

# 小样本能量检测中的双门限协作频谱感知

陈晓思, 杭燚灵

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为了克服传统的能量检测方法需要大量的采样样本,且在低信噪比时检测性能不佳的问题,提出了一种小样本能量检测中的双门限协作频谱感知方法。该方法采用双门限有效减少了在低信噪比的情况下认知用户对主用户的干扰,利用多维高斯近似处理检测结果实现小样本能量检测,并且在融合中心使用硬判决中最适合实际应用的“大多数投票”原则做出最终判决。仿真结果表明,与传统能量检测、小样本能量检测双门限以及小样本能量检测单门限协作频谱感知等方法相比,小样本能量检测中的双门限协作频谱感知算法具有在小样本和低信噪比情况下也可以有效减少频谱感知过程中认知用户对主用户的干扰程度,降低能量检测的漏检概率,提高系统的检测性能等优点。

**关键词:** 协作频谱感知;小样本;能量检测;双门限;碰撞概率

**中图分类号:** TP31

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2017)03-0193-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-629X.2017.03.041

## Double-threshold Cooperative Spectrum Sensing in Small Sample Energy Detection

CHEN Xiao-si, HANG Yi-ling

(College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** In order to overcome the drawbacks of demanding large quantity of samples for the conventional energy detection method and poor detection performance in the low SNR, a double-threshold cooperative spectrum sensing way is proposed in small sample energy detection. It adopts double-threshold to effectively reduce the interference of cognitive users to primary users in the low SNR, making the use of the cube-of-Gaussian approximation approach to implement small sample energy detection. In the center fusion, the proposed method takes a majority-voting rule which is the most suitable for practical using in hard decisions for the final decision. The simulation results show that compared to the conventional energy detection method, double-threshold energy detection method in small sample and single-threshold cooperative spectrum sensing method in small sample energy detection, the double-threshold cooperative spectrum sensing method in small sample energy detection can effectively reduce the interference of cognitive users to primary users in the condition of small sample size and low SNR, which can greatly reduce the miss detection probability of energy detection and improve the detection performance in the system.

**Key words:** cooperative spectrum sensing; small sample; energy detection; double threshold; collision probability

## 0 引言

认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 技术允许认知用户动态接入空闲的授权频谱,是一种有效解决频谱资源稀缺的方法。认知用户通过频谱感知技术判断出授权频谱是否空闲,从而决定是否接入该授权频谱。认知用户接入授权频谱后继续实时监控频谱的使用情况,一旦检测到主用户信号便立即退出,避免对主

用户信号产生干扰<sup>[1]</sup>。因此,频谱感知是认知无线电技术最重要的基础之一<sup>[2]</sup>。

经典的频谱感知算法<sup>[3]</sup>中,能量检测法<sup>[4]</sup>因其不需要主用户的先验知识,实施简单及算法复杂度低等优点,成为了频谱感知最常用的方法之一<sup>[5]</sup>。文献[6-9]都是采用单门限能量检测算法,在低信噪比时容易因误判而使检测性能降低。文献[10-13]都是基于

收稿日期:2016-04-26

修回日期:2016-08-10

网络出版时间:2017-02-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61201161,11201240)

作者简介:陈晓思(1991-),女,硕士研究生,研究方向为无线通信与网络信号处理;导师:曹开田,副教授,研究方向为无线通信与网络信号处理、压缩感知、MIMO 无线通信网络等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170217.1630.058.html>

双门限的能量检测方法,但是这些方法都是基于中心极限定理<sup>[14]</sup>(Central Limit Theorem, CLT),要求采样的样本数必须足够大。文献[15]提出一种基于小样本条件下的能量检测方法,利用多维高斯近似法得到较为精确、简单的检测概率表达式,但是该方法只预先设定一个门限值,检测性能容易受到噪声波动的影响。

综上,文中提出一种小样本能量检测中的双门限协作频谱感知方法。该方法不仅采用双门限减少了认知用户对主用户的干扰,而且克服了传统能量检测(Conventional Energy Detection, CED)方法因使用中心极限定理需要足够大的样本数而导致感知时间较长,感知时效性较差,最终使频谱利用率降低的问题。仿真结果表明,该方法可能会损失一小部分的频谱利用率,但是即使在样本数很小时也能有效减少认知用户对主用户的干扰程度,提高系统的检测性能。

## 1 传统能量检测

认知用户(SU)采用 ED 检测器检测主用户(PU)信号的问题,可以建模为一个二元假设问题<sup>[16]</sup>:

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

其中,  $x(n)$  是  $n$  时刻 SU 的观测值。 $w(n)$  是均值为 0、方差为  $\sigma_w^2$  的加性高斯白噪声。 $s(n)$  是  $n$  时刻 PU 信号的采样值。为了简便,假设  $s(n)$  是均值为 0、方差为  $\sigma_s^2$  的随机信号,且  $s(n)$  和  $w(n)$  相互独立。 $H_0$ 、 $H_1$  分别表示主用户信号不存在和存在两种假设。

对于传统能量检测,检验统计量  $T(x)$  可以表示为:

$$T(x) = \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \quad (2)$$

其中,  $N$  是样本总数。

如果  $T(x)$  不小于系统预设的判决门限  $\lambda$ , 那么 ED 检测器判决为  $H_1$ , 否则判决为  $H_0$ 。 $2T(x)/\sigma_w^2$  在  $H_0$  条件下服从自由度为  $2N$  的中心卡方分布, 因此, 虚警概率为:

$$P_f = P(T(x) \geq \lambda | H_0) = 1 - F_{\chi_{2N}^2}(2\lambda/\sigma_w^2) \quad (3)$$

其中,  $F_{\chi_{2N}^2}(x) = \int_0^x t^{N-1} e^{-t} dt / \Gamma(N)$  是自由度为  $2N$  的中心卡方分布的累积分布函数,  $\Gamma(N) = \int_0^\infty t^{N-1} e^{-t} dt$ 。

$2T(x)/\sigma_w^2(\gamma + 1)$  在  $H_1$  条件下服从自由度为  $2N$  的非中心卡方分布, 因此, 检测概率为:

$$P_d = P(T(x) \geq \lambda | H_1) = 1 - F_{\chi_{2N}^2}(2\lambda/\sigma_w^2(\gamma + 1)) \quad (4)$$

其中,  $\gamma = \sigma_s^2/\sigma_w^2$  为信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)。

o, SNR)。

漏检概率是主用户信号存在时, ED 检测器却判决主用户不存在的概率, 则漏检概率为:

$$P_m = (T(x) < \lambda | H_1) = 1 - P_d = F_{\chi_{2N}^2}(2\lambda/\sigma_w^2(\gamma + 1)) \quad (5)$$

## 2 双门限能量检测模型

为了克服 ED 检测器可能因噪声波动造成误判而对主用户产生干扰的问题, 文中采用双门限进行判决, 如图 1 所示。

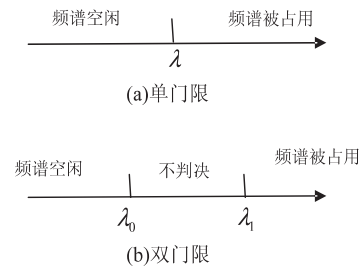


图 1 能量检测判决

如图 1(b) 所示, 如果  $T(x) \leq \lambda_0$ , 那么 ED 检测器判决为  $H_0$ ; 如果  $T(x) \geq \lambda_1$ , 则判决为  $H_1$ ; 当  $\lambda_0 < T(x) < \lambda_1$  时, 容易产生误判, 因此, 不做判决, 需要重新检测。

由检测概率和虚警概率的定义可知, 双门限能量检测的检测概率、虚警概率和漏检概率分别为:

$$P_{dd} = P(T(x) \geq \lambda_1 | H_1) = 1 - F_{\chi_{2N}^2}(2\lambda_1/\sigma_w^2(\gamma + 1)) \quad (6)$$

$$P_{fd} = P(T(x) \geq \lambda_1 | H_0) = 1 - F_{\chi_{2N}^2}(2\lambda_1/\sigma_w^2) \quad (7)$$

$$P_{md} = P(T(x) < \lambda_1 | H_1) = 1 - P_{dd} = F_{\chi_{2N}^2}(2\lambda_1/\sigma_w^2(\gamma + 1)) \quad (8)$$

文献[10]提出了双门限能量检测的碰撞概率和限占概率两个概念。其中, 碰撞概率是指认知用户错误判决主用户不存在而占用授权频谱, 但实际上主用户存在的概率, 其表达式为:

$$P_{cd} = P(T(x) < \lambda_0 | H_1) = F_{\chi_{2N}^2}(2\lambda_0/\sigma_w^2(\gamma + 1)) \quad (9)$$

碰撞概率是指认知用户由于噪声不确定性而对主用户产生的干扰程度。碰撞概率越大, 认知用户对主用户的干扰越严重; 反之, 干扰越小。

限占概率是指认知用户错误判决主用户存在而不占用授权频谱, 但是实际上主用户不存在的概率, 其表达式为:

$$P_{nd} = P(T(x) > \lambda_0 | H_0) = 1 - F_{\chi_{2N}^2}(2\lambda_0/\sigma_w^2) \quad (10)$$

限占概率表示了频谱利用效率。限占概率越大, 频谱利用效率就越低; 反之, 频谱利用效率越高。

### 3 小样本能量检测中的双门限协作频谱感知

文献[15]提出一种小样本条件下的能量检测方法,利用多维高斯近似法对检测概率进行处理,得出了较为精确、简单的检测概率表达式。文中利用多维高斯近似对双门限能量检测的结果进行处理,可以克服中心极限定理需要样本足够大的缺点,实现小样本条件下的双门限能量检测。

卡方随机变量除以  $2N$  可以近似为均值为  $1 - (9N)^{-1}$ 、方差为  $(9N)^{-1}$  的多维高斯随机变量,即:

$$F_{\lambda_{2N}}(x) \approx 1 - Q\left(\frac{\sqrt[3]{x/(2N)} - [1 - (9N)^{-1}]}{(9N)^{-1/2}}\right) \tag{11}$$

其中,  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 。

由式(9)可知,双门限能量检测的碰撞概率为:

$$P_{cd} \approx 1 - Q\left(\frac{\sqrt[3]{\lambda_0/N\sigma_w^2(\gamma' + 1)} - [1 - (9N)^{-1}]}{(9N)^{-1/2}}\right) \tag{12}$$

单门限能量检测也有碰撞概率,由文献[7]对碰撞概率的定义可知,单门限能量检测的漏检概率就相当于双门限能量检测的碰撞概率。因此,单门限能量检测的碰撞概率为:

$$P_{cdl} \approx 1 - Q\left(\frac{\sqrt[3]{\lambda/N\sigma_w^2(\gamma + 1)} - [1 - (9N)^{-1}]}{(9N)^{-1/2}}\right) \tag{13}$$

在 SNR 相同(即  $\gamma' = \gamma$ )的条件下,由于  $\lambda > \lambda_0$ ,故可得  $P_{cd} < P_{cdl}$ 。同理可得单门限能量检测的限占概率小于双门限能量检测的限占概率。

多用户协作进行频谱感知可以有效改善检测性能,文中在融合中心采用硬判决方法中最适合实际应用的 K-out-of-N 准则,故采用协作检测后,小样本能量检测中的双门限协作频谱感知方法的碰撞概率和限占概率分别为:

$$Q_K^{cd} = \sum_{m=K}^M \binom{M}{m} (P_{cd})^m \times (1 - P_{cd})^{M-m} = \sum_{m=K}^M \binom{M}{m} \left(1 - Q\left(\frac{\sqrt[3]{\lambda_0/N\sigma_w^2(\gamma' + 1)} - [1 - (9N)^{-1}]}{(9N)^{-1/2}}\right)\right)^m \times \left(Q\left(\frac{\sqrt[3]{\lambda_0/N\sigma_w^2(\gamma' + 1)} - [1 - (9N)^{-1}]}{(9N)^{-1/2}}\right)\right)^{M-m} \tag{14}$$

$$Q_K^{nd} = \sum_{m=K}^M \binom{M}{m} (P_{nd})^m (1 - P_{nd})^{M-m} =$$

万方数据

$$\sum_{m=K}^M \binom{M}{m} \left(Q\left(\frac{\sqrt[3]{\lambda_0/N\sigma_w^2} - [1 - (9N)^{-1}]}{(9N)^{-1/2}}\right)\right)^m \times \left(1 - Q\left(\frac{\sqrt[3]{\lambda_0/N\sigma_w^2} - [1 - (9N)^{-1}]}{(9N)^{-1/2}}\right)\right)^{M-m} \tag{15}$$

其中,  $M$  为认知用户数。

### 4 仿真结果与性能分析

在 高 斯 信 道 下 对 小 样 本 能 量 检 测 中 的 双 门 限 协 作 频 谱 感 知 算 法 进 行 仿 真 分 析。参 数 设 置 如 下:样 本 数  $N=5$ ,认 知 用 户 数  $M=4$ ,高 斯 白 噪 声 功 率  $\sigma_w^2=1$ ,单 门 限 和 双 门 限 能 量 检 测 时 自 由 度 均 设 为 5,即  $u = u' = 5$ ,信 噪 比  $\gamma = \gamma' = 5$ ,判 决 门 限  $\lambda_0 = 0.8\lambda$ ,  $\lambda_1 = 1.2\lambda$ 。

图 2 为 四 种 能 量 检 测 方 法 中,认 知 用 户 和 主 用 户 间 的 碰 撞 概 率 随 门 限 值 变 化 的 曲 线。

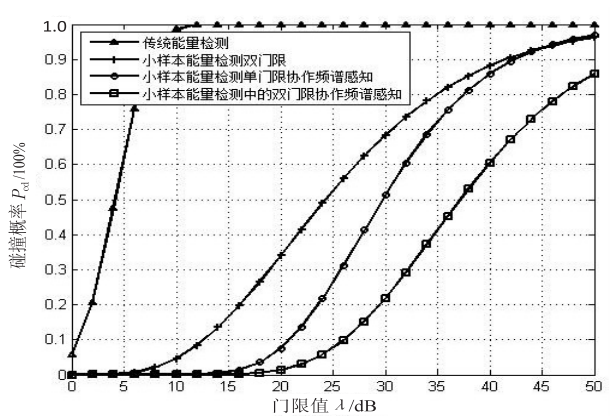


图 2 碰撞概率和门限值的关系

从图 2 中可以看出,文中方法的碰撞概率是最低的。例如,在  $\lambda = 25$  时,文中方法的碰撞概率与单门限协作频谱感知相比从 26.33% 降到了 7.55%,减少了在频谱感知过程中认知用户对主用户的干扰程度。

图 3 为 四 种 能 量 检 测 方 法 的 频 谱 未 利 用 率 与 门 限 值 的 关 系 曲 线。

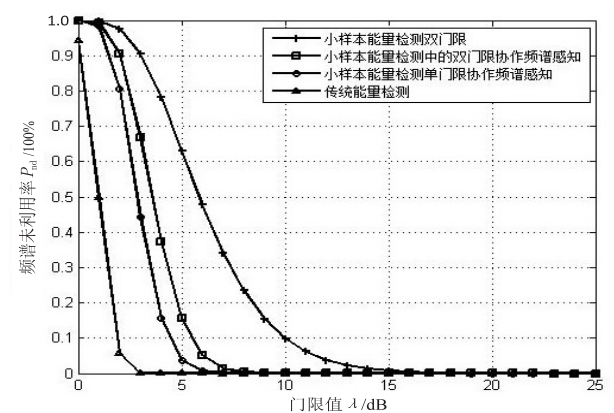


图 3 频谱未利用率与门限值的关系

从中可以看出,传统能量检测方法频谱利用率在



门限值较小时,比其他几种方法要好,但由图 2 可知,传统能量检测方法的碰撞概率较大,认知用户对主用户的干扰程度较大。由图 3 可知,当门限值逐渐增大时,四种方法的频谱未利用率都逐渐趋近于零,尤其是当  $\lambda \geq 8$  时,小样本能量检测中的双门限协作频谱感知方法的频谱未利用率几乎为零。结合图 2 可知,文中方法可以有效减少认知用户对主用户的干扰程度,并且当门限值达到一定值时,频谱利用率也几乎不会降低。

图 4 为四种能量检测方法的碰撞概率随平均信噪比变化的关系曲线。

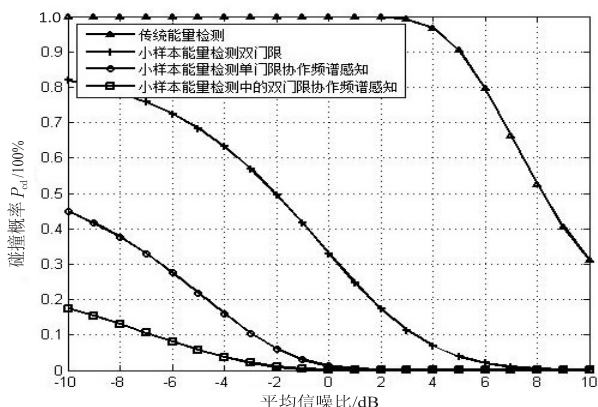


图 4 碰撞概率和平均信噪比的关系

从图 4 中可以看出,随着平均信噪比的增大,四种能量检测方法的碰撞概率都在降低,但是当信噪比相同时,文中方法的碰撞概率最低,尤其是在低信噪比时,该方法的碰撞概率明显比其他几种方法的碰撞概率都要低得多。

图 5 为三种能量检测在不同信噪比情况下,漏检概率随虚警概率变化的互补特性曲线。

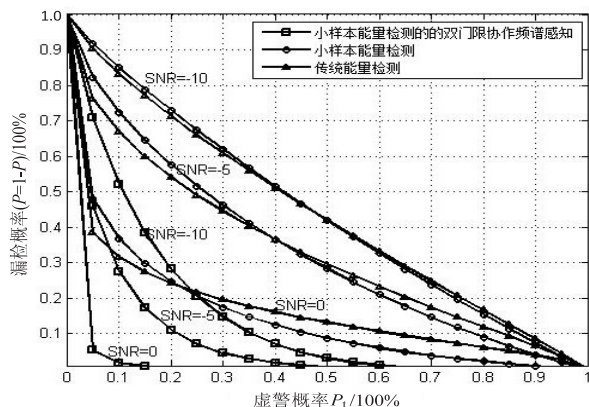


图 5 三种能量检测在不同信噪比下的互补特性曲线

由图 5 可知,在相同的信噪比下,当虚警概率相同时,文中方法的漏检概率最低。例如  $\text{SNR} = -10$ ,  $P_f = 0.4$  时,传统能量检测的漏检概率为 51.08%,小样本能量检测的漏检概率为 51.61%,文中方法的漏检概率为 7.09%。随着平均信噪比的增大,三种能量检测

方法的漏检概率都有所降低,但是文中方法总是保持着相同条件下最低的漏检概率,说明该方法可以提高系统的检测性能。

## 5 结束语

提出了一种小样本能量检测中的双门限协作频谱感知方法,克服了传统能量检测需要大量采样样本以及单门限容易因误判频谱状态而造成检测性能不佳的问题,在小样本和低信噪比的情况下减少了认知用户对主用户的干扰,提高了系统检测性能。但是文中在双门限之间的混合区域没有进行判决,而是重新感知,这一混合区域该如何判决以进一步提高算法性能是后续研究的内容。

### 参考文献:

- [1] Seshukumar K, Saravanan R, Suraj M S. Spectrum sensing review in cognitive radio [C]//International conference on emerging trends in VLSI, embedded system, nano electronics and telecommunication system. [s. l.]: IEEE, 2013: 1-4.
- [2] 谭学治, 姜靖, 孙洪剑. 认知无线电的频谱感知技术研究 [J]. 信息安全与通信保密, 2007(3): 61-63.
- [3] 冯文江, 郭瑜, 胡志远. 认知无线电中的频谱感知技术 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(11): 46-49.
- [4] 潘建国, 翟旭平. 基于能量检测的频谱感知方法 [J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2009, 15(1): 54-59.
- [5] 殷振华, 耿志, 刘郁林, 等. 基于能量检测的频谱感知方法的介绍 [J]. 通信技术, 2007, 40(11): 83-85.
- [6] López-Benítez M, Casadevall F. Improved energy detection spectrum sensing for cognitive radio [J]. IET Communications, 2012, 6(8): 785-796.
- [7] Cabric D, Tkachenko A, Brodersen R W. Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation [C]//Proceedings of the first international workshop on technology and policy for accessing spectrum. [s. l.]: ACM, 2006.
- [8] Akyildiz I F, Lee W Y, Vuran M C, et al. A survey on spectrum management in cognitive radio networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(4): 40-48.
- [9] 宋培臣, 范永安. 一种用于频谱感知的增强型能量检测算法 [J]. 通信管理与技术, 2012(3): 41-44.
- [10] Wu J, Luo T, Yue G. An energy detection algorithm based on double-threshold in cognitive radio systems [C]//1st international conference on information science and engineering. [s. l.]: [s. n.], 2009: 493-496.
- [11] Zhu J, Xu Z, Wang F, et al. Double threshold energy detection of cooperative spectrum sensing in cognitive radio [C]//3rd international conference on cognitive radio oriented wireless networks and communications. [s. l.]: IEEE,

(下转第 200 页)



图 6 手机客户端运行界面

## 4 结束语

将 ZigBee 技术和 Android 智能平台技术软硬件资源的多样性结合起来,在 Android 网关上构建服务器程序,实现了客户的远程访问。该系统具有部署方便、可扩充性强等特点,可以充分利用 Android 系统的软硬件资源,是对远程监控在移动互联网环境下的一次有效尝试。适用于小范围、低数据量的监控系统设计。测试结果表明,系统的设计达到了预期目标。

### 参考文献:

- [1] Mottola L, Picco G P. Programming wireless sensor networks: fundamental concepts and state of the art[J]. ACM Computing Surveys, 2011, 43(3): 1-51.
- [2] 耿东久, 索岳, 陈渝, 等. 基于 Android 手机的远程访问和控制系统[J]. 计算机应用, 2011, 31(2): 559-561.
- [3] 许强键, 杨飞, 翁玲瑜. 基于 Android 的一种主动监控系统

统设计与研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(4): 189-192.

- [4] Wu Yonghong, Luo Jianchao, Luo Lei. Porting mobile web application engine to the Android platform[C]//Proceedings of 2010 IEEE 10th international conference on computer and information technology. Chengdu, China: IEEE, 2010: 2157-2161.
- [5] 周时伟, 谢维波. 基于 Android 的智能家居终端设计与实现[J]. 微型机与应用, 2012, 31(14): 10-13.
- [6] 姚昱旻, 刘卫国. Android 的架构与应用开发研究[J]. 计算机系统应用, 2008, 17(11): 110-112.
- [7] 王朝华, 陈德艳, 黄国宏, 等. 基于 Android 的智能家居系统的研究与实现[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(6): 225-228.
- [8] Byun J, Jeon B, Noh J, et al. An intelligent self-adjusting sensor for smart home services based on ZigBee communications[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2012, 58(3): 794-802.
- [9] Park S, Choi M. Design and implementation of smart energy management system for reducing power consumption using ZigBee wireless communication module[J]. Procedia Computer Science, 2013, 19(4): 662-668.
- [10] 郑娟, 王建华. 基于 ARM 的智能家居安防监控系统的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2014, 22(5): 183-186.
- [11] 杨福宝. 基于 ZigBee 无线传感器网络节点的研究[J]. 制造业自动化, 2011, 33(19): 85-88.
- [12] 张猛, 房俊龙, 韩雨. 基于 ZigBee 和 Internet 的温室群环境远程监控系统设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 171-176.
- [13] 陈子龙, 张红雨, 李俊斌. CC2540 和 SHT11 的无线温湿度采集系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2013, 13(4): 41-44.
- [14] 杨春勇, 牛磊, 路杰, 等. 环境监测网络中的 ZigBee 网关服务器[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(2): 156-159.

(上接第 196 页)

2008: 1-5.

- [12] Ul-Haq A, Ayub M B, Iqbal J, et al. Performance of double threshold energy detection in cooperative-cognitive networks over Nakagami fading channels[C]//Eighth international conference on digital information management. [s. l.]: [s. n.], 2013: 166-169.
- [13] 张学军, 严金童, 田峰, 等. 基于差分能量检测的双门限协作频谱感知算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1325-1330.

[14] 董晴. 独立随机变量的中心极限定理[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2007, 21(7): 85-88.

- [15] Rugini L, Banelli P, Leus G. Small sample size performance of the energy detector[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9): 1814-1817.
- [16] Kim K, Yan X, Rangarajan S. Energy detection based spectrum sensing for cognitive radio: an experimental study[C]//GlobeCom communications conference. [s. l.]: [s. n.], 2010: 1-5.