

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

马彬* 方源 谢显中

(重庆邮电大学宽带接入网研究所 重庆 400065)

(重庆邮电大学重庆市计算机网络与通信技术重点实验室 重庆 400065)

摘要: 在认知无线电(CR)网络中, 针对检测频段突然被主用户(PU)占用导致次用户频谱检测性能较差的情况。该文提出一种基于反馈叠加原理的改进循环平稳特征检测算法, 该算法通过将检测周期后半部分采样点的瞬时采样值累加到检测周期前半部分采样点的瞬时采样值上, 在不延长检测时间的基础上, 提高了整个检测周期的判决统计值, 从而提高了系统检测性能。并且从理论上详细分析了该算法的检测概率, 虚警概率与吞吐量。仿真结果表明, 该算法的检测性能优于传统循环平稳特征检测算法和传统能量检测算法, 并且保证了不错的用户数据吞吐量。

关键词: 认知无线电; 主用户随机到达; 循环平稳特征检测; 反馈叠加; 检测概率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)07-1531-07

DOI: 10.11999/JEIT141283

Improved Cyclostationary Spectrum Sensing Scheme for Primary Users Randomly Arriving

Ma Bin Fang Yuan Xie Xian-zhong

(Institute of Broadband Access Networks, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(Chongqing Key Laboratory of Computer Network and Communication Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In the Cognitive Radio (CR) networks, the detection performance of Primary User's (PU) randomly arriving during the sensing period is poor. So, an improved spectrum sensing method exploiting the cyclostationary feature is proposed, which adds the second half sampling values of sampling signal to the first half. The method improves the detection performance by enhancing the test statistic even though the sensing time is not added. Then, detection probability, false probability and throughput are analysed theoretically. Simulation results show that the proposed method performs better on detection performance and throughput than the conventional spectrum detection and the conventional cyclostationary spectrum sensing.

Key words: Cognitive Radio (CR); Primary user randomly arriving; Cyclostationary feature detection; Feedback addition; Detection probability

1 引言

认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术作为一种动态频谱再利用技术, 可以提高稀缺频谱资源利用率^[1,2]。CR 中存在两种用户, 一种是对频谱具有绝对使用权的主用户(Primary User, PU), 另一种是次用户(Secondary User, SU)。SU 通过主动检测 PU 频段, 进行伺机接入和退出, 因此, SU 频谱检测的有效性和准确性是决定能否顺利接入频段重要因素^[3]。

传统频谱检测的研究都是假设在检测周期内 PU 状态不发生改变, 然而, 在低信噪比或者高 PU 业务量的场景下, PU 的状态很可能发生变化, 传统频谱检测技术的检测性能会大大降低^[4]。循环平稳特征检测能够将噪声信号和有用信号区分开来, 可以摆脱信号中背景噪声的干扰^[5], 在上述情况下有着更好的检测性能。文献[6]分析了在 PU 随机离开和到达两种情况下的 SU 检测性能, 利用平均似然比法则改进了传统能量检测算法, 但在低信噪比场景下的检测性能并不太理想。文献[7]和文献[8]给出了 PU 状态在检测周期内随机变化场景下的基于 weight-p 能量检测算法, 为采样样本赋以单调增的权值, 较好地区分了检测周期内不同采样点位置对检测性能的影响。文献[9]描述了一种基于循环平稳特征检测的改进方法, 给出了其二元假设检验模型, 并通过

2014-10-09 收到, 2014-12-22 改回, 2015-05-08 网络优先出版
国家自然科学基金(61271259, 61301123, 61471076), 重庆市教委科学技术研究项目(KJ130536)和重庆市计算机网络与通信技术重点实验室基金(CY-CNCL-2010-02)资助课题

*通信作者: 马彬 mab_cqupt@sina.com

广义似然比准则推导出了判决统计量，得到了相比于能量检测更好的检测性能，但缺少算法的详细理论分析。

本文在查阅相关资料的基础上，提出了针对检测周期内 PU 随机到达情况下的一种改进循环平稳特征检测算法，由于该算法基于反馈叠加原理，可以在不延长检测时间的情况下显著提高系统的检测性能。本文的主要贡献可概括为：

(1)基于反馈叠加原理，增强了用户随机到达频谱情况下循环平稳特征检测算法的检测准确性，基于概率论工具详细分析了相关检测性能。据作者所知，利用反馈叠加原理来改进检测模型，进一步理论分析改进后的循环平稳特征检测算法，还少见报道。

(2)该文基于改进的反馈叠加信号检测模型，选取了合适的判决统计量，把应用场景分成两类，通过有效系数分别讨论了判决统计量的计算问题。

2 系统检测模型

CR 网络中 SU 的检测周期内，被检测频段突然被 PU 占用情况下的检测模型可以转化为如式(1)所示的二元假设，其中 H_0 状态表示不存在 PU， H_1 状态表示存在 PU，SU 接收到的信号 $x(t)$ 经采样之后得到式(1)。

$$\left. \begin{aligned} H_0 : x[m] &= n[m], \quad m=1, 2, \dots, N_s \\ H_1 : x[m] &= s[n] + n[m], \quad n=n+1, n+2, \dots, N_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 N_s 表示采样点数， $x[m]$ 表示 SU 接收信号， $s[n]$ 表示 PU 信号， $n[m]$ 表示复高斯白噪声信号，其服从均值为 0，方差为 δ^2 的高斯分布。在 H_1 状态中，假设 PU 在第 n 个采样时隙内随机接入频谱，且在一个检测周期内 PU 最多接入的次数为一次。

为了提高上述二元假设模型下的检测性能，本文提出了一种基于反馈叠加原理的改进检测模型。将检测周期后半部分采样点的瞬时值累加到前半部分采样点的瞬时值上，如果在 SU 检测周期的后半部分采样点中含有用户信号，那么经过反馈累加之后，在检测周期的前半部分中也将含有用户信号，从而提高了判决统计量。新检测模型如图 1 所示，其中灰色表示检测周期中存在 PU 信号的采样点，白色表示检测周期中不存在 PU 信号的采样点。

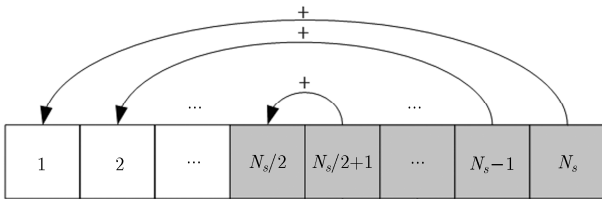


图 1 反馈叠加检测模型

3 反馈叠加循环平稳特征频谱检测算法及性能分析

3.1 传统循环平稳特征算法

循环平稳信号是一种统计特性随时间周期性变化的随机信号^[10]。设随机过程 $x(t)$ ，如果其均值 $m_x(t)$ 和自相关函数 $R_x(t)$ 在一段时间内具有周期性，则称 $x(t)$ 广义循环平稳。由于 $R_x(t)$ 具有周期性，可将其展开为傅里叶级数形式：

$$R_x\left(t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2}\right) = \sum_{\alpha_k} R_x^{\alpha_k}(\tau) e^{j2\pi\alpha_k t} \quad (2)$$

其中 $\alpha_k = k/T (k = 0, 1, 2, \dots)$ 称为信号的循环频率， $k = 0$ 时，循环自相关函数就是传统意义上的自相关函数。 $R_x^{\alpha}(\tau)$ 是傅里叶级数的系数，称为循环自相关系数 (Cyclic Autocorrelation Function, CAF)， $R_x^{\alpha}(\tau)$ 为

$$R_x^{\alpha_k}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} R_x\left(t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\alpha_k t} dt \quad (3)$$

若信号具有循环遍历性，统计平均可以由时间平均来代替，有

$$R_x^{\alpha_k}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\alpha_k t} dt \quad (4)$$

其中， $t = m\Delta t$ (Δt 是采样周期， $m = 1, 2, \dots, N_s$)， $T = N_s\Delta t$ (N_s 是采样数)，对 $R_x^{\alpha}(\tau)$ 求离散形式，得到式(5)

$$R_x^{\alpha_k} \simeq \frac{1}{N_s} \sum_{m=1}^{N_s} |x[m]|^2 e^{-j2\pi\alpha_k m} \quad (5)$$

其中 $\alpha_k' = k/m (k = 0, 1, 2, \dots)$ 。

在循环平稳特征检测中，判决统计量的选取往往与循环自相关系数有关。合适的判决统计量不仅可以显著减少运算量，而且可以实现更好的检测性能。通过对现有文献的查阅，选择式(6)所示的判决统计量^[11]：

$$T_{sc} = |Y_{sc}|^2 = |R_x^{\alpha_k}|^2 (\tau = 0) \quad (6)$$

其中，定义 Y_{sc} 为有效系数，有

$$Y_{sc} = R_x^{\alpha_k} (\tau = 0) = \frac{1}{N_s} \sum_{m=1}^{N_s} |x[m]|^2 e^{-j2\pi\alpha_k' m} \quad (7)$$

3.2 改进循环平稳特征算法分析

在图 1 的检测模型中，用 $a(0, 1, \dots, N_s)$ 表示在检测周期后半部分含有 PU 信号的采样点数目， H_0 条件下 $a = 0$ ，表示检测周期中只存在噪声不存在 PU 信号； H_1 条件下 $a > 0$ ，表示检测周期中存在 PU 信号。下面分别对 H_0 和 H_1 情况下的有效系数进行讨论。

H_0 条件下 $a = 0$ ，SU 的检测周期中只存在噪声，不存在 PU 信号，对信号采样值反馈叠加后如图 2 所示。

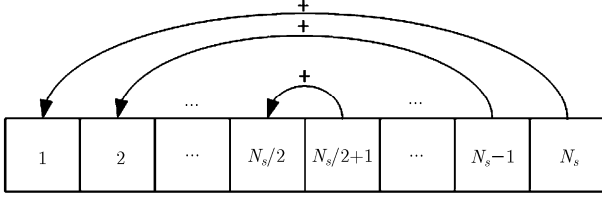


图 2 H_0 条件下检测周期

根据式(7)计算 H_0 条件下有效系数 Y_{sc} :

$$Y_{sc} = \frac{e^{-j2\pi\alpha'_k m}}{N_s} \left\{ \sum_1^{N_s/2} \left(|n[m]|^2 + |n[N_s - m + 1]|^2 \right) + \sum_{m=N_s/2+1}^{N_s} |n[m]|^2 \right\} \quad (8)$$

在 H_1 条件下, 当检测周期内主用户突然出现时, 对有效系数进行分析, 但是要对 a 值的大小分两种情况进行讨论。

第 1 种情况: PU 于检测周期中后段时间到达

当 $0 < a \leq N_s/2$ 时, PU 于检测周期中后段某个时段到达, 对接收端信号采样值反馈叠加后如图 3 所示。

根据式(7)计算该条件下有效系数 Y_{sc} :

$$Y_{sc} = \frac{e^{-j2\pi\alpha'_k m}}{N_s} \left\{ \sum_{m=1}^a \left(|n[m]|^2 + |s[N_s - m + 1]|^2 \right) + n[N_s - m + 1]^2 + \sum_{m=a+1}^{N_s/2} \left(|n[m]|^2 + |s[N_s - m + 1]|^2 \right) + \sum_{m=N_s/2+1}^{N_s-a} |n[m]|^2 + \sum_{m=N_s-a+1}^{N_s} |s[m] + n[m]|^2 \right\} \\ = \frac{e^{-j2\pi\alpha'_k m}}{N_s} \left\{ \sum_{m=1}^{N_s-a} |n[m]|^2 + \sum_{m=a+1}^{N_s/2} |n[N_s - m + 1]|^2 + \sum_{m=1}^a \left(|s[N_s - m + 1] + n[N_s - m + 1]|^2 \right) + \sum_{m=N_s-a+1}^{N_s} |s[m] + n[m]|^2 \right\} \quad (9)$$

第 2 种情况: PU 于检测周期前段时间到达

当 $N_s/2 < a \leq N_s$ 时, PU 于检测周期前段某个时段到达, 对接收端信号采样值反馈叠加后如图 4 所示。

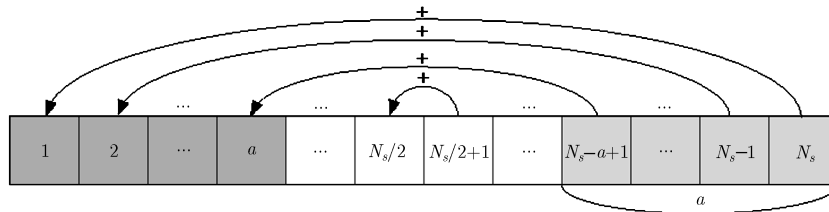


图 3 H_1 中 $0 < a \leq N_s/2$ 条件下检测周期

根据式(7)计算该条件下有效系数 Y_{sc} :

$$Y_{sc} = \frac{e^{-j2\pi\alpha'_k m}}{N_s} \left\{ \sum_{m=1}^{N_s-a} \left(|n[m]|^2 + |s[N_s - m + 1]|^2 \right) + n[N_s - m + 1]^2 + \sum_{m=N_s/2+1}^{N_s} |s[m] + n[m]|^2 + \sum_{m=N_s-a+1}^{N_s/2} \left(|s[m] + n[m]|^2 + |s[N_s - m + 1] + n[N_s - m + 1]|^2 \right) \right\} \\ = \frac{e^{-j2\pi\alpha'_k m}}{N_s} \left\{ \sum_{m=1}^{N_s-a} |n[m]|^2 + \sum_{m=N_s-a+1}^{N_s} |s[m] + n[m]|^2 + \sum_{m=1}^{N_s/2} |s[N_s - m + 1] + n[N_s - m + 1]|^2 \right\} \quad (10)$$

特别地, 当 $a = N_s$ 时, 检测周期中全部存在用户信号, 根据式(8)计算该条件下有效系数 Y_{sc} :

$$Y_{sc} = \frac{e^{-j2\pi\alpha'_k m}}{N_s} \left\{ \sum_{m=1}^{N_s} |s[m] + n[m]|^2 + \sum_{m=1}^{N_s/2} |s[N_s - m + 1] + n[N_s - m + 1]|^2 \right\} \quad (11)$$

3.3 性能分析

3.3.1 虚警概率和检测概率分析 二元假设检验模型下的检测概率和虚警概率如式(12)所示, 其中 T_{sc} 为判决统计量。

$$\left. \begin{aligned} P_{fa,\alpha} &= \int_{\eta}^{+\infty} P(T_{sc} | H_0) dT_{sc} \\ P_{d,\alpha} &= \int_{\eta}^{+\infty} P(T_{sc} | H_1) dT_{sc} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

假设噪声 $n(t)$ 是服从均值为 0, 方差为 σ^2 的复高斯白噪声, 即 $n[m] = n_r[m] + jn_i[m]$ 。存在 $E\{|n[m]|^2\} = \sigma^2$, $\text{var}\{|n[m]|^2\} = \text{var}\{n_r[m]^2 + n_i[m]^2\} = \sigma^4$ 。假设信号 $s(t)$ 与噪声 $n(t)$ 相互独立, 则 $E\{|s[m] + n[m]|^2\} = |s[m]|^2 + \sigma^2$ 。

H_0 条件下对虚警概率进行分析, 根据中心极限定理, 如果 $N_s \gg 1$, 那么 Y_{sc} 近似服从高斯过程, 有 $\sum_{m=1}^{N_s} e^{-j2\pi\alpha'_k m} = 0$ 且根据式(8)计算其分布均值和方差

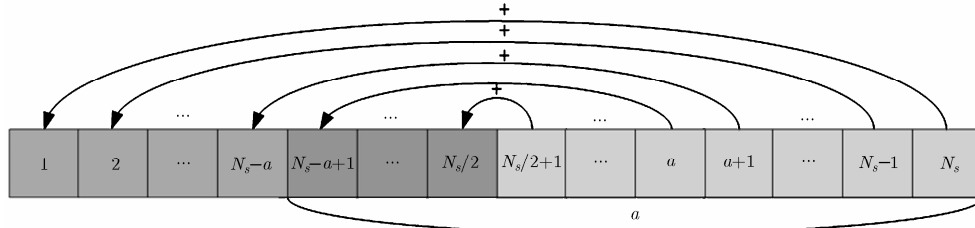


图 4 H_1 中 $N_s/2 < a \leq N_s$ 条件下检测周期

$$\left. \begin{aligned} E\{Y_{sc} | H_0\} &= \frac{3\sigma^2}{2N_s} \sum_{m=1}^{N_s} e^{-j2\pi\alpha'_k m} = 0 \\ \text{var}\{Y_{sc} | H_0\} &= \frac{1}{N_s^2} \left(2 \sum_{m=1}^{N_s/2} |e^{-j2\pi\alpha'_k m}|^2 \right. \\ &\quad \left. + \sum_{m=N_s/2+1}^{N_s} |e^{-j2\pi\alpha'_k m}|^2 \right) \text{var}\{n[m]^2\} \\ &= \frac{3\sigma^4}{2N_s} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由于 $(T_{sc} | H_0) = |Y_{sc} | H_0|^2 = (Y_0^r)^2 + (Y_0^i)^2$ ，所以 $(T_{sc} | H_0)$ 服从自由度为 2 的中心卡方分布，根据中心卡方分布的概率密度函数公式，得到 $P(T_{sc} | H_0)$

$$P(T_{sc} | H_0) = \frac{1}{2\sigma_0^2} e^{-T_{sc}/(2\sigma_0^2)} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} E\{Y_{sc} | H_1\} &= \frac{e^{-j2\pi\alpha'_k m}}{N_s} \left\{ \sum_{m=1}^{N_s-a} \sigma^2 + \sum_{a+1}^{N_s/2} \sigma^2 + \sum_{m=1}^a (|s[N_s - m + 1]|^2 + \sigma^2) + \sum_{m=N_s-a+1}^{N_s} (|s[m]|^2 + \sigma^2) \right\} = \frac{2a}{N_s} \bar{P}_{\alpha'_k} \\ \text{var}\{Y_{sc} | H_1\} &= \frac{|e^{-j2\pi\alpha'_k m}|^2}{N_s^2} \left\{ \sum_{m=1}^{N_s-a} \text{var}\{n[m]^2\} + \sum_{m=a+1}^{N_s/2} \text{var}\{n[N_s - m + 1]^2\} + \sum_{m=N_s-a+1}^{N_s} \text{var}\{s[m] + n[m]\}^2 \right\} \\ &\quad + \sum_{m=1}^a \text{var}\{s[N_s - m + 1] + n[N_s - m + 1]\}^2 = \frac{3\sigma^4}{2N_s} + \frac{4a\sigma^2 \bar{P}}{N_s^2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

其中 $\bar{P}_{\alpha'_k} = \frac{1}{N_s} \sum_{m=1}^{N_s} |s[m]|^2 e^{-j2\pi\alpha'_k m}$ ，为 PU 在循环频率 α'_k 处的平均功率， $\bar{P} = \frac{1}{N_s} \sum_{m=1}^{N_s} |s[m]|^2$ 为 PU 平均功率。

由于 $(T_{sc} | H_1) = |Y_{sc} | H_1|^2 = (Y_1^r)^2 + (Y_1^i)^2$ ，所以 $(T_{sc} | H_1)$ 服从自由度为 2 的非中心卡方分布，根据非中心卡方分布的概率密度函数公式，得到 $P(T_{sc} | H_1)$ ：

$$P(T_{sc} | H_1) = \frac{1}{2\sigma_0^2} e^{-(s_1^2 + T_{sc})/(2\sigma_1^2)} I_0 \left(\sqrt{T_{sc}} \frac{s_1}{\sigma_1} \right) \quad (17)$$

其中 $I_0(x)$ 为第 1 类零阶修正贝塞尔函数， $s_1 = \frac{2a}{N_s} \bar{P}_{\alpha'_k}$ ，

其中 $\sigma_0^2 = 3\sigma^4/(2N_s)$ 。

根据式(12)对 $P(T_{sc} | H_0)$ 积分，得到虚警概率

$$\begin{aligned} P_{fa,\alpha} &= \int_{\eta}^{+\infty} \frac{1}{2\sigma_0^2} e^{-T_{sc}/(2\sigma_0^2)} dT_{sc} = e^{-\eta/(2\sigma_0^2)} \\ &= e^{-\eta N_s/(3\sigma^4)} \end{aligned} \quad (15)$$

其中 η 是判决门限。在实际的检测环境中，为满足一定的检测性能，需要设定目标虚警概率 P_f^{DES} ，根据式(15)可以得到 P_f^{DES} 条件下反馈叠加循环平稳特征算法的判决门限 $\eta = -3\sigma^4 \ln P_f^{\text{DES}}/N_s$ 。

H_1 条件下根据 PU 到达时间的不同分两种情况对检测概率进行分析。

第 1 种情况：PU 于检测周期中后段时间到达

当 $0 < a \leq N_s/2$ 时，根据中心极限定理，如果 $N_s \gg 1$ ，那么 Y_{sc} 近似服从高斯过程，根据式(9)计算其分布的均值和方差。

$$\sigma_1^2 = \frac{3\sigma^4}{2N_s} + \frac{4a\sigma^2 \bar{P}}{N_s^2}$$

根据式(12)对 $P(T_{sc} | H_1)$ 积分得检测概率：

$$\begin{aligned} P_d &= \int_{\eta}^{+\infty} \frac{1}{2\sigma_0^2} e^{-(s_1^2 + T_{sc})/(2\sigma_1^2)} I_0 \left(\sqrt{T_{sc}} \frac{s_1}{\sigma_1} \right) dT_{sc} \\ &= Q_1 \left(\frac{s_1}{\sigma_1}, \frac{\sqrt{\eta}}{\sigma_1} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $Q_1(a, b)$ 一阶伽玛函数。

第 2 种情况：PU 于检测周期前段时间到达

当 $N_s/2 < a \leq N_s$ 时，根据中心极限定理，如果 $N_s \gg 1$ ，那么 Y_{sc} 近似服从高斯过程，根据式(10)计算其分布均值和方差。

$$\begin{aligned}
 E\{Y_{sc} | H_1\} &= \frac{e^{-j2\pi\alpha'_k m}}{N_s} \left\{ \sum_{m=1}^{N_s-a} \sigma^2 + \sum_{m=N_s-a+1}^{N_s} (|s[m]|^2 + \sigma^2) + \sum_{m=1}^{N_s/2} (|s[N_s - m + 1]|^2 + \sigma^2) \right\} = \frac{(2a + N_s) \bar{P}_{\alpha'_k}}{2N_s} \\
 \text{var}\{Y_{sc} | H_1\} &= \frac{|e^{-j2\pi\alpha'_k m}|^2}{N_s^2} \left\{ \sum_{m=1}^{N_s-a} \text{var}\{ |n[m]|^2 \} + \sum_{m=1}^{N_s/2} \text{var}\{ |s[N_s - m + 1] + n[N_s - m + 1]|^2 \} \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{m=N_s-a+1}^{N_s} \text{var}\{ |s[m] + n[m]|^2 \} \right\} = \frac{3\sigma^4}{2N_s} + \frac{\sigma^2 \bar{P}(2a + N_s)}{N_s^2}
 \end{aligned} \tag{19}$$

同理式(18)，得 $N_s/2 < a \leq N_s$ 情况下检测概率：

$$P'_d = Q_1 \left(\frac{s'_1}{\sigma'_1}, \frac{\sqrt{\eta}}{\sigma'_1} \right) \tag{20}$$

其中 $\sigma'^2_1 = \frac{3\sigma^4}{2N_s} + \frac{\sigma^2 \bar{P}(2a + N_s)}{N_s^2}$, $s'_1 = \frac{(2a + N_s) \bar{P}_{\alpha'_k}}{2N_s}$ 。

3.3.2 吞吐量分析 在 SU 检测周期内 PU 的突然出现，导致 SU 检测周期内前半部分只含有 AWGN 信号，后半部分含有的是 PU 信号和 AWGN 信号的混合信号^[12]，如图 5 所示。图 5 中，SU 在执行频谱检测过程中，PU 突然出现，增大了发生碰撞的概率从而对 SU 吞吐量产生影响。

假设 CR 网络中 PU 到达概率服从泊松分布，那么用户之间到达网络的时间间隔服从指数分布 $f(\tau) = \lambda_a e^{-\lambda_a \tau}$, $\tau > 0$ ，其中 λ_a 为用户业务量强度或者称之为到达率， τ_0 为采样时间。那么在图 5 的模型下，CR 网络中数据传输发生碰撞的平均概率如式(21)所示。

$$\begin{aligned}
 P_{\text{col}} &= \int_0^{\tau_0} [1 - P_d] f(\tau) d\tau \\
 &= 1 - e^{-\lambda_a \tau_0} - \int_0^{\tau_0} P_d \lambda_a e^{-\lambda_a \tau} d\tau
 \end{aligned} \tag{21}$$

相应可以得到 SU 归一化的数据平均吞吐量。

$$R(T_{\text{fra}}, P_{\text{col}}) = \frac{T_{\text{fra}} - T_{\text{sens}}}{T_{\text{fra}}} \left[e^{-\lambda_a \tau_0} + \int_0^{\tau_0} P_d \lambda_a e^{-\lambda_a \tau} d\tau \right] \tag{22}$$

其中 T_{fra} 为 SU 传输数据帧长度， T_{sens} 为检测时间。

4 仿真分析

设用户信号采用 BPSK 调制，工作在电视频谱

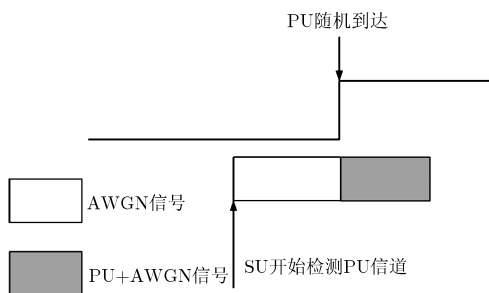


图 5 SU 检测周期内 PU 出现对吞吐量的影响

频段，载波频率为 500 MHz，采样频率为 6 MHz，码率为 100 bps。CR 的目标虚警概率 P_f^{DES} 为 0.1，目标检测概率 P_d^{DES} 为 0.98。用户到达网络服从泊松分布，利用 MATLAB 进行仿真比较。

4.1 检测概率分析

图 6 表示 $P_f^{\text{DES}} = 0.1$ 时，PU 在检测周期内随机到达情况下的 4 种检测方法检测概率对比曲线，被比较的为：本文提出的反馈叠加循环平稳特征检测 (Feedback Addition Cyclostationary Feature Detection, FA-CFD)；传统循环平稳特征检测 (Cyclostationary Feature Detection, CFD)^[13]；传统能量检测 (Energy Detection, ED)^[14]；文献[15]中 Chen 提出的改进能量检测 (Chen Energy Detection, Chen-ED)。图 7 表示 SNR=-15 dB 时，FA-CFD 和 CFD 的 ROC 曲线。图 6 中，4 种方法的检测概率随 SNR 增大而增大，Chen-ED 和 ED 的检测性能非常接近，这是由于在 PU 随机到达情况下，两种能量检测信号的判决统计量基本相同，所以导致相同的检测效果。FA-CFD 在所给 SNR 范围内的检测性能明显优于其他三者。图 7 中，虚警概率相同时，FA-CFD 的检测概率大于 CFD，这是由于反馈叠加可以将采样周期后半部分的采样值累加到前半部分，提高了检测周期内的判决统计量。PU 随机到达时，存在由于判决统计量过小导致 CFD 无法检测出信号的情况，而 FA-CFD 由于提高了判决统计量，改善了上述情况。

4.2 虚警概率分析

图 8 表示 $P_d^{\text{DES}} = 0.98$ 时，PU 在检测周期内随机到达情况下的 3 种检测方法虚警概率对比曲线。图 8 中，随着被检测频段 SNR 的提高，3 种检测方法的虚警概率随之下降。但是在 -12 dB 到 1 dB 区间内，ED 相对于 FA-CFD 和 CFD 有着更低的虚警概率；相同信噪比时 CFD 虚警概率小于 FA-CAF，这是由于 FA-CFD 的判决统计量大于 CFD，只存在在噪声时更容易出现虚警的情况，说明反馈叠加导致了虚警概率一定程度上的提高。

4.3 采样点数分析

图 9 表示 $P_f^{\text{DES}} = 0.1$, $P_d^{\text{DES}} = 0.98$ 时，FA-CFD

和 CFD 检测方法所需采样点数对比。图 9 中, 随着 SNR 的减小, 两种方法所需采样点数均增大。对于特定 SNR, FA-CFD 所需采样点数比 CFD 要少, 有着较好的时间增益。这是由于 FA-CFD 相对于 CFD 有着较高的判决统计量, 相同性能要求下所需采样点数更少; 也可以从图 9 中得到满足特定目标检测概率和虚警概率条件下所需的采样点数, 如 SNR 在 $-20 \sim 0$ dB 范围内满足 $P_f^{DES} = 0.1$, $P_d^{DES} = 0.98$ 条件下, FA-CFD 需要的采样点数范围为 $10^2 \sim 10^5$ 。

4.4 吞吐量分析

图 10 表示 SU 业务量强度 $\lambda_u = 50$, SNR = -20 dB 时, SU 数据吞吐量随数据帧长度变化的情况。图 10 中, 随着 SU 数据帧长度增大, 数据吞吐量首先提高, 当 $T_{sens} = 400$ ms 时, SU 数据吞吐量趋于不变。这是由于数据碰撞概率随 SU 数据帧长度的增大而增大, 但是增大到饱和状态时, 吞吐量将不再受数据帧长度的影响。图 11 表示 $\lambda_u = 50$, $T_{sens} = 400$ ms 时, SU 数据吞吐量随目标检测概率的变化情况。图

11 中, 随着目标检测概率的提高, ED 的 SU 数据吞吐量有所下降, 原因是 P_d^{DES} 提高导致数据碰撞概率提高, 从而使 SU 获得的数据吞吐量下降。图 10 和图 11 中, FA-CFD 的 SU 数据吞吐量归一化峰值和 CFD 基本相同, 达到 0.9 左右, ED 的为 0.5 左右, 表明 FA-CFD 和 CFD 相对于 ED 有着不错的数据吞吐量表现。

5 结束语

该文提出了一种基于反馈叠加原理的改进循环平稳特征检测算法, 提高了检测周期内 PU 状态随机变化情况下的检测性能。所提出的改进算法相对于传统的循环平稳特征检测和能量检测有着更好的检测性能, 相对于传统的循环平稳特征检测需要更少采样点数的同时保证了较高的数据吞吐量, 但是, 也可以看出该改进算法也存在着虚警概率偏大, 运算复杂度高等问题。下一步工作将继续研究频谱检测优化问题, 并尝试将其应用于对检测性能要求高的 CR 安全领域。

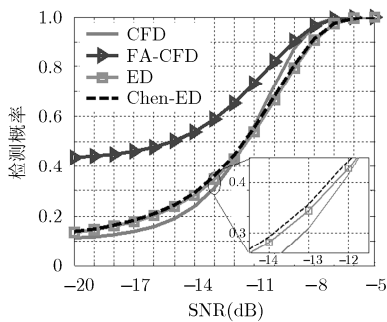


图 6 4 种检测方法检测概率对比曲线

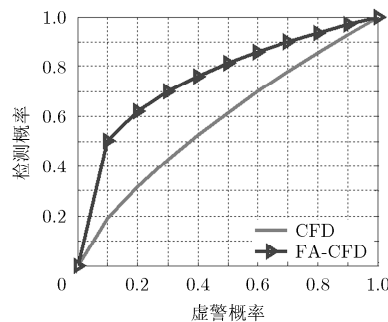


图 7 SNR = -15 dB 情况下 ROC 曲线

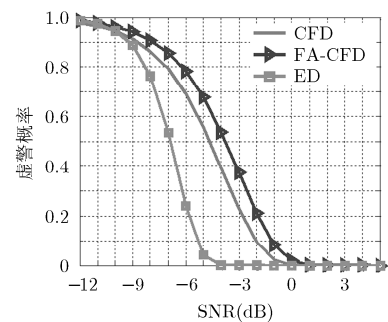


图 8 3 种检测方法虚警概率对比曲线

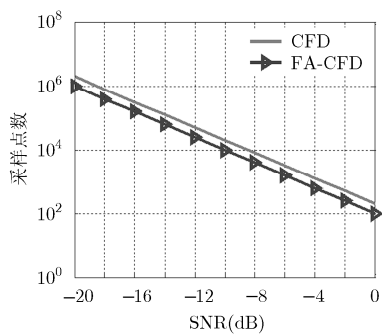


图 9 改进前后采样点数对比

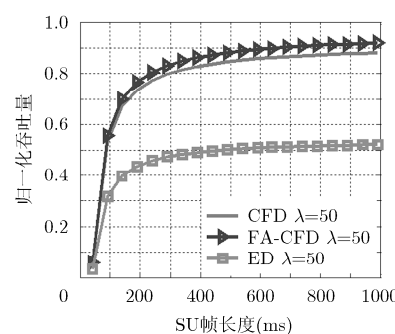


图 10 SU 吞吐量随数据帧长度的变化

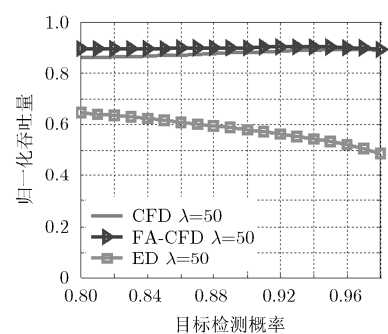


图 11 SU 数据吞吐量随 P_d^{DES} 的变化

参考文献

[1] Ma Bin, Xie Xian-zhong, and Liao Xiao-feng. An efficient proactive spectrum handover mechanism in cognitive radio networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 79(3): 1679-1701.

[2] Wilcox D, Tsakalaki E, Kortun A, et al. On spatial domain cognitive radio using single radio parasitic antenna arrays[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(3): 571-580.

[3] Yucek T, Huseyin, and Arslan. A survey of spectrum sensing

- algorithms for cognitive radio applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(1): 116-130.
- [4] Wang T, Chen Y, Zhao B, *et al.* Analysis of effect of primary user traffic on spectrum sensing performance [C]. Proceedings of the IEEE China fourth international conference on communications and networking (ChinaCOM2009), Xi'an, China, 2009: 1-5.
- [5] Mohapatra S G, Mohapatra A G, and Lenka S K. Performance evaluation of cyclostationary based spectrum sensing in cognitive radio network[C]. Proceedings of the IEEE 2013 International Multi-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s), Kottayam, India, 2013: 90-97.
- [6] Beaulieu N C and Chen Y. Improved energy detectors for cognitive radios with randomly arriving or departing primary users[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(10): 867-870.
- [7] 谢显中, 胡小峰, 马彬, 等. 主用户状态改变和低信噪比环境下的 weight- p 能量检测法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(4): 537-550.
Xie Xian-zhong, Hu Xiao-feng, Ma Bin, *et al.* A new weight- p energy detector for primary user status changes and low SNR environments[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2014, 44(4): 537-550.
- [8] Xie Xian-zhong, Hu Xiao-feng, Ma Bin, *et al.* Improved energy detector with weights for primary user status changes in cognitive radio networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, DOI: 10.1155/2014/836793.
- [9] Shim J, Lee J, Lee Y, *et al.* A cyclostationary spectrum sensing scheme for high traffic environments[C]. Proceedings of the 2013 3rd International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE), Atlantic City, NJ, USA, 2013: 1-4.
- [10] Gardner W A. Introduction To Random Processes[M]. USA: McGraw- Hill, 1986: 323-346.
- [11] Gardner W A and Spooner M S. Signal interception: performance advantages of cyclic-feature detectors[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1992, 40(1): 149-159.
- [12] Liang T, Chen Y, Hines E L, *et al.* Effect of primary user traffic on sensing-throughput tradeoff for cognitive radios [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(4): 1063-1068.
- [13] Masoumeh D, Masoumeh N K, and Tho L N. Cooperative cyclostationary spectrum sensing in cognitive radios at low SNR regimes[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Cape Town, Republic of South Africa, 2010: 1-5.
- [14] Tandra R and Sahai A. SNR walls for signal detection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(1): 4-17.
- [15] Chen Y F. Improved energy detector for random signals in Gaussian noise[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(2): 558-563.
- 马彬: 男, 1978年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为异构无线网络、认知无线网络等。
- 方源: 男, 1990年生, 硕士生, 研究方向为认知无线网络、频谱检测等。
- 谢显中: 男, 1966年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信网络、认知无线电技术等。