alpha) W(-\alpha)] \\ &\quad + E[W(\alpha) W(-\alpha)] E[W^*(-\alpha) W^*(\alpha)] \\ &= \begin{cases} 2\sigma^4 N^2 \left(1 - \frac{|m-n|}{p}\right)^2 e^{j4\pi\alpha(m-n)/p}, & |m-n| \leq p-1 \\ 0, & |m-n| \geq p \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $\sigma^2$ 为噪声方差,  $p$ 是数组的重叠因子。由式(9)和式(10)推出 $S_n^\alpha(0)$ 的方差 $V_{s1}$ 为:

$$\begin{aligned} V_{s1} &= \text{Var}(S_n^\alpha(0)) \\ &= \frac{2\sigma^4}{M^2} \left[ M + \sum_{i=1}^{p-1} 2(M-i) \left(1 - \frac{i}{p}\right)^2 \cos(4i\pi\alpha/p) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

可以证明 $S_n^\alpha(0)$ 的实部和虚部独立同分布, 均值为0, 方差为 $V_{s1}/2$ , 由中心极限定理得到,  $S_n^\alpha(0)$ 的实部和虚部服从均值为0, 方差为 $V_{s1}/2$ 的正态分布。

当 $f \neq 0$ 时 $S_n^\alpha(f)$ 的方差 $V_{s2}$ 为:

$$\begin{aligned} V_{s2} &= \text{Var}(S_n^\alpha(f)) \\ &= \frac{\sigma^4}{M^2} \left[ M + \sum_{i=1}^{p-1} 2(M-i) \left(1 - \frac{i}{p}\right)^2 \cos(4i\pi\alpha/p) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

$S_n^\alpha(f)$ 的实部和虚部也服从均值为0, 方差为 $V_{s2}/2$ 的正态分布,  $|S_n^\alpha(f)|$ 的概率密度函数可表示为:

$$p_s(r) = \frac{r}{\sigma_s^2} e^{-r/2\sigma_s^2}, r \geq 0 \quad (13)$$

其中,  $r = |S_n^\alpha(f)|$ ,  $\sigma_s^2$ 为循环功率谱的实部和虚部的方差, 当 $f = 0$ 时,  $\sigma_s^2 = V_{s1}/2$ 。根据式(13)可得到循环平稳特征检测的判决门限为:

$$\lambda = \sqrt{2\sigma_s^2 \ln\left(\frac{1}{p_f}\right)} \quad (14)$$

给定噪声功率和虚警概率, 根据式(14)可以得到循环平稳特征检测的判决门限值。

## 2 信息辅助的协作频谱感知

### 2.1 多循环频率信息融合

本文方法的第一步为: 各认知用户在接收信号  $x(t)$  的不同循环频率处求其循环谱值  $|S_{y_i}^\alpha(f)|$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,

$j = 1, 2, \dots, n$ ,  $\alpha_i$ 为不同循环频率,  $y_j$ 为不同认知用户. 通过比较 $|S_{y_j}^{\alpha_i}(f)|$ 与门限值 $\lambda$ 的大小, 得到相应循环频率处的判决结果, 融合中心基于 OR 准则对多个判决结果进行融合, 得到各认知用户处的检测结果 $P_d^j$ :

$$P_d^j = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{di}) \quad (15)$$

图 1 为多循环频率检测融合框图, 式 (15) 中 $P_{di}$ 为第 $i$ 个循环频率的检测概率.

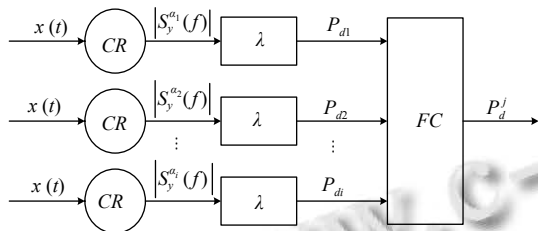


图 1 多循环频率检测融合框图

### 2.2 多认知用户协作加权融合

本文方法的第 2 步为: 将各认知用户处的检测结果与对应的权值进行加权融合, 得出最终的检测结果. 权值根据无线环境图提供的授权用户与认知用户之间的位置信息计算得出. 在协作检测中, 各认知用户分布在不同的空间位置上, 因此各认知用户所处的无线环境也略有差异, 这就导致各认知用户所做判决对最终检测结果的影响也不相同. 在理论分析中通常会选取认知节点处授权用户信号的信噪比作为影响度因子, 但在实际应用中很难获取. 实际通信中, 在不考虑多径和衰落的前提下, 认知节点处接收信号的信噪比与收发双方之间的距离成负相关, 认知用户与授权用户之间的距离越近其信噪比越高, 可靠性也就越高.

本文考虑实际应用场景, 假设认知用户能接收到授权用户信号且位置均固定, 认知无线网络利用认知用户和授权用户之间的位置分布构建一个 REM, REM 中包含有授权用户与认知用户之间的位置信息, 利用该位置信息能计算出授权用户到认知节点的距离. 因此可利用 REM 提供的授权用户与认知用户的距离信息作为认知节点处的权值, 二者之间的距离越小权重越大, 距离越大权重越小. 定义权重值<sup>[11]</sup>为:  $\omega_{ij} = l_j / \sum_{j=1}^N l_j$ , 其中 $l_j$ 是授权用户和第 $j$ 个认知用户之间的距离, 则多认知用户加权协作感知的检测概率为:

$$P_d = 1 - \prod_{j=1}^n W_{lj}(1 - P_d^j) \quad (16)$$

其中,  $W_{lj}$ 是第 $j$ 个认知用户处的权值,  $n$ 为协作感知的用户数量, 图 2 为多认知用户协作加权融合框图.

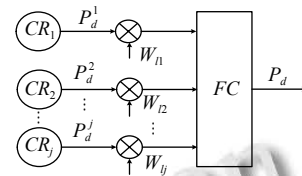


图 2 多认知用户协作加权融合框图

### 2.3 位置信息辅助的频谱检测流程

基于循环谱的多循环频率加权协作频谱感知步骤总体分为 3 步, 如图 3 所示.

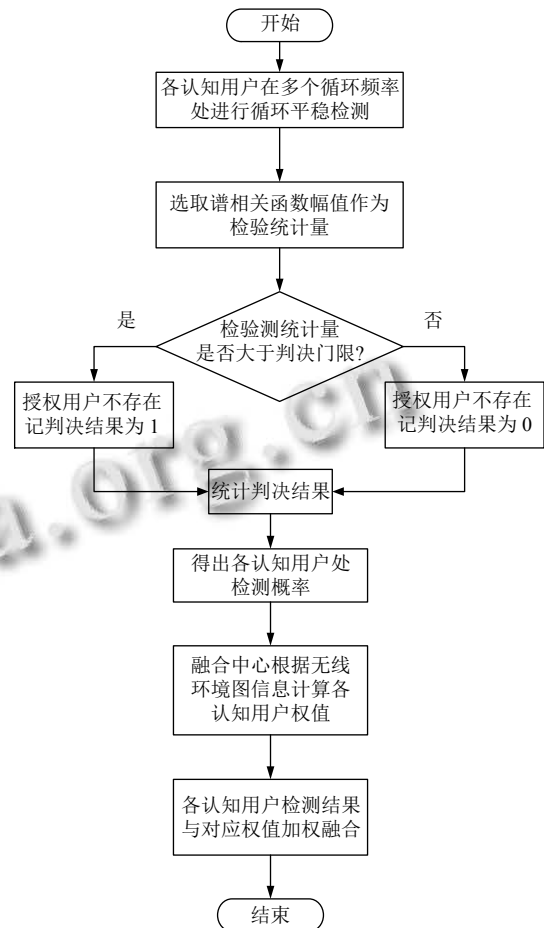


图 3 信息辅助的加权协作频谱感知流程图

步骤 1. 各认知用户在不同循环频率处计算相应的谱相关函数幅值 $|S_{y_j}^{\alpha_i}(f)|$ 并与门限值比较, 得到 $\alpha_i$ 处的判决结果. 当谱函数幅值大于门限值时, 授权用户存在,

记为 $a_i = 1$ ; 小于门限值时, 授权用户不存在, 记为 $a_i = 0$ . 随机仿真 $N$ 次, 统计 $a_i = 1$ 和 $a_i = 0$ 的个数分别记为 $N_1$ 和 $N_0$ . 则基于 OR 准则 $\alpha_i$ 处的检测概率为 $P_{di} = P(|S_{y_j}^{\alpha_i}(f)| > \lambda | H_1) = N_1/N$ , 虚警概率为 $P_{fi} = P(|S_{y_j}^{\alpha_i}(f)| > \lambda | H_0) = N_0/N$ .

步骤 2. 根据 REM 储存的授权用户与认知用户之间的距离计算各认知用户的权重值 $W_{ij}$ .

步骤 3. 将各认知用户的检测结果乘以权值 $W_{ij}$ , 一并送入融合中心进行数据融合得出最终检测结果 $P_d$ .

### 3 仿真与结果分析

#### 3.1 通信信号的循环谱仿真与分析

构建蒙特卡洛仿真模型, 假设授权用户调制方式为 BPSK 的通信信号, 载波频率 $f_c = 100$  MHz, 采样频率 $f_s = 300$  MHz, 采样长度为 $N=2048$ , 平滑点数为 $M=20$ . 噪声为均值为 0, 方差为 1 的高斯白噪声. 图 4、图 5 中不同颜色线条表示为接收信号的循环谱. 由图 4 可知, 在 $\alpha = 200$  MHz 处周围存在尖峰, 说明在频率 $f = \alpha/2 = 200$  MHz 周围存在信号. 授权用户的谱相关函数的非零值主要在 $\alpha = 0$ 和 $f = 0$ 两个截面上, 因此, 仿真中选用 $f = 0$ 截面上 $\alpha \neq 0$ 处的谱相关函数进行检测.

图 5 所示为 $f = 0$ 的切面图, 由图可知在 $\alpha = 0$ 两侧循环谱基本对称, 因此选取一侧的循环频率参与检测也能得到理想的检测结果. 联合多个循环频率检测, 应选取能明显表现授权用户信号特征的循环频率进行检测, 若选取循环平稳特征不明显或较弱的循环频率参与检测, 只会增加判决难度和处理的复杂度, 而无法提升检测性能. 因此, 在后续仿真中结合图 5 主要选取 $\alpha_1 = 190$  MHz,  $\alpha_2 = 193.8$  MHz,  $\alpha_3 = 203.8$  MHz,  $\alpha_4 = 207.6$  MHz,  $\alpha_5 = 211.2$  MHz 这 5 个循环频率进行检测.

#### 3.2 检测性能与仿真分析

图 6 为在 SNR = -8 dB 条件下单认知用户联合不同个数循环频率参与检测, 检测概率随虚警概率变化的关系图, 仿真参数同上, 仿真次数为 1000 次. 其中循环频率个数 $n$ 分别为 1 个、3 个、5 个. 单循环频率检测选择 $\alpha_3$ , 联合 3 个循环频率检测选择 $\alpha_1, \alpha_3$ 和 $\alpha_5$ , 联合 5 个循环频率检测选择 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 和 $\alpha_5$ .

由图 6 可知, 就整体检测性能而言, 联合循环频率数越多其检测性能越好. 在同一虚警概率条件下, 5 个

循环频率的联合检测性能优于 3 个循环频率的联合检测和单循环频率检测. 联合检测的循环频率个数越多, 检测概率越快达到 1. 在频谱感知中为保证授权用户的正常通信, 认知用户的虚警概率应满足小于等于 0.1. 当虚警概率为 0.1 时, 5 个循环频率联合检测比 3 个循环频率联合检测的检测概率大约提升了 6.1%, 比单个循环频率检测概率大约提升了 17.8%. 综上可知, 充分利用授权用户信号在不同循环频率处的多个循环平稳信息能有效改善检测性能, 在一定程度上提高了检测概率.

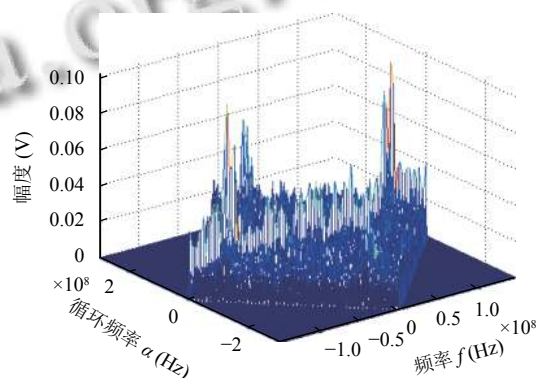


图 4 BPSK 信号循环谱图

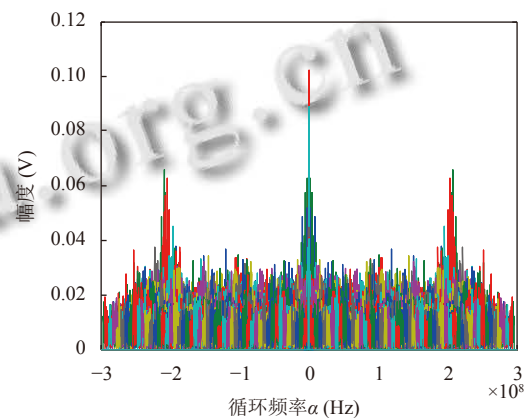


图 5 BPSK 信号循环谱 $f = 0$ 切面图

图 7 为在 SNR = -8 dB 条件下基于 REM 位置信息进行加权融合的多循环频率协作频谱感知检测图, 仿真参数同上, 仿真次数为 1000 次,  $m$ 为认知用户数. 基于 REM 的认知用户与授权用户之间的距离选取 $l_1 = 3$  km,  $l_2 = 5$  km,  $l_3 = 8$  km. 与之对应的权值为 $W_{l1} = 0.81$ ,  $W_{l2} = 0.68$ ,  $W_{l3} = 0.5$ . 当虚警概率小于 0.1 时, 3 个用户 3 个循环频率加权融合性能与 3 个用户 5 个循环频率

加权融合的性能基本接近,因此通过适当增加认知用户数量减少参与检测的循环频率个数也能达到检测目的.当虚警概率为0.1时,结合图6和图7分析可知,单用户3个循环频率加权融合相比于单用户3个循环频率联合检测性能大约提升了9.4%;3个用户5循环频率加权融合比3个用户3个循环频率加权融合的检测概率大约提升了9%;3个用户3个循环频率加权融合比单用户3个循环频率加权融合检测概率大约提高了20%.

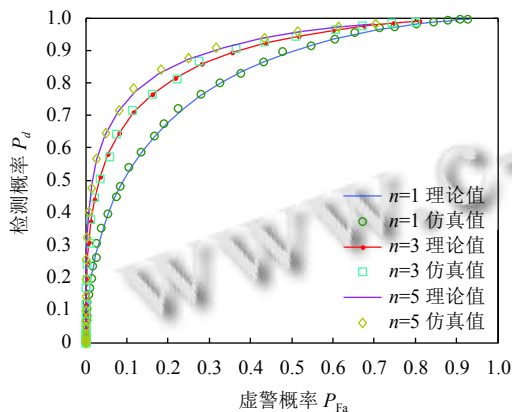


图6 不同循环频率个数联合检测仿真图

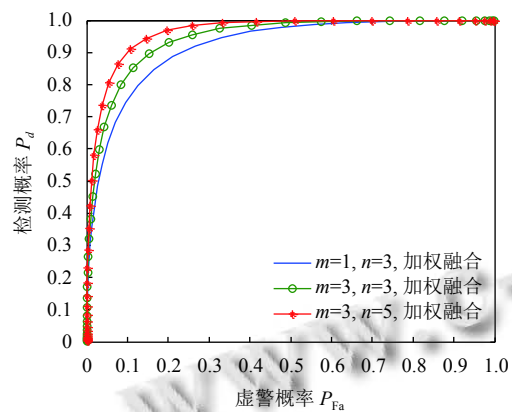


图7 多循环频率协作加权融合检测性能

图8为在 $P_f = 0.1$ 条件下本文方法与文献[4]中基于多个循环谱信息的联合检测方法性能对比图,其中 $n$ 为参与检测的循环频率个数,本文算法中认知用户数为3.由图可知,当 $\text{SNR} = -8 \text{ dB}$ 时,本文方法5个循环频率协作检测比联合循环频率方法5个循环频率合作检测的检测概率大约提升了25.9%;本文方法一个循环频率协作检测比联合循环频率算法3个循环频率合作检测的检测概率大约提升了65%.由图还可分析出

当信噪比大于 $-5 \text{ dB}$ 时,无论参与检测的循环频率个数是多少,检测概率都能达到1,因此本文方法在信噪比大于 $-5 \text{ dB}$ 环境中,选择3用户3个循环频率参与检测即可对授权用户实现有效检测,当信噪比小于 $-5 \text{ dB}$ 时,为确保检测的准确性应选取3个以上循环频率参与检测.由于本文方法采用协作式检测,在多个认知用户处选取多个循环频率参与检测,与传统单循环频率检测方法相比,本文方法在算法复杂度和时间开销上均有一定的提升.

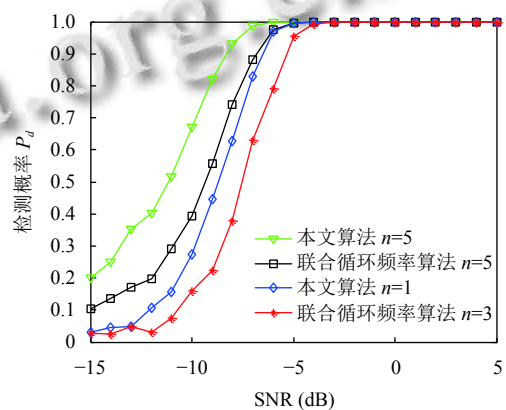


图8 两种检测方法的性能对比

## 4 结论

本文方法主要通过判断不同循环频率处谱相关函数幅值与门限值的大小来判断授权用户是否存在,同时通过对信号多个循环平稳特征以及空间上多个授权信息的充分利用来提高检测概率,考虑到各认知节点处实时信噪比难以获取的问题,本文根据REM提供的认知用户与授权用户之间的距离信息来计算各认知节点的权值,通过加权融合来进一步提高检测结果的可靠性.仿真结果表明该检测方法在低信噪比环境下有着良好的检测性能,同时不需要考虑认知用户自身信噪比信息,更适用于实际通信中的频谱检测.

## 参考文献

- Zhou M, Wang TY, Wang SW. Spectrum sensing across multiple service providers: A discounted Thompson sampling method. IEEE Communications Letters, 2019, 23(12): 2402–2406. [doi: 10.1109/LCOMM.2019.2941717]
- Jin M, Guo QH, Xi JT, et al. On spectrum sensing of OFDM signals at low SNR: New detectors and asymptotic

- performance. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 65(12): 3218–3233.
- 3 马彬, 方源, 谢显中. 一种主用户随机到达情况下改进的循环平稳特征检测算法. *电子与信息学报*, 2017, 37(7): 1531–1537.
  - 4 张瑜, 马惠珠. 一种基于多个循环频率的联合循环谱感知方法. *应用科技*, 2010, 37(2): 16–19. [doi: [10.3969/j.issn.1009-671X.2010.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-671X.2010.02.005)]
  - 5 Han DM, Liu H. An energy detection based on cyclostationary. 2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Wuhan: IEEE, 2011. 1–4.
  - 6 Mao DL, Shao W, Qian ZP, *et al.* Constructing accurate radio environment maps with kriging interpolation in cognitive radio networks. 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). Xuzhou: IEEE, 2018. 1–3.
  - 7 Zhao YP, Raymond D, Da Silva C, *et al.* Performance evaluation of radio environment map-enabled cognitive spectrum-sharing networks. *MILCOM 2007-IEEE Military Communications Conference*. Orlando: IEEE, 2007. 1–7.
  - 8 Nuallain EO, Anderson C. Real-time radio environment mapping for cognitive radio. 2014 National Wireless Research Collaboration Symposium. Idaho Falls: IEEE, 2014. 64–68.
  - 9 Kim J, Choi JP. Sensing coverage-based cooperative spectrum detection in cognitive radio networks. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(13): 5325–5332. [doi: [10.1109/JSEN.2019.2903408](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2903408)]
  - 10 包亚萍, 蒋利, 朱晓梅. 基于循环谱的多循环频率加权合作频谱检测. *数据采集与处理*, 2012, 27(2): 248–253. [doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2012.02.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2012.02.020)]
  - 11 Chen Y, Zhang H, Hu H, *et al.* A new cooperative spectrum sensing with radio environment map in cognitive radio networks. *Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things*. Harbin: IEEE, 2015. 40–43.