

无线传感器网络中的轻量级协作频谱检测方法

胡富平, 王 殊

(华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 探讨利用认知无线电技术为其寻求新的可用频谱资源, 针对传感器网络资源受限的特点, 提出了一种轻量级协作频谱检测方法. 通过对采样信号进行量化, 降低计算和通信开销, 并从理论上分析了其检测性能. 仿真结果表明, 所提出的检测方法具有与非量化情况非常接近的检测性能, 为在传感器网络中寻求可用频谱资源奠定了基础.

关键词: 无线传感器网络; 认知无线电; 频谱检测

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)09-0130-03

A Lightweight Cooperative Spectrum Sensing Method for Wireless Sensor Network

HU Fu-ping, WANG Shu

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

Abstract: Thus an alternate method based on Cognitive Radio is explored to capturing spectrum for WSN. With the consideration of limit on hardware and resource of WSN, a lightweight spectrum sensing method by quantizing the sampled signals is proposed, to reduce the overhead of computation and communication. The performance of proposed method is analyzed theoretically. The simulation results show that the proposed method exhibits comparable performance with the non-quantization one, which establishes a foundation of capturing spectrum for WSN.

Key words: WSN; CR; spectrum sensing

1 引言

近年来,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的研究与应用迅速发展^[1-3]. 由于无线电频谱资源的逐渐紧缺, WSN 与现有传统无线网络之间会出现严重的频谱资源竞争, 将面临频谱紧缺的难题. 虽然可花费巨额资金向无线电管理机构注册获得固定的频谱使用权, 但 WSN 通常强调低成本, 因而这种做法并不是很合理^[4]. 而且授权频段也基本都被分配, 而免授权 ISM 频段也越来越拥挤. FCC 的调查表明: 频谱资源非常紧缺的背后是大量已授权频段的利用率很低^[5]. 认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术^[6]被认为是提高频谱资

源利用率、解决频谱资源紧缺问题的有效技术之一. 文中假设 WSN 需要寻找空闲授权频谱来完成其自身的数据通信. 因为空闲频谱的检测是 WSN 利用这些空闲频谱的必要前提, 因此文中重点研究适用于 WSN 的频谱检测方法.

2 相关背景和系统模型

认知无线电技术的基本原理是: 未授权用户(称为次用户)检测一定范围内的授权频段, 如果未检测到授权用户(称为主用户)信号, 则在不对主用户造成干扰的前提下传输无线信号; 当该频道上出现主用户信号时, 次用户退出对该频段的占用.

假设每个传感器节点都装配有 CR. 传感器节

点通过公共控制信道相互交换传感信息,同时假设公共控制信道具有理想的信道参数.由于传感器网络的分布式特性,文中所考虑的协作频谱检测可建模为图1所示的模型.其中,当节点 SN_0 需要作出检测判决时,它同时也充当融合中心的角色. $SN_i (i = 1, 2, \dots, m, m$ 为 SN_0 的邻居节点数目) 为其邻居节点, d_0 和 d_i 分别表示节点 SN_0 和 SN_i 的局部检测信息, d 表示节点 SN_0 作出的最终检测判决.

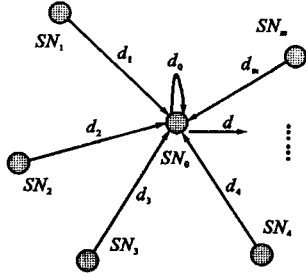


图1 系统模型图

3 轻量级频谱检测方法

在缺少主用户信号先验知识的情况下,能量检测法是检测未知信号的经典方法.与匹配滤波、循环平稳检测等经典方法相比,虽然抗干扰能力一般,但其简单、便于实现,更适用于传感器网络这种资源受限的网络.能量检测以接收信号的能量作为检验统计量,即:

$$E = \sum_{k=1}^K |r(k)|^2$$

$$= \begin{cases} \sum_{k=1}^K |w(k)|^2, & H_0 \\ \sum_{k=1}^K |s(k) + w(k)|^2, & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $r(k)$ 为接收信号的采样, $s(k)$ 为待检测目标信号分量的采样, $w(k)$ 为加性高斯白噪声(AWGN)的采样, H_1 和 H_0 分别表示假设主用户信号存在和假设主用户信号不存在. K 为总的采样数,一般由检测器的时间带宽积确定.

文中提出的轻量级协作频谱检测方法也是基于能量检测法的.不同的是,通常都隐含地假设节点能以任意理想精度表征接收信号的采样值,而文中考虑到尽量降低对传感器节点表征传感数据精度和计算能力的要求(最终是降低对节点硬件的要求),对接收信号的采样值进行了量化.这样还有一个优点:直接减小了信息交换的数据量,降低了对公共控制信道带宽的需求.采样值量化后的检验统计量可表示为式(2)所示,其中, $r_Q(k) = \text{QUANT}[r(k)]$, $\text{QUANT}[\cdot]$ 表示量化操作.

$$E_Q = \sum_{k=1}^K r_Q^2(k) \quad (2)$$

轻量级协作频谱检测的基本过程:

- (1) 每个节点 SN_i 获得其本地输出 $E_{Q,i}$;
 - (2) 如果节点 SN_i 需要作出检测判决,则从邻居节点集 $S_i = \{SN_j | SN_j \text{ 是 } SN_i \text{ 的邻居节点}\}$ 收集其本地输出;
 - (3) 节点 SN_i 计算最终检验统计量:
- $$V_{Q,i} = E_{Q,i} + \sum_{j|SN_j \in S_i} E_{Q,j} \quad (3)$$
- (4) 判决:如果检验统计量 $V_{Q,i} > \lambda_Q$,则判存在主用户信号,否则判不存在主用户信号.

4 性能分析

假设采用 mid-rise 均匀量化器,量化位数为 B ,量化步长为 Δ ,则量化器的动态范围为 $2^B \Delta$,接收信号 $r(k)$ 量化后的输出值为 $(q + 0.5)\Delta$, q 为 $-2^{B-1}, -2^{B-1} + 1, \dots, 2^{B-1}$. 在 H_0 假设成立的情况下, $r(k)$ 为零均值的高斯白噪声信号,假设其方差为 σ^2 ,则 $r(k)$ 被量化为第 q 级输出值的概率为式(4)所示,其中 $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数, $\sigma' = \sigma\sqrt{2}$.

$$f(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(q\Delta/\sigma')] , & q = 2^{B-1} \\ \frac{1}{2} [1 + \text{erf}((k+1)\Delta/\sigma')] , & q = -2^{B-1} \\ \frac{1}{2} [\text{erf}((k+1)\Delta/\sigma') - \text{erf}(q\Delta/\sigma')] , & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

由于式(2)中的 E_Q 可等价地表示为式(5)所示,其中 q_k 表示接收信号 $r(k)$ 的量化级.因此可以利用 q_k 的概率密度函数,即式(4)来求得 E'_Q 的概率密度函数.

$$E'_Q = E_Q/\Delta^2 - K/4 = \sum_{k=1}^K q_k^2 + q_k \quad (5)$$

当量化位数 B 一定时,令 q_k 的所有可能取值集合为 A , $(q^2 + q)$ 所有可能取值集合为 I ,即:

$$I = \{a | a = q^2 + q, q \in A\} \quad (6)$$

可以证明,对 I 中的任意元素 a ,有且仅有 q_i 和 q_j 属于 A ,且 $q_i \neq q_j$,使得 $a = q_i^2 + q_i = q_j^2 + q_j$. 如果用 $f(x)$ 表示 $q^2 + q$ 的概率密度函数,则:

$$f(x) = \begin{cases} 2f(q) & x \in I \\ 0 & x \notin I \end{cases} \quad (7)$$

根据多个随机变量相加的性质, E'_Q 的概率密度函数可表示为式(8)所示,其中 $*$ 表示卷积运算,共有 K 个 $f(x)$ 进行卷积.

$$f(z) = f(x) * f(x) * \dots * f(x) \quad (8)$$

类似地, V'_Q 的概率密度函数为式(9)所示, 其中共有 $(m+1)$ 个 $f(z)$ 进行卷积.

$$f(v) = f(z) * f(z) * \cdots f(z) \quad (9)$$

假设量化情况下的阈值为 λ_Q , 则误警概率为

$$P_{FA} = \sum_{V \geq \lambda_Q} f(v) \quad (10)$$

阈值 λ_Q 可选取为不对 $r(k)$ 进行量化时(此时, H_0 假设条件下能量检测器的输出 E 服从自由度为 K 的卡方分布)的阈值的量化值, 即 $\lambda_Q = \text{ceil}(\lambda/\Delta^2 - K/4)$, 其中 $\text{ceil}(x)$ 表示不小于 x 的最小整数, λ 为:

$$\lambda = F^{-1}(\chi^2 | (m+1)K, 1 - P_{FA,0})\sigma^2 \quad (11)$$

其中, $F^{-1}(\chi^2 | \mu, \cdot)$ 表示自由度为 μ 的卡方分布的累积分布函数的反函数, $P_{FA,0}$ 表示非量化情况下的误警概率. 利用了卡方分布的性质: 假设 $X_1, X_2, \dots$ 是独立的服从卡方分布的随机变量, 自由度分别为 v_i , 则 $Y = X_1 + X_2 + \cdots + X_n$ 服从自由度为 $v_1 + v_2 + \cdots + v_n$ 的卡方分布.

由于量化误差可以近似为零均值、方差为 $\Delta^2/12$ 的高斯随机变量, 因此如需在选择阈值时考虑量化误差的影响, 则可将式(11)用式(12)替代.

$$\lambda = F^{-1}(\chi^2 | (m+1)K, 1 - P_{FA,0})(\sigma^2 + \Delta^2/12) \quad (12)$$

5 仿真实验

实验在 MATLAB 7.0 环境下仿真. 仿真参数设置如下: 240 个节点随机部署在 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 的区域内, 节点通信半径范围内的平均节点数为 10 个, 量化位数分别取 4、6、8, 无线信道为 AWGN 信道, 传输信号为随机序列的 BPSK 信号, 仿真次数 10^6 次.

(1) 实验结果显示在量化器的动态范围超过 8σ 时, 随着量化位数的增加, 所提出的检测方法的误警概率趋近于非量化情况的误警概率. 当量化位数到达 8 时, 就已经几乎相等. 其中, $P_{FA,0}$ 恒定为 0.001, 结果如图 2 所示.

(2) 实验结果显示随着量化位数的增加, 量化情况下的互补接收机工作特性曲线逐渐接近非量化情况, 当量化位数为 8 位时, 前者已经非常接近于后者. 其中, 信噪比为 6dB, 量化步长 Δ 设置为 $10\sigma/2^B$ (即量化器的动态范围为 10σ), 结果如图 3 所示.

(3) 实验结果显示在信噪比大于 3dB 时, 所提出检测方法就具有比较理想的检测概率, 而且随着量化位数增加, 逐渐趋近于非量化情况下的检测概

率. 其中阈值 λ 的选取使得非量化情况下的误警概率 P_{FA} 恒定为 0.1, 结果如图 4 所示.

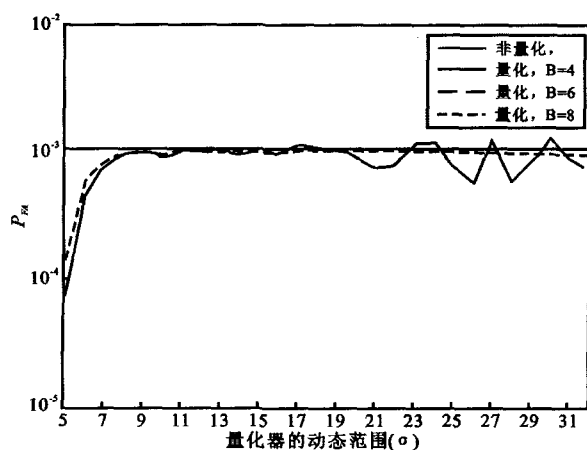


图2 不同动态范围下的误警概率比较

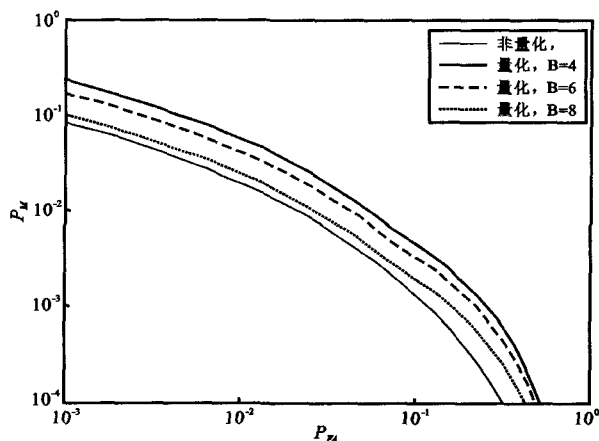


图3 AWGN 信道下的 $P_M - P_{FA}$ 曲线比较

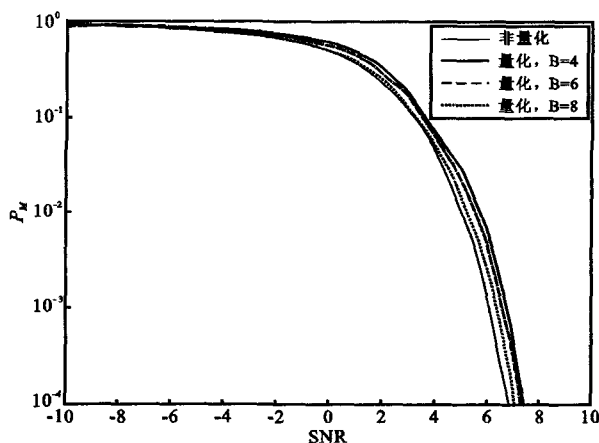


图4 AWGN 信道下的 $P_M - \text{SNR}$ 曲线比较

6 结束语

文中提出了一种轻量级协作频谱检测方法, 并

(下转第 137 页)

6 结束语

由于当前 Xilinx 公司 XUP Virtex - II Pro XC2VP30 开发板平台的资源限制,所以文中实现的资源管理器是在一维任务模型基础上,对任务进行的管理,实际片上运行的任务较少.随着 Xilinx 公司技术的成熟,这些问题需要进一步的研究和改进.

参考文献:

- [1] Vuletic M, Pozzi L. Seamless hardware software integration in reconfigurable computing systems[J]. IEEE Design & Test of Computers, 2005, 22(2): 102 - 113.
- [2] Vuletic M, Pozzi L. Virtual memory window for application - specific reconfigurable coprocessors[C]//Proc. of DAC. London, 2004: 948 - 953.
- [3] Tabero, Mecha H, Mozos D. A vertex - list approach to 2D HW multitasking management in RTR FPGAs[C]//DCIS 2003. Ciudad Real, Spain, 2003, 545 - 550.
- [4] Juanjo Noguera, Rosa M Badia. HW/SW codesign techniques for dynamically reconfigurable architectures [J].

IEEE Trans. on VLSI Systems, 2002, 10(4): 399 - 415.

- [5] Mitsuru Tomono, Masaki Nakanishi, Shigeru Yamashita, et al. A new approach to online FPGA placement[C]//40th Annual Conference on Information Sciences and Systems. New Jersey Prinveton, 2006: 145 - 150.
- [6] 傅光宁, 葛思攀. 基于 ARM_FPGA 的可重构控制器设计及其在加载系统中的应用[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(7): 28 - 29.
- [7] Windstorm. PowerPC 平台 Linux 的移植[EB/OL]. [2009 - 11 - 10]. <http://www.forwind.cn/2007/08/13/powerpc-linux1/>.

作者简介:

焦 铭 男, (1979 -), 硕士研究生, 讲师. 研究方向为嵌入式计算.

李仁发 男, (1956 -), 教授, 博士生导师. 研究方向为嵌入式计算、无线网络等.

彭日光 男, (1981 -), 硕士研究生. 研究方向为可重构计算等.

李 浪 男, (1970 -), 博士研究生. 研究方向为嵌入式计算等.

(上接第 132 页)

从理论上分析了其检测性能. 仿真结果表明, 该方法在检测性能上与非量化情况下的检测性能非常接近, 同时具有较小计算和通信开销的优势. 在经典衰落信道下的检测性能是下一步研究计划.

参考文献:

- [1] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, Dipak Ghosal. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292 - 2330.
- [2] 孟中楼, 王殊, 赵峰, 等. 分簇式无线传感器网络睡眠调度机制研究[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(7): 9 - 16.
- [3] 杨晓飞, 吴晓蓓, 黄锦安. 数据融合技术在无线传感器网络中的应用[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(5): 190 - 192.

[4] Zhou G, Stankovic J A, Son S H. Crowded spectrum in wireless sensor networks [C]// Proc. of the Third Workshop on Embedded Networked Sensors. Harvard, 2006.

[5] FCC. Spectrum policy task force. Report of the spectrum efficiency working group[EB/OL]. [2009 - 11 - 10]. <http://www.fcc.gov/sptf/reports.html>

[6] Mitola I, Maguire J, G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13 - 18.

作者简介:

胡富平 男, (1983 -), 博士研究生. 研究方向为认知无线网络.

王 殊 男, (1956 -), 教授, 博士生导师. 研究方向为智能信号处理和认知无线网络.