

认知无线电 OFDM 系统中无静默期带内感知方法

陈东 李建东 庞继勇 马静

(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 西安 710071)

摘要: 认知无线电中传统的带内感知技术需要通过静默期避免来自自身网络传输的干扰。该文提出了一种适用于 OFDM 系统的带内感知算法, 借助相邻 OFDM 符号的互补特征实现能量检测。该算法不需要静默期, 因此可以避免对网络性能的影响。文中对算法进行了性能分析, 同时推广到多种应用方式中。仿真表明, 该算法具有和基于静默期感知的能量检测算法相近的性能, 能够满足 IEEE802.22 系统的感知要求。

关键词: 认知无线电; 带内感知; 能量检测; OFDM; 互补

中图分类号: TN911.23; TN915.65

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2638-04

In-band Spectrum Sensing without Quiet Period for OFDM System in Cognitive Radio

Chen Dong Li Jian-dong Pang Ji-yong Ma Jing

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The usual in-band spectrum sensing in cognitive radio is performed without the interference from the network itself by quiet periods. In this paper, an In-band spectrum sensing method is proposed which can avoid the usage of quiet period to guarantee the performance of the network. In this method, the complementarity of adjacent OFDM symbols is utilized to perform energy detection. Furthermore, the performance of the algorithm is analyzed and this idea is extended to several applications. Simulation proves that the algorithm has a comparable performance with power detector with quiet period. And the algorithm can achieve an acceptable detection performance for IEEE802.22 system.

Key words: Cognitive radio; In-band spectrum sensing; Energy detection; OFDM; Complementarity

1 引言

认知无线电(cognitive radio)^[1]通过无线环境感知动态重用已经固定分配给授权用户(首要用户)的频段以及其他空闲频段。无线频谱感知是认知无线电实现的关键技术之一。无线频谱感知可以分为两种类型, 带外(out-of-band)感知和带内(in-band)感知。带外感知的主要目的是实现对工作频段外其他信道的用户占用情况和可再利用情况的测量; 带内感知的主要目的是实现对当前工作频段内的无线信道的感知, 用以实时监测当前所占用信道内首要用户的活动, 避免与首要用户形成有害的干扰。带内感知需要避免来自自身网络内部通信的干扰, 在实现上主要有两种方法^[2]: (1)基于静默期的带内感知, 通过抑制网络中所有用户在带内感知期间的发射活动来避免网络自身通信的干扰。在中心控制式网络中实现

简单, 但静默期将导致通信的短暂中断, 引入了额外的开销, 对实时性要求较高的业务的服务质量, 如 VOIP 业务, 会造成较大的影响。(2)基于动态跳频的带内感知, 以其他空闲信道为中介, 将当前工作频段调整到空闲信道, 实现从带内感知到带外感知的转化。在一定程度上可以保持通信的连续性, 但需要借助于额外的信道, 造成无线资源的浪费。同时当多个网络共存时需要解决网络跳频同步问题。针对上述已有带内感知方法的不足, Ji 等提出了基于信道估计的带内感知算法^[3]。借助信道估计的结果和解调信号对接收到的自身信号进行重建, 然后再将接收到的信号减去重建后的信号, 从而实现自信号抑制。但是该方法实现复杂度相对较高, 性能受信道估计和误码率影响明显。Lü 等在文献[4]中给出了基于导频及相邻符号正交性的检测算法。

针对认知无线电带内感知的需要, 本文提出了认知无线电环境下 OFDM 系统中不需要静默期的带内感知方法。该方法利用 OFDM 相邻符号的互补特性消除自身信号和信道的影响, 从而实现能量检测。文中对算法进行了性能分析, 并给出了多种实现方法。仿真表明, 本文方法能够达到和利用静默期的能量检测相近的性能, 满足 IEEE802.22 系统的检测要求。

2007-11-15 收到, 2008-07-14 改回

国家杰出青年科学基金(60725105), 国家自然科学基金重大项目(60496316), 国家自然科学基金项目(60572146), 高等学校博士学科点专项科研基金(20050701007), 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划, 教育部科学技术研究重点项目(107103)和高等学校创新引智计划(B08038)资助课题

2 系统模型

2.1 检测假设

认知无线电中通常称频段的授权用户为首要用户(primary user), 认知无线电用户为次要用户(secondary user)。图1所示的 OFDM 系统展示了次要用户发射机和接收机之间的通信过程。该过程同时考虑了来自首要用户的信号, 也就是需要检测的信号。

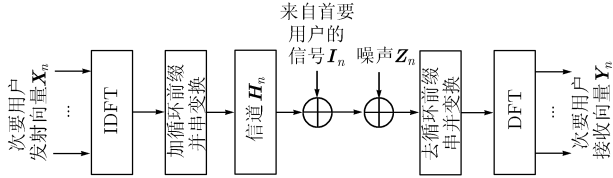


图1 系统模型

图中 n 表示发射与接收信号的序号。 \mathbf{X}_n 和 \mathbf{Y}_n 分别表示次要用户的发射与接收符号向量, \mathbf{I}_n 为首要用户的信号向量, \mathbf{Z}_n 为本地噪声向量, \mathbf{H}_n 为次要用户间的信道矩阵。在不使用静默期的情况下, 带内感知可以由以下二元检测假设描述

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{H}_0: \mathbf{Y}_n &= \mathbf{H}_n \mathbf{X}_n + \mathbf{Z}_n \\ \mathcal{H}_1: \mathbf{Y}_n &= \mathbf{H}_n \mathbf{X}_n + \mathbf{I}_n + \mathbf{Z}_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 \mathcal{H}_0 表示不存在首要用户信号的情况, \mathcal{H}_1 表示存在首要用户信号的情况。

为便于描述, 将上式写为

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{X}_n + \mathbf{Q}_n \quad (2)$$

其中 $\mathbf{Q}_n = \mathbf{Z}_n$ 和 $\mathbf{Q}_n = \mathbf{I}_n + \mathbf{Z}_n$ 分别对应上述两种假设。

2.2 互补符号对

假设序号为 $\{p_1, p_2, \dots, p_M\}$ 的 M 个子载波用于感知, 因此 OFDM 符号 n 中用于感知的信号向量可以表示为 $\mathbf{P}_n = \{\mathbf{X}_n(p_1), \mathbf{X}_n(p_2), \dots, \mathbf{X}_n(p_M), \dots, \mathbf{X}_n(p_M)\}$ 。

如果用于感知的相邻信号向量满足如下互补关系,

$$\mathbf{P}_n + \mathbf{P}_{n+1} = \mathbf{0} \quad (3)$$

则称两个相邻 OFDM 符号向量为互补符号对。

3 无静默期内感知方法

假设相邻符号间的信道变化可以忽略不计, 根据式(2)的表述, 相邻 OFDM 符号相加可近似为

$$\mathbf{Y}_{2n} + \mathbf{Y}_{2n+1} \approx \mathbf{H}_{2n}(\mathbf{X}_{2n} + \mathbf{X}_{2n+1}) + \mathbf{Q}_{2n} + \mathbf{Q}_{2n+1} \quad (4)$$

令 \mathbf{P}'_{2n} 和 \mathbf{P}'_{2n+1} 分别表示接收到的第 n 个互补符号对所对应 OFDM 符号内用于感知的符号向量, 可得

$$\mathbf{P}'_{2n} + \mathbf{P}'_{2n+1} \approx \mathbf{H}'_{2n}(\mathbf{P}_{2n} + \mathbf{P}_{2n+1}) + \mathbf{Q}'_{2n} + \mathbf{Q}'_{2n+1} \quad (5)$$

根据式(3)定义, 式(5)写为

$$\mathbf{P}'_{2n} + \mathbf{P}'_{2n+1} \approx \mathbf{Q}'_{2n} + \mathbf{Q}'_{2n+1} \quad (6)$$

由帕斯瓦尔定理, 一个 OFDM 符号上首要用户信号及噪声的能量估计为

$$W_n = \frac{\sum_{m=1}^M |\mathbf{P}'_{2n}(m) + \mathbf{P}'_{2n+1}(m)|^2}{\alpha M} \quad (7)$$

其中当首要用户信号不相关时 α 为 2; 当首要用户信号完全相关且高信噪比情况下, α 约为 4。之后的分析会发现 α 取值并不影响检测性能。

考虑到信道变化的瞬时特性, 通过对多次检测结果取平均值来获得最终的能量估计结果。不需要静默期内感知算法的执行步骤如下:

(1) 利用式(7)计算 N 个不同互补符号对上的能量估计 $\{W_1, W_2, \dots, W_N\}$;

(2) 计算均值为

$$W = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W_n \quad (8)$$

(3) 与检测门限 W_t 比较, 如果 $W > W_t$, 则认为检测到首要用户的信号, 否则认为没有检测到。

4 检测算法性能分析

检测门限 W_t 由 \mathcal{H}_0 假设下检测统计量的概率密度函数决定。根据奈曼-皮尔逊准则, 通过期望的虚警概率(P_{FA}), 确定对应的检测门限 W_t 。通常虚警概率为 0.1 和 0.01。

根据式(7), 式(8), W 可以写为

$$W = \frac{1}{\alpha MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |\mathbf{P}'_{2n}(m) + \mathbf{P}'_{2n+1}(m)|^2 \quad (9)$$

当不存在首要用户时, 即 \mathcal{H}_0 假设下

$$W = \frac{1}{\alpha MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |\mathbf{Z}_{2n}(m) + \mathbf{Z}_{2n+1}(m)|^2 \quad (10)$$

假设噪声 $\mathbf{Z}(m)$ 为独立同分布零均值复高斯加性白噪声, 其实部和虚部的方差均为 δ_z^2 。根据中心极限定理, 当 MN 较大时 W 服从正态分布, 即

$$W \sim \mathcal{N}\left(\frac{4\delta_z^2}{\alpha}, \frac{16\delta_z^4}{\alpha^2 MN}\right) \quad (11)$$

对于给定的虚警概率 P_{FA} , 其对应的检测门限可以用 Q 函数^[5]表示如下

$$W_t = \frac{4\delta_z^2}{\alpha} \left(\frac{Q^{-1}(P_{FA})}{\sqrt{MN}} + 1 \right) \quad (12)$$

根据检测门限 W_t , 如果假设首要用户信号是零均值独立同分布复高斯的随机变量, 实部和虚部的方差均为 δ_s^2 , 利用相同方法推导并将式(12)代入, 得到检测概率(P_D)为

$$P_D = Q\left(\frac{\delta_z^2}{\delta_s^2 + \delta_z^2} \left(Q^{-1}(P_{FA}) + \sqrt{MN} \right) - \sqrt{MN}\right) \quad (13)$$

由式(13)可知实际检测性能与 α 取值无关。

本文检测算法中假设相邻 OFDM 符号间的信道变化可以忽略不计。在实际环境下, 信道的微小变化将引入次要用户自身信号 \mathbf{X}_n 的干扰。接收机处的次要用户信号信噪比越大, 其引入的干扰越大。因此在实际情况下, 根据由期望虚警概率确定的检测门限 W_t 得到的实际虚警概率将与期望值

存在一定的受信噪比影响的差异,此时实际虚警概率略高于期望值。

5 算法实现

算法实现中需要利用 OFDM 符号的互补性,根据实际系统的特点,可以存在多种实现方法。

(1)利用训练序列进行感知:训练序列(Preamble)是 OFDM 系统中位于帧前部用于进行符号同步,信道估计和频偏估计等功能的若干个 OFDM 符号,通常由 2 到 4 个符号构成。如果训练序列中的相邻的 OFDM 符号,满足式(3)给出的互补特性,即可利用本文方法在所有子载波上进行感知。而这样的互补特性并不影响同步、信道估计等功能^[6]。

(2)利用导频进行感知:在梳状导频结构的系统中,可以利用导频信号自身存在的互补特性。以 IEEE802.11a 为例,导频子载波上数据的极性,由 PN 序列 $PN_{0..126} = \{1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, 1, \dots\}$ 循环扩展给出。序号为 3&4, 6&7 和 11&12 的 OFDM 符号的导频子载波向量可以构成互补对,用于感知。

(3)利用解调数据反馈进行感知:OFDM 数据中前后相邻符号中相同子载波上可能存在具有互补特征的数据。当解调发现数据中存在互补特性时,即可利用缓存的对应接收信号进行检测。此时利用了数据中隐含的互补特性,提高能量检测的累加平均点数。缺点是需要借助数据解调信息,因此误码会对检测性能造成一定影响,并且发送数据中隐含的互补对数量不确定,实现存在一定的困难。

6 仿真与分析

6.1 仿真参数

本节通过计算机仿真来评估所提出的非静默期感知方法的性能。仿真场景为 IEEE802.22 系统^[2],信道参数如表 1 所示^[7]。系统有 2048 个子载波,其中包含 192 个均匀分布的梳状导频子载波。采样速率为 $6 \times 9 / 7 \text{MHz}$ 。首要用户信号为 DTV 信号,接收机处的噪声为加性复高斯白噪声。 α 的取值为 4。同时假设在每一 OFDM 帧中包含 4 个互补符号对。

IEEE802.22 中定义感知的检测时间要求为 2s。由于帧长约为 10ms,所以感知过程中最多可利用 200 帧。检测概率(P_D)的要求为 0.9-0.95,虚警概率(P_{FA})要求为 0.01-0.1。

为了方便叙述,这里做如下定义

表 1 信道参数

	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 5	路径 6
时延(μs)	0	3	8	11	13	21
相对幅度(dB)	0	-7	-15	-22	-24	-19
多普勒频移(Hz)	0	0.10	2.5	0.13	0.17	0.37

$$SNR = \frac{\text{次要用户的信号}}{\text{噪声}}, \quad INR = \frac{\text{首要用户的信号}}{\text{噪声}} \quad (14)$$

在之后的仿真中,如果没有声明,SNR 为 10dB。

6.2 仿真结果与分析

图 2 给出了理论性能曲线与仿真曲线的对比。期望获得的 P_{FA} (即理论值)与仿真得到的 P_{FA} 之间在不同的 SNR 下的差异很小,算法的性能分析与实际比较吻合。这些差异主要是由中心极限定理的近似特性以及相邻 OFDM 符号间信道的微小变化引入的噪声所导致的。当约束 P_{FA} 为 0.1 时,图 3 给出了在不同的 INR 下 P_D 的曲线。同样理论值和仿真值能够比较好的吻合。

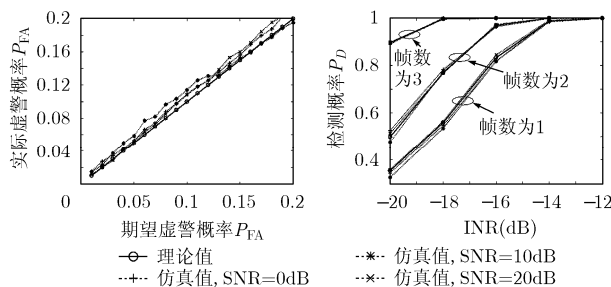


图 2 虚警概率的仿真与理论对比 图 3 检测概率的仿真与理论对比

采样点数直接影响能量检测器的性能^[7],本算法的采样点数目由参与感知的帧数决定。图 4 给出了在 $P_{FA} = 0.1$, $SNR = 0\text{dB}$ 时利用训练序列进行感知的性能。可以看出 P_D 随着帧数的增加逐渐增加。当帧数大于 4, $INR > -18\text{dB}$ 时,可以达到 $P_D > 0.9$ 的检测要求。图 5 为 $P_{FA} = 0.1$, $SNR = 0\text{dB}$ 时采用导频子载波进行感知的性能要比采用训练序列的差。其主要原因是只有部分子载波参与到感知中,采样点数相对减少。

接收机工作特性(ROC)曲线是奈曼皮尔逊准则下衡量检测性能的常用方法。图 6 给出了不同 INR 下的检测性能。当帧数为 4, $INR > -18\text{dB}$ 时,可以在 $P_{FA} < 0.1$ 的情况下获得满足 IEEE802.22 需求的检测概率。图 7 给出了自身网络的数据传输对检测性能的影响,其中点线和实线分别表示

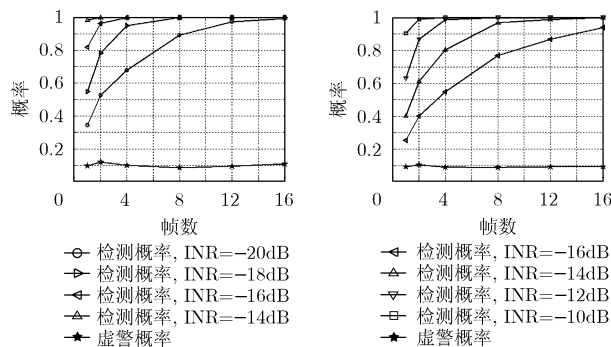


图 4 利用训练序列感知下的帧数对检测影响

图 5 利用导频感知下的帧数对检测影响

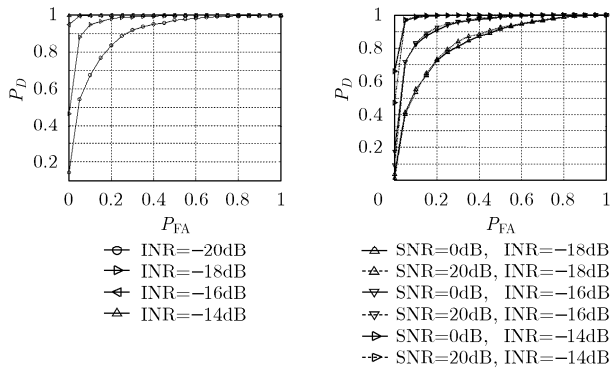


图 6 INR 对检测性能的影响

图 7 SNR 对检测性能的影响

SNR = 0dB 和 SNR = 20dB (帧数=1)时的 ROC 性能曲线。在不同的 SNR 情况下两种曲线基本重合, 说明次要用户自身信号对检测性能基本没有影响。进一步可以发现, 在 SNR = 0dB 的情况下检测依然可以进行, 其原因是本文算法并不需要解调和反馈。

图 8 将本文算法与传统的静默期情况下(帧数=1)的能量检测器^[8]性能进行了对比。仿真中两种感知方法使用相同的采样点数。不同的 INR 下二者的性能差异很小, 意味着本文算法具有和传统算法相近似的性能。本文算法的优势在于带内感知过程中不需要中断数据传输, 可以提供更好地传输性能保障。

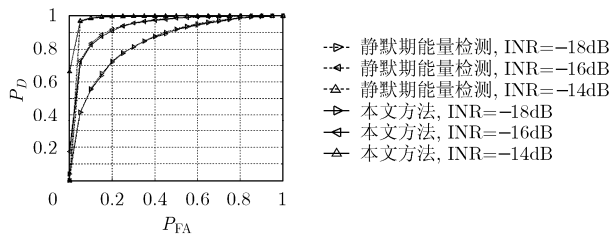


图 8 与静默期能量检测方法的性能对比

7 结论

无线环境感知是认知无线电中的关键技术之一。通常的频谱感知技术为了避免来自自身网络的干扰需要利用静默期进行带内感知。本文提出了一种新型的不需要静默期的带内感知算法, 可以保障网络性能不受静默期的影响。该方法利用 OFDM 中相邻符号的互补特性来进行频谱的感知。同时文中进一步将该方法拓展到几种应用实现中。仿真表明, 本文方法可以提供与静默期情况下的能量感知相近的性能,

可以满足 IEEE802.22 的需求。

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] IEEE. IEEE P802.22.1/D0.1 Draft Standard for Wireless Regional Area Networks Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands [S], IEEE. 2006.
- [3] Ji Baowei, Din Yinongg, and Mazzaresse D. Channel sensing based on self-signal suppression (SSS). IEEE 802.22-06/0120r1. http://www.ieee802.org/22/Meeting_documents/2006_July/22-06-0120-00-0000_Samsung_SSS-Based_Channel_Sensing.doc, Jul.2006.
- [4] Liti Linjun and Chang Soo-Young, *et al.* Interference detection for sensing. IEEE 802.22-06/0125r0. http://www.ieee802.org/22/Meeting_documents/2006_July/22-06-0125-00-0000_Huawei_Interference_Detection_Sensing.ppt, Jul.2006.
- [5] Papoulis A. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes [M]. Third Edition, New York, NY: McGraw Hill, 1991, Chapter 4.
- [6] Minn H, Zeng M, and Bhargava V K. On timing offset estimation for OFDM systems [J]. *Communications Letters, IEEE*, 2000, 4(7): 242-244.
- [7] Sofer E. WRAN Channel modeling, IEEE 802.22-05/0055r0. http://www.ieee802.org/22/Meeting_documents/2005_July/22-05-0055-00-0000_WRAN_Channel_Modeling.doc, Jul. 2005.
- [8] Shellhammer S J, Tandra R, and Tomcik J. Performance of power detector sensors of DTV signals in IEEE 802.22 WRANs[C]. Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum, New York, USA, 2006: 4-12.

陈 东: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为移动通信技术、认知无线电技术等。

李建东: 男, 1962 年生, 西安电子科技大学研究生院院长, 教授, 博士生导师, 综合业务网理论和关键技术国家重点实验室主任, 长期从事移动通信、个人通信、软件无线电、分组无线网、自组织网络、宽带无线 IP 技术等方面的研究。