

资源受限的认知无线电系统优化合作频谱感知算法

薛 峰 屈代明 朱光喜 刘 立

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

(国家光电实验室光通信与智能网络研究部 武汉 430074)

摘 要 认知无线电的首要任务就是动态地感知频谱,合作频谱感知提高了频谱感知的可靠性。目前大多数频谱感知算法采用全部认知无线电台参与感知,并且假设每个认知无线电台的信噪比的测量值为一常数。然而,由于无线信道的特性和环境差异,每个认知无线电台的信噪比是有差异的,同时系统资源也是有限的。基于此,在采用能量检测硬判决的合作频谱感知算法基础上,提出一种优化的频谱感知算法。它在满足给定系统探测概率及虚警概率前提下,采用部分性能较好的认知无线电台参与频谱感知,并使系统感知开销最小。理论和仿真证明了其合理及有效性。

关键词 频谱感知,硬判决,感知开销,资源受限

Optimal Cooperative Spectrum Sensing Algorithm of the Resource Constrained Cognitive Radio Networks

XUE Feng QU Dai-ming ZHU Guang-xi LIU Li

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Division of Optical Communication and Intelligent Network, Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

Abstract The primary task of cognitive radio is dynamically sensing spectrum. Cooperative spectrum sensing increases the reliability of spectrum sensing. Recently most spectrum sensing algorithm uses all the cognitive radio to participate in the sensing and assumes the SNR measured values of each cognitive radio as a constant. However, because the characteristics and environment of wireless channel have difference, the SNR of each cognitive radio is difference and system resources are also limited. Based on this, we proposed an optimized spectrum sensing algorithm on the foundation of cooperative spectrum sensing which uses hard decision. It can use partial of cognitive radio to participate in spectrum sensing and minimize the sensing overhead. The analytic results were verified by computer simulation.

Keywords False alarm probability, Hard decision, Sensing overhead, Resource constrained

1 简介

近年来,随着无线通信业务需求的快速增长,可用频谱资源变得越来越稀缺。人们在采用先进的无线通信理论和技术提高频谱效率的同时,却发现全球授权频段频谱利用率较低。美国联邦通信委员会的研究报告表明实际授权频段的利用率仅有15%~85%^[1]。

为了在这样一个动态的环境中更充分地利用已分配的频率资源,认知无线电技术应运而生^[2]。它能动态适应快速变化的无线环境,利用频域、时域上动态出现的频谱空洞进行通信。认知用户的首要任务就是频谱感知,这样它可以在对现有授权用户只造成一定限制干扰前提下有效地利用频谱空洞。无线环境中,信号传输会受到阴影、多径等因素的影响,认知用户的本地频谱检测不能满足所要求的可靠性;更甚者,认知用户受到严重阴影的影响时,会发生漏检,从而会对主用户系统造成干扰。为此,认知无线电需要在同频段上采用用户分集的合作频谱感知技术^[3,4]来提高检测的可靠性和快速性。合作频谱感知技术通过处理多个认知用户的检测信息来更准确地判断频谱的使用情况。

提高系统的感知性能可以从空域和时域两方面进行,空域上采用更多的认知用户参与感知,时域上可采用延长感知时间,提高采样率等办法。然而在提高了系统感知性能的同时,系统的感知开销却迅速地增大,在一个资源受限的认知无线系统中,在满足系统的相应性能指标的前提下,尽可能减少系统的感知开销,是急需解决的问题。

在认知无线电系统中,为了易于区分不同用户的感知结果,合作检测结果一般采用 TDMA 或者 OFDM 方式将感知结果传递到相应的认知基站,OFDM 方式中认知用户同时传递感知结果,需要很宽的控制信道。在控制信道带宽受限的信道上,一般采用 TDMA 方式,传统算法考虑全部认知用户参与频谱感知并传递结果到认知基站,如果认知无线电台数量较多,不可避免地导致频谱感知时间延长。文献[5]提出当感知用户的信噪比不同时,选择部分信噪比最大的认知用户参与感知,其系统性能优于全部用户参与的系统。文献[6]提出满足系统性能需要时,最小感知用户数量的选择算法,但它没有考虑每个认知无线电台的信噪比差异性。文献[7]研究了感知开销的相关问题,但它只考虑了信噪比变化对认知电台数量的影响,并没有考虑到感知时长变化对所需电台数量

到稿日期:2009-10-16 返修日期:2010-01-14 本文受国家科技支撑计划项目(2008BAH30B12),国家自然科学基金(60702039)资助。

薛 峰(1972-),男,博士生,主要研究方向为认知无线电及宽带接入,E-mail: xueboen@gmail.com;屈代明(1972-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线通信等;朱光喜(1945-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带无线与多媒体通信。

的影响。本文提出了一种快速而有效的频谱感知算法,它在满足给定系统探测概率及虚警概率前提下能利用部分性能较好的认知无线电台感知频谱,并使系统感知开销最小。数学推导和仿真证明了其有效性。

2 系统模型

系统的框图如图 1 所示,它基于 IEEE 802.22 WRAN 标准。电视发射台为首要用户,认知基站(BS)和认知用户(CPE)如图 1 所示。每个认知用户接收到首要用户的功率可以近似为 $P_i = \frac{P_{\text{primary}}}{1 + \beta d_i^\alpha}$, α 是衰减因子, β 是一可测常数, d_i 是首要用户和第 i 个次要用户之间的距离。则次要用户接收到的信噪比为 $\eta_i = 10 \log \frac{P_i}{\sigma^2}$, $i \in [1, N]$ 。假设噪声功率是一样的, N 代表参与频谱感知的所有电台数量,同时假设认知基站知道每个次要用户的 η_i 。

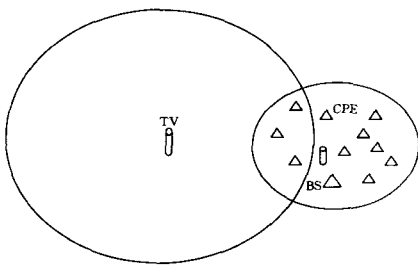


图 1 IEEE 802.22 系统模型

3 优化合作频谱感知算法

3.1 单个用户信道感知

认知无线电系统中,每个认知用户采用能量检测^[8]。单用户检测的基本假设模型可以描述为二元假设检验问题:

$$\begin{aligned} H_0: r_i &= n_i \\ H_1: r_i &= h_i s + n_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中, H_0, H_1 分别代表首要用户消失、出现与否; r_i 代表第 i 个认知用户接收到的首要用户信号值; h_i 代表第 i 个认知用户和首要用户间的复信道增益; s 代表首要用户信号值; n_i 代表加性高斯白噪声。

采用能量检测的方法,其输出相应统计量为:

$$Y_i = \sum_{n=0}^N |r_i(n)|^2 \quad (2)$$

$N = T_{\text{QP}} \cdot f_s$, N 代表抽样数量, T_{QP} 代表感知时长(静默期时长), f_s 代表抽样率。

考虑经过衰落信道到达认知用户接收到的首要用户信号为:

$$\eta = \frac{s |h_i|^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

设 τ 为判决门限,则单个认知用户的检测概率和虚警概率分别为:

$$p_{di} = \Pr(Y_i > \tau | H_1) = Q\left(\frac{\tau - N\sigma_n^2(1+\eta)}{\sigma_n^2 \sqrt{2N(1+2\eta)}}\right) \quad (4)$$

$$p_{fi} = \Pr(Y_i > \tau | H_0) = Q\left(\frac{\tau - N\sigma_n^2}{\sigma_n^2 \sqrt{2N}}\right) \quad (5)$$

式中, $Q(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\alpha}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$, 代表高斯分布累积概率。

3.2 接收信噪比不同时的系统性能

硬判决合作频谱感知的算法过程如下:

1) 每个认知无线电台独立在本地完成频谱感知工作并做出频谱占用与否二元判决 $X_i \in \{0, 1\}$;

2) 每个认知无线电台通过相应的控制信道将感知结果传到认知基站;

3) 认知基站通过一定的规则处理相应的二元判决结果并生成系统最终的判决结果,并将该结果发送给各个认知用户。

认知基站将各个认知用户的 1bit 的判决结果 y_k 通过以下的逻辑规则进行融合:

$$H_0: \sum_{k=1}^N y_k < K$$

$$H_1: \sum_{k=1}^N y_k \geq K$$

当 N 个认知用户中有 K 个以上用户发送 1 时,认知基站认为首要用户在传送信号,否则认为首要用户没有传送信号。可以看到 OR 和 AND 算法相应的是 $k=1$ 和 $k=N$ 的特例。

其相应的检测概率和虚警概率为:

$$P_f = \Pr(Y = \sum_{i=1}^N y_i > \alpha | H_0) \quad (6)$$

$$P_d = \Pr(Y = \sum_{i=1}^N y_i > \alpha | H_1) \quad (7)$$

当各个认知用户接收到的信噪比不同时,系统总的检测概率和虚警概率表达式非常复杂,下面从数学上简化它的分析:假设每个认知用户之间彼此独立,当认知用户数目比较多时,利用中心极限定理, Y 基本满足高斯分布,其均值和方差如下:

$$E(Y) = E\left(\sum_{i=1}^N y_i\right) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N p_{fi} H_0 \\ \sum_{i=1}^N p_{di} H_1 \end{cases}$$

$$Var(Y) = Var\left(\sum_{i=1}^N y_i\right) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N p_{fi} - \sum_{i=1}^N (p_{fi})^2 H_0 \\ \sum_{i=1}^N p_{di} - \sum_{i=1}^N (p_{di})^2 H_1 \end{cases}$$

则系统的检测概率和虚警概率为:

$$P_f = Q\left(\frac{\alpha - \sum_{i=1}^N p_{fi}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N p_{fi} - \sum_{i=1}^N (p_{fi})^2}}\right) \quad (8)$$

$$P_d = Q\left(\frac{\alpha - \sum_{i=1}^N p_{di}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N p_{di} - \sum_{i=1}^N (p_{di})^2}}\right) \quad (9)$$

假设系统的门限为 $\alpha = N\lambda$, 则:

$$P_d = Q\left(\frac{N\lambda - \sum_{i=1}^N p_{di}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N p_{di} - \sum_{i=1}^N (p_{di})^2}}\right)$$

$$P_f = Q\left(\frac{N\lambda - \sum_{i=1}^N p_{fi}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N p_{fi} - \sum_{i=1}^N (p_{fi})^2}}\right)$$

$N \rightarrow \infty$, 如果认知电台的平均探测概率 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{di} = \overline{P_d} > \lambda$,

$$P_d = Q(-\infty) = 1.$$

$N \rightarrow \infty$, 如果认知电台的平均虚警概率 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{fi} = \overline{P_f} < \lambda$,

$$P_f = Q(+\infty) = 0.$$

随着 N 的增加,系统的探测概率逐渐趋向 1,虚警概率逐渐趋向 0。

从以上分析可以看到传统算法认为每个认知电台接收到的信噪比是相同的,因此其系统探测概率随着电台数量的增加而增加,逐渐趋于1,但是当各认知电台接收到的信噪比不同时,甚至 $\overline{P_d} \leq \lambda$,则其系统探测概率是逐渐减小的,此时选用全部电台参与感知频谱并不能实现最优的系统性能。

3.3 优化频谱感知算法

从以上分析可知,当各认知电台接收到的信噪比不同时,只需要选择部分性能较好的认知电台,就能实现所需系统性能。同时感知时间的长短也影响着系统的性能。将所有参与频谱感知的电台其感知时长及传递相应感知结果至认知基站所对应的时隙的时长的总和定义为感知开销。显然,它与参与感知的电台数量、感知时长及传递相应的感知结果的时隙长相关,算法的设计目标是在资源受限的认知无线系统中使系统感知开销最小。

认知无线系统中,高的探测概率意味着对首要用户小的干扰,低的虚警概率意味着频谱效率的改进,我们的目标是在满足系统探测概率和虚警概率的前提下,使系统感知开销最小。参与感知的电台数量因为与系统的感知时长 T_{QP} 及其接收到的信噪比值 η 相关,所以用 $L(T_{QP}, \eta)$ 表示。 T_{QP} 代表感知时长, ΔT 代表将感知结果传到认知基站所对应的一个时隙的时长,则可得如下的约束条件:

$$\begin{aligned} \min & L(T_{QP}, \eta)(T_{QP} + \Delta T) \\ \text{s.t. } & P_d(L) \geq P_D \\ & P_f(L) \leq P_F \end{aligned} \quad (10)$$

式中, P_D, P_F 分别代表满足系统探测基本要求所对应的系统探测概率和虚警概率。

3.3.1 满足约束条件所需要的最小认知电台数量

由约束条件可知系统开销增长速度和参与合作感知的用户数成正比,因此应尽可能在满足系统性能的前提下,使所需要的认知电台数量最小。

由于探测概率 P_d 随信噪比的增大而增大,因此在认知基站按信噪比由高到低进行排序依次选择出所需的认知电台。同时,虚警概率仅和每个认知用户的门限 τ 相关,因为每个认知用户的门限 τ 是一样的, $p_{fi} = p_f$, 则由式(8)可得:

$$\begin{aligned} \alpha &= Q^{-1}(P_F) \sqrt{N p_f (1 - p_f)} + N p_f \\ \text{将其代入式(9),则有:} \\ P_D &= Q\left(\frac{Q^{-1}(P_F) \sqrt{L p_f (1 - p_f)} + L p_f - \sum_{i=1}^L p_{di}}{\sqrt{\sum_{i=1}^L p_{di} - \sum_{i=1}^L (p_{di})^2}}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

假设系统的平均探测概率为:

$$\begin{aligned} \overline{P_d} &= \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L p_{di} \\ \overline{\sigma^2} &= \frac{1}{L} \left(\sum_{i=1}^L p_{di} - \sum_{i=1}^L (p_{di})^2 \right) \\ P_D &= Q\left(\frac{Q^{-1}(P_F) \sqrt{L p_f (1 - p_f)} + L(p_f - \overline{P_d})}{\sqrt{L \overline{\sigma^2}}}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

则满足约束条件所需要的最小认知电台数量(为方便起见将 $L(T_{QP}, \eta)$ 简记为 L)为:

$$L = \left\lceil \left[\frac{Q^{-1}(P_D) \sqrt{\overline{\sigma^2}} - Q^{-1}(P_F) \sqrt{p_f (1 - p_f)}}{\overline{P_d} - p_f} \right]^2 \right\rceil \quad (13)$$

3.3.2 基于最小感知开销优化频谱感知算法

由式(4)、式(5)可知,认知电台的探测概率和虚警概率一

方面与接收到的信噪比相关,另一方面还与感知时长相关,因此感知电台的数量与感知时长相关,以下研究二者之间的关系。由于系统的虚警概率随着认知电台的数量是逐渐下降的,而系统的探测概率随着认知电台的数量是逐渐上升的,因此可以将所需的最小电台数量表达式进行如下化简^[9]。

满足虚警概率所需要最小认知电台数量为:

$$L_1 = \left\lceil \left[\frac{Q^{-1}(P_F) \sqrt{p_f (1 - p_f)}}{\lambda - p_f} \right]^2 \right\rceil \quad (14)$$

满足探测概率所需要最小认知电台数量为:

$$L_2 = \left\lceil \left[\frac{Q^{-1}(P_D) \sqrt{\overline{\sigma^2}}}{\lambda - \overline{P_d}} \right]^2 \right\rceil \quad (15)$$

则 $L = \max(L_1, L_2)$ 。一般地,如果系统选择适当参数,可选 L_2 为最小所需电台数。由式(15)可知如果各电台的信噪比越大,则所需要的电台数量最小,因此为了方便分析其上限,也就是选取固定信噪比的情形,其值为:

$$\begin{aligned} L &= \left\lceil \frac{Q^{-1}(P_D) p_d (1 - p_d)}{\lambda - p_d} \right\rceil^2 \\ \text{将其代入式(10)中则得:} \\ \min(T_{QP} + \Delta T)L &= \left\lceil \frac{Q^{-1}(P_D) p_d (1 - p_d)}{\lambda - p_d} \right\rceil^2 (T_{QP} + \Delta T) \end{aligned} \quad (16)$$

由于探测概率 $p_d \in [0, 1]$, 则上式可以简化为:

$$\begin{aligned} \min(T_{QP} + \Delta T)L &\leq \left\lceil \frac{Q^{-1}(P_D)}{4(\lambda - p_d)} \right\rceil^2 (T_{QP} + \Delta T) \\ &\Rightarrow \max \left[\frac{4(\lambda - p_d)}{Q^{-1}(P_D)} \right]^2 \frac{1}{T_{QP} + \Delta T} \end{aligned}$$

由于 p_d 是感知时长的函数,因此整个函数对 T_{QP} 求导可得最优值。

4 性能仿真

仿真模型如图1所示。假设认知无线电台随机分布于以认知基站为中心、半径30km的范围内。首要用户和认知基站间隔150km。假设认知基站知道每个认知电台相应的信噪比值及地理位置。

4.1 系统探测概率和虚警概率分析

为了与 AND, OR 算法性能进行比较,将3种算法的系统探测概率、虚警概率分别示于图2和图3,因为 AND 算法的 $\lambda=1$, 所以 $P_d = Q(+\infty) = 0, P_f = Q(+\infty) = 0$ 。而在 OR 算法中, $\alpha = N\lambda = 1, P_d = Q(-\infty) = 1, P_f = Q(-\infty) = 1$ 。

可以看到,当系统参与感知的电台数量趋向无穷时, AND 只能满足虚警概率的需要,而其探测概率趋于0, OR 算法的性能正好与其相反,两个算法都不能满足要求。而优化算法在选择合适的门限前提下,即使其中部分认知电台的性能不好也不会影响系统整体的性能。

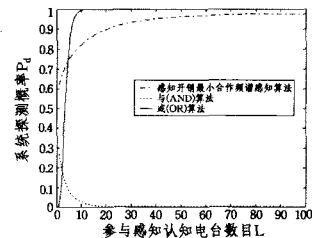


图2 3种算法的系统探测概率比较

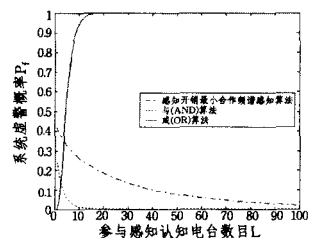


图3 3种算法的系统虚警概率比较

- [8] Zheng Yu-liang. Digital Signcryption or how to Achieve Cost (signature & encryption) $\ll$ Cost(signature) + cost(encryption) [C] // Advances in Cryptology-Crypto 1997, volume 1294 of LNCS. Springer-Verlag, 1997; 165-179
- [9] Lee J.M. Identity-based Signcryption [R]. Report 2002/098. Cryptology ePrint Archive, 2002. <http://eprint.iacr.org/>
- [10] Libert B, Quisquater J J. New Identity Based Signcryption Schemes from Pairings [R]. Report 2003/023. Cryptology ePrint Archive, 2003. <http://eprint.iacr.org/>
- [11] Peng Chang-gen, Li Xiang. An Identity-based Threshold Sign-

- [12] Huang Xin-yi, Susilo W, Mu Yi, et al. Identity-based Ring Signcryption Schemes; Cryptographic Primitives for Preserving Privacy and Authenticity in the Ubiquitous World [C] // Advanced Information Networking and Application 2005. 2005, 2; 649-654
- [13] Yu Yong, Li Fa-gen, Xu Chun-xiang, et al. An Efficient Identity-based Anonymous Signcryption Scheme [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2008, 13; 670-674
- [14] Li Fa-gen, Shirase M, Takagi T. Analysis and Improvement of Authenticatable Ring Signcryption Scheme [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2008, 13; 679-683

(上接第 56 页)

4.2 认知电台数量的选择

为了区别各个认知电台接收到信噪比的不同,我们选择了 3 种方案,为了保证公平性,假设各方案中系统的最大信噪比值 SNR_{max} 相同,系统的平均感知信噪比 $\overline{SNR}$ 相同, N 代表参与感知的认知无线电台数量。

方案 1: $SNR(i) = SNR$;

方案 2: $SNR(i) = SNR_{max} - (SNR_{max} - \overline{SNR}) \frac{2i}{N-1}$;

方案 3: $SNR(i) = SNR_{max} - (SNR_{max} - \overline{SNR})$

$$\frac{6i^2}{(N-1)(2N-1)}.$$

从图 4 可以看到,假如认知无线电台接收到的平均感知信噪比为 $\overline{SNR}$,假设系统的探测概率应满足 $P_d \geq 0.9$,系统取得最佳探测性能的方案是性噪比方差大的方案 3,它可以在选择认知电台的数量最少的情况下,通过选择信噪比大的认知电台,达到系统要求的性能。

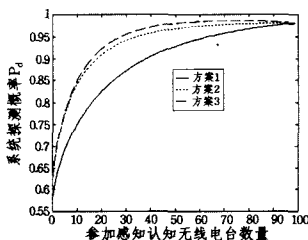


图 4 不同信噪比方案下感知电台数量与系统性能的关系

4.3 系统感知开销比较

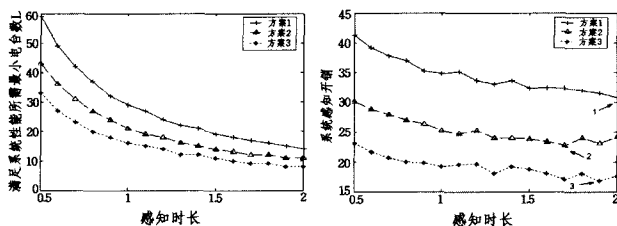


图 5 感知时长和系统所需最小电台数关系

从图 5 中可以看到随着感知时间的延长,满足系统性能所需要的电台数是逐渐减少的,这是因为延长感知时间意味着认知电台相应探测性能的升高,所以所需的最小电台数是逐渐减小的。从图 6 中可以看到,系统的感知开销有最小值,对应的数值用箭头示出,相应的方案用箭头旁标号示出。以

方案 2 为例,此时所需的最小感知电台数量为 15,其最佳感知时长约为 1.7ms。仿真证明了算法的正确性和有效性。

结束语 本文中,鉴于每个认知无线电台上信噪比的不同性,我们证明当电台数目无限大时,只要满足一定条件,系统的探测概率 $P_d = 1$,虚警概率 $P_f = 0$ 。如果电台数目有限时,选择全部电台参与感知并不能使系统最优,而是应该选择其中信噪比更高的部分电台参与感知,并给出满足系统性能所需的最小电台数的表达式。在此基础上,在最小化系统感知开销约束条件下,推导出所需感知时长的条件。仿真结果说明,在认知无线电台接收到的平均感知信噪比 $\overline{SNR}$ 相同的情况下,如果选用部分性能较好的用户,则有对应的最小所需感知电台数量和相应的感知时长,使系统感知开销最小。

参考文献

- [1] FCC. Spectrum Policy Task Force Report, ET Docket [R]. No. 02-155. Nov. 2002
- [2] Mitola J, Maquire G Q Jr. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4); 13-18
- [3] Mishra S M, Sahai A, Brodereson R W. Cooperative sensing among cognitive radios [C] // Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC) 2006. Istanbul, Turkey, June 2006
- [4] Cabric D, Mishra S M, Brodersen R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios [C] // Proc. 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers 2004. November 2004; 772-776
- [5] Liang Y-C, Peh E. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks [C] // Proc. IEEE WCNC 2007. Hong Kong, China, Mar. 2007; 27-32
- [6] Zhang Wei, Mallik R K, Letaief B K. Cooperative Spectrum Sensing Optimization in Cognitive Radio Networks [C] // Proc. IEEE International Conference on Department of ECE. Hong Kong University of Science; 3411-3415
- [7] Fodor V, Glaropoulos I, Pescosolido L. Detecting low-power primary signals via distributed sensing to support opportunistic spectrum access [C] // Proceedings of IEEE ICC'09. Germany, 2009
- [8] Kostylev V I. Energy detection of a signal with random amplitude [C] // Proc. IEEE Int. Conf. Commun. May 2002; 1606-1610
- [9] Niu Ruixin, Varshney P K. Performance Analysis of Distributed Detection in a Random Sensor Field [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(1); 339-349