

认知无线电系统中的两判决门限能量检测算法^①吴进波^② 罗 涛 乐光新

(北京邮电大学信息与通信工程学院无线通信系统与网络教育部重点实验室 北京 100876)

摘 要 基于传统单门限能量检测算法,提出了一种适用于认知无线电系统的两门限能量检测算法。在算法分析中定义了两个性能指标,即认知用户和主用户间的碰撞概率以及限制认知用户对频谱使用的限占概率。理论分析与仿真结果表明,与传统单门限能量检测算法相比较,两门限能量检测算法降低了认知用户和主用户间的碰撞概率,同时也引起限占概率的增加,即该算法能够在牺牲部分频谱效率的条件下,明显降低认知用户对主用户的干扰,保证了主用户使用频谱的优先权。

关键词 认知无线电, 能量检测, 检测门限, 频谱选择

0 引 言

根据美国联邦通信委员会(FCC)的频谱规划方案^[1],随着无线通信技术的进一步发展,无线频谱资源越来越紧张,但是,实际测量结果^[2]表明频谱资源并没有得到均衡和充分使用。为了缓解频谱资源紧张和充分利用频谱资源,人们提出了认知无线电技术^[3]。文献[3]给出了认知无线电的系统结构和关键技术。文献[4]提出使用虚拟非授权频谱的方法来划分频谱,以解决频谱动态分配问题;文献[5]提出使用频谱池概念实现频谱的分类和分配;文献[6]提出应用正交频分复用(OFDM)技术实现对频谱池的管理。上述文献所使用的方法,都可以实现对频谱资源的分类和管理,但只是建立在单门限频谱检测的基础上,频谱检测的准确性有限,从而可能会对主用户产生严重干扰。基于此,本文通过增加检测门限的数量,提出了两门限能量检测算法。该算法能够有效降低认知用户和主用户的碰撞概率,降低认知用户对主用户的干扰,保证主用户对频谱使用的优先权,但是,该算法会对频谱的使用效率产生一定影响。

1 传统单门限能量检测算法

在认知无线电系统中,使用传统单门限能量检

测算法对主用户信号进行检测时,多采用 Neyman-Pearson 准则(见文献[7])。如图 1(a)所示,单门限能量检测算法存在一个检测门限值(V_{th}),当检测到的接收信号能量 V 大于 V_{th} 时,判决为有主用户信号出现,用事件 H_1 来描述;反之,判决为无主用户信号出现,用事件 H_0 来描述。

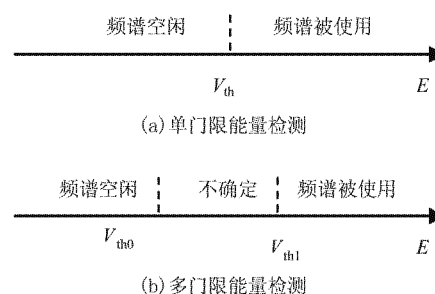


图 1 能量检测原理示意图

在无线衰落环境中,使用能量检测算法时,可分别求出检测概率(p_d)、虚检概率(p_f)和漏检概率(p_m)^[8]:

$$p_d = \Pr\{V > V_{th} | H_1\} = Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{V_{th}}) \quad (1)$$

$$p_f = \Pr\{V > V_{th} | H_0\} = \frac{\Gamma(u, V_{th}/2)}{\Gamma(u)} \quad (2)$$

$$p_m = \Pr\{V \leq V_{th} | H_1\} = 1 - p_d \quad (3)$$

其中, γ 表示认知用户接收到的信噪比, V_{th} 表示检测门限, $Q_u(a, b)$ 表示阶数为 u 的归一化 marcum 函数,并且分别是关于 u 、 a 的增函数, b 的减函数;

① 国家自然科学基金(60872049, 60871042), 863 计划(2007AA10Z235)和教育部留学归国人员教学、科研建设项目资助。

② 男, 1974 年生, 博士生; 研究方向: 通信与信息系统; 联系人, E-mail: hyxwu@163.com

(收稿日期: 2008-11-14)

$\Gamma(a, b)$ 表示非完全 gamma 函数, 并且是关于 b 的减函数, $\Gamma(a)$ 表示完全 gamma 函数。

由式(2)可得

$$p_f \cdot \Gamma(u) = \Gamma(u, V_{th}/2)$$

根据非完全、完全 gamma 函数定义可得

$$\begin{aligned}\Gamma(u, V_{th}/2) &= \int_{V_{th}/2}^{\infty} t^{u-1} \cdot e^{-t} dt \\ &= \int_{V_{th}/2}^0 t^{u-1} \cdot e^{-t} dt + \int_0^{\infty} t^{u-1} \cdot e^{-t} dt \\ &= \Gamma(u) - \int_0^{V_{th}/2} t^{u-1} \cdot e^{-t} dt\end{aligned}$$

且

$$\int_0^{V_{th}/2} t^{u-1} \cdot e^{-t} dt = \Gamma(u) \cdot p(u, V_{th}/2)$$

其中 $z = p(u, x) = \frac{1}{\Gamma(u)} \int_0^x t^{u-1} \cdot e^{-t} dt$ 表示低阶不完全 gamma 函数, 在 u 一定的条件下, 它是关于 x 的单调减函数。且 $x = p^{-1}(u, z)$ 是关于 z 的单调增函数。所以有

$$p_f \cdot \Gamma(u) = \Gamma(u) - \Gamma(u) \cdot p(u, V_{th}/2)$$

$$p_f = 1 - p(u, V_{th}/2)$$

$$V_{th} = 2 \times p^{-1}(u, 1 - p_f)$$

把 V_{th} 代入式(1)和(3)可以分别求出 p_d, p_m 随 p_f 变化的关系表达式:

$$\begin{aligned}p_d &= Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{V_{th}}) \\ &= Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{2 \times p^{-1}(u, 1 - p_f)})\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}p_m &= 1 - p_d \\ &= 1 - Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{2 \times p^{-1}(u, 1 - p_f)})\end{aligned}\quad (5)$$

2 两门限能量检测算法

在图 1(a)中, 由于只使用一个检测门限, 不是判决成 H_0 就是判决成 H_1 , 如果有突发噪声或其它因素, 产生误检测的可能性比较大, 对主用户使用频谱的优先权和认知用户及时接入系统都产生影响。针对这种情况, 可以通过增加检测门限的数量进行改进, 如图 1(b)所示。在传统单检测门限的基础上增加一个检测门限, 变成具有两个检测门限 V_{th0} 和 V_{th1} 的能量检测方法。显然, 只有当 $V > V_{th1}$ 或者 $V < V_{th0}$ 时才会检测出有主用户信号出现或者没有出现(分别对应事件 H_1 或 H_0), 当 $V_{th0} < V \leq V_{th1}$ 时, 容易引起误判, 需要重新检测或采用其它方法。故此时可按照表 1 的方法来选择频谱。

表 1 频谱选择规则

判决范围	检测结果	频谱使用规则
H_0	$V' \leq V_{th0}$	无主用户出现, 频谱可用
不是 H_0 或 H_1	$V_{th0} < V' \leq V_{th1}$	占用情况不明, 不用该频谱
H_1	$V' > V_{th1}$	主用户出现, 不用该频谱

2.1 两门限能量检测的性能指标

根据上述分析, 可求出两门限能量检测算法的检测概率、虚检概率和漏检概率, 它们分别为

$$p_d' = p\{V' > V_{th1} | H_1\} = Q_{u'}(\sqrt{2\gamma'}, \sqrt{V_{th1}}) \quad (8)$$

$$p_f' = p\{V' > V_{th1} | H_0\} = \frac{\Gamma(u', V_{th1}/2)}{\Gamma(u')} \quad (9)$$

$$p_m' = p\{V' \leq V_{th1} | H_1\} = 1 - p_d' \quad (10)$$

其中, p_d' 表示有主用户存在并且能正确检测的概率; p_f' 表示没有主用户存在, 却检测出确定有主用户存在的概率; p_m' 表示有主用户存在, 但是可能没有检测出来的概率。

为了更好地衡量新算法的性能, 定义两个新的性能指标: 碰撞概率和限占概率。

定义 1: 认知用户和主用户间的碰撞概率定义为 $p_c = \Pr\{V' < V_{th0} | H_1\}$, 表示有主用户存在时, 却检测出肯定没有主用户, 从而会把该频谱分配给感知用户使用的概率。它反映了由于频谱检测的不准确性所引起的感知用户对主用户的干扰程度。如果碰撞概率较大, 说明感知用户对主用户造成的干扰较为严重; 反之, 干扰较小。

定义 2: 限制感知用户对频谱的使用概率(即限占概率)定义为: $p_{na} = \Pr\{V' > V_{th0} | H_0\}$, 表示在没有主用户存在时, 却检测出可能有主用户存在, 从而不能把该频谱分配给感知用户使用的概率。它反映了由于频谱检测的不准确性对频谱使用效率的影响, 即是否有足够的可用频谱供感知用户及时接入系统。如果限占概率较大, 说明频谱还未得到充分使用, 其使用效率还有进一步提高的可能性; 反之, 说明频谱已基本得到充分使用, 再想提高使用效率, 难度较大。

2.2 两门限能量检测的性能分析

由于增加了检测门限的数量, 所以一般有, $V_{th0} < V_{th} < V_{th1}$ 。故由式(1)和(8)有 $Q_{u'}(\sqrt{2\gamma'}, \sqrt{V_{th1}}) < Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{V_{th}})$, 即 $p_d' < p_d$, 同理可得: $p_m' > p_m, p_f' < p_f$ 。

虽然两门限能量检测算法的检测概率减小, 漏检概率变大、虚检概率变小, 但在认知无线电系统

中,需要重点考虑的问题包括:认知用户对主用户的干扰不能超过干扰温度,尽量提高空闲频谱的使用效率等。因此,下面重点分析两门限检测算法的抗干扰性能和频谱效率。

显然,在传统单门限能量检测算法中,认知用户和主用户间的碰撞概率就是漏检概率 $p_{c1} = p_m$, 限占概率就是虚检概率 $p_{na1} = p_f$ 。

两门限能量检测算法中,认知用户和主用户的碰撞概率为

$$\begin{aligned} p_{c2} &= \Pr\{V' < V_{th0} | H_1\} \\ &= 1 - p\{V' > V_{th0} | H_1\} \\ &= 1 - Q_{u'}(\sqrt{2\gamma'}, \sqrt{V_{th0}}) \end{aligned} \quad (11)$$

限制认知用户对频谱的使用概率(限占概率)为

$$\begin{aligned} p_{na2} &= \Pr\{V' > V_{th0} | H_0\} \\ &= \frac{\Gamma(u', V_{th0}/2)}{\Gamma(u')} \end{aligned} \quad (12)$$

比较式(3)、(11),由于 $V_{th0} < V_{th}$, 有 $Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{V_{th}}) < Q_{u'}(\sqrt{2\gamma'}, \sqrt{V_{th0}})$, 即 $p_{c1} < p_{c2}$, 同样方法有 $p_{na1} < p_{na2}$ 。

由上述分析可得,两门限能量检测算法能够有效降低认知用户和主用户的碰撞概率,降低认知用户对主用户的干扰,但是,该算法降低了认知用户接入系统的可能性,即降低了频谱使用效率。反过来也说明,频谱的使用效率还有提升的空间。

3 仿真分析

该部分使用计算机仿真进行验证。仿真条件设置如下:噪声功率 $\sigma^2 = 1$, 自由度 $u = u' = 5$, 信噪比 $\gamma = \gamma' = 10\text{dB}$, $V_{th0} = 0.8V_{th}$, $V_{th1} = 1.2V_{th}$ 。

图2、图3分别给出单门限和两门限检测算法的碰撞概率和限占概率($p_{c1}, p_{c2}; p_{na1}, p_{na2}$)随检测门限值的变化关系。从图2可得,与单门限算法相比较,两门限算法降低了认知用户对主用户的碰撞概率。例如,在 $V_{th} = 10\text{dB}$ 时,碰撞概率由 32.31% 降为 8.914%, 下降近 4 倍;从图3可得,两门限算法也使限占概率有所增加,使频谱并未得到完全充分使用。例如,在 $V_{th} = 10\text{dB}$ 时,限占概率由 2.331% 增加为 3.57%, 增加了约 1.5 倍。由仿真结果可以看出,通过牺牲一定的频谱使用效率,能够有效地降低认知用户和主用户间的碰撞概率。

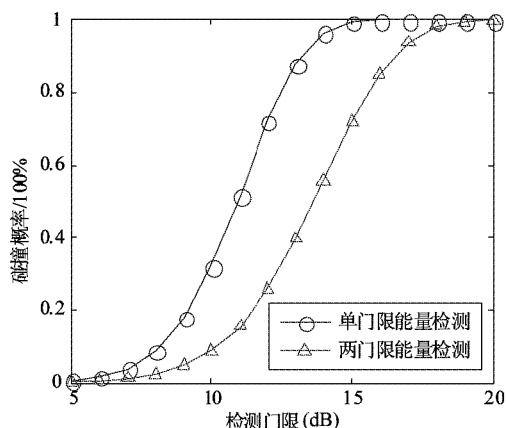


图2 碰撞概率与检测门限的关系

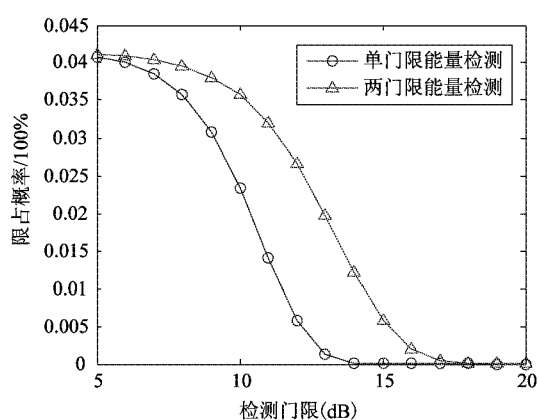


图3 限占概率与检测门限的关系

为了进一步验证上述理论分析,进行了计算机蒙特卡罗仿真。仿真中,共使用 5000 个信号,其中主用户使用信道的概率为 50%,采用平坦瑞利信道。图4、图5分别给出了信号经过 $-30 \sim 10\text{dB}$ 噪声后使用两种算法得到的碰撞概率和限占概率情况。从图4可得,在信噪比(SNR)比较低时,能量检

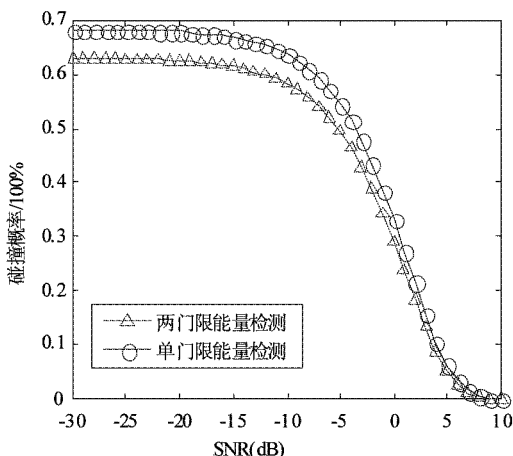


图4 碰撞概率和 SNR 的关系

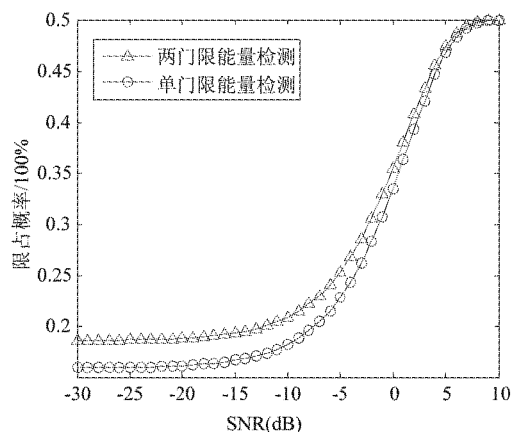


图 5 限占概率和 SNR 的关系

测算法的检测性能并不理想,主用户和认知用户间碰撞的可能性比较大,但此时多门限能量检测算法的碰撞概率仍然有一定改善,在 $-30 \sim -10\text{dB}$ 时,两门限检测算法的碰撞概率比单门限检测算法提高约 5 个百分点。在检测范围内,两门限能量检测算法的碰撞概率都小于单门限检测算法。从图 5 中可得,两门限能量检测算法的限占概率较单门限算法有所增加,即频谱使用效率有一定下降。

4 结 论

由于能量检测算法是根据接收到的信号能量检测判决主用户信号是否出现,所以对干扰比较敏感,针对传统的单门限能量检测算法,本文提出多门限

能量检测算法。理论分析和计算机仿真结果表明:两门限能量检测算法能够有效降低认知用户和主用户间的碰撞概率,降低认知用户对主用户的干扰,保证了主用户对频谱占用的优先权,但同时也看到,该算法增加了对认知用户使用频谱的限占概率,对频谱的使用效率产生一定影响,如何处理检测结果落在两个检测门限之间时的频谱检测问题,在后续研究中将进一步讨论分析。

参考文献

- [1] Federal Communications Commission. <http://www.fcc.gov/oet/inf/database/spectrum/>: IEEE, 1996
- [2] Willkomm D, Gross J, Wolisz A. Reliable link maintenance in cognitive radio systems. In: 2005 IEEE International Symposium on DySPAN, Maryland, USA, 2005. 371-378
- [3] Akyildiz Ian F, Lee Won-Yeol, Vuran Mehmet C, et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Computer Networks*, 2006, 50(13): 2127-2159
- [4] Danijela Čabrić, Mishra Shridhar M, et al. A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum. In: 14th Information Society Technologies on Mobile Wireless Communications, Dresden, Germany, 2005. 261-264
- [5] Timo A, Friedrich K. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency. *IEEE Radio Communications*, 2004, 42(3): 8-14
- [6] Weiss T, Hillenbrand J, Krohn A, et al. Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems. In: Proceedings of the 59th IEEE Vehicular Technology Conference, Milan, Italy, 2004. 1873-1877
- [7] Mourad B. Signal Detection and Estimation. 2nd edition. London: Artech House Publishers, 2005. 317-318
- [8] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals. *Proceedings of the IEEE*, 1967, 55(4): 523-531

A double-threshold energy detection algorithm for cognitive radio systems

Wu Jinbo, Luo Tao, Yue Guangxin

(Key Laboratory of Wireless Communication Systems and Networks, the Ministry of Education, School of Information and Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

Based on the conventional single-threshold energy detection algorithm, the paper proposes a novel double-threshold energy detection algorithm for cognitive radio systems. For farther research, two performance indexes, the probability of collision between the cognitive user and the primary user and the probability of spectrum unavailable to the cognitive user, are defined. The theoretical analysis and the simulation results indicate that this strategy can make a great decrease of the probability of collision between the cognitive user and the primary user, while the probability of spectrum unavailable has a little deterioration. That is to say, this algorithm can protect the primary user perfectly in the case of sacrificing some spectrum efficiency for cognitive user.

Key words: cognitive radio, energy detection, detection threshold, spectrum selection