

一种时域—码域联合的认知无线电频谱感知算法*

赵峰, 叶红刚, 陈宏滨

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了提高认知无线电系统中频谱感知的性能, 对多维联合的频谱感知进行了研究, 提出一种时域—码域联合的频谱感知算法。该算法主要利用了直接序列扩频主用户信号频谱空间中时域与码域的特性, 分别从时域与码域的角度对信道的状态进行检测, 其中时域采用能量感知, 码域分析扩频主用户信号的二次功率谱, 最终共同确认信道状态。仿真结果表明, 联合感知算法对应的检测性能优于单纯时域或码域感知, 能够直接应用于直接序列扩频主用户的频谱感知。

关键词: 认知无线电; 频谱感知; 联合感知; 扩频

中图分类号: TN911; TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)09-3391-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.050

Joint time-code spectrum sensing algorithm for cognitive radio

ZHAO Feng, YE Hong-gang, CHEN Hong-bin

(School of Information & Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to improve the performance of spectrum sensing in cognitive radio systems, this paper studied the multi-dimensional spectrum sensing, and proposed a joint time-code spectrum sensing algorithm. The proposed algorithm utilized the characteristics of primary signals with direct-sequence spread spectrum in both the time domain and the code domain, and detected the state of the channel from both time domain and code domain perspectives using energy detection in the time domain and analyzing power spectrum of primary users in the code domain. Finally it confirmed the state of the channel together. Simulation results show that the performance of the joint algorithm outperforms the single time-domain or code-domain spectrum sensing algorithm. The proposed algorithm is applicable in spectrum sensing of primary users with direct-sequence spread spectrum.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; joint sensing; spread spectrum

随着全世界范围内移动通信用户的迅猛增加,使得可分配的频谱资源变得越来越稀缺,而且已分配的频谱资源也未得到充分利用。为此,研究人员提出了认知无线电的概念来解决剩余频谱资源匮乏和已分配频谱资源未充分利用之间的矛盾^[1]。频谱感知作为认知无线电的首要任务和关键技术,一直是国内外的研究热点。频谱感知就是通过特定频段的监视和检测来确定可被认知用户使用的信道的过程^[2]。目前已有大量文献对认知无线电中常用的频谱感知技术进行了研究^[2~4],但这些频谱感知算法大多只对频谱空间一维特征进行检测,单纯地进行时域或者空域频谱感知,感知的性能不够理想,而且没有充分利用频谱空间信息。为了提高频谱感知的准确性,可对频谱空间的多维特征进行联合检测。文献[5]对认知无线电中常用的频谱感知方法进行了分析和比较,并说明了为提高频谱感知的性能,应对频谱空间的时域、空域、码域进行多维联合检测。文献[6,7]分别提出一种时域—空域联合频谱感知的方法,并证明了该算法的性能优于单纯的时域或者空域频谱感知。并且文献[5]还提出码域感知的概念。它指出,频谱的码域特性也是频谱空间的一部分,如果能被充分挖掘,就能提高频谱感知的性能。基于此,本文提出一种时域—码域联合频谱感知算法。该算法在时域频谱感知的基础上融入码

域感知,对频谱的时域特性和码域特性进行联合检测。

1 时域频谱感知

时域感知主要检测某一时间内主用户是否出现在待检测频段上,其做法是通过本地认知用户对主用户发射机发出的信号进行检测,以确定主用户的信号有没有出现在某一确定的频段内。常用方法有匹配滤波检测、周期平稳特性检测和能量检测^[8]。在实际频谱感知中,通常利用经采样后得到的离散信号值,简化的感知模型为

$$\begin{cases} H_0: y(n) = u(n) \\ H_1: y(n) = x(n) + u(n) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $y(n)$ 代表认知用户接收到的信号; $x(n)$ 代表目标频段上主用户的信号; $u(n)$ 代表信道中的加性噪声; H_0 代表信道空闲的假设,即当前频段上没有出现主用户; H_1 代表信道被占用的假设,即主用户正在使用当前频段进行通信。在实际的频谱感知过程中,认知用户根据判决门限 λ 与判决度量值进行比较,从而判断所检测的频段是否空闲。

能量检测方法具有较低的计算复杂度,实现起来也较容易,且还无须知道任何关于信号的先验信息,因此,在认知无线

收稿日期: 2011-12-19; 修回日期: 2012-02-10 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172055, 61162008); 广西自然科学基金资助项目(2011GXNSFB018072); 广西教育厅科研项目(201012MS080)

作者简介: 赵峰(1974-),男,山东日照人,研究员,博士,主要研究方向为无线通信技术; 叶红刚(1986-),男,湖北孝感人,研究生,主要研究方向为认知无线电频谱感知; 陈宏滨(1981-),男,湖南邵阳人,副教授,博士,主要研究方向为传感器网络、认知无线电(chbscut@guet.edu.cn)。

电频谱感知方面得到了广泛应用。能量检测对应的判决量为

$$D(Y) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Y^2(n) \quad (2)$$

其中: N 为采样点数,统计量 $D(Y)$ 为接收信号的能量。设判决门限为 λ ,当 $D(Y) > \lambda$ 时,就判定主用户存在;当 $D(Y) < \lambda$ 时判定主用户不存在。

根据统计理论知识可知,无论是在 H_0 还是 H_1 假设下, $D(Y)$ 均服从卡方分布。当采样点数 N 足够大时,利用中心极限定理可得

$$D(Y) | H_0 \sim N(\sigma_n^2, \frac{2}{N} \sigma_n^4)$$

$$D(Y) | H_1 \sim N(\sigma_s^2 + \sigma_n^2, \frac{2}{N} (\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2) \quad (3)$$

其中: $D(Y) | H_0$ 表示不存在主用户信号时的判决变量; $D(Y) | H_1$ 表示主用户存在情况下的判决变量; $\sim N(\cdot)$ 表示变量服从高斯分布; σ_s^2 为信号平均功率; σ_n^2 为噪声功率。

感知性能常用虚警概率(P_f)、检测概率(P_d)来表示。利用信号检测知识,可以得到能量检测中虚警概率与检测概率的表达式为

$$P_f = P(D(Y) > \lambda | H_0) = Q((\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - 1) \sqrt{N/2}) \quad (4)$$

$$P_d = P(D(Y) > \lambda | H_1) = Q((\frac{\lambda}{\sigma_n^2} - 1 - \gamma) \sqrt{N/(4\gamma + 1)}) \quad (5)$$

其中: γ 为信号噪声功率比, $Q(\cdot)$ 为标准高斯互补CDF函数。

2 码域频谱感知

码域感知主要就是针对经过直接序列扩频处理后的主用户信号,即DS信号。扩频码检测是码域感知的关键技术,码域感知就是要识别主用户采用的扩频码。一方面能充分利用频谱空间中的码域特性,采用时域感知与码域感知相结合,实现对频谱空间时域与码域的联合感知,改善频谱感知算法的性能,提高认知无线电系统频谱感知的准确性;另一方面认知用户能根据主用户的扩频码相应地调整自身的扩频码,使自身的扩频码与主用户采用的扩频码相互正交,这样,经过扩频处理后的认知用户信号便能与主用户同时在同一频段上传输而不对主用户产生干扰,提高认知无线电系统频谱利用率。本文主要是利用频谱空间中的码域特性,并与时域频谱感知相结合,以提高认知无线电系统频谱感知整体检测概率。

针对中频调制DS-SS信号,可以用一种基于二阶循环统计量的参数估计方法得到中频调制DS-SS信号的载频和chip速率两个参数的估计^[9],在此基础上易于用平方环等方法实现对DS信号的解调。所以本文中以DS基带信号为基础进行分析,并且每位信息码由一周期PN码同步调制。

设被高斯白噪声 $u(n)$ 污染了的基带DS信号为

$$\begin{aligned} dx(n) &= ds(n) + u(n) = \\ &= d(n)p(n) + u(n) \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $ds(n)$ 为用一周期的PN码来同步调制一位信息码的已扩基带DS信号; $d(n)$ 为信息码; $p(n)$ 为PN序列; $u(n)$ 为零均值、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

$$d(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_k q(n - kT_0) \quad (7)$$

$$p(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} p_k q(n - kT_c) \quad (8)$$

其中: $d_k, p_k \in \{+1, -1\}$; $q(\cdot)$ 为幅度为1的矩形脉冲; T_0 为

PN码周期; T_c 为一个chip码宽,且有 $T_0 = NT_c$; N 表示PN码位数。

当 $T_0 \gg T_c$,即 $N \gg 1$ 时,DS基带信号 $ds(n)$ 的功率谱密度可以表示为^[10]

$$S_{ds}(f) \approx \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{m=-\infty}^{\infty} Sa^2(\frac{\pi m}{N}) \delta(f - \frac{m}{NT_c}) & m \neq 0 \\ 0 & m = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中: $Sa(x) = \sin(x)/x$, $\delta(\cdot)$ 为冲激函数。可以看出基带信号 $ds(n)$ 的功率谱在 $N \gg 1$ 时是一序列离散谱线,且谱线的间隔为 $1/NT_c$ 。对其再做傅里叶变换取模平方,便可得到DS基带信号功率谱的二次处理:

$$\begin{aligned} S_{ds}(e) &= |\text{DFT}\{S_{ds}(f)\}|^2 = \\ &= |\text{DFT}\{\frac{1}{N} \sum_{m=-\infty}^{\infty} Sa^2(\frac{\pi m}{N}) \delta(f - \frac{m}{NT_c})\}|^2 \cong \\ &= |\sum_{m=-\infty}^{\infty} (1 - \frac{|e - kT_0|}{T_c})|^2, |e - kNT_c| \leq T_c \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。可见,基带DS有用信号 $ds(n)$ 的二次功率谱是间距为PN码周期的尖锐三角形脉冲序列^[10],而高斯白噪声 $u(n)$ 的二次功率谱不具有这一特性。因此,可以通过对信道中截获的信号进行功率谱二次处理来判断信道中是否存在DS信号。

为了减小噪声的影响,可以将截获的DS信号进行分组计算二次功率谱再累加,最后看累加后的信号是否具有尖锐三角形脉冲的特性。因此,码域检测算法如下:

- 将信道中截获的DS信号分成 M 组,分别求出每组信号的功率谱;
- 将步骤a)中的每组信号的功率谱分别作傅里叶变换后取模平方,得到每组信号的二次功率谱;
- 将步骤b)中求得的二次功率谱进行累加;
- 检测累加后的信号是否有尖锐三角形脉冲;若有则判定有DS信号。

3 时域—码域联合感知算法

联合感知算法主要用做对信道中主用户DS信号的检测。DS信号在码域存在以下特性:其二次功率谱是以扩频码为周期的尖锐三角形脉冲序列。这一特性为认知无线电频谱感知创造了新的机会,如果能被充分利用,能提高认知无线电系统频谱感知的性能。利用第2章中的码域感知方法,在一定的信道环境下能较准确地检测到直扩主用户信号。对于多主用户情况下的DS-CDMA信号的频谱感知是一个比较复杂的问题,涉及到盲源分离、盲用户数估计、码间干扰。为了简化码域感知算法,方便分析联合频谱感知,下面的时域—码域联合感知算法主要研究单一直扩主用户,主要目的在于把扩频码检测技术运用到频谱感知中,并与传统的单域频谱感知算法相结合以改善频谱感知性能。

联合感知算法采用时域感知与码域感知相联合,共同对信道的状态进行检测,能提高系统的感知性能。算法流程如图1所示。



图1 联合感知算法流程图

在联合感知算法中,时域感知采用能量检测,对信道中信号的能量进行累积,再与设定的门限值作比较,以确定信道中

是否存在主用户信号。码域感知采用 DS 信号功率谱二次处理的方法。由于 DS 有用信号的二次功率谱是以扩频码为周期的尖锐三角形脉冲序列,而噪声不具有这种特性,因此,可以通过对信道中截获的信号进行功率谱二次处理来进一步判断信道中是否存在主用户信号。两种检测方法分别利用信道中主用户信号时域与码域的特性,从不同角度对信道的状态进行检测,优势互补,共同确认信道状态。

当信道中存在 DS 信号时,联合感知能提高检测概率:先用时域感知对信道状态进行初步检测,当没有检测到主用户存在即出现漏检时,码域感知能利用信号的码域特性对信道状态进行进一步确认,能在一定程度上纠正时域漏检。当信道中不存在主用户信号即信道空闲时,联合感知能降低虚警概率:由于噪声不具备码域特性,因此,码域感知几乎不会产生虚警。即使时域感知检测到信道忙即出现虚警时,码域感知对信道状态的二次检测也能消除时域虚警。

从整体检测概率上看,时域—码域联合感知算法利用了频谱空间的二维特性,提高了单纯时域或码域频谱感知的检测性能。联合感知算法对信道状态进行了两次检测,设时域检测概率为 P_{d1} ,码域检测概率为 P_{d2} ,此时联合感知算法的检测概率为

$$P_d = 1 - (1 - P_{d1})(1 - P_{d2}) = P_{d1} + P_{d2} - P_{d1}P_{d2} \quad (11)$$

由于 $0 < P_{d1}, P_{d2} < 1$, 所以 $P_d > P_{d1}, P_{d2}$, 即联合感知算法的检测性能要高于单纯的时域或码域感知的检测性能。

从算法复杂度上看,码域感知计算量较大,而时域感知的计算量很小,相对码域而言几乎可以忽略。联合感知算法相对于单纯时域感知来说主要增加了码域检测的计算。码域检测主要的计算量是对信道中截获的 DS 信号进行了两次傅里叶变换,以求得其二次功率谱。当信道中截获的 DS 信号长度为 N 时,一次傅里叶变换(快速)的计算量为 $N/2 \cdot \log_2 N$, 所以联合感知算法中主要增加的码域计算量为 $N \log_2 N$ 。

4 仿真结果与分析

本文用 MATLAB 仿真工具对提出的算法进行仿真验证,通过对仿真结果的分析与比较来评价算法的性能。信息码为 0、1 交替的二进制码,采样点数为 6 200。

1) 本文仿真了 DS 信号的二次功率谱 在仿真 DS 信号的二次功率谱时,让信道中的信号为用一周期的 PN 码来调制一位信息码,并且 PN 码与信息码同步的已扩基带 DS 信号,PN 码为周期 31 的 m 序列,在 DS 信号中加入零均值的高斯白噪声, $\text{SNR} = -5$ dB。图 2 为 DS 信号的二次功率谱作 50 次累积后取平均的结果。从图 2 中可以看出,DS 信号的二次功率谱在 PN 码的周期整数倍处出现尖锐三角形脉冲。信噪比越大,这种现象就越明显。

2) 仿真了码域感知的性能 图 3 为码域检测概率与信噪比的关系曲线图。在仿真码域感知性能时,让 DS 信号中 PN 码分别为周期 15 的 m 序列和周期为 31 的 m 序列,在 DS 信号中加入零均值的高斯白噪声,分别仿真了信噪比 SNR 为 $-10 \sim -5$ dB 不同情况下的检测概率,每种信噪比下进行了 100 次 Monte-Carlo 仿真实验,得出信道中信号正确检测到的概率与信噪比之间的关系曲线。从图 3 中可以看出,DS 信号中 PN 码周期大小对码域感知性能影响不大。

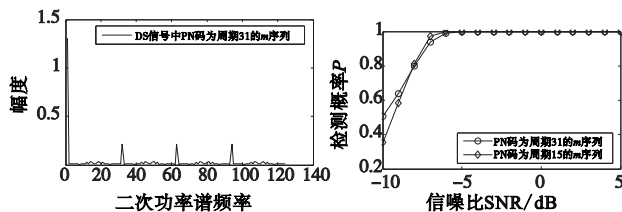


图2 DS信号二次功率谱

图3 码域感知性能

同时在上述实验条件下,本文也仿真了时域感知的性能,发现 DS 信号中 PN 码周期大小对时域感知性能几乎没有任何影响。

3) 将时域—码域联合感知算法的性能与单纯的时域能量检测的性能以及单纯的码域感知算法的性能作了对比仿真分析,主要分析它们在不同信道环境下的检测概率。性能对比曲线如图 4 所示。在虚警概率为 0.01,不同信噪比情况下对联合感知和时域感知分别进行了仿真分析。本文依然让 DS 信号中 PN 码为周期 31 的 m 序列。在信道中加入零均值的高斯白噪声,分别仿真了信噪比 SNR 为 $-20 \sim 0$ dB 不同情况下的检测概率,每种信噪比下进行了 100 次 Monte-Carlo 仿真实验,得出检测概率与信噪比之间的关系曲线。

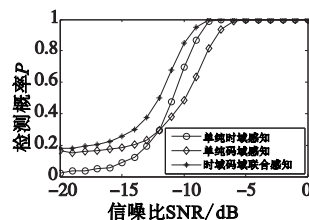


图4 三种频谱感知算法的性能

从图 4 中可以看出,在信噪比很低,当 $\text{SNR} < -8$ dB 时,码域感知的性能要优于时域感知;当 $\text{SNR} > -8$ dB 时,时域感知的性能却比码域感知的好;而联合感知的检测概率始终高于单纯时域感知或单纯的码域感知的检测概率;当 $\text{SNR} = -20$ dB 时,联合感知整体的检测概率相对于单纯的时域感知提高了约 18%;当 $\text{SNR} > -13$ dB 时,联合感知整体的检测概率相对于单纯的码域感知也有较大程度的提高;而且在 $\text{SNR} > -6$ dB 时,都能实现对主用户信号的存在性作出完全正确的判断。

由联合感知整体的检测性能可知,在信噪比较低时,单纯时域或码域感知无法检测出主用户的存在(假设检测概率大于 0.6 时就认为能检测到主用户的存在),而使用时域—码域联合感知则可以通过对信道增加一次检测来提高整体的检测概率,从而检测到主用户的存在。从图 4 中可以看出,在当 $\text{SNR} = -11.5$ dB 时,单纯时域感知无法检测到主用户,而时域—码域联合感知可以检测到主用户;同时单纯使用时域感知时,只有当 $\text{SNR} > -10.4$ dB 时主用户才可以被检测到。所以在时域—码域联合感知算法中,通过增加一次码域的检测后,能正确检测到主用户的信噪比范围提升了约 1 dB;同样,联合感知算法相比单纯的码域感知,能正确检测到主用户的信噪比范围也提升了约 2 dB。虽然检测性能提高的前提是增加了额外的计算,但随着处理器计算能力的提高,这部分计算量相比其带来的检测性能的提升和对日益紧张的频谱资源的利用率增加而言还是次要的。

5 结束语

传统的频谱感知方法一般只对频谱空间的(下转第 3410 页)

(上接第 3393 页)一维特性进行检测,为了更好地检测空闲频谱,需要对频谱空间的多维特征进行检测。本文充分利用了频谱空间中的码域特性,采用时域感知与码域感知相结合,以实现频谱空间时域与码域的联合感知,提高了认知无线电系统频谱感知的准确性。

参考文献:

- [1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radios: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 4(6): 13-18.
- [2] IAN F A, LEE W Y, MEHMT C V, *et al.* Next generation/ dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [3] 陈曦. 认知无线电中的频谱感知算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
- [4] 申达. 认知无线电频谱检测技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [5] YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(1): 116-130.
- [6] GANESAN G, LI Ye, BING B, *et al.* Spatiotemporal sensing in cognitive radio networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 5-12.
- [7] TUAN D, BRIAN L M. Joint spatial-temporal spectrum sensing for cognitive radio networks[C]//Proc of the 43rd Annual Conference on Information Sciences and Systems. 2009: 124-129.
- [8] WANG Bei-bei, RAY K J. Advances in cognitive radio networks: a survey[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(1): 5-23.
- [9] 金艳, 姬红兵, 罗军辉. 一种基于循环统计量的直扩信号检测与参数估计方法[J]. *电子学报*, 2006, 34(4): 634-637.
- [10] 张天骢, 林孝康, 周正中. 一种直扩信号伪码周期及序列的盲估计方法[J]. *电波科学学报*, 2005, 20(3): 400-405.