

认知 MIMO 系统频谱检测与吞吐量折中*

罗丽平^{1,2}, 李学易³, 秦家银¹

- (1. 中山大学信息科学与技术学院, 广东 广州 510006;
2. 广西民族大学信息科学与工程学院, 广西 南宁 530006;
3. 广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 研究了认知 MIMO 系统频谱检测与吞吐量折中问题, 以最大化 SU (Secondary User) 吞吐量为目标, 求解出最佳的频谱检测时间和最优功率分配方案。仿真结果表明, 存在最佳检测时间使 SU 的吞吐量达到最大, 并且通过注水法功率分配, 能进一步提高 SU 的吞吐量。此外, 通过仿真比较了能量检测和基于特征值的频谱检测算法对 SU 吞吐量的影响, 结果表明, 采用两种算法 SU 的吞吐量几乎相等, 由于基于特征值的频谱检测算法更具有健壮性, 因而更适合应用于认知 MIMO 系统。

关键词: 认知无线电; 最优频谱检测时间; 吞吐量最大化; 功率分配; 折中

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2012) 02-0006-06

Spectrum Sensing and Throughput Tradeoff for Cognitive MIMO System

LUO Liping^{1,2}, LI Xueyi³, QIN Jiayin¹

- (1. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;
2. Department of Information Science and Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China;
3. Faculty of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Spectrum sensing-throughput tradeoff is investigated for a cognitive MIMO system. The objective is to find the optimal spectrum sensing time and optimal power allocation to maximize the throughput of secondary user. Simulation results show that there is indeed a unique optimal sensing time to make the throughput achieve the maximum. Further, the throughput of SU can be improved by using optimal power allocation. The throughput of SU with different spectrum sensing algorithms including energy detection and eigenvalue-based detection is compared by simulations. The results show that the eigenvalue-based detection is very appropriate for cognitive MIMO system, which is not only more robust than energy detection, but also satisfies the requirement of throughput.

Key words: cognitive radio; optimal spectrum sensing time; throughput maximization; power allocation; tradeoff

随着无线通信业务量和新技术的快速发展, 频谱需求日益增长, 频谱资源变得极其紧张。然而, 美国联邦通信委员会 (FCC) 的研究报告指出^[1], 在当前固定的频谱分配政策下, 频谱利用率不到

* 收稿日期: 2011-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61173148); 广东省产学研重大资助项目 (2010A090200057); 广州市科技计划资助项目 (11A 11060133); 广西民族大学科研基金资助项目 (2011MDYB037)

作者简介: 罗丽平 (1980 年生), 女, 博士生, 讲师; 通讯作者: 秦家银; E-mail: issqjy@mail.sysu.edu.cn

15%, 存在大量空闲频谱。为有效利用空闲频谱, 认知无线电 (CR: Cognitive Radio) 技术应运而生^[2]。通过 CR 技术, 次用户 SU (Secondary User) 可以伺机利用主用户 PU (Primary User) 的空闲频谱, 从而提高频谱利用率。频谱检测是认知无线电的关键技术之一。频谱检测的性能对 PU 和 SU 都会产生影响, 通常采用检测概率 (P_d) 和虚警概率 (P_f) 作为频谱检测性能的衡量指标。从 PU 的角度来讲, 希望检测概率越大越好, 从而减少来自 SU 的干扰; 从 SU 的角度来讲, 希望虚警概率越小越好, 这样可以获得更多的频谱利用机会, 从而达到更高的吞吐量。影响频谱检测性能的主要参数有检测时间, 判决门限等。以检测时间为例, 延长检测时间, 可以提高频谱检测性能, 降低虚警概率, 获得更多的频谱利用机会, 从而提高吞吐量; 但另一方面, 用于数据传输的时间缩短, 又会降低 SU 的吞吐量。因此在检测时间和吞吐量之间存在折中。寻找最优的频谱检测参数以最大化 SU 的吞吐量同时尽可能减少对 PU 的干扰是目前 CR 频谱检测新的研究点。

文献 [3] 首次研究了 CR 系统中频谱检测 - 吞吐量折中的问题, 研究表明确实存在一个最佳的检测时间使次用户的吞吐量达到最大。文献 [4 - 5] 进一步研究了协作频谱检测与吞吐量折中的问题, 在满足一定的检测概率的条件下求解最优的检测时间和融合中心判决门限值。文献 [6] 以最大化 PU 和 SU 的和吞吐量为目标, 寻找最优的融合规则。文献 [7] 解决了在满足发射功率和干扰功率约束条件下频谱检测时间和 SU 吞吐量的折中问题。上述文献对频谱检测 - 吞吐量折中问题进行了深入的研究, 然而频谱检测算法都是基于能量检测^[8], 并且 SU 采用单天线模型。对于 SU 采用多天线的模型, 文献 [9 - 11] 提出了基于特征值的频谱检测算法, 这些算法的检测性能比能量检测稍差, 其优点是不受噪声不确定性的影响^[12], 不需要知道 PU 信号信息和信道状态信息 (CSI), 更具有健壮性。由此看出, 利用多天线为频谱检测提供了空间分集增益。但文献没有从吞吐量的角度对能量检测和基于特征值的检测算法进行比较分析, 并且没有利用到 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 系统的复用增益。

本文将 MIMO 与 CR 技术结合, 研究认知 MIMO 系统频谱检测和吞吐量折中问题, 除了寻找最优的检测时间外, 还结合注水法功率分配, 进一步提高 SU 的吞吐量。此外, 本文从吞吐量的角度比

较分析了能量检测和基于特征值的频谱检测算法。研究表明, 尽管基于特征值的检测算法在性能方面比能量检测算法稍差^[9-11], 但是通过优化频谱检测时间, SU 采用这两类检测算法能获得相同的吞吐量, 且基于特征值的检测算法更具有健壮性, 因此, 在认知 MIMO 系统中, 更适合采用基于特征值的频谱检测算法。

1 系统模型

IEEE802.22 是第一个利用认知无线电技术的无线通信标准^[13], 也称为无线区域网 (WRAN: Wireless Regional Area Networks), 它利用 54 ~ 862 MHz 的 UHF/VHF 广播电视 (TV) 频段, 服务距离可达到 100 km。主用户是广播电视用户, 次用户包括 WRAN 基站和至少一个 WRAN 用户设备。本文系统模型基于 802.22 标准建立, 如图 1 所示, 包括一个认知基站 (CBS: Cognitive Base Station) 和一个 SU 设备, 其中 CBS 安装有 M_i 根天线, SU 安装有 M_r 根天线, 构成了一个认知 MIMO 系统。

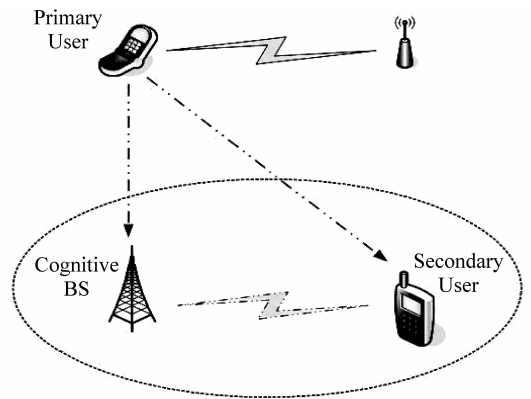


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

CBS 负责进行频谱检测, 接收信号描述如下:

$$H_0: x_i(n) = w_i(n), i = 1, 2, \dots, M_i$$

$$H_1: x_i(n) = h_{pi}s_p(n) + w_i(n), n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中 N 为采样点数, 与检测时间 τ 和采样频率 f_s 有关, $N = \tau f_s$ 。设 $s_p(n)$ 为 PU 信号, 调制方式为 QPSK, $E[|s_p(n)|^2] = P_p$ 。 $w_i(n)$ 为加性高斯白噪声, 服从 $w_i(n) \sim CN(0, \sigma_w^2)$ 。 h_{pi} 为 PU 发射机到 CBS 第 i 根天线的信道增益系数, 服从独立的 Rayleigh 分布, 假设 h_{pi} 为慢变信道, 在检测时间段内为一常数。接收信号用矩阵形式表示为 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}(1), \dots, \mathbf{x}(N)] \in \mathbf{C}^{M \times N}$ 。

2 数学模型与求解

2.1 频谱检测算法

由引言可知, 在多天系统通常可以采用能量检测和基于特征值的频谱检测算法。以下给出这两种算法的描述。

1) 能量检测^[3]。

$$T_{ED} = \frac{1}{M_t N} \sum_{i=1}^{M_t} \sum_{n=1}^N \|x_i(n)\|^2 \geq \varepsilon \quad (2)$$

其中 ε 为判决门限。当 N 取较大值时, 由中心极限定理可知, T_{ED} 近似服从高斯分布:

$$T_{ED} \sim \begin{cases} N(\sigma_w^2, \frac{1}{M_t N} \sigma_w^4), & H_0 \\ N(\sigma_w^2(\gamma_p + 1), \frac{1}{M_t N} \sigma_w^4(2\gamma_p + 1)), & H_1 \end{cases} \quad (3)$$

其检测概率和虚警概率为:

$$P_d(\varepsilon, \tau) = Q\left(\frac{\sqrt{M_t \tau f_s}}{2\gamma_p + 1} \left(\frac{\varepsilon}{\sigma_w^2} - \gamma_p - 1\right)\right) \quad (4)$$

$$P_f(\varepsilon, \tau) = Q\left(\frac{\sqrt{M_t \tau f_s}}{\sigma_w^2} (\varepsilon - 1)\right) =$$

$$Q\left(\sqrt{2\gamma_p + 1} Q^{-1}(P_d(\varepsilon, \tau)) + \sqrt{M_t \tau f_s} \gamma_p\right) \quad (5)$$

由此可以看出, 频谱检测性能与检测时间和判决门限有关。

2) 基于特征值的频谱检测。

多天线可以带来空间分集, 借助多天线可以提高频谱检测的健壮性。当 SU 未知 PU 信号信息, 噪声方差和信道 CSI 时, 文献 [9-11] 基于 GLRT 准则提出了 3 种基于特征值的频谱检测算法, 描述如下:

$$T_{MME} = \frac{\hat{\lambda}_{\max}}{\hat{\lambda}_{\min}} > \varepsilon, T_{AGM} = \frac{\frac{1}{M_t} \sum_{i=1}^{M_t} \hat{\lambda}_i}{\left(\prod_{i=1}^{M_t} \hat{\lambda}_i\right)^{\frac{1}{M_t}}} > \varepsilon, \quad (6)$$

$$T_{GLRT} = \frac{\hat{\lambda}_{\max}}{\sum_{i=1}^{M_t} \hat{\lambda}_i} > \varepsilon \quad (7)$$

其中 $\hat{\lambda}_m$ 是样本协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_x = \frac{1}{N} \mathbf{X}\mathbf{X}^H$ 的特征值。

文献 [9-10] 应用 Wishart 矩阵理论对基于特征值的频谱检测算法进行了近似性能分析, 在此不再赘述。

本文以能量检测为例进行理论分析, 研究频谱检测和吞吐量折中问题, 通过仿真比较说明能量检测和基于特征值的频谱检测算法对吞吐量的影响。

2.2 SU 吞吐量表达式

图 2 给出了认知无线网络周期性频谱检测的

帧结构, 包括检测时间和数据传输时间 $T - \tau$ 。在时间 τ 内, CBS 执行频谱检测, 一旦检测到有空闲频谱, SU 就进行数据传输。由于频谱检测存在虚警和漏检, 数据传输需分两种情况讨论。

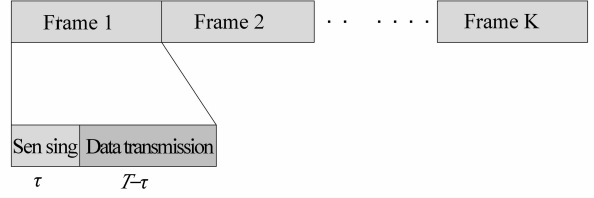


图 2 帧结构

Fig. 2 Frame structure

1) 实际为 H_0 , 检测结果也为 H_0 , $Pr[H_0 | H_0] = 1 - P_f(\varepsilon, \tau)$ 。

SU 接收信号为: $\mathbf{X}_s = \mathbf{H}_s \mathbf{S}_s + \mathbf{v}$, \mathbf{H}_s 为 CBS 到 SU 间的信道增益矩阵, \mathbf{S}_s 为 CBS 发射信号, 平均发射功率约束为 P_s , \mathbf{v} 为 SU 端加性高斯白噪声, 服从 $\mathbf{v} \sim CN(0, \sigma_v^2 \mathbf{I}_{M_r})$ 。SU 的数据速率为^[14]

$$C_0(P_i) = E_H \left(\sum_{i=1}^{R_H} \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_i^2 P_i}{\sigma_v^2} \right) \right) \quad (8)$$

其中 $R_H = \min(M_t, M_r)$, σ_i 为信道矩阵 \mathbf{H}_s 的奇异值。

吞吐量为

$$R_0(\varepsilon, \tau, P_i) = \frac{T - \tau}{T} C_0(P_i) (1 - P_f(\varepsilon, \tau)) Pr(H_0) \quad (9)$$

2) 实际为 H_1 , 检测结果为 H_0 , $Pr[H_0 | H_1] = 1 - P_d(\varepsilon, \tau)$ 。

此种情况下, PU 信号对 SU 会产生干扰, SU 接收信号为: $\mathbf{X}_s = \mathbf{H}_s \mathbf{S}_s + \mathbf{H}_{ps} \mathbf{S}_p + \mathbf{v}$, \mathbf{H}_{ps} 为 PU 到 SU 间的信道增益向量。SU 的数据速率为

$$C_1(P_i) = E_H \left(\sum_{i=1}^{R_H} \log_2 \left(1 + \frac{\sigma_i^2 P_i}{\sigma_v^2 + P_p |h_{ps}|^2} \right) \right) \quad (10)$$

吞吐量为

$$R_1(\varepsilon, \tau, P_i) = \frac{T - \tau}{T} C_1(P_i) (1 - P_d(\varepsilon, \tau)) Pr(H_1) \quad (11)$$

(7) 和 (9) 式中 $Pr(H_0)$ 、 $Pr(H_1)$ 分别为 PU 处于 H_0 、 H_1 状态的先验概率。由 (7) 和 (9) 式得 SU 的平均吞吐量为 $R(\varepsilon, \tau, P_i) = R_0(\varepsilon, \tau, P_i) + R_1(\varepsilon, \tau, P_i)$ 。由此看出 SU 的吞吐量与检测时间, 判决门限和功率分配有关。

2.3 频谱检测与吞吐量优化

研究频谱检测和吞吐量折中问题的目标是寻找最优的检测参数 (ε, τ) 和功率分配方案使 SU 的吞吐量达到最大, 同时尽可能减少对 PU 的干扰。优化问题描述如下:

$$\begin{aligned} \max_{\varepsilon, \tau, P_i} R(\varepsilon, \tau, P_i) &= R_0(\varepsilon, \tau, P_i) + R_1(\varepsilon, \tau, P_i) \\ \text{s. t. } P_d(\varepsilon, \tau) &\geq \bar{P}_d \\ \sum_i P_i &\leq P_s \end{aligned} \quad (10)$$

其中 \bar{P}_d 是目标检测概率, 为了减少对 PU 的干扰, 要求 \bar{P}_d 越大越好, 但 \bar{P}_d 必须小于或等于 1, 如在 IEEE802.22 WRAN 系统中, 在 SNR 为 -20 dB 时要求 $\bar{P}_d = 0.9$ 。由于功率变量 P_i 与 τ, ε 是相互独立的, 上述优化问题可分解成两个独立的子问题:

P1: (频谱检测参数优化)

$$\begin{aligned} \max_{\varepsilon, \tau} R(\varepsilon, \tau) &= R_0(\varepsilon, \tau) + R_1(\varepsilon, \tau) \\ \text{s. t. } P_d(\varepsilon, \tau) &\geq \bar{P}_d \quad 0 \leq \tau \leq T \end{aligned} \quad (11)$$

P2: (功率分配)

$$\max_{P_i} C_0(P_i), C_1(P_i) \text{ s. t. } \sum_i P_i \leq P_s \quad (12)$$

2.3.1 P1 求解 当给定 $C_0(P_i)$ 和 $C_1(P_i)$ 时, 在 $\bar{P}_d(\varepsilon, \tau) = \bar{P}_d$ 处 P1 取得最优解。理由如下: 对于给定频谱检测时间 τ , 存在判决门限 ε_0 满足 $\bar{P}_d(\varepsilon, \tau) = \bar{P}_d$ 。若选择另一门限值 $\varepsilon_1 < \varepsilon_0$, 由 (3)、(4) 式知, P_d, P_f 为 ε 的减函数, 则 $\bar{P}_d(\varepsilon_1, \tau) > \bar{P}_d$, $\bar{P}_f(\varepsilon_1, \tau) > \bar{P}_f(\varepsilon_0, \tau)$ 。从 (7)、(9) 式可知, 有 $R_0(\varepsilon_1, \tau) < R_0(\varepsilon_0, \tau), R_1(\varepsilon_1, \tau) < R_1(\varepsilon_0, \tau)$ 。因此, 当 $P_d(\varepsilon_1, \tau) = \bar{P}_d$ 时, (11) 式取得最优解, 此时 ε 可表示为

$$\varepsilon = \left(\sqrt{\frac{2Y_p + 1}{M_i \tau f_s}} Q^{-1}(\bar{P}_d) + Y_p + 1 \right) \delta_w^2 \quad (13)$$

将 (13) 式代入 (11) 式, P1 转化为变量仅为 τ 的优化问题,

$$\begin{aligned} \max_{\tau} R(\tau) &= \frac{T - \tau}{T} \\ C_0(1 - Q(\sqrt{2Y_p + 1} Q^{-1}(\bar{P}_d) + \sqrt{M_i \tau f_s Y_p})) \\ &+ \frac{T - \tau}{T} C_1(1 - \bar{P}_d) P(H_1) \\ \text{s. t. } 0 &\leq \tau \leq T \end{aligned} \quad (14)$$

文献 [4] 已证明, $R(\tau)$ 为的凹函数, 在 $0 \leq \tau \leq T$ 区间内存在唯一最优解。因此可以采用二分法求得最优检测时间 τ_{opt} 。

2.3.2 P2 求解 将 (6) (8) 代入 (12) 式得到 P2 的表达式为:

在 H_0 情况下:

$$\begin{aligned} \max_{P_{0i}} C_0(P_{0i}) &= E_H \left(\sum_{i=1}^{RH} \log_2 \left(1 + \frac{\delta_i^2 P_{0i}}{\delta_v^2} \right) \right) \\ \text{s. t. } \sum_i P_{0i} &\leq P_s \end{aligned} \quad (15)$$

在 H_1 情况下:

$$\begin{aligned} \max_{P_{1i}} C_1(P_{1i}) &= E_H \left(\sum_{i=1}^{RH} \log_2 \left(1 + \frac{\delta_i^2 P_{1i}}{\delta_v^2 + P_p |h_{ps}|^2} \right) \right) \\ \text{s. t. } \sum_i P_{1i} &\leq P_s \end{aligned} \quad (16)$$

对 (15) (16) 式采用经典的注水法可得到最优功率分配^[14]。令 $\gamma_{0i} = \frac{\delta_i^2 P_{0i}}{\delta_v^2}, \gamma_{1i} = \frac{\delta_i^2 P_{1i}}{\delta_v^2 + P_p |h_{ps}|^2}$, 最优功率分配为

$$P_{ji} = \begin{cases} \left(\frac{1}{\gamma_0} - \frac{1}{\gamma_{ji}} \right) P_s, & \gamma_{ji} > \gamma_0 \\ 0, & \gamma_{ji} < \gamma_0 \end{cases}, j = 0, 1 \quad (17)$$

频谱检测与吞吐量优化过程总结如下:

- 1) 依据 (17) 式, 采用注水法求出最优功率分配 P_{0i}, P_{1i} , 从而得出 C_0 和 C_1 ;
- 2) 求解 (14) 式, 采用二分法搜索出最优检测时间 τ_{opt} ;
- 3) SU 获得的最大吞吐量为 $R_{\text{max}} = R_0(\tau_{\text{opt}}, P_{0i}) + R_1(\tau_{\text{opt}}, P_{1i})$ 。

3 仿真结果与分析

仿真参数设置如下^[3]: PU 信号调制方式为 QPSK, 采样频率为 $f_s = 6$ MHz, 帧周期 $T = 100$ ms, 目标检测概率 $f_s = 6$ MHz, $T = 100$ ms, 定义 $\bar{P}_d = 0.9, Pr(H_1) = 0.2$, 定义 $\gamma_p = \frac{P_p}{\sigma_w^2} = -15$ dB, $\gamma_s = \frac{P_s}{\sigma_v^2} = 20$ dB, SU 端天线数为 $M_r = 2$ 。本节通过仿真进一步说明频谱检测时间与吞吐量折中问题, 并比较分析能量检测和基于特征值的频谱检测对系统吞吐量的影响。

图 3 给出了能量检测的 ROC (Receiver Operating Characteristics) 曲线。从图看出, 延长检测时间, 使得观察数据样本数增多, 因而频谱检测的性能大大提高。

图 4 给出了不同取值下最佳检测时间 τ_{opt} 的收敛情况。本文采用二分法在 $[0, T]$ 范围内进行搜索, 结果表明确实存在唯一的最佳检测时间使 SU 吞吐量达到最大, 且收敛速度快。从图看出, 最佳检测时间值约为 $\tau_{\text{opt1}} = 2.56$ ms, $\tau_{\text{opt2}} = 1.29$ ms, $\tau_{\text{opt4}} = 0.65$ ms。

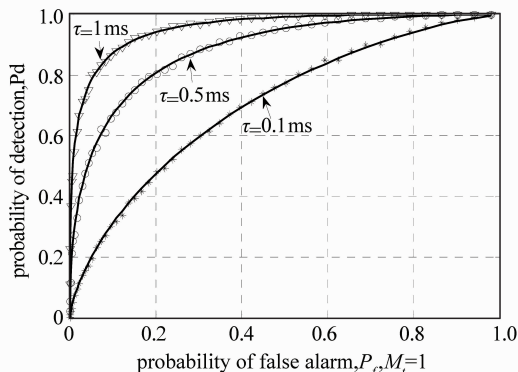


图 3 能量检测 ROC 曲线

Fig. 3 ROC curve of Energy Detection

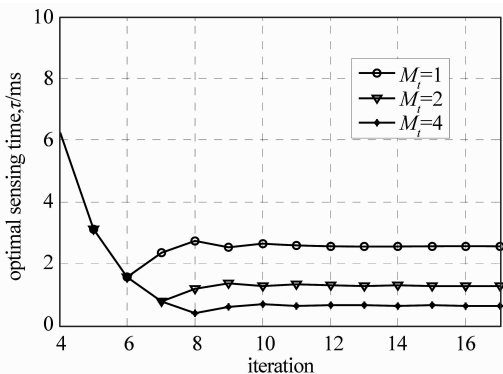


图 4 最佳检测时间

Fig. 4 Optimal sensing time

图 5 给出了 AWGN 信道下吞吐量随检测时间变化的曲线。从仿真结果看出, SU 吞吐量随检测时间 τ 先变大后变小, 说明确实存在最佳的检测时间 τ_{opt} 使 SU 吞吐量达到最大, 并且 τ_{opt} 的取值与图 4 一致。虽然延长检测时间可以提高检测性能, 但从吞吐量的角度来讲, 检测时间并不是越长越好。从图 5 还可以看出, M_i 越大, 吞吐量越大, 所需

的最佳检测时间 τ_{opt} 越短, 说明增加用于检测的天线数有利于提高频谱检测性能和吞吐量。但是随着检测时间 τ 的延长, 增加天线数并不能改善吞吐量, 原因在于当 τ 取较大值时, 虚警概率 $P_f \rightarrow 0$, 吞吐量仅取决于 SU 的数据速率, 当 $M_r = 2$ 时, 复用增益为 $\min(M_i, M_r)$, 故在 $M_i = 2$ 和 $M_i = 4$ 时 SU 的吞吐量相等, 但在最佳 τ_{opt} 时, $M_i = 4$ 时 SU 的吞吐量还是略大于 $M_i = 2$ 的吞吐量。

图 6 给出了 Rayleigh 信道下吞吐量随检测时间变化的曲线。从图 6 得出, 在 Rayleigh 信道下最优检测时间约为 $\tau_{opt1} = 14$ ms, $\tau_{opt2} = 6$ ms, $\tau_{opt4} = 2$ ms。结合图 5 比较得出, Rayleigh 信道条件下最优检测时间比 AWGN 信道长, 这说明在衰落环境下需要通过延长检测时间来达到相同的检测性能, 付出的代价是吞吐量会下降。图 6 还给出了在时最优功率分配 (实线) 和平均功率分配 (点划线) 情况下的吞吐量。从结果看出, 采用最优功率分配策略大大提高了 SU 的吞吐量。但是, 不同功率分配策略下 τ_{opt} 是相同的, 说明检测时间与功率分配无关, 因此在求解优化问题时将其分成两个独立的子问题求解是合理的。

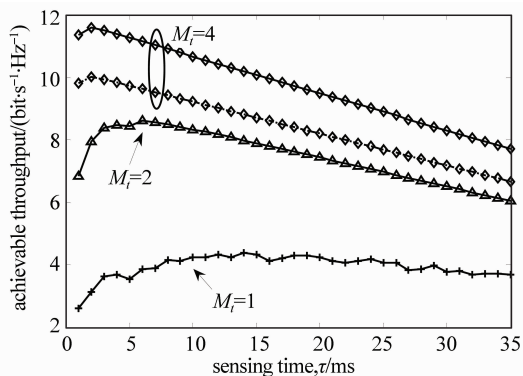


图 6 吞吐量 - 检测时间曲线, Rayleigh 信道

Fig. 6 Throughput-sensing time curve, Rayleigh channel

图 7 给出了分别采用能量检测和基于特征值的检测 (包括 MME、AGM 和 GLRT) 时 SU 的吞吐量。在检测时间 τ 较小时, 虽然采用能量检测 (ED) 获得的吞吐量较大, 但是当 $\tau > \tau_{opt}$ 时, 采用这两类检测方法获得的吞吐量几乎相等。因此, 尽管能量检测的性能较好, 但由于基于特征值的检测算法所需的先验信息较少, 并且吞吐量不受影响, 所以对于认知 MIMO 系统, 更适合采用基于特征值的频谱检测方法。

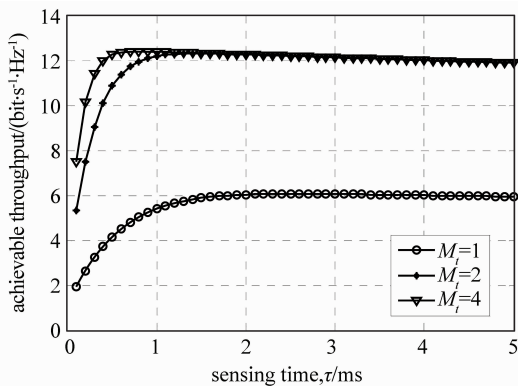


图 5 吞吐量 - 检测时间曲线, AWGN 信道

Fig. 5 Throughput-sensing time curve, AWGN channel

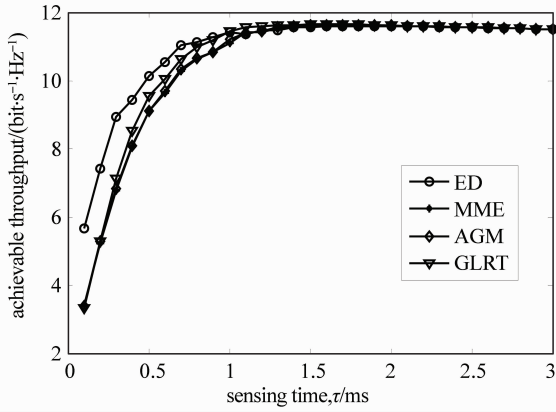


图 7 不同频谱检测方法的吞吐量比较,
Rayleigh 信道, $M_t = 4$

Fig. 7 Throughput comparison of different spectrum
sensing methods, Rayleigh channel, $M_t = 4$

4 结 论

本文研究了认知 MIMO 系统的频谱检测时间与吞吐量折中问题, 将检测时间和吞吐量优化问题分离成两个独立的子问题, 采用二分法快速求出最佳的频谱检测时间, 采用注水法得到最优的功率分配方案, 从而使 SU 的吞吐量达到最优。实验结果显示确实存在唯一 τ_{opt} 使 SU 的吞吐量取得最大值, 并且采用最优功率分配能大大提高 SU 的吞吐量。此外, 通过仿真比较了采用能量检测和基于特征值的频谱检测方法 SU 获得的吞吐量, 结果表明, 在 $\tau \geq \tau_{opt}$ 时采用这两类方法 SU 的吞吐量几乎相等, 说明在认知 MIMO 系统中, 采用基于特征值的频谱检测方法, 既能保证算法的健壮性, 又能满足最大化吞吐量的要求。

参考文献:

[1] Federal Communication Commission. Spectrum policy task force report [R]. ET Docket 02-155, 2002.
[2] MITOLA J, MAGUIRE G. Cognitive radio: making software radios more personal [J]. IEEE Personal Commun, 1999; 13-18.

[3] LIANG Y C, ZENG Y, PEH E C Y, et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2008, 7(4): 1326-1337.
[4] PEH E C Y, LIANG Y C, GUAN Y, et al. Optimization of cooperative sensing in cognitive radio networks: a sensing-throughput tradeoff view [J]. IEEE Trans Vehicular Tech, 2009, 58(9): 5294-5299.
[5] FAN R, JIANG H. Optimal multi-channel cooperative sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2010, 9(3): 1128-1138.
[6] SHEN J, JIANG T, LIU S, et al. Maximum channel throughput via cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2009, 8(10): 5166-5175.
[7] KANG X, LIANG Y C, GARG H K, et al. Sensing-based spectrum sharing in cognitive radio networks [J]. IEEE Trans Vehicular Tech, 2009, 8(10): 5166-5175.
[8] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals [J]. Proc IEEE, 1967, 55(4): 523-531.
[9] ZENG Y, LIANG Y C. Eigenvalue-based spectrum sensing algorithm for cognitive radio [J]. IEEE Trans Commun, 2009, 57(6): 1784-1793.
[10] TAHERPOUR A, KENARI M N, GAZOR S. Multiple antenna spectrum sensing in cognitive radios [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2010, 9(2): 814-823.
[11] WANG P, FANG J, HAN N, et al. Multiantenna-assisted spectrum sensing for cognitive radios [J]. IEEE Trans Vehicular Tech, 2010, 59(4): 1791-1800.
[12] TANDRA R, SAHAI A. Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty [C]//Proc WirelessCom Maui, HI, 2005: 464-469.
[13] IEEE 802.22 wireless RAN. Functional requirements for the 802.22 WRAN standard [C]// IEEE 802.22-05/0007r46. IEEE Wireless Commun, 2005.
[14] GOLDSMITH A. Wireless communications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.