



一种关于空间谱的两级多天线盲频谱检测

包志强, 崔妍蕊, 徐笑

(西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要: 为了提高感知性能, 将阵列空间谱搜索技术应用到频谱感知领域, 提出了一种基于空间谱谱值的两级盲频谱检测算法。首先利用空间谱的最大值和最小值作为检验统计量对频谱进行第一级检测, 然后对未检测出的部分利用空间谱均值特性做第二级检测。利用空域匹配滤波优势, 使新算法在低信噪比及低采样率下得到较高的检测概率。此外, 运用概率论, 准确推导出了检测门限的理论值。通过一系列仿真对比, 结果表明, TDSS 算法比现有一些经典盲频谱感知算法具有更好的检测效果。

关键词: 频谱感知; 阵列天线; 波达方向估计; 空域匹配滤波; 空间谱

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018090

A two level multi-antenna blind spectrum detection about spatial spectrum

BAO Zhiqiang, CUI Yanrui, XU Xiao

School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China

Abstract: In order to improve the perceptual performance, the array spatial spectrum search technology was applied to the spectrum sensing field. A blind spectrum detection algorithm based on two stage detection of spatial spectral values was proposed. Firstly, the maximum and minimum values of the spatial spectrum were used as the test statistics to detect the spectrum. Then the mean value of spatial spectrum for the undetected part was used in the second level detection. By using the advantage of the spatial matching filter, the new algorithm achieved higher detection probability under the low SNR and low sampling rate, and the threshold of detection was accurately deduced based on probability theory. The simulation and comparison results show that TDSS algorithm has better detection effects than some existing classical blind spectrum sensing algorithms.

Key words: spectrum sensing, antenna array, direction-of-arrival estimation, spatial matched filtering, spatial spectrum

收稿日期: 2017-08-15; 修回日期: 2018-01-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61271276, No.61301091); 陕西省自然科学基金资助项目 (No.2014JM8299)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61271276, No.61301091), The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No.2014JM8299)



1 引言

为充分有效利用现有频谱资源, 认知无线电^[1] (cognitive radio, CR) 技术是将具有一定感知能力的无线通信设备以某种机会方式接入已授权频段中, 并动态利用频谱。频谱感知 (spectrum sensing, SS) 即利用此技术来保证非授权用户在接入频谱时尽量少地对授权用户造成干扰^[2], 因此要尽量准确感知“频谱空洞”。

在认知无线网络中, 非授权用户持续检测频谱环境, 尽量准确地检测处于空闲状态的频带, 调整传输参数, 最大化利用频谱资源。较典型的检测方法包括能量检测法、匹配滤波器法、循环平稳特征检测法等。

能量检测法^[3]是最常见的频谱感知方法, 通过将接收信号的能量在一个时间段内累积, 然后与利用噪声信息计算出的门限值进行比较, 从而判断该频段是否有授权用户正在接入。能量检测法不需要知道授权用户信号先验知识, 但是, 噪声功率不是一成不变的, 这导致了噪声的不确定性^[4]。因此, 噪声功率难以准确估计, 将无法设定准确的判决门限, 严重影响了能量检测算法的性能。

若信号已知, 线性时不变滤波器输入为加性平稳噪声, 此时, 输出信噪比最大, 形成与输入信号相匹配的最佳滤波器, 称为匹配滤波器^[5]。但此方法只适用于具有已知信号模式的系统, 虽然在可靠性和收敛时间上优于能量检测法, 但对每种不同类型的授权用户信号, 需要设计不同的匹配滤波器。

在无线通信系统中, 如果授权用户信号先验知识是已知的, 可以利用循环平稳特征检测^[6]。这种方法可以区分授权用户信号和噪声, 但是计算复杂度太高。

上述算法都需要知道接收信号的先验知识或者噪声, 为了避免这些问题, 提出了全盲频谱感

知检测算法。比较通用的算法有基于特征值的检测 (eigenvalue-based detection) 算法^[7]、基于协方差的检测 (covariance-based detection) 算法^[8,9], 其中典型算法有基于协方差矩阵特征值分解的最大最小特征值之比 (the maximum-minimum eigen-value, MME) 的算法^[10]和方差绝对值 (the covariance absolute value, CAV) 算法。虽然这类的盲频谱感知算法不需要知道信号先验知识^[11], 但它们有的需要进行复杂的特征值分解运算, 有的只能给出统计的判决门限, 且需要较高采样率来提高检测概率^[8], 在低信噪比下检测性能较低。

以上提到的一些算法都有各自的优缺点, 但大多是在频域角度进行检测, 说明现存的一些算法对角度维的利用并不普遍, 基于此, 本文利用信号的角度维空间谱来寻找一种更高效的感知算法。又考虑到 AOA (到达角度) 估计中延迟—相加算法^[12]不需要估计信号数、也不被信源的相关性所影响。在此基础上, 本文提出了基于空间谱的盲频谱感知算法, 结合空域匹配滤波器^[12,13]原理, 利用多路信号的加权增益, 使新算法在低信噪比下也能有很高的检测概率。本文所提基于空间谱谱值两级检测 (two stage detection of spatial spectral values, TDSS) 的盲频谱感知算法不需要知道授权用户信号和噪声的先验知识, 并基于随机矩阵理论和概率论知识, 推导出检测阈值和检测概率的理论值。在低信噪比下提高算法的检测性能, 使频谱利用率更高^[14,15]。

2 系统模型和理论基础

2.1 系统模型

假设认知无线电设备含有一个由 M 个阵元组成的等距线阵 (uniform linear array, ULA), 现有一个独立发送的信号, 第 k 个时刻阵列接收到的信号为:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{a}(\theta)\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

其中, 方向矢量 $\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(M-1)d\sin\theta}]^H$, 噪声矢量 $\mathbf{n}(k) = [n_1(k), n_2(k), \dots, n_M(k)]^H$, $(\cdot)^H$ 表示共轭转置, θ 表示授权用户信号方向, d 表示阵元间距离, λ 为波长, j 为复数虚单位。

为检测接收信号中是否存在微弱的主信号, 构造一个二元假设检验^[16]问题如下:

$$\begin{aligned} H_1: \mathbf{x}(k) &= \mathbf{a}(\theta)\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \\ H_0: \mathbf{x}(k) &= \mathbf{n}(k), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, H_0 代表没有授权用户信号, 接收到的基带复合信号 $\mathbf{x}(k)$ 只包含加性高斯白噪声 $\mathbf{n}(k)$, $\mathbf{n}(k) \sim \text{CN}(0, \sigma_n^2)$, H_1 代表有授权用户信号, $\mathbf{x}(k)$ 包含授权用户信号 $\mathbf{s}(k)$ 和 $\mathbf{n}(k)$, N 表示快拍采样点数。

2.2 空域匹配滤波

在每一个阵元后都连有接收机对各个阵元接收到的信号进行采样, 然后加权再求和, 得到阵列的最终输出信号, 如图 1 所示。

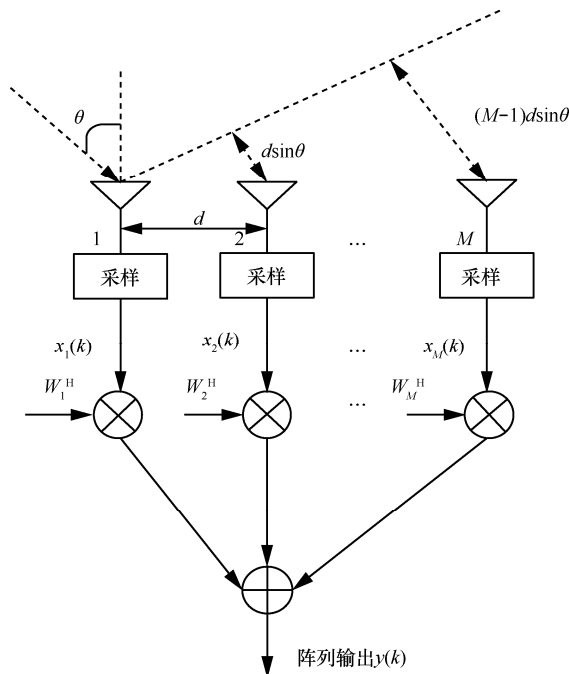


图 1 空域匹配滤波模型

阵列的输出信号为:

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(k)$$

输出功率为:

$$\begin{aligned} P(\mathbf{w}) &= E\{|\mathbf{y}(k)|^2\} \\ &= E\{|\mathbf{w}^H \mathbf{x}(k)|^2\} \\ &= \mathbf{w}^H E\{\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^H(k)\} \mathbf{w} \\ &= \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{R}_{xx}$ 是 $\mathbf{x}(k)$ 的自相关矩阵。

3 基于空间谱谱值的两级盲频谱检测算法

基于空间谱谱值的两级盲频谱感知算法是利用空间谱的最大值和最小值分别确定检验统计量对频谱做第一级双门限检测, 对第一级未检出的部分利用空间谱平均值做第二级检测。

3.1 接收信号空间谱

假设某个信号的入射角为 θ , 输出功率为:

$$\begin{aligned} P(\theta) &= E\{|\mathbf{w}^H \mathbf{x}(k)|^2\} \\ &= E\{|\mathbf{w}^H [\mathbf{a}(\theta)\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k)]|^2\} \\ &= |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta)|^2 \sigma_s^2 + \|\mathbf{w}^H\|^2 \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 授权信号功率 $\sigma_s^2 = E\{s^2(k)\}$, 噪声功率 $\sigma_n^2 = E\{n^2(k)\}$, $\mathbf{a}(\theta)$ 为入射方向 θ 对应方向矢量。

通过改变扫描方向 θ_i ($\theta_i \in [-90^\circ, 90^\circ]$), 对每个 θ_i 对应权矢量 $\mathbf{w} = \mathbf{a}(\theta_i)$, 则阵列输出 $\mathbf{y}(k)$ 的输出功率为:

$$P(\theta) = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} = \mathbf{a}^H(\theta_i) \mathbf{R}_{xx} \mathbf{a}(\theta_i) \quad (6)$$

则以扫描 θ_i 为参数变量的输出功率, $P(\theta_i)$ 为输出信号空间谱。

3.2 空间谱分布特性

在授权用户不存在 (H_0 条件) 时, $\mathbf{x}(k) = \mathbf{n}(k)$, 接收信号空间谱为:

$$\begin{aligned} P(\theta_i) &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} |a_i n_i(k)|^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |\mathbf{y}(k)|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中, a_i 和 $n_i(k)$ 分别是方向矢量 $\mathbf{a}(\theta_i)$ 和噪声 $\mathbf{n}(k)$ 的第 i 个元素。接收信号 $\mathbf{y}(k) =$



$\sum_{m=1}^M \mathbf{n}_m(k) e^{-j\pi(m-1)\sin(\theta_l)}$, 即 $\mathbf{y}(k)$ 是 $\mathbf{n}_m(k)$ 的线性组合,

满足高斯分布。即 $E[\mathbf{y}(k)] = 0$, $D[\mathbf{y}(k)] = M\sigma_n^2$, 则 $\mathbf{y}(k) \sim N(0, M\sigma_n^2)$ 。

根据卡方分布特点, $E\left[\frac{|\mathbf{y}(k)|^2}{M\sigma_n^2}\right] = 1$,

$D\left[\frac{|\mathbf{y}(k)|^2}{M\sigma_n^2}\right] = 2$, 则 $E[|\mathbf{y}(k)|^2] = M\sigma_n^2$, $D[|\mathbf{y}(k)|^2] =$

$2M^2\sigma_n^4$, 当 N 足够大时, 根据中心极限定理, 空间谱是相互独立的高斯随机变量, 即

$P(\theta_l) \sim N\left(M\sigma_n^2, \frac{2M^2\sigma_n^4}{N}\right)$, 归一化后得:

$$\frac{NP(\theta_l)}{M\sigma_n^2} \sim \chi_N^2 \quad (8)$$

即 $\frac{NP(\theta_l)}{M\sigma_n^2}$ 服从自由度为 N 的卡方分布。

3.3 确定检验统计量

对 $\theta_l \in [-90^\circ, 90^\circ]$ 内 L 个方向分别进行扫描时, M 个阵元可以在 L 个方向上接收到 L 个空间谱的检验统计量 $\frac{NP(\theta_l)}{M\sigma_n^2}$, 且相互独立。分别设为

$X_1, X_2, \dots, X_L$, 则 $X_1, X_2, \dots, X_L$ 是 L 个相互独立的随机变量, 且其分布函数均为自由度为 N 的卡方分布, 记为 $F(z)$, 概率密度函数记为 $f(z)$ 。

3.3.1 第一级检验统计量

假设 $X = \max(X_1, X_2, \dots, X_L)$, 由于 X 不大于 z 等价于 $X_1, X_2, \dots, X_L$ 都不大于 z , 又因为 $X_1, X_2, \dots, X_L$ 相互独立, 得到 X 的分布函数为:

$$\begin{aligned} F_{\max}(z) &= P(X \leq z) \\ &= P(X_1 \leq z, X_2 \leq z, \dots, X_L \leq z) \\ &= F_{X_1}(z) F_{X_2}(z) \cdots F_{X_L}(z) \\ &= [F(z)]^L \end{aligned} \quad (9)$$

基于上述特征, 构造检验统计量为:

$$T_{\max} = \max\left(\frac{NP}{M\sigma_n^2}\right) \quad (10)$$

同理, 设 $X = \min(X_1, X_2, \dots, X_L)$, 得到 X 的分布函数为:

$$\begin{aligned} F_{\min}(z) &= 1 - P(X > z) \\ &= 1 - P(X_1 > z, X_2 > z, \dots, X_L > z) \\ &= 1 - [1 - P\{X_1 \leq z\}][1 - P\{X_2 \leq z\}] \cdots [1 - P\{X_L \leq z\}] \\ &= 1 - [1 - F(z)]^L \end{aligned} \quad (11)$$

构造检验统计量为:

$$T_{\min} = \min\left(\frac{NP}{M\sigma_n^2}\right) \quad (12)$$

3.3.2 第二级检验统计量

利用接收信号空间谱值均值构造新的检验统计量为:

$$T_{ME} = \frac{N}{ML\sigma_n^2} \sum_{i=1}^L P_i \quad (13)$$

3.4 判决门限

利用接收信号空间谱最值构造的检验统计量进行第一级判决检测。

检验统计量 $T_{\max}$ 的概率密度函数为:

$$f_{\max}(z) = \frac{dF_{\max}(z)}{dz} = L[F(z)]^{L-1} f(z) \quad (14)$$

在虚警概率 P_f 给定的情况下推导判决门限为:

$$P_f = 1 - F_{T_{\max}}(\gamma_{\max}) = 1 - F^L(\gamma_{\max}) \quad (15)$$

$$\gamma_{\max} = F_{\chi^2}^{-1}[(1 - P_f)^{\frac{1}{L}}] \quad (16)$$

同理, 检验统计量 $T_{\min}$ 的概率密度函数为:

$$f_{\min}(z) = \frac{dF_{\min}(z)}{dz} = L[1 - F(z)]^{L-1} f(z) \quad (17)$$

$T_{\min}$ 判决门限为:

$$\gamma_{\min} = F_{\chi^2}^{-1}[1 - (P_f)^{\frac{1}{L}}] \quad (18)$$

所以, 规定第一级判决为:

$$\begin{cases} T_{\max} > \gamma_{\max}, & H_1 \\ T_{\min} < \gamma_{\min}, & H_0 \end{cases} \quad (19)$$

对第一级检测未能准确判决的部分, 利用空间谱均值进行第二级判决。

根据抽样分布定理, $T_{ME} \sim \chi_N^2$, 则判决门限为:

$$\gamma_{ME} = F_{\chi^2}^{-1}(1 - P_f) \quad (20)$$

第二级判决为:

$$T_{ME} \begin{cases} \geq \\ < \end{cases} \gamma_{ME} \quad (21)$$

3.5 算法步骤

基于以上理论分析, 本文提出基于空间谱最大最小值的两级检测盲频谱感知算法的步骤归纳如下。

(1) 计算接收信号的协方差矩阵, $R_x(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)x^H(k)$, 其中, N 为采样点数。

(2) 根据 $P(\theta_l) = a^H(\theta_l)R_x(N)a(\theta_l)$ 搜索空间谱的最大值 $P_{\max}$ 和 $P_{\min}$, 计算检验统计量式 (10) 和式 (12), 对给定的虚警概率 P_f , 计算判决门限值 (16) 及式 (18), 进行第一级判决。

(3) 为保证检测更加精确, 对第一级检测未能准确检出的部分, 利用新的检验统计量式 (18), 根据虚警概率计算判决门限值 (20) 并进行第二级判决。

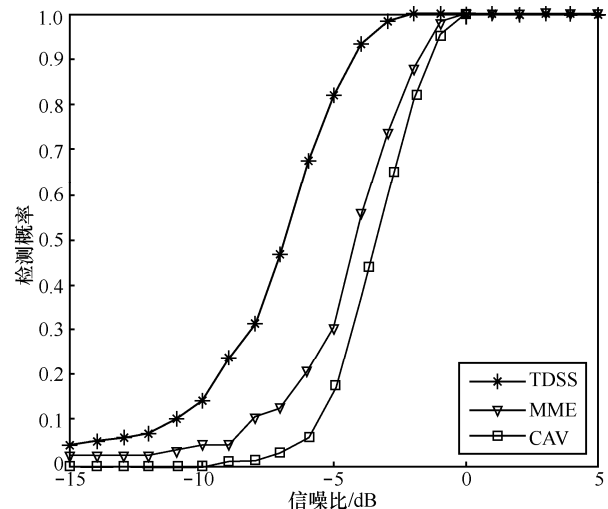
4 仿真结果及分析

4.1 仿真环境及工具

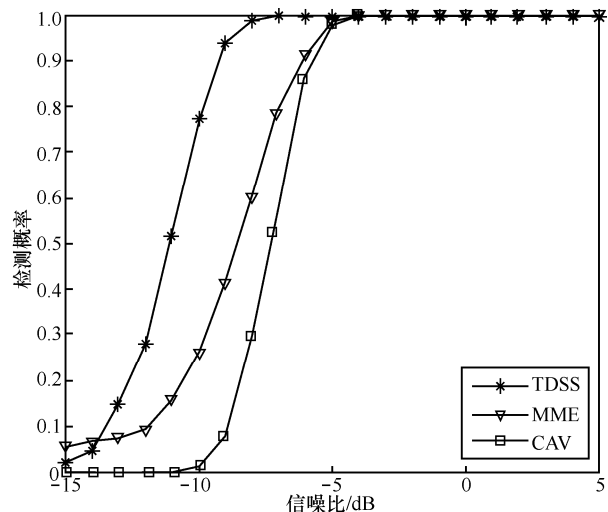
由于 TDSS 算法是全盲频谱感知算法, 现存此类算法中比较有代表性的有基于协方差矩阵特征值分解的 MME 算法和 CAV 算法。因此, 为了对 TDSS 算法效果进一步说明, 本次仿真针对多天线路谱感知模型, 对 TDSS 算法、MME 算法及 CAV 算法进行仿真比较。实验接收端采用均匀线阵, 阵元间距设置为半波长, 接收端噪声为加性高斯白噪声。信噪比 $SNR = 10 \lg(\sigma_s^2 / \sigma_n^2)$, 仿真结果用 100 000 次蒙特卡洛来实现, 仿真平台为 MATLAB (2012a)。

4.2 阵元数、采样点数在不同信噪比下对检测性能的影响

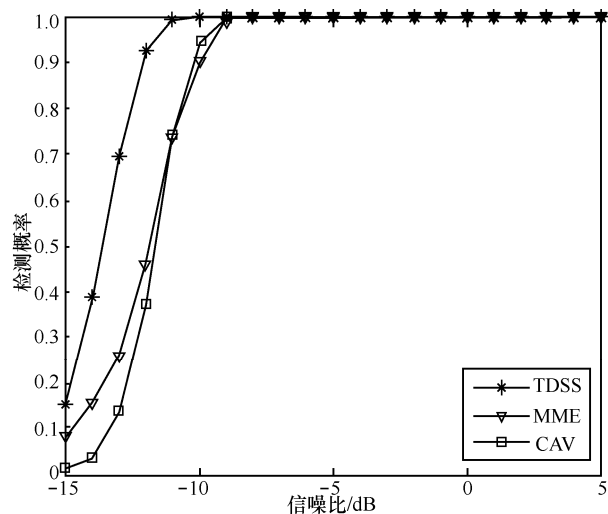
图 2 各分图表示 TDSS 算法和 CAV 算法、



(a) 阵元数为3, 采样点数为50



(b) 阵元数为8, 采样点数为50



(c) 阵元数为8, 采样点数为200

图2 几种算法检测性能随信噪比变化曲线



MME 算法检测概率随信噪比的变化曲线, 实验中设定虚警概率为 0.01。

如图 2 (a) 所示, TDSS 算法阵元数为 3, 采样点数为 50, 在信噪比约为 -3 dB 时检测概率先于 CAV、MME 算法达到 1, 在低信噪比下, TDSS 算法检测概率高于其他两种算法。

图 2 (b) 与图 2 (a) 比较, 阵元数由 3 提高到 8, 3 种算法的检测概率均有提高, 在信噪比小于 -5 dB 时, TDSS 算法检测概率高于 CAV 及 MME 算法, 且在信噪比约为 -8 dB 时检测概率优先达到 1。

图 2 (c) 与图 2 (b) 比较, 采样点数提高到 200, 信噪比为 -10 dB 时 TDSS 算法检测概率达到 1, 且在低信噪比下达到了较高的检测概率, 这是由于 TDSS 算法利用了信号的角度维空间匹配滤波原理, 在低信噪比下达到了较高的检测概率。

4.3 虚警概率理论值及实际值比较

图 3 (a) 表示当虚警概率为 0.01、阵元数 M 为 8、采样点数 N 为 150 时, 信噪比不同的条件下 3 种算法的检测概率及虚警概率的变化情况, 实线表示检测概率, 点线表示虚警概率。将图 3 (a) 虚警概率部分局部放大, 如图 3 (b) 所示, 其中

星形标记折线表示虚警概率实际值。

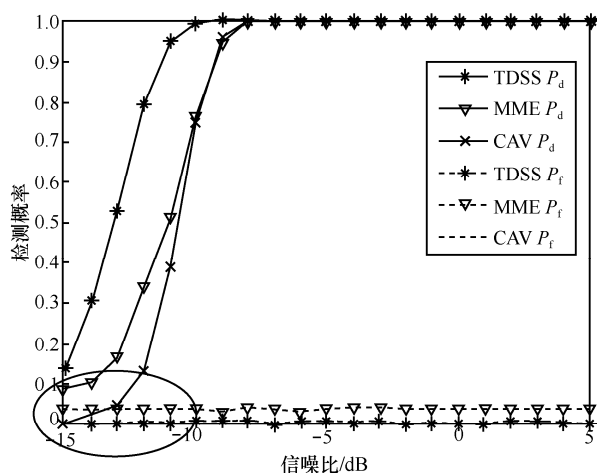
首先, 给定期望的虚警概率 0.01, 称为理论值, 将其代入公式求出其对应门限, 然后利用其门限进行检测, 得出实际的虚警概率, 最后对理论值和实际值进行比较。

由图 3 (b) 可以看出 TDSS 两级算法与 MME 算法对比, 实际得到的虚警概率总是小于或等于理论值, 达到了系统要求。

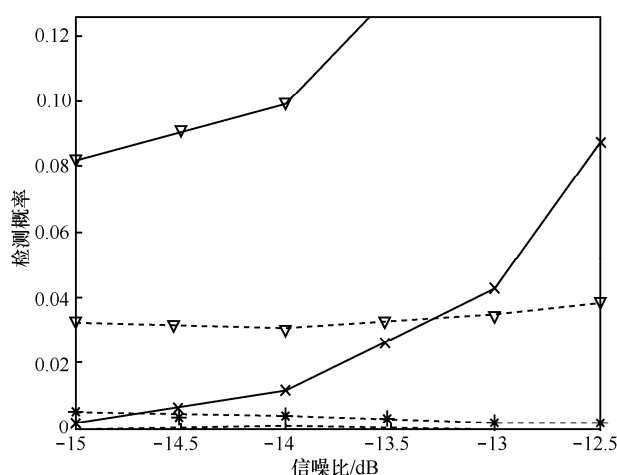
4.4 接收机工作特性曲线

图 4 各分图表示的是不同信噪比、采样点数及阵元数下接收机的工作特性曲线。为了方便观察, 虚警概率从 0 到 1, 比较不同情况下各算法的检测概率。

图 4 仿真结果表明, 在不同信噪比、阵元数和采样点数下, TDSS 算法在虚警概率为 0 时检测概率已接近 0.9, 且虚警概率在 0~0.1 波动时, 检测概率增加到接近于 1, 说明 TDSS 算法受到虚警概率的影响很小, 而其他两种算法在较低的虚警概率下检测概率比较低, 随虚警概率增加其波动范围较大。由此可知, TDSS 算法接收特性明显优于其他两种盲频谱感知算法。实际情况中, 可根据信噪比的高低选择合适的采样点数和阵元数, 以达到最优的检测概率。

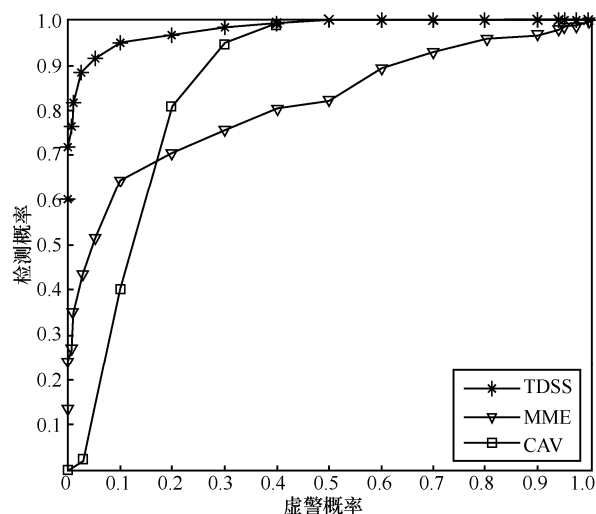


(a) 几种算法检测概率及虚警概率随信噪比变化曲线

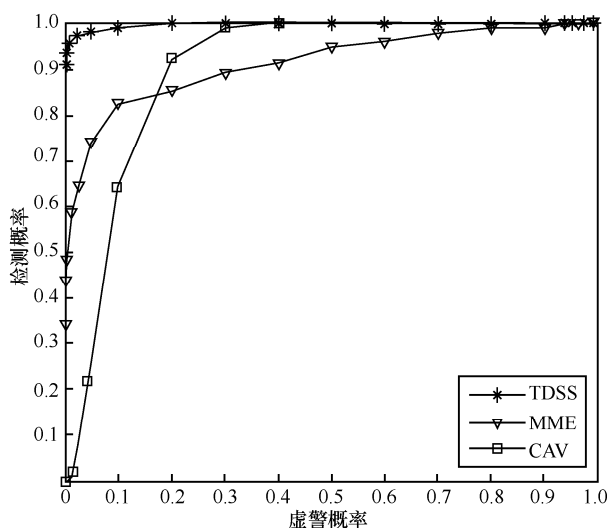


(b) 虚警概率局部放大效果

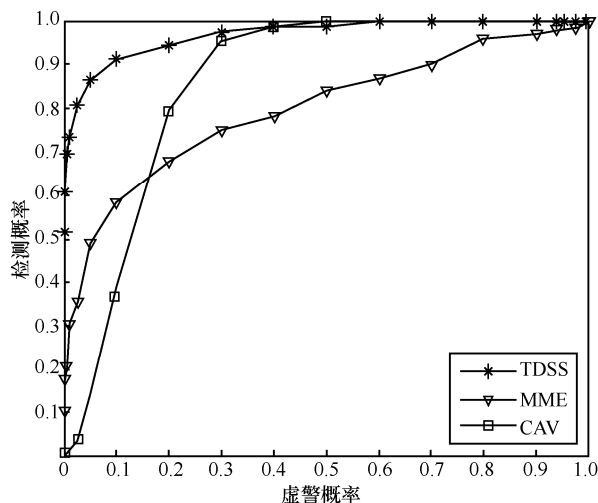
图 3 不同信噪比下的检测概率和虚警概率



(a) 阵元数为8, 采样点数为150, 信噪比为-13 dB



(b) 阵元数为8, 采样点数为150, 信噪比为-10 dB



(c) 阵元数为3, 采样点数为225, 信噪比为-15 dB

图4 接收机工作特性曲线(ROC)比较

5 结束语

本文提出了一种基于接收信号空间谱的两级盲频谱感知方法。算法通过扫描加权信号后的空间谱值,利用其在有无授权用户时不同的分布特性来检测频谱空洞。其优点是根据随机矩阵理论可以计算出准确的判决门限,且该算法在低采样点数下依然表现出强稳健性,第二级检测也不需增加额外的采样点数。仿真结果表明,TDSS算法与其他算法比较,既保留了其他算法的优点,又进一步将授权用户是否存在进行了有效判决,在低信噪比下也表现出了更优的检测性能和检测概率。

参考文献:

- [1] 毕志明, 匡镜明, 王华. 认知无线电技术的研究与发展[J]. 电信科学, 2006, 22(7): 57-60.
BI Z M, KUANG J M, WANG H. Research status and development trend of cognitive radio[J]. Telecommunications Science, 2006, 22(7): 57-60.
- [2] 吴伟, 张小飞. CRN 合作频谱感知 SSDF 攻击的博弈分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(6): 866-871.
WU W, ZHANG X F. Game theoretic analysis for cooperative spectrum sensing under SSDF attack in cognitive radio network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(6): 866-871.
- [3] 付彩梅, 李有明, 周桂莉, 等. 一种基于能量检测的协作式频谱感知算法[J]. 电信科学, 2016, 22(9): 52-60.
FU C M, LI Y M, ZHOU G L, et al. A new cooperation spectrum sensing algorithm based on energy detection[J]. Telecommunications Science, 2016, 22(9): 52-60.
- [4] 富爽, 李一兵, 叶方, 等. 基于频域 Katz 分形维数的快速盲频谱感知[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(1): 155-161.
FU S, LI Y B, YE F, et al. Fast blind spectrum sensing based on Katz fractal dimension infrequency domain[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(1): 155-161.
- [5] UBAID U R, DAHLHAUS D, HUNZIKERE T, et al. Cooperative cognitive spectrum sensing using optimized DFT filter banks[C]//IEEE Symp. Commun. Veh. Technol. in the Benelux, IEEE SCVT, Nov 10, 2014, Delft, Netherlands. Piscataway: IEEE Press, 2015: 121-126.
- [6] RAKOVIC K, DENKOVSKI D, ATANASOVSKI V, et al. Capacity-aware cooperative spectrum sensing based on noise power estimation[J]. IEEE Transactions on Communications,



- 2015, 63(7): 2428-2441.
- [7] 杨雪梅, 何希, 徐家品. 基于 Wishart 矩阵特征值的频谱感知算法[J]. 电信科学, 2017, 33 (9): 69-75.
YANG X M, HE X, XU J P. Spectrum sensing algorithm based on the eigenvalue of Wishart random matrix[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(9): 69-75.
- [8] KHALD L, ANPALAGAN A. Adaptive assignment of heterogeneous users for group-based cooperative spectrum sensing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(1): 232-246.
- [9] ZHANG R, TENG J L, LIANG Y C, et al. Multi-antenna based spectrum sensing for cognitive radios: a GLRT approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(1): 84-88.
- [10] 弥寅, 卢光跃. 基于特征值极限分布的合作频谱感知算法[J]. 通信学报, 2015, 36(1): 1-6.
MI Y, LU G Y. Cooperative spectrum sensing algorithm based on limiting eigenvalue distribution[J]. Journal on Communications, 2015, 36(1): 1-6.
- [11] 何智勇. 认知无线电中一种改进的 AVC 频谱感知算法[J]. 电信科学, 2017, 33(2): 98-103.
HE Z Y. Modified absolute value cumulating spectrum sensing algorithm in cognitive radio[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(2): 98-103.
- [12] 赵德功. 基于类 MUSIC 算法的 DOA 估计算法[J]. 舰船电子对抗, 2016, 39(6): 69-72, 82.
ZHAO D G. DOA estimation algorithm based on MUSIC-like[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2016, 39(6): 69-72, 82.
- [13] ZENG Y H, LIANG Y C. Spectrum-sensing algorithms for cognitive radio based on statistical covariances [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(4): 1804-1815.
- [14] TSAKALAKI E P, ALRABADI O N, PAPADIAS C B, et al. Spatial spectrum sensing for wireless handheld terminals: design challenges and novel solutions based on tunable parasitic antennas dynamic spectrum management[J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(4): 33-40.
- [15] WILCOX, TSAKALAKI E, KORTUN A, et al. On spatial domain cognitive radio using single-radio parasitic antenna array [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(3): 571-580.
- [16] 邱恭安, 章国安. 业务感知的自适应协作频谱感知算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 866-872.
QIU G A, ZHANG G A. Service awareness based adaptive cooperative spectrum sensing algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(4): 866-872.

[作者简介]



包志强 (1978-), 男, 博士, 西安邮电大学副教授, 主要研究方向为阵列信号处理、高速信号处理。



崔妍蕊 (1992-), 女, 西安邮电大学硕士生, 主要研究方向为信号与信息处理、无线电频谱感知技术。



徐笑 (1992-), 女, 西安邮电大学硕士生, 主要研究方向为信号与信息处理、阵列信号处理。