

文章编号: 1672-2892(2011)01-0087-05

瑞利信道下基于信号采样自相关的信号检测技术

李彬, 陈跃斌, 冯赛赛, 郑晟

(云南民族大学 电气信息工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 信号检测技术是认知无线电中的首要及关键技术之一。为了提高低信噪比条件下的信号检测性能, 采用基于接收信号采样自相关的检测方法来进行授权用户信号检测, 并用捕获的数字电视信号以及随机产生的二相移键控信号作为信号源, 在 MATLAB 中进行信号检测仿真。仿真结果表明, 在瑞利衰落信道以及低信噪比(特别是信噪比 ≤ -14 dB)情况下, 该检测方法与传统的能量检测方法相比, 有较好的检测性能。此外, 该检测方法中被检测信号相关性程度对检测概率也有一定影响。

关键词: 认知无线电; 信号采样自相关; 信号检测; 瑞利衰落信道; 检测性能

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

Signal detection based on sample autocorrelation in Rayleigh fading channel

LI Bin, CHEN Yue-bin, FENG Sai-sai, ZHENG Sheng

(School of Electrical and Information Technology, Yunnan University of Nationalities, Kunming Yunnan 650500, China)

Abstract: Signal detection is the primary job and the key technology in cognitive radio. In this paper, in order to get a superior detection performance under low Signal Noise Ratio(SNR), a method based on the sample autocorrelation of received signals is adopted to detect the existence of authorized users' signals. Then Binary Phase Shift Keying(BPSK) signals and the captured digital television signals are adopted as signal sources to simulate the detection algorithms in MATLAB simulation. The detection results demonstrate that the adopted method outperforms energy detection in Rayleigh fading channel and under low SNR($R_{SN} \leq -14$ dB) conditions. Moreover, the overall correlation degree of received signals show some effects on detection probability.

Key words: Cognitive radio; sample autocorrelation; signal detection; Rayleigh fading channel; detection performance

认知无线电是一种新型的无线通信系统^[1], 它能够在所感兴趣的频带上可靠地感知频谱环境, 探测在该频段上合法授权用户的出现, 在对授权用户通信不造成干扰情况下, 智能地利用空闲的本地频谱资源进行自己的通信过程。因此, 检测授权用户信号存在与否(信号检测)是认知无线电的首要任务。

基于授权用户发射端检测的最基本检测算法是能量检测, 该检测方法相对简单, 易实施, 并且它不需要关于被检测信号的先验信息, 但是它的检测性能依赖于已知环境中的噪声功率。一般情况下, 假设接收端的噪声是加性高斯白噪声, 其方差是已知确定的。但是在实际情况中, 精确地获得实际环境中的噪声功率是很困难的。此外, 在能量检测算法中, 特别是在信噪比很低的情况下, 噪声的不确定性^[2-3]直接影响了检测性能。为了克服此项不足, 在文献[4]中, 作者提出了一种基于统计协方差的方法(Covariance Absolute Value detection, CAV), 该方法主要根据授权用户信号自相关矩阵和白噪声的协方差矩阵的不同特性, 来判断授权用户信号是否存在, 并且该检测方法能用在未知信号、信道以及噪声功率等情况下的信号检测中。不过, 该文并没有针对实际的通信信道来讨论检测效果。

众所周知, 瑞利衰落信道^[5]一般用于描述建筑物密集的城市中的无线信道, 是移动通信中的主要信道模型。信号检测技术同样需要在低信噪比的情况下也具有很好的检测性能, 因此研究信号在瑞利衰落信道下以及在低信噪比时的检测性能有着非常重要的意义。

1 检测模型与信道模型

1.1 一般系统检测模型

频谱感知的目的是分析侦听到的信号中是否存在授权用户信号,用二元假设数学模型来表示该检测过程:

$$\begin{aligned} H_0: y(t) &= \eta(t) \\ H_1: y(t) &= u * s(t) + \eta(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:情况 H_0 表示授权用户信号不存在; H_1 表示授权用户信号存在; $y(t)$ 是认知用户接收到的信号; $\eta(t)$ 是高斯白噪声; u 是信道幅度增益因子; $s(t)$ 是授权用户信号; $*$ 表示卷积运算。

1.2 瑞利衰落信道模型

在建筑密集的城区,由于建筑物的阻挡以及地表等其他大量物体的反射,大量信号从不同的方向到达接收端,广泛的测量^[5]表明接收到的信号包络的视距分量往往被城市中的障碍所阻隔。现假设,当传输 1 个未经过调制的载波信号在该通信环境中时,对接收到的信号所有路径的总和可以通过下面的复随机过程来描述:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N u_n(t) = \sum_{n=1}^N [x_n(t) + jy_n(t)] \quad (2)$$

式中: $u(t)$ 是所有接收信号波的合成; N 为信号分量的个数; $u_n(t)$ 表示第 n 条接收信号波; $x_n(t)$ 和 $y_n(t)$ 表示统计不相关的实数值, j 为虚数单位。当 $N \rightarrow \infty$ 时,应用中心极限定理, $\sum_{n=1}^N x_n(t)$ 和 $\sum_{n=1}^N y_n(t)$ 可以分别描述成实值的各自独立不相关的高斯随机过程,再令:

$$u(t) = u_1(t) + ju_2(t) \quad (3)$$

那么 $u_1(t) = \sum_{n=1}^N x_n(t)$ 和 $u_2(t) = \sum_{n=1}^N y_n(t)$ 是统计独立且同分布的高斯随机过程,其均值为 0,方差为 σ^2 ,则 $u(t)$ 的方差为 $\text{Var}\{u(t)\} = 2\sigma^2$ 。所以,信号的包络 $|u(t)|$ 的概率密度为:

$$p(u) = \frac{u}{\sigma^2} e^{-\frac{u^2}{2\sigma^2}}, \quad u \geq 0 \quad (4)$$

这就是瑞利随机变量,这个信道模型就称作瑞利信道模型,它非常适用于建筑密集的城市无线通信信道,它是一个在城市中无线电信号传播环境的统计模型。

那么,如何在 MATLAB 中仿真得到授权用户信号经过瑞利衰落信道后的接收信号 $y(t)$,是本文进行信号检测的前提。本文仿真采用多路正弦波叠加^[6-7]的方法来近似模拟 2 个相互独立的高斯随机变量 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$,即:

$$\begin{cases} u_1(t) = \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{n=1}^M \cos(f_d t \cos \alpha_n + \phi_n) \\ u_2(t) = \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{n=1}^M \cos(f_d t \sin \alpha_n + \phi_n) \end{cases}, \quad \alpha_n = \frac{2\pi n - \pi + \theta_n}{4M}, n = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

式中: f_d 为最大多普勒频移; ϕ_n, φ_n 以及 θ_n 对于所有 n ,均独立且均匀分布于区间 $[-\pi, \pi]$ 。至于仿真瑞利信道时所需正弦波叠加的个数 M ,一般取 $M > 16$ 即可。在本文实验仿真中,取值 $M > 64$,最大多普勒频移 f_d 取值为 100 Hz。此外,还假设仿真的衰落信道是频率非选择性的^[5],即如果接收端散射信号分量之间的传播延时差与符号周期相比可以忽略不计,那么就称该信道是频率非选择性的。因此在这种情况下,接收信号的波动函数可以由传输信号

与相应的随机模型过程乘积来建模,即式(1)可以表述成: $\begin{matrix} H_0: y(t) = \eta(t) \\ H_1: y(t) = e(t) + \eta(t) \end{matrix}$, 其中 $e(t) = u \bullet s(t)$, \bullet 为乘积运算。

2 检测原理

定义 $\text{cov}(X, Y) = E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}$ 为随机变量的协方差,令 $c_{ij} = \text{cov}(X_i, X_j)$,那么 $C = (c_{ij})_{n \times n} =$

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix}_{n \times n} \quad \text{为 } X, Y \text{ 的协方差矩阵。对于独立同分布的高斯白噪声 } \eta(t), \text{ 均值 } E[\eta(t)] = 0, \text{ 方差 } D[\eta(t)] = \sigma_n^2,$$

其协方差矩阵(自相关矩阵)为: $\mathbf{R}_\eta = \begin{pmatrix} \sigma_n^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_n^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_n^2 \end{pmatrix}_{n \times n} = \sigma_n^2 \cdot \mathbf{I}_n$, 其中 \mathbf{I}_n 表示 n 阶单位矩阵。而对于授权用户信号 $e(t)$, 由于信号的相关性, 其协方差矩阵 $\mathbf{R}_e = (c_{ij})_{n \times n}$ 中的元素 $c_{ij} \neq 0, i \neq j$ 。因此对于接收信号 $y(t)$ 的协方差矩阵 \mathbf{R}_y , 有:

$$\mathbf{R}_y = \mathbf{R}_e + \sigma_n^2 \cdot \mathbf{I}_n \quad (6)$$

从式(6)看出, 若不存在授权用户信号($e(t)=0$), 则 $\mathbf{R}_y = \sigma_n^2 \cdot \mathbf{I}_n$, 那么矩阵 \mathbf{R}_y 非对角线上的元素全为 0; 但是若存在实信号($e(t) \neq 0$)并且信号采样相关, 那么显然矩阵 \mathbf{R}_y 非对角线上的元素肯定不可能全为 0。令 $r_{i,j}$ 表示矩阵 \mathbf{R}_y 上的元素, 再定义:

$$T_{\text{all}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |r_{ij}|, \quad T_{\text{diag}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_{ii}| \quad (7)$$

因此, 可以通过比较矩阵对角线元素绝对值的均值 T_{diag} 以及 T_{all} 来判断是否存在授权用户信号 $e(t)$ 。

假设接收信号载波频率为 f_c , 对其进行采样速率为 $f_s (f_s \geq 2f_c)$ 的采样。 $y(n) = [\tilde{y}(0), \tilde{y}(1), \dots, \tilde{y}(n)]$ 表示采样后 $y(t)$ 的离散序列, 同理 $e(n) = [\tilde{e}(0), \tilde{e}(1), \dots, \tilde{e}(n)]$ 表示采样后实信号 $e(t)$ 的离散序列, 实际上在本文中仅通过对有限的信号采样来计算其自相关矩阵 $\mathbf{R}_y(N_s)$, 进而近似地等于其统计协方差矩阵 \mathbf{R}_y :

$$\mathbf{R}_y \approx \mathbf{R}_y(N_s) = \begin{pmatrix} \lambda(0) & \lambda(1) & \cdots & \lambda(L-1) \\ \lambda(1) & \lambda(0) & \cdots & \lambda(L-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda(L-1) & \lambda(L-2) & \cdots & \lambda(0) \end{pmatrix}_{L \times L} \quad (8)$$

N_s 是计算信号采样自相关系数时的个数, 其中

$$\lambda(l) = \frac{1}{N_s} \sum_{m=0}^{N_s-1-l} \tilde{y}(m) \tilde{y}(m-l), \quad l = 0, 1, \dots, L-1 \quad (9)$$

显然, 若 $e(t)=0$, 且 $l=0$, N_s 取值足够大时, $\lambda(0)$ 将无限接近噪声的方差 σ_n^2 。令 γ 为检测门限, 那么该二元检测方法可以表述为: 若 $T_{\text{all}}/T_{\text{diag}} > \gamma$, 授权用户信号 $e(t)=0$ 存在, 否则不存在。

本文仿真采用恒虚警检测方法, 通过实验仿真来得到门限值, 即选择基于虚警概率 P_{fa} 的门限。在仿真中, 用产生的高斯白噪声 $\eta(t)$ 作为输入(无授权用户信号), 然后调整门限值 γ , 使得 P_{fa} 满足预先设定的虚警概率。

3 仿真

3.1 仿真方法

第 1 步 采用 DTV 信号或者随机产生的 BPSK 作为信号源 $s(t)$ 。

第 2 步 信源 $s(t)$ 通过瑞利衰落信道, 加入高斯白噪声 $\eta(t)$, 得到接收信号 $y(t)$ 。本文主要是比较在低信噪比的情况下信号检测性能, 因此通过改变白噪声的大小来获得不同等级的信噪比。

第 3 步 设定参数 N_s 和 L , 仿真计算出判决门限 γ , 再用该检测法进行检测判决, 令信号存在时检测结果为 1; 反之检测结果为 0。

第 4 步 按照以上步骤蒙特卡罗随机仿真 N_{loop} 次, 统计检测结果为 1 的个数为 N_d , 那么统计所得检测概率为:

$$P_d(r \geq \gamma | H_1, N_s, L, \gamma) = N_d / N_{\text{loop}} \quad (10)$$

显然, 当统计仿真次数 N_{loop} 足够大时, 实验结果逼近理论检测概率。

3.2 仿真结果分析

首先设定虚警概率 $P_{\text{fa}}=0.1$, 然后令 $L=14, N_s=40\ 000$, 实验求得门限 $\gamma=1.060\ 2$, 然后再实验仿真得出实际的虚警概率。图 1 中 ED - xdB 表示存在 xdB 噪声不确定性^[2-3]的能量检测^[8-9]。图 1 的仿真结果表明, 当在实际检测环境中存在噪声不确定性时, 实验所得出的能量检测法的虚警概率明显高于事先设定的值 0.1, 因此能量检测在此条件下所得出的检测结果是不可靠的, 而基于接收信号采样自相关矩阵的检测法却不受噪声功率不确定的影

响。实际中由于接收设备电子器件的非线性还有元件因发热产生的非均匀、时变的热噪声以及由其他用户干扰而产生的噪声，都有可能使噪声功率很难精确地估计，故噪声的不确定性是真实存在的，而且在真实的无线通信环境中，一般假设至少存在 1 dB~2 dB 的噪声不确定性^[2]。

选择基于虚警 $P_{fa}=0.1$ 的门限值，分别采用 DTV 信号^[8]和随机产生的 BPSK 信号(过采样 $f_s=2.5f_c$)作为信源来仿真其信号检测的概率 P_d 。由图 2 和图 3 可以看出，在瑞利衰落信道下，在不存在噪声不确定性时或者说噪声功率能精确估计时，能量检测也有很好的检测性能，但当存在噪声不确定性时，本文所采用检测方法的性能要明显好于能量检测。

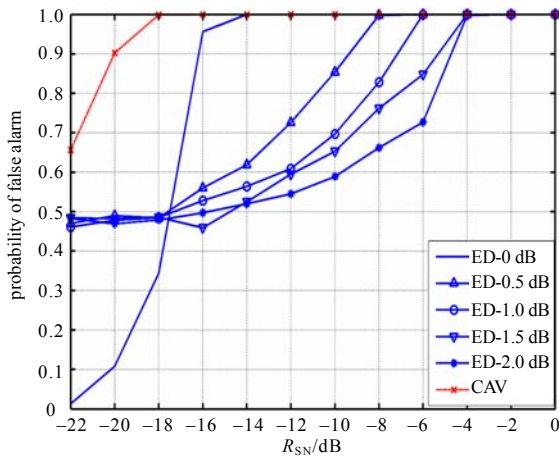


Fig.2 Probability of detection(BPSK signal, $N_s=50\ 000, L=15$)
图 2 检测概率(BPSK 信号, $N_s=50\ 000, L=15$)

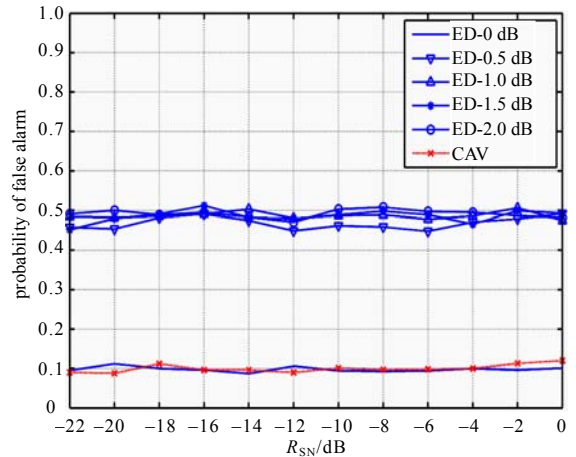


Fig.1 Probability of false alarm($N_s=40\ 000, L=14$)
图 1 虚警概率($N_s=40\ 000, L=14$)

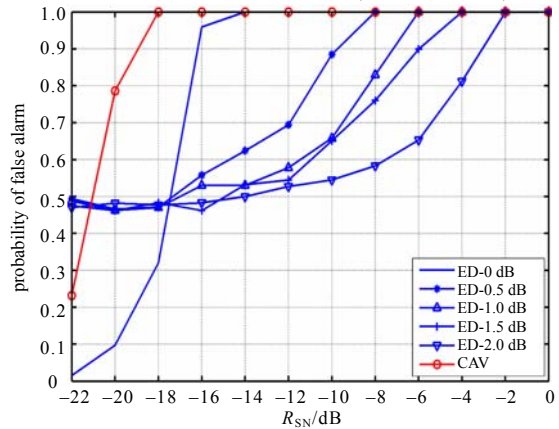


Fig.3 Probability of detection(DTV signal, $N_s=50\ 000, L=15$)
图 3 检测概率(DTV 信号, $N_s=50\ 000, L=15$)

由式(9)可知，该检测方法与接收信号采样的相关性有关，下面分析信号相关强度对检测性能的影响。先定义 $\alpha_l = \frac{E[e(n) \times e(n-l)]}{E[e(n) \times e(n)]}$ 为信号在 l 处的相关强度，显然对于有限个数的信号采样自相关矩阵 $\mathbf{R}_y(N_s)$,

$$2 \sum_{l=1}^{L-1} (L-l) \alpha_l$$

有 $\alpha_l = |\lambda(l)|$ 。再定义 $\gamma_L = \frac{2 \sum_{l=1}^{L-1} (L-l) \alpha_l}{L}$ 为基于采样自相关矩阵的用户信号总相关强度。表 1 给出了采用随机 BPSK 信号在不同的相关强度下的检测概率。仿真结果表明：信号相关程度越高，检测性能越好。因此对于信号相关程度弱的授权用户信号，可以用过采样的方法来增加其相关强度，进而提高检测概率。

表 1 接收信号相关强度与检测概率(BPSK 信号, $R_{SN}=-20$ dB)
Table 1 Detection probability and correlation strength(BPSK signal, $R_{SN}=-20$ dB)

overall correlation strength	$\gamma_L=3.298\ 8$	$\gamma_L=3.439\ 5$	$\gamma_L=3.837\ 9$	$\gamma_L=4.304\ 0$	$\gamma_L=7.058\ 0$
sampling frequency	$f_s=f_c$	$f_s=2f_c$	$f_s=3f_c$	$f_s=4f_c$	$f_s=5f_c$
P_d	0.082 0	0.247 0	0.903 0	1	1

4 结论

基于接收信号采样自相关的检测算法在瑞利衰落信道以及低信噪比环境下有很好的检测性能，只要使授权用户信号具有相关性，该检测方法对多种信号都将适用。能量检测法虽然不需要信号的先验信息，但需要精确估计噪声的功率，在实际中这很难做到；而本文所采用的检测方法不需要信号、信道的先验条件，因此具有更好的适用性和可行性。

参考文献：

- [1] Haykin S. Cognitive radio:brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Trans. on Communications, 2005,23(2):201-220.
- [2] Sahai A,Cabric D. Spectrum sensing:fundamental limits and practical challenges[C]// Proc. IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks(DySPAN), Baltimore,MD:[s.n.], 2005.
- [3] Zeng Yonghong,Liang Yingchang. Reliability of Spectrum Sensing Under Noise and Interference Uncertainty [J]. IEEE International Conference on ICC Workshops, 2009,1(1):165-170.
- [4] Zeng Y H,Liang Y C. Covariance Based Signal Detections For Cognitive Radio[J]. 2nd IEEE International Symposium in DySPAN, 2007,33(4):202-207.
- [5] 佩措尔德(德)著. 移动衰落信道[M]. 陈伟,译. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [6] Nikolay Kostov. Mobile Radio Channels Modeling In Matlab[J]. Radio Engineering, 2003,12(4):12-16.
- [7] Zheng Y R,Xiao C. Improved Models for the Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms[J]. IEEE Communications Letters, 2002,6(1):256-258.
- [8] 张伟,周劫. 强噪声背景下 DS-SS 信号检测技术[J]. 信息与电子工程, 2007,5(3):235-240. (ZHANG Wei,ZHOU Jie. Detection Techniques of DS-SS Signal Submerged in Heavy Noise[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(3):235-240.)
- [9] Digham F F,Alouini M S,Simon M K. On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007,55(1):21-24.

作者简介：



李 彬(1985-), 男, 湖南省常德市人, 在读硕士研究生, 研究方向为认知无线电中频谱感知技术.email:navybeckham@163.com.

陈跃斌(1963-), 男, 重庆市人, 教授, 硕士生导师, 研究方向为现代通信信号处理、信号检测与估计.

冯赛赛(1985-), 女, 石家庄市人, 在读硕士研究生, 研究方向为认知无线电技术.

郑 晟(1985-), 男, 湖南省耒阳市人, 在读硕士研究生, 研究方向为红外热成像技术.