第37卷 第19期 计 算 机 工 程 2011年10月
Vol.37 No.19 Computer Engineering October 2011

·网络与通信· 文章编号：1000—3428(2011)19—0091—02 文献标识码：A 中图分类号：TN925

基于莱斯信道的认知网络合作频谱感知

谭晓衡，程金波，廖 勇

(重庆大学通信与测控中心，重庆 400044)

摘 要：推导认知无线网络下单认知用户与多认知用户合作频谱感知的莱斯信道模型，并分别进行仿真。结果表明，莱斯信道下单认知用户的频谱感知效果远不及理想环境下的检测效果，但随着认知用户的增加，合作频谱感知的效果明显改善，在增加到一定程度后，甚至优于理想环境下的单用户的检测效果。

关键词：认知无线电；莱斯信道；能量检测；多用户；合作频谱感知

Cooperative Spectrum Sensing of Cognitive Network Based on Rician Channel

TAN Xiao-heng, CHENG Jin-bo, LIAO Yong

(Institute of Communication & Tracking Telemetry Command, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

【**Abstract**】This paper derives the model of local spectrum sensing and cooperative spectrum sensing over Rician channel, and makes simulation. The results suggest that the sensing performance of local spectrum sensing over Rician channel is not so far as the performance over the AWGN, then with the increase of secondary users, the performance of cooperative spectrum sensing may improve sensing performance significantly, and will be better then the circumstance over the AWGN when the number of the secondary users is big enough.

【**Key words**】cognitive radio; Rician channel; energy detection; multi-user; cooperative spectrum sensing

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.19.029

1 概述

随着无线通信技术与业务的飞速发展，无线服务的用户与日俱增，这就导致无线频谱资源这种不可再生资源显得愈发短缺。此外，频谱资源的平均利用率非常低，而且极不平衡。一些非授权频段(Unlicensed Frequency Bands, UFB)被过度利用，同时一些授权频段(Licensed Frequency Bands, LFB)的利用率处于中低水平(如广播电视)。

认知无线电技术的基本出发点是：在不影响授权频段正常通信基础上，具有认知功能的无线电设备可以按某种机会方式(Opportunistic Way)接入授权的频段内，并动态的利用频谱。这种在空域、时域和频域出现的可以被利用的频谱资源称为频谱空穴(Spectrum Holes)。认知无线电的核心思想就是使无线通信设备具有这种发现频谱空穴并合理利用的能力。

认知无线电系统的关键是频谱感知(Spectrum Sensing)。感知就是未授权用户-认知用户(Secondary User)对授权用户-主用户(Primary User)所在的频段不断的进行频谱检测，判断主用户是否在工作，从而获知该频段的使用情况。频谱感知的目的是发现频谱空穴，同时不能对主用户造成有害干扰。

在认知用户中进行合作频谱感知能够改善频谱检测的效果。在合作频谱检测的方案中，一些认知用户由于建筑物、树林等障碍物的阻挡无法识别是频段空闲还是处于信号深度阴影。在这种情况下，合作检测可以明显提高认知用户检测到主用户信号的能力[1]。文献[2]研究了AWGN信道、Rayleigh信道环境下的频谱感知作，但没有涉及其他衰落信道，而在无线通信环境中，信道模型的不同会对通信质量产生较大影响。本文在文献[2]研究的基础上，对莱斯(Rician)衰落信道中的频谱感知实现进行量化，并分析其合作检测效果。

2 单认知用户频谱感知

本文中认知用户对主用户信号检测所采用的方法是能量检测。能量检测器框图如图1所示。

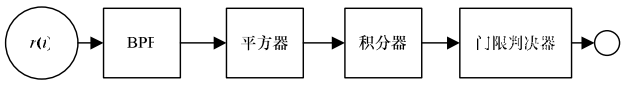


图1 能量检测器框图

认知用户接到的信号形式如下：

$$r(t)=hs(t)+n(t) \tag{1}$$

其中，$s(t)$是主用户信号；$n(t)$是噪声信号；h为信道增益。h=0时，表示主用户信号不存在，对应于假设H_0；h=1时，表示主用户信号存在，对应于假设H_1。接收到的信号$r(t)$首先是通过一个带通滤波器来确定检测频段的中频率f_c以及频段带宽W，其传递函数如下：

$$H(f)=\begin{cases}2/\sqrt{N_{01}} & |f-f_c|\leqslant W\\ 0 & \text{else}\end{cases} \tag{2}$$

其中，N_{01}为噪声单边功率谱密度。经过平方器和积分器来得到接受波形的能量。积分器的输出Y是用来检测2种假设的统计量。Y的分布情况及概率密度函数如下[2]：

基金项目：中央高校基本科研业务费基金资助项目(CDJZR10 16 0011)；重庆市自然科学基金资助项目(2010BB2049)

作者简介：谭晓衡(1976－)，男，教授，主研方向：宽带无线接入技术，现代通信系统；程金波，硕士研究生；廖 勇，讲师、博士研究生

收稿日期：2011-04-01 **E-mail：**cheng11867@126.com

$$Y \sim \begin{cases} \chi^2_{2u} & H_0 \\ \chi^2_{2u}(2\gamma) & H_1 \end{cases} \tag{3}$$

$$f_Y(y) = \begin{cases} \dfrac{1}{2^u \Gamma(u)} y^{u-1} \mathrm{e}^{-\frac{y}{2}} & H_0 \\ \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{y}{2\gamma}\right)^{\frac{u-1}{2}} \mathrm{e}^{-\frac{2\gamma+y}{2}} I_{u-1}(\sqrt{2\gamma y}) & H_1 \end{cases} \tag{4}$$

式(4)中的 $\Gamma(\ )$是完全伽马函数；$I_v(\ )$是 v 阶修正贝赛尔函数[3]。将积分器的输出值 Y 与判决门限 λ 进行比较，以判定是否有主有户存在。文献[3]中的仿真结果表明，能量检测器在衰落环境中性能会有所降低。

2.1 单认知用户在理想环境下的频谱感知

在 AWGN 信道环境中，信道增益 h 是固定的，检测概率 P_d 以及错误警报概率 P_f 为[4]：

$$P_d = P\{Y > \lambda \mid H_1\} \tag{5}$$

$$P_f = P\{Y > \lambda \mid H_0\} \tag{6}$$

其中，λ 为判决门限，由式(4)可以将式(6)表示为：

$$P_f = P\{Y > \lambda \mid H_0\} = \frac{\Gamma(m, \lambda/2)}{\Gamma(m)} \tag{7}$$

其中，m 为时间带宽积；$\Gamma(.,.)$是不完全伽马函数。同样，式(5)也可通过式(4)表示为：

$$P_d = P\{Y > \lambda \mid H_1\} = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \tag{8}$$

其中，$Q_m(.,.)$ 定义式如下：

$$Q_m(a,b) = \int_b^\infty \frac{x^m}{a^{m-1}} \mathrm{e}^{-\frac{x^2+a^2}{2}} I_{m-1}(ax)\mathrm{d}x \tag{9}$$

其中，$I_{m-1}()$ 为 m-1 阶修正贝塞尔函数。

在动态频谱分享的情况下，使 P_m =1－ P_d (漏检概率)和 P_f 达到协调一致有着不同的意义。P_m 过高将可能会导致漏检主用户的存在，从而增加干扰主用户的可能性；另一方面，P_f 过高则会导致较低的频谱利用率。

2.2 单认知用户在 Rician 衰落环境下的频谱感知

在假设 H_0 的情况下，因为没有主用户信号的存在，所以 P_f 与信噪比 γ 是相互独立的。因此，在任何衰落环境中 P_f 的计算式是不变的。但在衰落环境中，信噪比 γ 是变化的，因此，由(8)式可知 P_d 也随之变化，此时信道增益也是变化的，检测概率 P_d 与瞬时信噪比的关系如下：

$$P_d = \int_x Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) f_\gamma(x)\mathrm{d}x \tag{10}$$

其中，$f_\gamma(x)$ 是在衰落环境下信噪比的概率密度函数。

在郊区或农村地区，发射信号经过独立的多径到达接收端，经常接收到有视距路径传播分量的信号。这样由于该路径信号的强度往往比其他路径大得多，这时接收信号的包络已不是 Rayleigh 分布，而是 Rician 分布，相应的概率密度为：

$$f(\gamma) = \frac{k+1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-k - \frac{(k+1)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) I_0\left(2\sqrt{\frac{k(k+1)\gamma}{\bar{\gamma}}}\right), \gamma \geqslant 0 \tag{11}$$

其中，k 定义为直射波的功率与 Rician 衰落的方差 $2\sigma^2$ 之比，即 $k = A^2/(2\sigma^2)$。参数 k 称为 Rician 因子，它可以完全刻画 Rician 分布。当 A =0 时即直射波不存在时，k =0，此时式(11)就变为 Rayleigh 分布的概率密度函数，这与直射波不存在时 Rician 分布退化为 Rayleigh 分布的结果是一致的。同理，用式(11)替换式(10)中的 $f_\gamma(x)$，有：

$$P_{dRic}\mid_{m=1} = Q\left(\sqrt{\frac{2k\bar{\gamma}}{k+1+\bar{\gamma}}}, \sqrt{\frac{\lambda(k+1)}{k+1+\bar{\gamma}}}\right) \tag{12}$$

Rician 衰落信道下的 ROC 曲线($\bar{\gamma}$ =10 dB、k =1、m =1)如图 2 所示，同时将其与 AWGN 信道的 ROC 曲线进行对比。

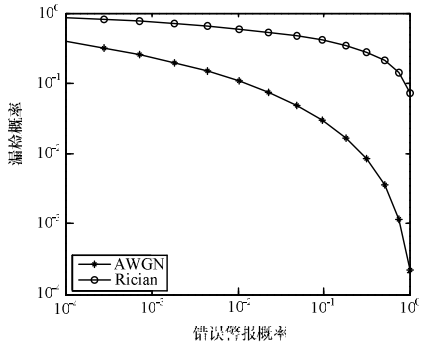


图 2 Rician 衰落信道下的 ROC 曲线

Rician 衰落信道下 Rician 因子 k 取不同值时的 ROC 曲线如图 3 所示，同时将其与 AWGN 信道的 ROC 曲线进行对比。可以看出，随着 k 的增大，ROC 曲线逐渐接近 AWGN 信道的 ROC 曲线。当 k =100 时，几乎与 AWGN 的曲线重合。这与 k >>1 时，Rician 信道近似于 AWGN 信道的结论一致。

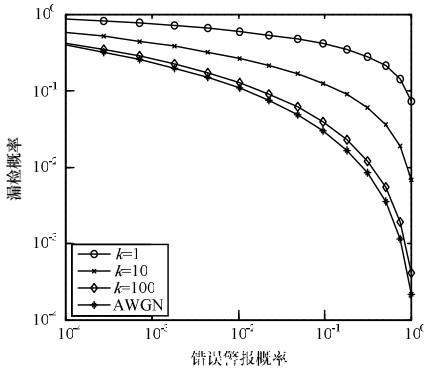


图 3 不同 k 值时 Rician 衰落信道下的 ROC 曲线

3 多认知用户合作频谱感知

如上所述，让多个不同的认知用户组成认知网络，通过分享信息来进行合作，可以提高频谱感知的可行性。

用 n 来表示认知网络中合作感知用户的数目。假设 n 个用户都服从独立的同一衰落分布，且具有相同的平均信噪比。为简化分析以及实际的使用，n 个用户都使用相同的判决门限 λ。用户只分享最终的一位判决信息，这样可以减少通信量。分析可知，其中的一个感知用户从其他 n-1 个用户得到的判决信息中，只要有一个以上(包括一个)的用户信息判定主用户存在，就应认为主用户存在。这有利于保护主用户，以免造成有害干扰。这样的合作频谱感知方案的检测概率和错误警报概率分别为：

$$Q_d = 1 - (1 - P_d)^n \tag{13}$$

$$Q_f = 1 - (1 - P_f)^n \tag{14}$$

其中，P_d、P_f 分别可由式(10)和式(7)得到。不难看出，与本地频谱感知相比，合作频谱感知提高了检测的概率，但同时也提高了错误警报的概率。从仿真结果看，合作频谱感知还是改善了检测的效果。在 Rician 衰落环境下，不同数目认知用户的合作频谱感知的 ROC 曲线如图 4 所示($\bar{\gamma}$ =10 dB, k =1, m =1)。同时与单认知用户的 AWGN 信道 ROC 曲线进行比较。从图中可知，合作频谱感知不但改善了检测的效果，随着 n 的增大，比 AWGN 信道的本地感知更有效。当 n=10 时，效果已经优于 AWGN 的检测效果。 (下转第 95 页)