

DOI: 10.7652/xjtuxb201506005

低信噪比下采用广义随机共振的能量检测算法

刘进, 李赞, 高锐

(西安电子科技大学综合业务网理论和关键技术国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对低信噪比下认知无线电中采用能量检测(ED)的频谱感知方法错误概率较大的问题,提出了一种采用广义随机共振的改进的能量检测(IED)算法。该算法首先对接收信号添加一个直流分量,并借助偏移系数确定直流分量的最优幅值,使其与信号中的直流产生广义随机共振;其次,对共振后的信号进行采样和能量累加得到检测统计量,然后根据最小平均错误概率准则确定最佳检测门限并与检测统计量进行比较从而做出判决;最后,从错误概率、样本检测点数和算法复杂度等几个方面给出算法的性能分析。理论推导和仿真结果表明:在信噪比为 -15 dB的低信噪比条件下,IED算法的错误概率性能比传统的ED算法提升了约 3 dB;在相同的错误概率条件下,IED算法所需的检测样本点数比ED算法显著减少。

关键词: 认知无线电;频谱感知;能量检测;广义随机共振

中图分类号: TN911.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)06-0027-06

An Energy Detection Algorithm Using Generalized Stochastic Resonance under Low Signal-to-Noise Ratios

LIU Jin, LI Zan, GAO Rui

(State key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An improved energy detection (IED) algorithm using generalized stochastic resonance (GSR) is proposed to reduce the error probability of the energy detection based spectrum sensing method in cognitive radio systems at low signal-to-noise ratio (SNR). A direct current (dc) component is added to the received signal and the optimal amplitude of the dc component is determined by the offset coefficient so that the GSR between the dc component and the dc in the signal is generated. A test statistic is obtained by sampling and energy accumulation of resonant signals. The optimal detection threshold is determined based on the minimum average error probability criterion and then a decision result is obtained from a comparison between the test statistic and the detection threshold. The performance analyses of the proposed algorithm are given. The theoretical analyses, simulation results and a comparison with the conventional ED algorithm show that the error probability of the IED algorithm improves by about 3 dB when SNR is -15 dB, and less samples are needed for the IED algorithm under same error probability conditions.

Keywords: cognitive radio; spectrum sensing; energy detection; generalized stochastic resonance

收稿日期: 2014-10-28。 作者简介: 刘进(1986—),男,博士生;李赞(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61301179 和 61401338);国家“863 计划”资助项目(2014AA8098080E);陕西省自然科学基金重点资助项目(2012JZ8002)。

网络出版时间: 2015-03-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150319.1153.002.html>

无线通信需求和无线数据传输速率的快速增长,导致无线频谱资源日益紧张,已经成为制约无线通信发展的瓶颈。同时,由于现有的频谱分配方式不够合理,使得大量的频谱资源没有得到充分利用。认知无线电作为一种提高无线频谱利用率的新技术,为解决当前效率低下的频谱分配方式与不断增长的频谱资源需求之间的矛盾提供了一种解决方案^[1]。关于认知无线电的研究目前主要集中于频谱感知、频谱分配和频谱管理等几个方向。其中,频谱感知作为认知无线电研究的核心内容,是频谱分配和频谱管理研究的前提条件^[2]。目前,随着无线信号的迅速增加,背景噪声和干扰显著提高,接收到的信号常呈现出低信噪比的特点。在低信噪比条件下,现有的频谱感知方法无法满足实际认知网络快速、准确的感知需求。因此,低信噪比条件下的频谱感知已经成为认知无线电技术中亟需解决的关键问题^[3]。

作为认知无线电的关键技术,频谱感知一直是国内外研究的热点^[4-5],常用的方法有:匹配滤波法^[6]、能量检测法^[7]以及循环平稳检测法^[8]等。匹配滤波法是性能最优的检测算法,但前提是需要知道主用户的先验信息,这在实际系统中往往很难得到,从而很大程度上限制了匹配滤波法的应用;循环平稳检测法性能较好,但是计算复杂度过高从而难以满足认知系统快速感知的需求;能量检测法由于其不依赖于先验信息且计算复杂度低等优点在实际系统中最常采用。然而,能量检测算法在低信噪比条件下性能严重下降,要保证感知性能就要以牺牲感知时间为代价,无法满足认知无线电系统快速、准确的感知需求。

为了改善频谱感知算法在低信噪比条件下的感知性能,一些学者尝试将非线性学科中的随机共振技术引入到频谱感知中。随机共振的概念最初由 Benzi 等人提出^[9],描述了一种奇特的非线性物理现象,即在一定的条件下噪声可以用来增强信号的传输^[10-13]。在传统的随机共振研究中,非线性双稳态系统是研究最多的一类随机共振模型^[9-13],其原因是双稳态随机共振的物理意义非常直观以及在双稳态系统中噪声的非线性作用非常典型。然而,双稳态随机共振研究中要求处理信号的类型为周期的正弦信号^[9-12]或二进制的非周期调制信号^[13]。为了拓宽随机共振的概念,研究学者提出了一种噪声增强检测性能的方法也就是广义随机共振的概念^[14-16]。随机共振技术的提出,改变了传统信号处理领域对噪声的认识,将噪声从有害的因素变为有利于信号

传输的因素。

为了改善低信噪比下认知无线电中采用能量检测(ED)的频谱感知方法的错误概率性能,本文通过添加直流量与信号中的直流产生共振的方式,提出了一种基于广义随机共振的改进的能量检测(IED)算法。与匹配滤波相比,所提算法只需要知道信号的部分信息,如均值和方差等,但是比匹配滤波需要的信息要少。与传统能量检测相比,该算法通过使用部分额外的信号信息,因此性能优于传统能量检测算法。

1 系统模型

1.1 频谱感知模型

认知无线电的核心问题是如何提高次级用户(secondary user, SU)对主用户(primary user, PU)空闲频段实时、准确感知的能力。为了合理利用 PU 的空闲频段且不对 PU 造成影响, SU 必须能够实时、准确地检测主授权用户信号的存在与否。当检测到 PU 频谱空闲时, SU 可以通过动态接入 PU 空闲频段的方式提高频谱利用率。SU 节点频谱感知可以看作是二元假设检验问题

$$x(n) = \begin{cases} \omega(n), & H_0 \\ s(n) + \omega(n), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: H_0 和 H_1 分别代表 PU 信号不存在和存在的情况; $s(n)$ 和 $\omega(n)$ 分别表示接收到的采样信号和干扰噪声。不失一般性本文中假设:①噪声 $\omega(n)$ 是均值为 0、方差为 σ_ω^2 的高斯噪声,即 $\omega(n) \sim N(0, \sigma_\omega^2)$; ②接收信号 $s(n)$ 是均值为 μ 、方差为 σ_s^2 的随机变量,且信号 $s(n)$ 和噪声 $\omega(n)$ 相互独立。根据以上假设,可以计算出接收信号的信噪比 $\gamma = (\mu^2 + \sigma_s^2) / \sigma_\omega^2$ 。

1.2 传统能量检测算法及存在的问题

传统能量检测(ED)算法的基本思想是对接收到采样后的信号 $x(n)$ 进行能量累加并与判决门限 ρ_{ED} 进行比较,从而做出 H_1 或 H_0 判决。检测统计量 T_{ED} 为接收序列的能量和

$$\left. \begin{aligned} T_{ED} &= \sum_{n=1}^L |x(n)|^2 \geq \rho_{ED}, & H_1 \\ T_{ED} &= \sum_{n=1}^L |x(n)|^2 < \rho_{ED}, & H_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: L 表示样本检测点数。由概率论及统计学知识可以得到:如果 L 个相互独立的随机变量均服从正态分布,那么这 L 个随机变量的平方和则服从自由度为 L 的卡方分布;特别是当 L 取值足够大时,

由中心极限定理可知,检测统计量 T_{ED} 服从近似的正态分布,即

$$T_{ED} \sim \begin{cases} N(L\sigma_\omega^2, 2L\sigma_\omega^4), & H_0 \\ N(L(\sigma^2 + \mu^2), 2L\sigma^4 + 4L\mu^2\sigma^2), & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

为了方便表示,式(3)中 $\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_\omega^2$ 。这里,采用最小平均错误概率准则来推导能量检测算法的检测门限 ρ_{ED} 。传统能量检测算法的平均错误概率 $P_{e,ED}$ 可以表示为

$$P_{e,ED} = P(H_1 | H_0)P(H_0) + P(H_0 | H_1)P(H_1) = Q\left(\frac{\rho_{ED} - L\sigma_\omega^2}{(2L)^{1/2}\sigma_\omega^2}\right)\pi_0 + Q\left(\frac{L\sigma^2 + L\mu^2 - \rho_{ED}}{(2L\sigma^4 + 4L\mu^2\sigma^2)^{1/2}}\right)\pi_1 \quad (4)$$

式中: Q 函数的表达式为 $Q(t) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \cdot$

$$\int_t^\infty \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right)dv, \text{ 且 } P(H_0) + P(H_1) = \pi_0 + \pi_1 = 1。$$

为了得到最优检测门限 ρ_{ED} ,对式(4)关于 ρ_{ED} 进行求导并令求导结果为0,进一步化简后可得到以下方程

$$A_1\rho_{ED}^2 + B_1\rho_{ED} + C_1 = 0 \quad (5)$$

式中: A_1 、 B_1 和 C_1 分别为方程(5)中关于检测门限变量 ρ_{ED} 的各次项以及常数项的系数,其取值分别为

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \sigma_\omega^4 - \sigma^4 - 2\mu^2\sigma^2 \\ B_1 &= 2L\sigma_\omega^2\sigma^4 + 4L\sigma_\omega^2\mu^2\sigma^2 - 2L\sigma^2\sigma_\omega^4 - 2L\mu^2\sigma_\omega^4 \\ C_1 &= L^2\mu^4\sigma_\omega^4 - 4\ln\left(\sigma_\omega^2\pi_1\left[\left(\sigma^4 + 2\mu^2\sigma^2\right)^{1/2}\pi_0\right]\right) \cdot \\ &\quad (L\sigma^4 + 2L\mu^2\sigma^2)\sigma_\omega^4 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

通过求解式(5),且根据 $\rho_{ED} > 0$,可得到检测门限为

$$\rho_{ED} = [-B_1 + (B_1^2 - 4A_1C_1)^{1/2}]/(2A_1) \quad (7)$$

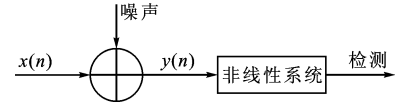
由于传统的能量检测算法随着接收信号信噪比的降低其检测性能严重下降,因此要在低信噪比条件下获得较小的平均错误概率,就必须大幅度增加能量累积点数 L 。例如,在信噪比 $\gamma = -15$ dB 的条件下,要保证平均错误概率 $P_{e,ED} < 0.1$,则需满足 $L > 1.4 \times 10^4$ 。当 L 一定时,能量累积点数决定了感知时间,大量地增加能量累积点数会相应地增加感知时间,无法满足实际的认知无线电系统快速感知的需求。

2 基于广义随机共振的能量检测法

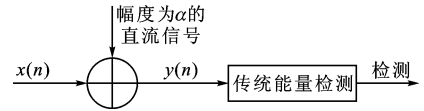
为了改善低信噪比下认知无线电中采用能量检测(ED)的频谱感知方法的错误概率性能,本文提出一种基于广义随机共振的改进的能量检测(IED)算法,下面给出算法流程。

2.1 算法流程

文献[16]拓宽了随机共振的概念,提出了一种广义随机共振概念下的噪声增强检测性能方法,该方法的流程如图1a所示。在本文中,选择一个直流信号作为添加的广义随机共振噪声^[14],即噪声的概率密度函数(probability density function, PDF)为 $\delta(n-a)$,这里 $\delta(n-a)$ 代表一个直流信号,取值为 a 。将经过广义随机共振处理后的信号再进行传统的能量检测,从而得到基于广义随机共振的改进的能量检测(improved energy detection, IED)算法,算法流程如图1b所示。



(a) 噪声增强非线性检测法框图



(b) 基于广义随机共振的能量检测法框图

图1 噪声增强检测方法框图

根据图1b所示的算法流程,首先对接收到的信号 $x(n)$ 添加幅度为 a 的直流信号,从而得到新的观测量 $y(n) = x(n) + a$,进一步计算出改进的能量检测算法的检测统计量为

$$\left. \begin{aligned} T_{IED} &= \sum_{n=1}^L |y(n)|^2 \geq \rho_{IED}, & H_1 \\ T_{IED} &= \sum_{n=1}^L |y(n)|^2 < \rho_{IED}, & H_0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: ρ_{IED} 为改进的能量检测算法的检测门限。当 L 足够大时,根据中心极限定理,检测统计量 T_{IED} 服从近似的正态分布

$$T_{IED} \sim \begin{cases} N(L(\sigma_\omega^2 + a^2), 2L\sigma_\omega^4 + 4L\sigma_\omega^2a^2), & H_0 \\ N(L\sigma^2 + L\xi^2, 2L\sigma^4 + 4L\sigma^2\xi^2), & H_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_\omega^2$; $\xi = \mu + a$ 。

2.2 最优直流信号幅值

根据改进的能量检测算法原理,其核心问题在于确定添加的直流信号的最优幅值。借助偏移系数 d^2 ^[17] 来选择最优的直流信号幅值 a ,计算公式如下

$$d^2 = \frac{[E(T_{IED}; H_1) - E(T_{IED}; H_0)]^2}{\text{var}(T_{IED}; H_0)} \quad (10)$$

式中: $E(\cdot)$ 和 $\text{var}(\cdot)$ 分别为求期望和方差的函

数。由于检测性能是关于 d^2 的单调递增函数,因此最优直流信号幅值 a 的选取应使得偏移系数 d^2 取得最大值, d^2 的表达式为

$$d^2 = \frac{[L(\sigma_s^2 + \xi^2) - L(\sigma_w^2 + a^2)]^2}{2L\sigma_w^4 + 4L\sigma_w^2 a^2} = \frac{[L\sigma_s^2 + L(\mu^2 + 2\mu a)]^2}{2L\sigma_w^4 + 4L\sigma_w^2 a^2} \quad (11)$$

对偏移系数 d^2 关于直流信号幅值 a 求导,可以得到

$$\begin{aligned} & \frac{d}{da} \left\{ \frac{[L\sigma_s^2 + L(\mu^2 + 2\mu a)]^2}{(2L\sigma_w^4 + 4L\sigma_w^2 a^2)} \right\} / da = \\ & \frac{4L\mu[L\sigma_s^2 + L(\mu^2 + 2\mu a)][2L\sigma_w^4 + 4L\sigma_w^2 a^2]}{(2L\sigma_w^4 + 4L\sigma_w^2 a^2)^2} - \\ & \frac{8L\sigma_w^2 a[L\sigma_s^2 + L(\mu^2 + 2\mu a)]^2}{(2L\sigma_w^4 + 4L\sigma_w^2 a^2)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

令式(12)的求导结果等于0,可以得到

$$[\mu\sigma_s^2 + \mu^3 + 2\mu^2 a][\sigma_w^2 + 2a^2] = a[\sigma_s^2 + \mu^2 + 2\mu a]^2 \quad (13)$$

化简式(13),最优直流信号幅值 a 的选取等价于求解以下方程

$$A_2 a^2 + B_2 a + C_2 = 0 \quad (14)$$

式中: A_2 、 B_2 和 C_2 分别为方程(14)中关于直流信号幅值变量 a 的各次项以及常数项的系数,其取值分别为

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= 2\mu^3 + 2\mu\sigma_s^2 \\ B_2 &= \sigma_s^4 + \mu^2 + 2\mu^2\sigma_s^2 - 2\sigma_w^2\mu^2 \\ C_2 &= -(\sigma_w^2\mu\sigma_s^2 + \sigma_w^2\mu^3) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

求解方程(14)可以得到改进的能量检测算法中添加的直流信号的最优幅值 a 为

$$a = [-B_2 + (B_2^2 - 4A_2C_2)^{1/2}]/(2A_2) \quad (16)$$

2.3 最优检测门限

类似于传统的能量检测,可以计算得到改进的能量检测(IED)算法的平均错误概率为

$$\begin{aligned} P_{e,IED} &= P(H_1 | H_0)P(H_0) + P(H_0 | H_1)P(H_1) = \\ & P(T_{IED} \geq \rho_{IED} | H_0)\pi_0 + P(T_{IED} < \rho_{IED} | H_1)\pi_1 \end{aligned} \quad (17)$$

为了得到最优的检测门限值,首先对平均错误概率 $P_{e,IED}$ 关于 IED 算法的检测门限 ρ_{IED} 进行求导并令结果等于0,即 $dP_{e,IED}/d\rho_{IED} = 0$,等价于求解以下方程,可以得到最优的检测门限值

$$A_3 \rho_{IED}^2 + B_3 \rho_{IED} + C_3 = 0 \quad (18)$$

式中: A_3 、 B_3 和 C_3 分别为方程(18)中关于检测门限变量 ρ_{IED} 的各次项以及常数项的系数,分别为

$$\left. \begin{aligned} A_3 &= (\sigma_w^4 + 2\sigma_w^2 a^2) - (\sigma_1^4 + 2\sigma_1^2 \xi^2) \\ B_3 &= 2L(\sigma_w^2 + a^2)(\sigma_1^4 + 2\sigma_1^2 \xi^2) - \\ & (2L\sigma_1^2 + 2L\xi^2)(\sigma_w^4 + 2\sigma_w^2 a^2) \\ C_3 &= L^2 \sigma_w^2 (\sigma_1^4 + 2\sigma_1^2 \xi^2 + \xi^4) - 4L\sigma_1^2 \sigma_w^2 \cdot \\ & \ln \left[\frac{(\sigma_w^4 + 2\sigma_w^2 a^2)^{1/2} \pi_1}{(\sigma_1^4 + 2\sigma_1^2 \xi^2)^{1/2} \pi_0} \right] (\sigma_1^2 + 2\xi^2)(\sigma_w^2 + 2a^2) - \\ & \sigma_1^2 (L^2 (\sigma_w^2 + a^2)^2) (\sigma_1^2 + 2\xi^2) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

求解方程(18)可得到 IED 算法的最优检测门限值 ρ_{IED} 为

$$\rho_{IED} = [-B_3 + (B_3^2 - 4A_3C_3)^{1/2}]/(2A_3) \quad (20)$$

式中:直流信号幅值 a 为式(16)已经求解出的直流信号的最优幅值。由式(17)和式(20)可以计算出改进的能量检测算法的错误概率 $P_{e,IED}$,而传统的能量检测算法相当于添加的直流信号幅值取 $a=0$ 的情形。当信号均值 $\mu=0$ 时,此时直流信号幅值 $a=0$ 。将 $\mu=0$ 、 $a=0$ 代入式(3)和(9)中可以得到此时传统能量检测统计量 T_{ED} 和改进的能量检测统计量 T_{IED} 服从相同的分布。因此,可以得到,当 $\mu=0$ 时,改进的能量检测算法不能改善检测性能,即 $P_{e,IED} = P_{e,ED}$ 。当 $\mu \neq 0$ 时,且当添加的直流信号根据式(16)取最优幅值时,此时偏移系数 d^2 取得最大值。根据文献[17]可知,检测性能是关于偏移系数的递增函数,即偏移系数越大,错误概率越小。因此不难得到,当 $\mu \neq 0$ 时,且当添加的直流信号根据式(16)取最优幅值时,改进的能量检测算法的平均错误概率小于传统能量检测算法(即 $P_{e,IED} \leq P_{e,ED}$)。在实际的通信系统中,非零均值信号常常被广泛地使用,例如以离散的脉冲串作为调制载波的 PAM(pulse amplitude modulation)信号、PDM(pulse density modulation)信号、PPM(pulse position modulation)信号以及数字基带信号等等。

3 性能分析

本节将从系统所需样本检测点数、计算复杂度和抗噪声不确定度等几个方面进一步分析基于广义随机共振的能量检测算法的性能。

3.1 系统所需样本检测点数

系统所需样本检测点数 L 是改进的能量检测算法中一个重要的参数,由式(11)可以得到

$$d^2 = \frac{L[\sigma_s^2 + (\mu^2 + 2\mu a)]^2}{2\sigma_w^4 + 4\sigma_w^2 a^2} \quad (21)$$

由式(21)可以看出,当 L 增加时,偏移系数 d^2 也随之增加,且由偏移系数和检测性能的关系可知,

当 L 给定时, $P_{e,IED} \leq P_{e,ED}$ 。那么,要得到相同的检测性能 $P_{e,IED} = P_{e,ED}$,改进的能量检测算法需要的检测长度小于传统的能量检测算法 ($L_{IED} \leq L_{ED}$)。

3.2 计算复杂度

在认知无线网络中,通常都是通过增加感知时间来得到可靠的感知结果。然而,一个强健的感知技术,应该具备较低的复杂度和较高的感知性能。下面,分析改进的能量检测算法的计算复杂度。

当系统的所需的样本检测点数为 L 时,能量检测(ED)算法中求信号能量时需要进行平方运算,平方运算中的乘法次数为 L 次;ED 算法中能量累加运算的加法次数为 $L-1$ 次,此外还有 1 次比较判决。相比于传统的 ED 算法,改进的能量检测(IED)算法需要增加添加直流信号这一步骤,这个步骤仅仅需要增加一次加法运算。因此,IED 算法的加法次数为 L 次,乘法运算与 ED 算法相同为 L 次,此外还有 1 次比较判决。在 3.1 节的分析中已经获知,要得到相同的检测性能 $P_{e,IED} = P_{e,ED}$,IED 算法需要的样本检测点数少于传统的 ED 算法 ($L_{IED} \leq L_{ED}$),此时,IED 算法较传统 ED 算法对加法运算的改进次数为 $(L_{ED} - 1) - L_{IED}$ 次,对乘法运算的改进次数为 $L_{ED} - L_{IED}$ 次。

3.3 抗噪声不确定度

考虑到能量检测(ED)算法在实际应用中受到噪声不确定性的影响较大,下面分析噪声方差不确定度对改进的能量检测(IED)算法的影响。

假设背景高斯噪声方差 σ_w^2 的变化范围满足 $(1 - \epsilon_1)\sigma_w^2 \leq \sigma_w^2 \leq (1 + \epsilon_2)\sigma_w^2$,其中 $0 \leq \epsilon_1 \leq 1, \epsilon_2 \geq 0$ 为噪声方差误差比值,则 ED 算法的噪声不确定度可以定义为

$$\rho_{ED} = \frac{(1 + \epsilon_2)\sigma_w^2}{(1 - \epsilon_1)\sigma_w^2} = \frac{1 + \epsilon_2}{1 - \epsilon_1} \geq 1 \quad (22)$$

不确定度 ρ_{ED} 的取值越接近于 1,则表示噪声方差的变化越小,对于 ED 算法的影响也就越小。同理,可以得到改进的能量检测算法的噪声不确定度

为 $\rho_{IED} = \frac{(1 + \epsilon_2)\sigma_w^2 + a}{(1 - \epsilon_1)\sigma_w^2 + a}$,从而可以得到

$$\rho_{ED} - \rho_{IED} = \frac{(1 + \epsilon_2)\sigma_w^2}{(1 - \epsilon_1)\sigma_w^2} - \frac{(1 + \epsilon_2)\sigma_w^2 + a}{(1 - \epsilon_1)\sigma_w^2 + a} = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)\sigma_w^2 a}{(1 - \epsilon_1)\sigma_w^2 [(1 - \epsilon_1)\sigma_w^2 + a]} \geq 0 \quad (23)$$

从式(23)可以得到当添加幅值为 a 的直流信号时,IED 算法受噪声不确定度的影响要小于传统 ED 算法 ($\rho_{IED} < \rho_{ED}$),即所提 IED 算法抗噪声不确定度的能力强于传统 ED 算法。

4 仿真结果与分析

4.1 概率密度分布

仿真参数设置为:信噪比 $\gamma = -10$ dB,样本检测点数 $L = 2000$, $\pi_0 = \pi_1 = 0.5$, $\mu^2 = \sigma_s^2/25$ 。图 2 给出了添加噪声(幅值为 a 的直流信号)前后能量检测统计量的归一化概率密度分布(PDF)。从图 2 可见,添加噪声后 H_0 和 H_1 条件下 PDF 的距离要大于添加噪声前。这意味着添加噪声后更容易判断主用户(PU)信号的存在性。

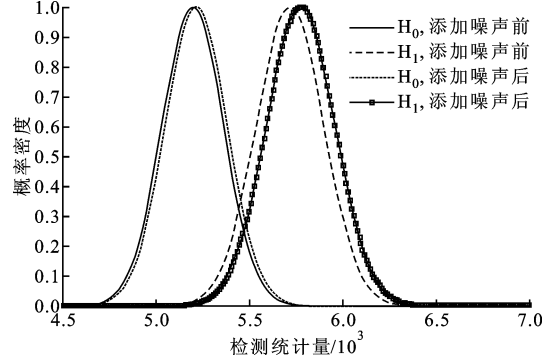


图2 添加噪声前后检测统计量的概率密度分布

4.2 最优噪声强度

仿真条件为:信噪比分别为 $\gamma = -10$ dB 和 $\gamma = -12$ dB,样本检测点数 $L = 1000$, $\pi_0 = \pi_1 = 0.5$, $\mu^2 = \sigma_s^2/25$ 。图 3 给出了偏移系数 d^2 在不同直流信号幅值 a 下的变化趋势。当添加的直流信号幅值 a 根据式(16)取值时,偏移系数 d^2 趋于最大值。因此,可以验证由式(16)计算添加的直流信号的最优幅值的正确性。

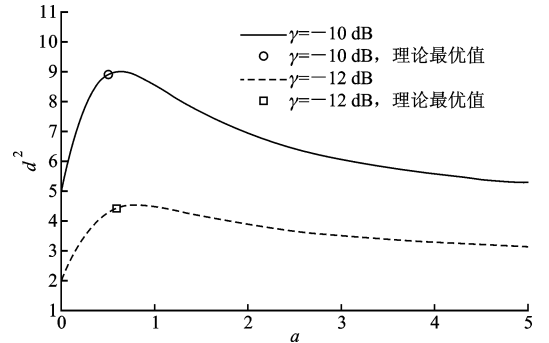


图3 不同噪声强度 a 下的偏移系数曲线

4.3 检测性能

仿真条件为:信噪比从 $\gamma = -25$ dB 到 $\gamma = -5$ dB,样本检测点数 $L = 1000$, $\pi_0 = \pi_1 = 0.5$, $\mu^2 = \sigma_s^2/25$ 。图 4 给出了不同信噪比条件下传统能量检测(ED)算法和改进的能量检测(IED)算法的平均错误概率性能比较。很显然,在相同的条件下,IED

算法的平均错误概率小于传统的 ED 算法。在 $\gamma = -15$ dB 的条件下,IED 算法的平均错误概率性能较传统 ED 算法提升了约 3 dB。

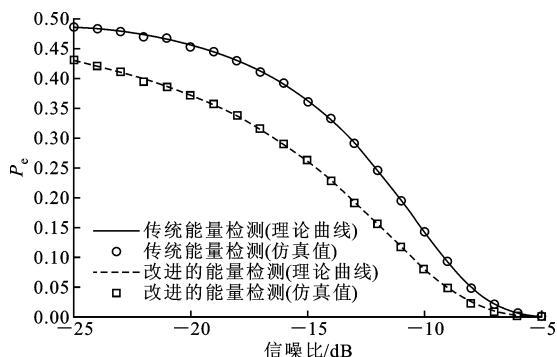


图4 不同信噪比条件下的平均错误概率性能曲线

图5给出了不同的先验概率 π_0 条件下传统能量检测(ED)算法和改进的能量检测(IED)算法的平均错误概率性能比较。仿真条件为: π_0 的取值从 0.1 到 0.9,信噪比 $\gamma = -15$ dB,样本检测点数 $L = 1\,000$, $\mu^2 = \sigma_s^2/25$ 。很显然,IED 算法的平均错误概率小于传统的 ED 算法,而且可以观察到当 $\pi_0 = \pi_1 = 0.5$ 时,IED 算法和传统 ED 算法的平均错误概率均趋于最大值,这与经典的信息熵理论相类似。

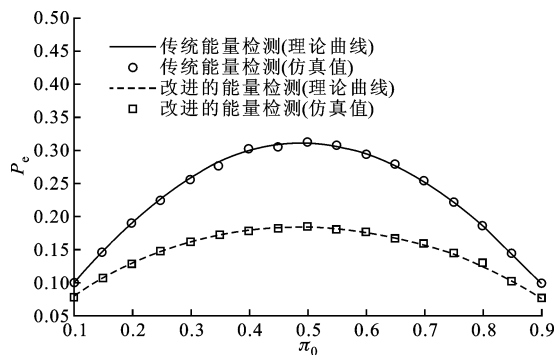


图5 不同先验概率 π_0 下的平均错误概率性能曲线

图6给出了不同样本检测点数 L 条件下传统能量检测(ED)算法和改进的能量检测(IED)算法

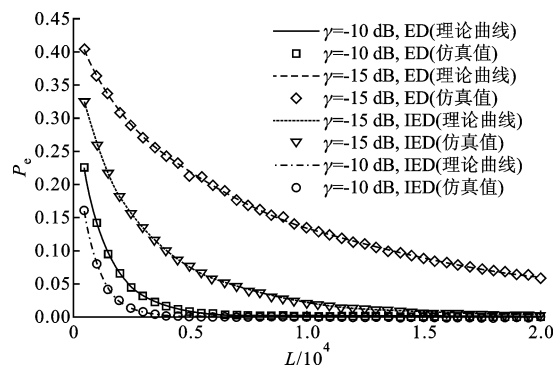


图6 不同样本检测点数下的平均错误概率性能曲线

的平均错误概率性能比较。仿真条件为: $\pi_0 = \pi_1 = 0.5$,信噪比 $\gamma = -15$ dB 和 $\gamma = -10$ dB,检测长度 L 的取值从 500 到 20 000, $\mu^2 = \sigma_s^2/25$ 。很显然,要达到相同的平均错误概率,IED 算法需要的检测长度远小于传统 ED 算法。

5 结 论

本文提出了一种基于广义随机共振的改进的能量检测算法,通过添加直流分量与信号中的直流产生共振的方式,有效地改善了低信噪比条件下能量检测统计量的概率密度分布,从而改善了低信噪比下认知无线电中采用能量检测(ED)的频谱感知方法的错误概率性能。此外,与传统能量检测相比,本文所提出的改进的能量检测算法具有所需样本检测点数少、计算复杂度低和抗噪声不确定性好的优点,为实现认知无线网络在低信噪比条件下准确、快速的频谱感知提供了可能性。

参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] LARSSON E G, SKOGLUND M. Cognitive radio in a frequency-planned environment: some basic limits [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 4800-4806.
- [3] CORDEIRO C, CHALLAPALI K, BIRRU D. IEEE 802.22: an introduction to the first wireless standard based on cognitive radios [J]. Journal of Communications, 2006, 1(1): 2208-2233.
- [4] AXELL E, LEUS G, LARSSON E G, et al. Spectrum sensing for cognitive radio: state-of-the-art and recent advances [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 29(3): 101-116.
- [5] 齐佩汉, 司江勃, 李赞, 等. 新型抗噪声不确定度谱分段对消频谱感知算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(6): 19-24.
QI Peihan, SI Jiangbo, LI Zan, et al. Novel anti-noise-uncertainty spectrum sensing algorithm based on power spectral density segment cancellation [J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(6): 19-24.
- [6] THEILER J, FOY B R. Effect of signal contamination in matched-filter detection of the signal on a cluttered background [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 98-102.

(下转第 59 页)