

未知信噪比条件下的频谱检测技术

淮安信息职业技术学院 束美其

摘要: 频谱感知是认知无线电中的关键技术,认知用户(非授权用户)只有在频段空闲时才能接入,然而认知用户检测概率与它所处位置的信噪比是密切相关的,针对认知用户所处位置的不确定,通过对认知用户到授权用户距离的统计平均,来获取认知用户对授权用户检测概率的统计平均量。结果分析表明,在不知道认知用户位置及信噪比这些先验条件情况下,对不同频段和不同发射信噪比的授权用户进行检测,可有效地获知该频段是否被授权用户占用。

关键词: 授权用户 认知用户 检测概率 信噪比 损耗指数因子

1 引言

随着信息技术的快速发展,无线频谱已成为现代社会不可缺少的宝贵资源,研究表明可用频谱愈加紧缺,而传统的授权频带机制导致频谱的利用率不高,大量的频谱处于空闲状态,美国联邦通信委员会(FCC)的研究表明,授权频段的平均利用率范围在15%~85%之间,为了更有效的提高频谱利用率,认知无线电(cognitive radio,CR)作为一种智能的频谱分享技术,可感知外界通信环境的智能通信系统^[1]。根据一定的学习和决策算法,实时自适应地调整其自身内部的通信机理,动态地检测和有效地利用空闲频谱,有效地解决上述问题,提高频谱的利用率。然而,提高认知用户动态接入频谱的前提条件是对授权用户的通信不形成干扰,所以对空闲频谱的检测是关键。

空闲频谱认知检测技术是认知无线电的两大核心技术之一。频谱环境的认知是认知无线电技术成立的前提和先决条件,只有在环境感知和检测的基础上,才能够进行空闲资源的使用和通信。经典的检测方法有三种:匹配滤波^[2],能量检测^{[3] [4]},循环平稳特征检测^{[5] [6]}。匹配滤波器的设计需要授权用户信号的先验概率,解调时必须与授权用户信号进行同步和定时,在认知无线电环境中,它有一个很大的缺陷:对于每一种类型的授权用户信号,需要设计不同的专用滤波器。所以,匹配滤波器在认知无线电的检测环境中总体实用性不高。循环平稳特征检测需要已知授权用户信号的循环频率,这可能在一些系统中不太现实,能量检测不需要知道授权用户信号的先验信息,是一种对未知参数的确定信号存在检测的有效方法,是一种次优化检测方法。

目前的能量检测^{[3] [4]},都是在已知信噪比的情况下进行分析的,然而在实际的系统中,由于认知用户出现位置的不确定和随机性,因此认知用户的信噪比也是未知的。由于认知无线电工作的前提是不对授权用户进行干扰,利用Neyman-Pearson 检验准则(确定一个负担得起的虚警概率,使得检测概率尽可能大),在授权用户到认知用户距离和信噪比未知的情况下,可通过最小解码信噪比方法来计算检测概率的统计平均。

2 系统模型

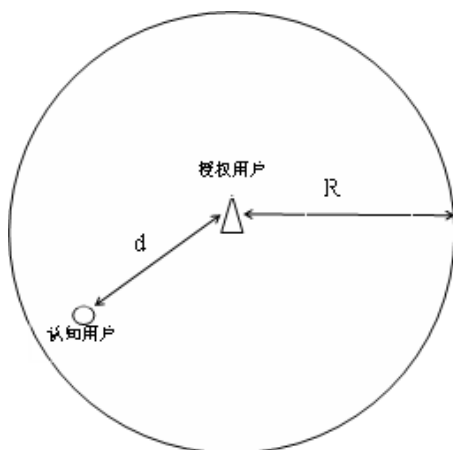


图 1 系统模型

授权用户发射端检测是认知用户通过分析侦听到的信号中是否存在授权用户信号来判断授权用户发射机的工作状态进而判断感兴趣的频谱处于占用状态还是空闲状态，它是一种假设授权用户接收端位置未知情况下的检测。在瑞利信道情况下进行授权用户发射端检测，第 k 个采样时间上的二元假设模型如下：

$$y(k) = \begin{cases} n(k) & H_0 \\ hx(k) + n(k) & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

$x(k)$ 表示授权用户的发射信号， $y(k)$ 表示认知用户的接收信号， h 为信道增益， $n(k)$ 为均值为零，方差为 σ_n^2 的高斯白噪声。不失一般性，我们假设 $x(k)$ ， $n(k)$ 彼此独立。认知用户的检测统计量 Y 可表示为

$$Y = \sum_{k=0}^{N-1} |y(k)|^2 \quad (2)$$

其中 N 为采样点个数，由观测时间与感兴趣频带带宽决定。

3 频谱感知

由 (2) 式可得认知用户能量检测统计量，由于统计量 Y 是 N 个高斯随机变量的平方和，所以当授权用户不占用信道时，即在 H_0 状态， Y/σ_n^2 服从自由度为 N 的中心卡方分布 χ_N^2 ，否则服从自由度为 N ，非中心系数为 ρ 的非中心卡方分布 $\chi_N^2(\rho)$ ， ρ 为信噪比，且 $\rho = P_2/\sigma_n^2$ ， P_2 是认知用户接收到授权信号的功率。

注意：平时我们所定义的信噪比是能量检测器输出的 N 个采样值的平均信噪比，它的值为 $P_2/(N\sigma_n^2)$ 。

判决统计量表示如下：

$$\frac{Y}{\sigma_n^2} \square \begin{cases} \chi_N^2 & H_0 \\ \chi_N^2(\rho) & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

当采样点数 N 足够大时，认知用户的检测统计量 Y 的均值和方差分别为

$$E[Y] = \begin{cases} N\sigma_n^2 & H_0 \\ (N + \rho)\sigma_n^2 & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Var}[Y] = \begin{cases} 2N\sigma_n^4 & H_0 \\ 2(N + 2\rho)\sigma_n^4 & H_1 \end{cases} \quad (5)$$

利用中心极限定理，可表示认知用户虚警概率和漏检概率分别为：

$$P_f = P(Y > V_T | H_0) = Q \left[\frac{V_T - N\sigma_n^2}{\sigma_n^2 \sqrt{2N}} \right] \quad (6)$$

$$P_d = P(Y > V_T | H_1) = Q \left[\frac{V_T - (N + \rho)\sigma_n^2}{\sigma_n^2 \sqrt{2(N + 2\rho)}} \right] \quad (7)$$

其中 V_T 表示门限， $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2/2} dy$ 。

用一个简单的路径损耗模型来描述认知网络,如图 1,认知用户接收到的信号功率为 $P_2 = P_1/d^\alpha$, 其中 P_1 为授权用户发射功率, $P_1 = \sum_{k=0}^{N-1} |x(k)|^2$ d 为认知用户到授权用户之间的距离, α 为路径损耗指数因子, 取值范围一般为 $3 \leq \alpha \leq 6$ 。

假设授权用户功率覆盖范围为半径为 R 的圆周区域, 实际中, 认知用户到授权用户的距离 d 是未知的, 我们可得到认知用户到授权用户距离 d 的概率密度函数

$$f(d) = \frac{2d}{R^2} \quad 1 \leq d \leq R. \quad (8)$$

认知用户信噪比可表示为

$$\begin{aligned} \rho &= P_2 / \sigma_n^2 \\ &= P_1 / (d^\alpha \sigma_n^2) \end{aligned} \quad (9)$$

把 (8) 代入 (9), ρ 的概率密度函数可表示为

$$f(\rho) = \frac{2}{\alpha \rho R^2} \left(\frac{P_1}{\rho \sigma_n^2} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad (10)$$

信噪比 ρ 的取值范围为

$$P_1 / (R^\alpha \sigma_n^2) \leq \rho \leq P_1 / \sigma_n^2$$

在认知无线网络中, 检测概率 P_d 越大, 将对授权用户造成越小的干扰, 而越小的虚警概率 将能获得越高的频谱利用率。应用 Neyman-Pearson 检验准则, 确定一个负担得起的虚警概率, 并寻求信号检测概率尽可能大的判决策略。可根据 (6) 式得:

$$V_T = \sqrt{2N} \sigma_n^2 Q^{-1}(P_f) + N \sigma_n^2 \quad (11)$$

由 (7) 和 (11) 式, 可得

$$P_d = Q \left[\frac{\sqrt{2N} Q^{-1}(P_f) - \rho}{\sqrt{2(N+2\rho)}} \right]$$

则检测概率 P_d 的统计平均值可表示为

$$\begin{aligned} E[P_d] &= \int_{\frac{P_1}{R^\alpha \sigma_n^2}}^{\frac{P_1}{\sigma_n^2}} Q \left[\frac{\sqrt{2N} Q^{-1}(P_f) - \rho}{\sqrt{2(N+2\rho)}} \right] f(\rho) d\rho \\ &= \int_{\frac{P_1}{R^\alpha \sigma_n^2}}^{\frac{P_1}{\sigma_n^2}} Q \left[\frac{\sqrt{2N} Q^{-1}(P_f) - \rho}{\sqrt{2(N+2\rho)}} \right] \times \\ &\quad \frac{2}{\alpha \rho R^2} \left(\frac{P_1}{\rho \sigma_n^2} \right)^{\frac{2}{\alpha}} d\rho \end{aligned} \quad (12)$$

实际上, 由于认知用户到授权用户位置未知而导致的信噪比未知, 求出来的检测概率 P_d 是对信噪比在 $\left[\frac{P_1}{R^\alpha \sigma_n^2}, \frac{P_1}{\sigma_n^2} \right]$ 认知用户所有有可能出现位置进行统计平均, 它是一种折衷处理方法。

4 数据结果及讨论

设最小解码信噪比 $\gamma_{\min} = 10\text{dB}$, 认知用户最小信噪比是当它处于授权用户覆盖区域的最边缘, 此时最小信噪比 $\rho_{\min} = P_1 / (R^\alpha \sigma_n^2) \geq \gamma_{\min}$, 覆盖半径 R 与发射功率 P_1 和损耗指数因子 α 的关系为

$$R \leq \left(\frac{P_1}{10\sigma_n^2} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (13)$$

把 (13) 代入 (12) 中, 我们可以得到检测概率 P_d 和发射功率信噪比 P_1 / σ_n^2 及路径损耗指数因子 α 之间的关系式。

当虚警概率 P_f 分别为 0.01 和 0.1 时, 采样点数 $N = 10$, 路径损耗指数因子 $\alpha = 3$, 检测概率 P_d 和发射功率信噪比 P_1 / σ_n^2 (T-SNR) 关系如图 2 所示, 随着 P_f 值的增加, P_d 的值也增加. 同时, 发射功率信噪比 P_1 / σ_n^2 的值越大, P_d 的值也就越大.

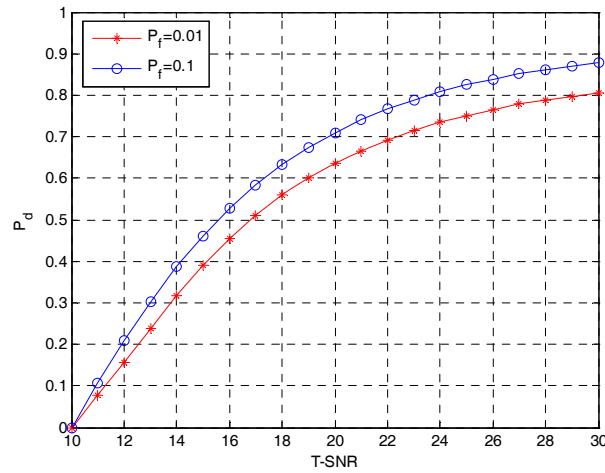


图 2 P_d VS. $T - SNR$

无线信号在频率越高时, 衰减越大, 路径损耗因子 α 也就越大, 在这我们取不同的 α , 可近似代表处于不同的频段. 当 P_f 分别为 0.01 和 0.1 时, 采样点数 $N = 10$, 发射功率信噪比 $P_1 / \sigma_n^2 = 30\text{dB}$ 时, 检测概率 P_d 和路径损耗因子 α 关系如图 3 所示, 可见在 $\alpha = 3$ 时, P_d 的值最大, 因为在此时认知用户所能接收到的信噪比最大.

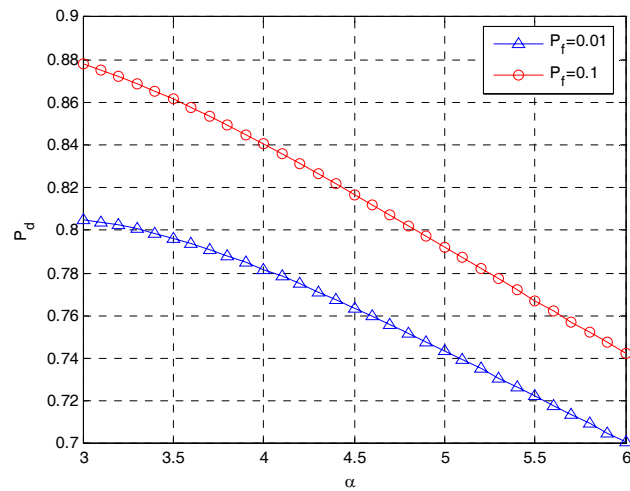


图 3 P_d VS. α

5 结束语

由于认知用户是随机出现的,本文是建立在认知用户位置的不确定的情况下,提出的对认知用户到授权用户距离统计平均,利用路径损耗模型,从而得到接收信噪比的统计平均量,并通过最小解码信噪比确定方法和 Neyman-Pearson 检验准则,来获得认知用户对授权用户信息检测的信息。分析结果表明,在认知用户接收信噪比未知情况下,针对不同频段和不同发射信噪比的授权用户发射信号进行检测,可有效地获知该频段是否被占据,并且此模型可应用到多用户协同检测中。

参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive Radio: Brain-empowered wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in communication*, 2005. 23(2): 201-220.
- [2] A. Sahai, N. Hoven, and R. Tandra. Some fundamental limits on cognitive radio. *Allerton conference on communication, control, and computing*, 2003.
- [3] H. Urkowitz. Energy detection of unknown deterministic signals. *Processings of the IEEE*, 55 :523-531, 1967
- [4] F. F. Digham, M. S. Alouini, and M. K. Simon. On the energy detection of unknown signals over fading channels, 2003
- [5] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios. In *Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on, volume 1, pages 772-776 Vol.1, 2004*
- [6] H. Tang. Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems. *Proc. IEEE Int. Symp. New Frontiers Dynamic Spectr. Access Network*, 1:151-159.