



研究与开发

基于随机共振的双门限协作频谱感知算法

刘顺兰, 肖义德, 包建荣

(杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对现有频谱感知算法在低信噪比 (SNR) 环境中性能检测不佳的问题以及传统随机共振 (SR) 检测弱信号的方法在实际应用中存在的局限性, 通过设置最优门限, 计算出最优的协作用户数量, 提出了一种基于随机共振的双门限协作频谱感知算法, 并对提出的算法进行了性能分析。DCSSR 算法通过将位于双门限不确定区域的统计数据经过随机共振系统, 进一步提高频谱感知算法在低信噪比下的检测性能。仿真结果表明, 在不同信噪比和虚警概率下, DCSSR 算法相较于传统单门限能量协作算法、双门限能量协作算法以及单门限随机共振协作算法, 检测性能都得到了提升。在信噪比为 -20 dB 时, 提出的 DCSSR 算法相较于传统单门限能量检测协作算法, 检测概率提高了 80%。

关键词: 随机共振; 频谱感知; 双门限; 低信噪比

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020248

Dual threshold cooperative spectrum sensing algorithm based on stochastic resonance

LIU Shunlan, XIAO Yide, BAO Jianrong

School of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: In view of the poor performance of the existing spectrum sensing algorithm in the low signal-noise ratio (SNR) environment and the limitations of traditional stochastic resonance (SR) detection methods for weak signals in practical applications, a dual threshold cooperative spectrum sensing algorithm based on stochastic resonance (DCSSR) by setting the optimal threshold was proposed and the optimal number of cooperative users was calculated. At last, the performance of the proposed algorithm was analyzed. This algorithm further improves the detection performance of the spectrum sensing algorithm under low signal-to-noise ratio by passing the statistical data located in the double-threshold uncertain region through a stochastic resonance system. Simulation results show that the detection performance of DCSSR algorithm is improved compared with traditional single threshold energy cooperation algorithm, double threshold energy cooperation algorithm and single threshold stochastic resonance cooperation algorithm. When the SNR is -20 dB, the proposed DCSSR algorithm improves the detection probability by 80% compared with the traditional single threshold energy detection cooperation algorithm.

Key words: stochastic resonance, spectrum sensing, dual threshold, low signal to noise ratio

收稿日期: 2020-01-12; 修回日期: 2020-08-05

通信作者: 刘顺兰, E-mail: liushunlan@hdu.edu.cn.

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LY18F010037); 国家自然科学基金资助项目 (No.U1809201)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of China of Zhejiang Provincial (No.LY18F010037), The National Natural Science Foundation of China (No.U1809201)



1 引言

频谱感知 (spectrum sensing) 作为认知无线电的重要组成部分, 成为了广大学者重点研究的对象^[1]。传统的频谱感知方法主要有能量检测、匹配滤波器检测和循环特征检测^[2]。能量检测算法由于较低的计算复杂度、不依赖信号先验信息等优点而被广泛应用, 但其在低信噪比下的检测性能并不理想^[3], 参考文献[4]通过各次用户 (second user, SU) 对主用户 (primary user, PU) 进行协作感知, 来提高检测概率, 但该检测性能仍不能满足实际的应用要求。

近年来, 一些研究学者将随机共振 (stochastic resonance, SR) 理论^[5-6]用于微弱信号的检测, 以此来改善频谱感知算法在低信噪比下的检测性能。传统 SR 系统的主要组成部分包括非线性系统、周期信号和噪声。利用传统 SR 检测弱信号的方法在实际应用中存在一定的局限性^[7], 首先, 检测过程需要信号的先验信息; 其次, 对于检测非高斯信号, 信噪比并不总是与检测性能相关; 最后, 非线性系统中参数的设置也决定随机共振现象是否能发生^[8]。为扩展随机共振在信号检测中的应用范围, Chen^[7,9]提出了广义随机共振系统, 该系统有效地克服了传统随机共振系统要求输入信号的频率较低的限制, 并对 SR 噪声类型和幅值进行了研究。但是为了求得加入最优的噪声信号, 其中最优的参数求解难度较大。参考文献[10]通过对加入随机共振系统的噪声信号进行简化, 将决定噪声信号参数减少为一个。该算法降低了噪声的不确定度, 减少了感知时间, 但是该算法没有考虑噪声不确定度对判决门限的影响。参考文献[11]提出了基于能量检测的协作频谱感知算法, 通过设置双门限, 分别对双门限外和双门限内的信号采用硬判决和软判决进行本地判决。但该算法在低信噪比的无线环境中性能降低, 同时软判决会占用一定的带宽资源。

为克服现有频谱感知算法在低信噪比 (SNR) 环境中性能检测不佳的问题以及传统 SR 检测弱信号的方法在实际应用中存在的局限性, 本文利用广义随机共振方法, 提出了基于随机共振的双门限协作频谱感知 (dual threshold cooperative spectrum sensing based on stochastic resonance, DCSSR) 算法, 利用噪声不确定度设置双门限, 减少噪声不确定度对判决结果的影响。将不确定区域中的信号利用 SR 算法进行处理。通过与判决门限进行比较, 做出本地判决。融合中心 (fusion center, FC) 对 SU 发送来的判决结果进行数据融合, 对 PU 状态做出最后的判决。与单门限随机共振算法相比, DCSSR 算法给只对不确定区域中的数据进行处理, 降低了感知时间, 节省了带宽资源。

2 基于能量检测频谱感知算法模型

假设认知无线网络 (cognitive radio network, CRN) 的组成部分主要有: 一个 PU、 M 个 SU、一个数据融合中心 (fusion center, FC)。传统的基于能量检测频谱感知算法的二元假设模型可表示如下:

$$r_i(n) = \begin{cases} w_i(n), & H_0 \\ s_i(n) + w_i(n), & H_1 \end{cases}, i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

其中, $r_i(n)$ 表示第 i 个 SU 接收到的信号; $s_i(n)$ 表示第 i 个 SU 接收到的 PU 信号, 且服从均值为 μ 、方差为 σ_{si}^2 的高斯分布; $w_i(n)$ 为第 i 个 SU 接收到的噪声, 服从均值为 0、方差为 σ_{wi}^2 的高斯分布, 且与 $r_i(n)$ 相互独立。 H_0 和 H_1 分别表示主用户不存在和存在的情况。

在能量检测 (energy detection, ED) 算法中, 检测统计量 $T_i(r)$ 可表示为:

$$T_i(r) = \sum_{n=0}^{N-1} |r_i(n)|^2 \quad (2)$$

其中, N 为采样点数。根据假设可知, 在 H_0 、 H_1 情况下, 统计量 $T_i(r)$ 的概率密度函数 p_0 、 p_1 均服从自由度为 $2N$ 的卡方分布。由中心极限定理可

知, 当 N 足够大时, $T_i(r)$ 的概率分布可近似为高斯分布, 统计量的概率分布可表示为:

$$T_i(r) \sim \begin{cases} N(u_0, \sigma_0^2), H_0 \\ N(u_1, \sigma_1^2), H_1 \end{cases} \quad (3)$$

在 H_0 情况下, $T_i(r)$ 的均值和方差分别为 $u_0 = N\sigma_{wi}^2$, $\sigma_0^2 = 2N\sigma_{wi}^4$; 在 H_1 情况下, $T_i(r)$ 的均值和方差分别为 $u_1 = N(\sigma_{si}^2 + \sigma_{wi}^2 + \mu^2)$, $\sigma_1^2 = 2N(\sigma_{si}^2 + \sigma_{wi}^2)^2 + 4N\mu^2(\sigma_{si}^2 + \sigma_{wi}^2)$ 。

当给定判决门限 λ 时, 虚警概率 P_f 、检测概率 P_d 和漏检概率 P_m 分别表示为:

$$P_f(\lambda, N) = P(T_i(r) > \lambda | H_0) = \int_{\lambda}^{\infty} p_0(x) dx = Q\left(\frac{\lambda - u_0}{\sigma_0}\right) \quad (4)$$

$$P_d(\lambda, N) = P(T_i(r) > \lambda | H_1) = \int_{\lambda}^{\infty} p_1(x) dx = Q\left(\frac{\lambda - u_1}{\sigma_1}\right) \quad (5)$$

$$P_m(\lambda, N) = 1 - P_d(\lambda, N) \quad (6)$$

其中, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 为高斯互补积分函数。

3 基于随机共振的双门限协作频谱感知算法

3.1 算法模型

传统能量检测算法为了满足在低信噪比下的性能要求, 可通过增加采样点数的方式实现。但是, 采用该方式会出现信噪比墙的现象^[12], 即为了达到指定的检测概率, 采样点数会趋于无穷。

本文将广义随机共振系统引入频谱感知算法中, 改善算法在低信噪比下的检测性能。基于随机共振的频谱感知二元假设模型可表示为:

$$r_i(n) = \begin{cases} w_i(n) + \eta(n), & H_0 \\ s_i(n) + w_i(n) + \eta(n), & H_1 \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (7)$$

其中, $\eta(n)$ 为最优的随机共振噪声。在参考文献[1]中, 给出了最优的噪声概率分布为:

$$p_{\eta}^{\text{opt}}(\eta) = \gamma \delta(\eta - \eta_1) + (1 - \gamma) \delta(\eta - \eta_2) \quad (8)$$

但是由于计算该最优问题属于非凸化问题, 难以得到最佳的参数 γ 、 η_1 和 η_2 , 使检测概率最大化。在参考文献[10]中, 将直流信号作为一种最优的 SR 噪声, 其概率密度分布函数可表示为: $p_{\eta}^{\text{opt}}(\eta) = \delta(\eta - a)$, a 为直流噪声的大小。并给出了在低信噪比和小均值信号下, a 的最优取值为:

$$a_{\text{opt}} = \frac{\mu\sigma_{si}^2 - \mu\sigma_{wi}^2 - \mu^3}{(\mu^2 - \sigma_{si}^2)} \quad (9)$$

在广义随机共振系统中, 当给定虚警概率 $P_{f(\text{SR})}$ 时, 由式 (4) 求得判决门限 λ_{SR} 为:

$$\lambda_{\text{SR}} = Q^{-1}(P_{f(\text{SR})})\sigma_{0(\text{SR})} + u_{0(\text{SR})} \quad (10)$$

检测概率 $P_{d(\text{SR})}$ 为:

$$P_{d(\text{SR})} = Q\left(\frac{\lambda_{\text{SR}} - u_{1(\text{SR})}}{\sigma_{1(\text{SR})}}\right) \quad (11)$$

式 (10)、式 (11) 中, $u_{0(\text{SR})} = N(\sigma_{wi}^2 + a^2)$, $\sigma_{0(\text{SR})}^2 = 2N(\sigma_{wi}^4 + 2a^2\sigma_{wi}^2)$ 为统计量 $T_i(r)$ 在假设 H_0 下的均值和方差; $u_{1(\text{SR})} = N(\sigma_{si}^2 + \sigma_{wi}^2 + (\mu + a)^2)$, $\sigma_{1(\text{SR})}^2 = 2N(\sigma_{si}^2 + \sigma_{wi}^2)^2 + 4N(\sigma_{si}^2 + \sigma_{wi}^2)(\mu + a)^2$ 为统计量 $T_i(r)$ 在假设 H_1 下的均值和方差。

3.2 基于随机共振的双门限频谱感知算法

双门限频谱感知算法的判决模型如图 1 所示, 由图 1 中可以看出, 当统计量 T_i 大于 λ_1 时, SU 将检测结果判决为 H_1 ; 当统计量 T_i 小于 λ_0 时, 判决为 H_0 。若统计量 T_i 落在 U_i 时, SU 不进行判决, 此区域为不确定区域。



图 1 双门限频谱感知算法的判决模型

在真实的无线环境中, 噪声的功率会随时间变化, 实际噪声 σ_w^2 会均匀分布于 $\left(\frac{\sigma_w^2}{\rho}, \rho\sigma_w^2\right)$, 这种现象称为噪声的不确定性^[13]。图 1 中的门限 λ_0 、 λ_1 就是根据噪声不确定因子 ρ 来确定的, 且



$\rho > 1$ 。本文设置 $\lambda_0 = \lambda^{\text{opt}}(\sigma_{wi}^2 / \rho)$, $\lambda_1 = \lambda^{\text{opt}} \rho \sigma_{wi}^2$, λ_{SR} 由式 (10) 可得。可以看出, 当噪声变化范围较大时, 会导致检测概率降低, 同时虚警概率也会升高, 这会对能量检测性能产生较大的影响。

在参考文献[11,14]中, 当统计量落入 U_i 中时, 将该统计量直接发送至融合中心, 融合中心再对数据进行软判决, 随着 U_i 区域中的数量增多, 这将占用一定带宽资源, 感知的时间也会增加。

本文提出的 DCSSR 算法将统计量处于不确定区域中的接收信号, 经过广义随机共振系统后, 进一步做出判决。最后, SU 将所有判决结果发送至 FC, 对应的本地判决准则表示为:

$$D_i = \begin{cases} 0, & T_i < \lambda_0 \\ U_i, & \lambda_0 \leq T_i \leq \lambda_1 \\ 1, & T_i > \lambda_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0, & T_{\text{SR}} < \lambda_{\text{SR}} \\ 1, & T_{\text{SR}} \geq \lambda_{\text{SR}} \end{cases} \quad (12)$$

其中, λ_{SR} 由式 (10) 计算得到。DCSSR 算法利用噪声不确定度, 设置双门限。并对落入不确定区域的信号进行随机共振处理。以此来降低真实无线环境中噪声对判决结果的影响, 从而提高检测概率。相较于单门限随机共振算法, DCSSR 算法给只对不确定区域中的数据进行处理, 降低了感知时间, 节省了带宽资源。

3.3 最优门限值的确定

本节将讨论最优门限值 λ^{opt} 的确定。假设 P_0 和 P_1 分别表示在 H_0 和 H_1 下的信道利用率, 且 $P_0 + P_1 = 1$, 则错误概率 P_e 可表示为:

$$P_e = P_0 P_f + P_1 (1 - P_d) \quad (13)$$

因此, 只需判断 P_e 是否存在极值, 首先将式 (4)、式 (5) 代入式 (13), 然后将式 (13) 对 λ 求一阶偏导, 有:

$$\frac{\partial P_e}{\partial \lambda} = -P_0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0}\right)^2} + P_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_1}\right)^2} \quad (14)$$

假设 $P_0 = P_1 = 0.5$, 有 $\frac{\partial^2 P_e}{\partial \lambda^2} > 0$, 则存在 λ^{opt} ,

使得 P_e 有最小值。令 $\frac{\partial P_e}{\partial \lambda} = 0$, 解得:

$$\lambda^{\text{opt}}(\sigma_{wi}) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (15)$$

其中, $A = \sigma_1^2 - \sigma_0^2$, $B = 2(\sigma_0^2 u_1 - \sigma_1^2 u_0)$, $C = \sigma_1^2 u_0^2 - \sigma_0^2 u_1^2 - 2\sigma_1^2 \sigma_0^2 \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)$, u_0 、 σ_0^2 和 u_1 、 σ_1^2 由式 (3)

决定。

3.4 性能分析

在双门限能量检测中, 检测概率 P_d 、漏检概率 P_m 、虚警概率 P_f 、信道利用率 P_a 以及落入不确定区域 U_i 的概率 ϕ_0 、 ϕ_1 分别表示为:

$$P_f = P(T(r) > \lambda_1 | H_0) = Q\left(\frac{\lambda_1 - u_0}{\sigma_0}\right) \quad (16)$$

$$P_a = P(T(r) < \lambda_0 | H_0) = 1 - Q\left(\frac{\lambda_0 - u_0}{\sigma_0}\right) \quad (17)$$

$$\phi_0 = P(\lambda_0 \leq T(r) \leq \lambda_1 | H_0) = 1 - P_f - P_a \quad (18)$$

$$P_d = P(T(r) > \lambda_1 | H_1) = Q\left(\frac{\lambda_1 - \mu_1}{\sigma_1}\right) \quad (19)$$

$$P_m = P(T(r) < \lambda_0 | H_1) = 1 - Q\left(\frac{\lambda_0 - \mu_1}{\sigma_1}\right) \quad (20)$$

$$\phi_1 = P(\lambda_0 \leq T(r) \leq \lambda_1 | H_1) = 1 - P_d - P_m \quad (21)$$

其中, ϕ_0 、 ϕ_1 分别为在 H_0 和 H_1 的假设下, 落入不确定区域的概率。

在 DCSSR 算法中, 从以上的分析可知, 单个用户的虚警概率 P_F 由确定区域的虚警概率 P_f 和不确定区域的虚警概率 $P_{f(\text{SR})}$ 组成, 同理可得单个用户的检测概率 P_D 。

$$P_F = P_f + \phi_0 P_{f(\text{SR})} \quad (22)$$

$$P_D = P_d + \phi_1 P_{d(\text{SR})} \quad (23)$$

当有 M 个 SU 的时候, 采用硬判决的方式, 各 SU 将判决的结果发送至 FC, 本文采用“ k 秩”准则为数据融合准则^[15], 可表示为:

$$L = \begin{cases} 0, & \sum_{i=1}^M D_i \leq k \\ 1, & \sum_{i=1}^M D_i > k \end{cases} \quad (24)$$

其中, L 为最后判决结果, D_i 表示第 i 个 SU 做出的本地判决结果, k 为最后判决 PU 是否存在的门限值。 k 的取值是否恰当会影响整个系统的检测性能, 参考文献[16]中选取“ k 秩”准则, 以 $M/2$ 作为 k 的最优取值。参考文献[17]指出, $M/2$ 并非最优取值, 当检测概率较高时, 可以通过减少 k 的值来减少感知时间。

根据参考文献[18], 协作频谱感知的全局虚警概率 Q_f 、全局检测概率 Q_d 分别为:

$$Q_f = 1 - \sum_{T=0}^M \binom{M}{T} (1-\phi_0)^T \phi_0^{M-T} \sum_{l=k}^T \binom{T}{l} (1-P_F)^l P_F^{T-l} \quad (25)$$

$$Q_d = 1 - \sum_{T=0}^M \binom{M}{T} (1-\phi_1)^T \phi_1^{M-T} \sum_{l=k}^T \binom{T}{l} (1-P_D)^l P_D^{T-l} \quad (26)$$

其中, T 为 SU 能够做出本地判决的用户数, 全局错误概率 Q_e 可表示为:

$$Q_e(k) = P_0 Q_f + P_1 (1 - Q_d) \quad (27)$$

将其对 k 求导:

$$\frac{\partial Q_e(k)}{\partial k} \approx Q_e(k+1) - Q_e(k) = \binom{N}{T} \cdot \left((1-\phi_0)^T \phi_0^{M-T} (1-P_F)^k P_F^{T-k} - (1-\phi_1)^T \phi_1^{M-T} (1-P_D)^k P_D^{T-k} \right) \quad (28)$$

令 $\frac{\partial Q_e(k)}{\partial k} = 0$, 有:

$$k^{\text{opt}} = \frac{T \ln \frac{P_D}{P_F} + T \ln \left(\frac{1-\phi_1}{1-\phi_0} \right) \left(\frac{\phi_1}{\phi_0} \right)^{M-T}}{\ln(1-P_F)P_D - \ln P_F(1-P_D)} \quad (29)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数。已知协作用户数量 M 和统计量落入确定区域的个数 T 时, 系统通过检测概率和虚警概率的变化来改变“ k 秩”融合准则中的 k 值, 来使全局错误概率 Q_e 达到最小。

4 数据仿真及结果分析

仿真参数设置如下, 采样点数 $N = 2000$, 信

号采用加入均值为 μ 的 QPSK 调制信号, 其中 $\mu = 0.05$; 噪声为服从均值为 0, 方差 $\sigma_w^2 = 1$ 的高斯白噪声。在 SR 系统中, $P_{f(\text{SR})} = 0.05$ 。采用蒙特卡洛法仿真, 仿真次数为 10 000。

单个次用户在不同信噪比下, 单门限 ED 算法、双门限 ED 算法^[1]和单门限 SR-ED 算法^[1]以及本文提出的 DCSSR 算法的检测概率性能比较如图 2 所示。从图 2 可知, 在信噪比为 -20 dB 的条件下, 单门限 ED 频谱感知算法的检测概率仅为 5%; 参考文献[1]双门限 ED 频谱感知算法尽管引入了双门限, 其检测概率仅提升到 18%; 参考文献[1]单门限 SR-ED 算法的检测概率为 41%, 相较于前两种算法, 性能有一定的提升。本文新提出的 DCSSR 算法, 通过噪声不确定度设置双门限, 将不确定区域中的信息再一次经过随机共振系统进行处理, 在信噪比为 -20 dB 的条件下, 检测概率可高达 55%, 远优于前 3 种算法。

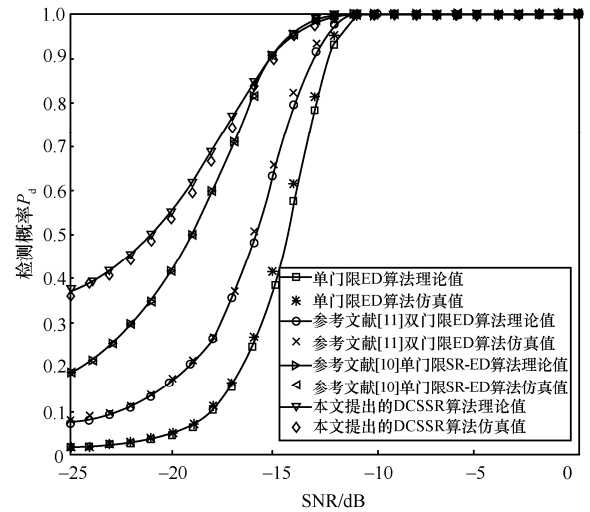


图 2 不同信噪比下, 4 种频谱感知算法检测概率的比较

信噪比为 -15 dB 时, 单门限 ED 算法、双门限 ED 算法^[1]、单门限 SR-ED 算法^[1]以及本文提出的 DCSSR 算法 4 种算法在不同虚警概率下的检测概率曲线如图 3 所示。当虚警概率为 0.1 时, 单门限 ED 算法的检测概率为 51%; 参考文献[11]的双门限 ED 算法的检测概率为 75%; 参考文献[10]的 SR-ED

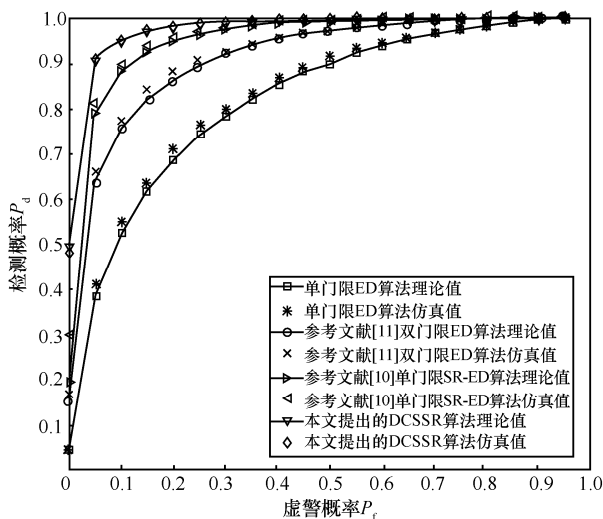
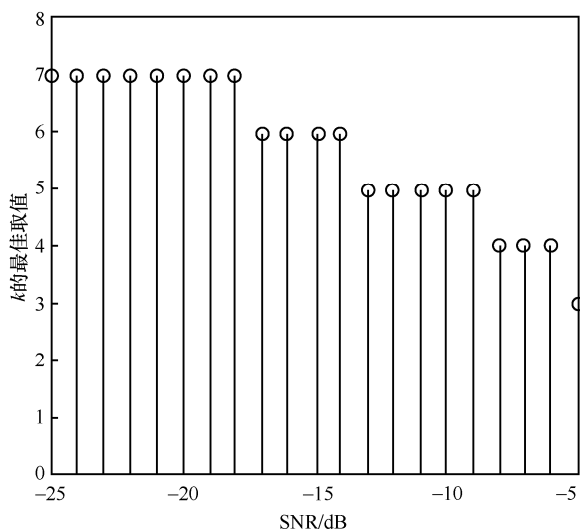
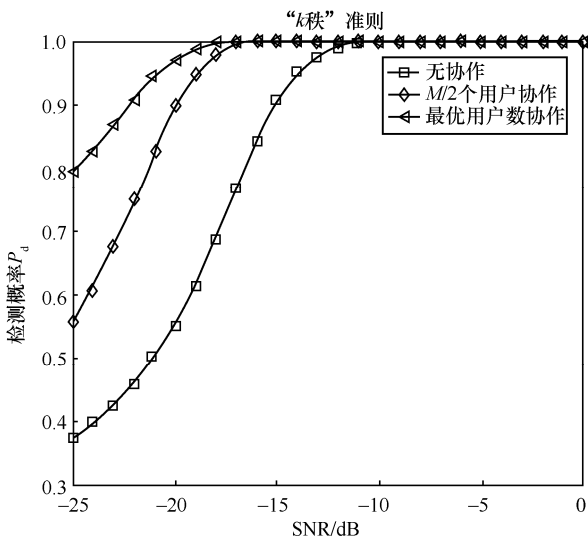


图3 在 SNR=-15 dB, 4 种算法检测概率的比较

算法的检测概率为 89%; 而本文提出的 DCSSR 算法的检测概率为 96%, 性能优于其他 3 种算法。

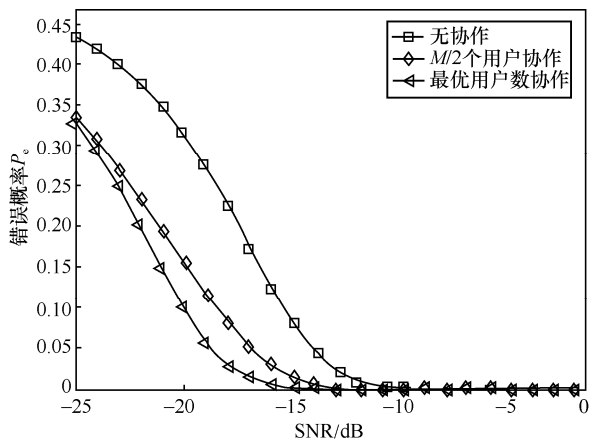
不同信噪比下, 最优 k 值的变化如图 4 所示。假设 $M=13$ 、 $T=10$ 表示统计量位于确定区域的用户数, k 为使全局概率 Q_e 最小的取值。由图 4 可以看出, k 会随着信噪比的增加而相应地减少。其原因在于, 信噪比增加的同时, 由于噪声的干扰度不断减少, 每个 SU 用户做出的本地判决也更加可靠。在信噪比为 $-25 \sim -18$ dB 时, k 的最佳取值为 7; 当信噪比增加到 -5 dB 时, k 的取值仅为 3。由此可以减少协作过程中 k 的数量, 在降低频谱感知时间的同时, 又提高了系统带宽的利用率。

选取不同 k 值时, DCSSR 算法检测概率的对比如图 5 所示, DCSSR 算法分别表示无协作感知、 $M/2$ 个用户协作感知和最优用户数协作感知在不同信噪比下的检测性能图。在参考文献[16]中, “ k 秩” 准则中的门限值 k 取为 $\left\lceil \frac{M}{2} \right\rceil$ 。由图 5 可知, 在信噪比为 -25 dB 时, 相对于无协作算法, 当 k 固定取值为 $\left\lceil \frac{M}{2} \right\rceil$, 提升大约 17%; 当引入最优的 k 值时, 相对无协作算法提升了 41%, 相对于 k 为 $M/2$ 个用户的协作算法也提升了约 24%。

图4 不同信噪比下, 最优 k 值的变化图5 选取不同 k 值时, DCSSR 算法检测概率的对比

选取不同 k 值时, DCSSR 错误概率的对比如图 6 所示, 通过动态选取最佳 k 值, 在一定程度上降低了协作过程中的错误概率, 提高了算法的检测性能。

不同信噪比下, 4 种频谱感知算法检测概率的比较如图 7 所示, 当用户数 k 取最优值时, 传统单门限 ED 协作频谱感知算法、参考文献[11]的双门限 ED 协作频谱感知算法和参考文献[14]的单门限 SR-ED 协作频谱感知算法以及本文提出的 DCSSR 算法在不同信噪比下的检测概率。由图 7 可知, 在信噪比为 -20 dB 时, 传统单门限 ED 算

图6 选取不同 k 值时, DCSSR 错误概率的对比

法的检测概率为 8%; 参考文献[11]中加入双门限后的检测概率为 49%; 参考文献[14]中基于 SR 的单门限协作算法的检测概率为 85%, 相对前两种算法, 性能得到了一定的提升; 本文提出的 DCSSR 算法, 其检测概率高达 91%, 相较于传统单门限 ED 协作频谱感知算法, 检测概率提高了约 80%。在信噪比为 -25 dB 时, 检测概率仍有 55%, 而参考文献[14]中的算法的检测概率为 27%。

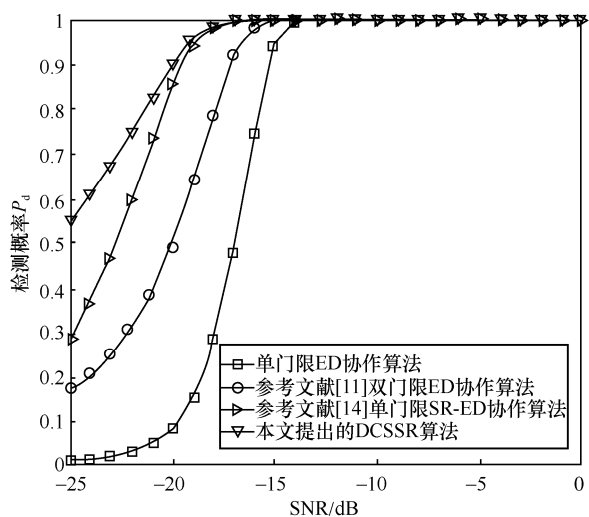


图7 不同信噪比下, 4种频谱感知算法检测概率的比较

5 结束语

本文提出了基于随机共振的双门限协作频谱感知算法, 通过噪声不确定度设置双门限, 可有效地减少通信环境中噪声波动对频谱感知算法检

测性能的影响。DCSSR 算法将位于不确定区域的数据经过本地的随机共振系统处理, 以提高检测检测概率。为了进一步提高检测的性能, 引入了多用户协作频谱感知, 通过讨论“ k 秩”中 k 的最优取值, 使得增加检测概率的同时, 又降低了全局错误概率。由仿真可知, 4种算法在单用户频谱感知时, 提出的 DCSSR 算法检测性能远优于其他 3 种算法; 当 k 取最优值进行协作频谱感知时, DCSSR 算法的检测性能仍为最佳。因此, 本文提出的 DCSSR 算法完全适用在低信噪比的无线环境中。

参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005(23): 201-220.
- [2] YUCEKT, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(1): 116-130.
- [3] TANG H Y. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems[C]// First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Piscataway: IEEE Press, 2005: 151-159.
- [4] ALTHUNIBAT S, RENZO M D, GRANELLI F. Towards energy-efficient cooperative spectrum sensing for cognitive radio networks: an overview[J]. Telecommunication Systems, 2015, 59(1): 77-91.
- [5] HE D, LIN Y, HE C, et al. A novel spectrum-sensing technique in cognitive radio based on stochastic resonance[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1680-1688.
- [6] HE D. Chaotic stochastic resonance energy detection fusion used in cooperative spectrum sensing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(2): 620-627.
- [7] CHEN H, VARSHNEY P K, KAY S M, et al. Theory of the stochastic resonance effect in signal detection: part I—fixed detectors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(7): 3172-3184.
- [8] 冷永刚, 王太勇, 郭焱, 等. 双稳随机共振参数特性的研究[J]. 物理学报, 2007(1): 30-35.
LENG Y G, WANG T Y, GUO Y, et al. Study on parameter characteristics of bistable stochastic resonance [J]. Journal of Physics, 2007(1): 30-35.
- [9] CHEN H, VARSHNEY P K, MICHELS J H. Noise enhanced signal detection and estimation[C]//Proceedings of the Forty-First Asilomar Conference on Signals, Systems and Comput-



- ers. [S.l:s.n.], 2007: 701-705.
- [10] 高锐, 李赞, 吴利平, 等. 低信噪比条件下基于随机共振的感知方法与性能分析[J]. 电子学报, 2013, 41(9): 1672-1679.
GAO R, LI Z, WU L P, et al. Perception method and performance analysis based on stochastic resonance in low SNR [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(9): 1672-1679.
- [11] 陈长兴, 符辉, 牛德智, 等. 基于双门限能量检测的协作频谱感知算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(8): 1742-1746.
CHEN C X, FU H, NIU D Z, et al. Cooperative spectrum sensing algorithm based on double threshold energy detection [J]. System Engineering and Electronic Technology, 2013, 35(8): 1742-1746
- [12] TANDRA R, SAHAI A. SNR walls for signal detection[J]. Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1): 4-17.
- [13] SAHAI A, CABRIC D. Spectrum sensing: fundamental limits and practical challenges[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Piscataway: IEEE Press, 2005.
- [14] CHEN W, WANG J, LI H, et al. Stochastic resonance noise enhanced spectrum sensing in cognitive radio networks[C]//Proceedings of the Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2010.
- [15] MISHR S M, SHHAI A, BRODERSEN R, et al. Cooperative sensing among cognitive radios[C]//Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [16] 张亮, 冯景瑜, 卢光跃. 协作频谱感知中的可信双门限硬判决融合算法[J]. 信号处理, 2014, 30(2): 181-188.
ZHANG L, FENG J Y, LU G Y. Trusted dual threshold hard decision fusion algorithm in cooperative spectrum sensing [J]. Signal Processing, 2014, 30(2): 181-188
- [17] ZHANG W, MALLIK R K, LETAIEF K B. Optimization of

cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12): 5761-5766.

- [18] WAN R, DING L, XIONG N, et al. Dynamic dual threshold cooperative spectrum sensing for cognitive radio under noise power uncertainty[J]. Human-Centric Computing and Information Sciences, 2019, 9(22): 11-15.

[作者简介]



刘顺兰(1965-), 女, 杭州电子科技大学电子信息学院教授, 主要研究方向为信息与信号处理、无线通信等。



肖义德(1995-), 男, 杭州电子科技大学电子信息学院硕士生, 主要研究方向为信号处理、无线通信等。



包建荣(1978-), 男, 博士, 杭州电子科技大学电子信息学院教授, 主要研究方向为空间无线通信、通信信号处理与自主无线电等。