

## 多天线感知无线电中的协作频谱感知算法

杨黎 王晓湘 赵堃

(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

**摘要:** 不同于以往单天线感知用户的频谱感知研究, 该文提出多天线情形下基于最优功率分配和协作分集的频谱感知算法。根据信道条件利用奇异值分解(SVD)在每根天线上进行功率注水, 并考虑多天线情况下两用户网络协作频谱感知授权用户的判决检测过程, 利用基于指数衰减的路径损耗模型, 分析多天线感知网络的各态历经容量和检测授权用户的概率及时间。理论分析及仿真结果表明, 多天线感知用户通过最优功率分配和协作频谱感知不仅使感知网络具有最大的各态历经容量, 同时改善系统的检测性能。

**关键词:** 感知无线电; 协作频谱感知; 多天线; 功率分配

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2338-05

## Cooperative Spectrum Sensing Algorithm in Multi-antenna Cognitive Radio

Yang Li Wang Xiao-xiang Zhao Kun

(School of Information and Communication Engineering,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Being different from previous spectrum sensing research for single-antenna cognitive users, a spectrum sensing algorithm based on optimal power allocation and cooperative diversity under multi-antenna scenario is proposed. It used Singular Value Decomposition(SVD) to implement power water-filling on each antenna based on channel condition, and the detection process of the cooperative spectrum sensing for the primary user is considered in the two-user network with multi-antenna. The ergodic capacity, detection probability and detection time in cognitive network with multi-antenna are analyzed with path-loss model based on exponential attenuation. Theory analysis and simulation results show that cognitive users with multi-antenna can not only make the cognitive network have maximal ergodic capacity, but also improve detection performance of the system through optimal power allocation and cooperative spectrum sensing.

**Key words:** Cognitive radio; Cooperative spectrum sensing; Multi-antenna; Power allocation

### 1 引言

感知无线电是一个实现频谱高利用率的智能无线通信系统<sup>[1]</sup>, 它的一项主要指标就是可靠地检测授权用户的能力。在衰落环境下, 两个感知用户构成的感知网络利用协作频谱感知能改善系统的检测性能, 提高网络的灵敏增益<sup>[2]</sup>。多个感知用户网络中, 则建立了一种容易实现的离散化的配对策略, 即为每一个需要协作的用户寻找中继两两配对来改善网络的检测性能<sup>[3]</sup>; 也有利用空间分集提出固定和移动中继感知方案来提高网络的检测性能<sup>[4]</sup>。在存在一条授权链路和一条感知链路的感知场景下, 各自的链路都有自己的数据传输队列, 在维持系统稳定性的前提下研究了授权发射机平均吞吐量给定后, 感知

发射机协作授权发射机发送数据队列并最大化感知链路的吞吐量<sup>[5]</sup>。同时在授权用户周围散布多个感知节点的场景下, 提出了对网络中各个感知节点做出判决的管理策略, 如AND, OR融合策略<sup>[6,7]</sup>和Linear-quadratic融合策略<sup>[8]</sup>等。然而, 这些关于频谱感知的研究都是基于单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)的情形。由于MIMO系统的高传输速率和高链路可靠性, 未来的移动通信必然会引入多天线技术, 甚至可能在用户终端内置多天线来获得更高的数据速率和更好的通信性能, 这是移动通信发展的必然趋势。目前对多天线感知无线电的研究主要关注感知网络的容量和吞吐量<sup>[9]</sup>, 但感知网络中只有单个感知用户。如果系统中有多个感知用户, 而且都有多根天线, 这些感知用户如何来更好地检测授权用户就是本文要研究的问题。

本文中考虑这样一种场景: 感知用户具有多根

2008-10-27 收到, 2009-03-23 改回

国家 863 计划项目(2007AA01Z265, 2009AA01Z247)和国家自然科学基金(60972079)资助课题

天线, 感知用户和授权用户共享授权频谱。在感知用户总的发射功率受限的条件下, 为感知无线电提出基于协作分集和最优功率分配的频谱感知技术, 协作方式采用放大转发 (Amplify and Forward, AF)<sup>[10]</sup>。由于 MIMO 信道等价于独立并行传输子信道, 可以推导出多天线感知用户检测授权用户的性能。仿真证明在多天线环境下本文提议的方案在最大化感知网络各态历经容量的同时也改善了感知网络的检测性能, 既提高了感知用户检测授权用户的概率, 又减少了检测时间。

## 2 系统模型

考虑两个感知用户  $U_1$  和  $U_2$  的感知网络, 感知用户  $U_2$  担任感知用户  $U_1$  的中继, 在一个特定的频带以固定的 TDMA 模式向授权接收机  $R_x$  发送数据。如图 1 所示。

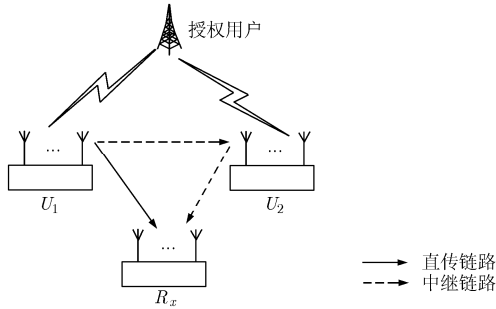


图1 感知无线电中的频谱感知系统模型

$U_1$  和  $U_2$  具有  $N$  根天线, 授权接收机  $R_x$  具有  $N_r$  根天线。假定所有的信道经历瑞利衰落, 不同感知用户对应的信道假定是相互独立的, 同时假设每个用户都能获得自身的信道状态信息, 可以通过在发射端定期发送导频符号来实现。 $U_1$  和  $U_2$  在连续的时隙上进行数据传输, 如图 2 所示。

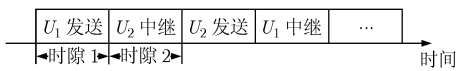


图2 TDMA 时隙传输示意图

第 1 个时隙,  $U_1$  广播信息符号  $\mathbf{x}_1$ ,  $U_2$  和接收机分别接收信息  $\mathbf{y}_{1,2}$  和  $\mathbf{y}_{1,d}$ , 接收信号表达式分别为

$$\mathbf{y}_{1,2} = \mathbf{H}_{1,2}\mathbf{F}\mathbf{x}_1 + \mathbf{n}_2 \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_{1,d} = \mathbf{H}_{1,d}\mathbf{F}\mathbf{x}_1 + \mathbf{n}_d \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{H}_{1,2}$ ,  $\mathbf{H}_{1,d}$  分别表示  $U_1$  到  $U_2$  和接收端  $R_x$  的信道频率响应矩阵; 发射符号矢量  $\mathbf{x}_1$  是高斯分布的, 满足  $E[\mathbf{x}_1\mathbf{x}_1^H] = \mathbf{I}$ ;  $\mathbf{F}$  是预编码矩阵,  $U_1$  的发送功率满足  $P = \text{Tr}(\mathbf{F}\mathbf{F}^H)$ ;  $\mathbf{n}_2$ ,  $\mathbf{n}_d$  分别表示  $U_2$  和接收

端噪声矢量。本文中噪声是均值为零、方差为 1 的循环对称复高斯随机变量。在第 2 个时隙,  $U_2$  发送信号  $\mathbf{x}_2$ , 将在前一个时隙接收到的  $U_1$  的信息中继给授权接收机  $R_x$

$$\mathbf{x}_2 = \beta\mathbf{y}_{1,2} \quad (3)$$

$\beta$  是放大转发因子, 表达式为<sup>[11]</sup>

$$\beta = \sqrt{\frac{P_t - P}{\text{Tr}(\mathbf{H}_{1,2}\mathbf{F}\mathbf{F}^H\mathbf{H}_{1,2}^H + \mathbf{I}_N + \theta P_2\mathbf{I}_N)}} \quad (4)$$

其中,  $P_t$  是感知用户发射总功率;  $\mathbf{I}_N$  是  $N$  维单位矩阵;  $P_2$  是  $U_2$  单根天线接收来自授权用户的信号功率;  $\theta$  是授权用户存在的标识:  $\theta = 1$  表示授权用户存在,  $\theta = 0$  表示授权用户不存在。 $U_2$  的发送功率满足  $\hat{P} = \text{Tr}(\mathbf{x}_2\mathbf{x}_2^H)$ 。接收端接收来自  $U_2$  的信号矢量表达式为

$$\mathbf{y}_{2,d} = \beta\mathbf{H}_{2,d}\mathbf{y}_{1,2} + \mathbf{n}_d \quad (5)$$

其中  $\mathbf{H}_{2,d}$  是  $U_2$  到接收端  $R_x$  的信道频率响应矩阵。在总功率受限的条件下, 即  $P + \hat{P} \leq P_t$ , 以最大化感知网络各态历经容量为目标设计  $U_1$  预编码  $\mathbf{F}$ 。假设授权用户开始使用该授权频带, 那么两个感知用户需要尽快地让出频带给授权用户使用。如果一个感知用户距离授权用户较远而使接收来自授权用户的信号较弱, 导致该感知用户需要较长时间来检测授权用户的存在, 那么检测时间就显得很重要了。感知用户之间如果利用协作分集技术, 就能有效改善网络的检测性能。

## 3 协作频谱感知算法分析

### 3.1 最优功率分配方案

AF 中继策略下, 将感知网络的中继信道模型化为  $N$  个输入,  $2N_r$  个输出的虚拟 MIMO 信道。于是, 式(1), 式(2)和式(5)可以简写为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{F}\mathbf{x}_1 + \mathbf{n} \quad (6)$$

其中  $\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{1,2} \\ \mathbf{y}_{2,d} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{H}$  表示虚拟 MIMO 信道的频率响应矩阵, 有  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{1,2} \\ \beta\mathbf{H}_{2,d}\mathbf{H}_{1,2} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{F}$  是预编码;  $\mathbf{x}_1$  是发射符号矢量;  $\mathbf{n}$  表示噪声矩阵, 有  $\mathbf{n} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_d \\ \beta\mathbf{H}_{2,d}\mathbf{n}_2 + \mathbf{n}_d \end{bmatrix}$ 。则 AF 中继网络的容量为<sup>[11]</sup>

$$C_{AF} = 0.5 \times \log_2 \left| \mathbf{I}_{2N_r} + (\mathbf{n}\mathbf{n}^H)^{-1} \mathbf{H}\mathbf{F}\mathbf{F}^H\mathbf{H}^H \right| \quad (7)$$

定义等价信道相关矩阵为  $\mathbf{R} = \mathbf{H}^H(\mathbf{n}\mathbf{n}^H)^{-1}\mathbf{H}$ , 推导出表达式

$$\mathbf{R} = \mathbf{H}_{1,2}^H\mathbf{H}_{1,2} + \beta^2\mathbf{H}_{1,2}^H\mathbf{H}_{2,d}^H(\mathbf{I}_{N_r} - \beta^2\mathbf{H}_{2,d}^H\mathbf{H}_{2,d}(\beta^2\mathbf{H}_{2,d}^H\mathbf{H}_{2,d} + \mathbf{I}_{N_r})^{-1})\mathbf{H}_{2,d}^H\mathbf{H}_{1,2} \quad (8)$$

对信道相关矩阵  $\mathbf{R}$  用 SVD 分解得到

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_N) \mathbf{U}^H \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{U}$  是酉矩阵;  $\lambda_1, \dots, \lambda_N$  是  $\mathbf{R}$  的  $N$  个特征值。利用注水定理将  $P$  分配到  $N$  个特征子信道进行最优功率分配, 有  $P_i = \mu - \lambda_i^{-1}$ , 其中  $\mu$  为定值, 用来满足  $\sum_{i=1}^N P_i = P$ 。于是最优预编码  $\mathbf{F}_{\text{opt}}$  的表达式为<sup>[11]</sup>

$$\mathbf{F}_{\text{opt}} = \mathbf{U} \text{diag}(\sqrt{P_1}, \dots, \sqrt{P_N}) \quad (10)$$

将式(10)代入式(7), 得到感知网络容量的表达式

$$C_{\text{AF}} = 0.5 \times \sum_{i=1}^N \log_2(\mu \lambda_i) \quad (11)$$

接下来考虑总发射功率  $P_t$  受限时如何决定最优功率  $P$  来最大化  $C_{\text{AF}}$ 。由式(11)得到  $C_{\text{AF}}$  是  $P$  的上凸函数, 必然出现一个最佳  $P$  值使得  $C_{\text{AF}}$  取最大值, 但由于不能给出具体表达式, 本文提出一种使用下面的迭代算法的功率分配方案<sup>[11]</sup>。

第 1 步 初始化, 设定  $\phi$  为一个小值, 并且  $P = P_t$ , 于是  $\beta = 0$ 。对  $\mathbf{R}$  进行奇异值分解, 利用注水定理将  $P$  分配到  $N$  个特征子信道。从式(11)中可以得到初始容量值  $C_{\text{AF}}$ 。

第 2 步 令  $P = P - \phi$ , 对  $\mathbf{R}$  进行奇异值分解,  $\beta$  用式(4), 用式(11)计算  $C_{\text{AF}}$ 。

第 3 步 重复第 2 步, 直到  $C_{\text{AF}}$  不再增加为止。

图 3 是最大化感知网络容量  $C_{\text{AF}}$  的算法流程:

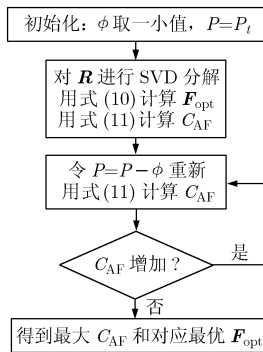


图 3 感知网络容量最大化的迭代算法

### 3.2 判决检测过程和检测性能

为了分析协作频谱感知的性能, 考虑  $U_1$  和  $U_2$  之间的中继链路。对该条链路信道矩阵  $\mathbf{H}_{1,2} \mathbf{F}_{\text{opt}}$  用 SVD 进行分解, 将信道分解成并行独立传输子信道, 每条子信道上的信道增益为  $\sqrt{\lambda_i}, i = 1, \dots, N$ ,  $\sqrt{\lambda_i}$  是  $\mathbf{H}_{1,2} \mathbf{F}_{\text{opt}}$  的奇异值, 如图 4 所示。

对第  $i$  条子信道, 在第 1 个时隙, 对应  $U_2$  的第  $i$  根天线接收到的信号表达式为

$$y_{2,i} = \theta h_{p,2} + \sqrt{\lambda_i} x_{1,i} + n_2, \quad i = 1, \dots, N \quad (12)$$

其中,  $h_{p,2}$  表示授权用户到  $U_2$  第  $i$  根天线的瞬时信道

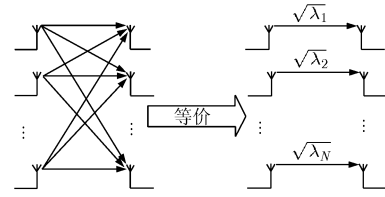


图 4 MIMO 信道分解成平行传输子信道

增益, 并有  $P_2 = E\{|h_{p,2}|^2\}$ ;  $x_{1,i}$  表示  $U_1$  第  $i$  根天线的发射符号;  $n_2$  表示加性高斯噪声; 在第 2 个时隙,  $U_1$  的第  $i$  根天线接收到的信号表达式为

$$\begin{aligned} y_{1,i} &= \theta h_{p,1} + \beta \sqrt{\lambda_i} y_{2,i} + n_1 \\ &= \theta h_{p,1} + \beta \sqrt{\lambda_i} (\theta h_{p,2} + \sqrt{\lambda_i} x_{1,i} + n_2) + n_1 \\ &= \theta (h_{p,1} + \beta \sqrt{\lambda_i} h_{p,2}) + n_1 + \beta \sqrt{\lambda_i} n_2 + \beta \lambda_i x_{1,i} \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $h_{p,1}$  表示授权用户到  $U_1$  第  $i$  根天线的瞬时信道增益,  $P_1 = E\{|h_{p,1}|^2\}$  表示  $U_1$  第  $i$  根天线接收来自授权用户的功率;  $n_1$  是加性高斯噪声。将自身的信息成分去掉后,  $U_1$  剩余信号为

$$\bar{Y} = \theta \bar{H} + \bar{N} \quad (14)$$

其中,  $\bar{H} = h_{p,1} + \beta \sqrt{\lambda_i} h_{p,2}$ ,  $\bar{N} = n_1 + \beta \sqrt{\lambda_i} n_2$ 。于是检测问题可以归纳如下: 给出观测值  $\bar{Y} = \theta \bar{H} + \bar{N}$ , 判决器的判决条件:

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 : \theta = 1, \text{ 授权用户存在} \\ \psi_0 : \theta = 0, \text{ 授权用户不存在} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

利用能量检测器<sup>[3]</sup>(Energy Detector, ED)对上面的假设检验问题做出判决。假定  $h_{p,1}, h_{p,2}, n_1, n_2$  均是零均值复高斯随机变量, 且两两独立, 则  $\bar{H}$  和  $\bar{N}$  也是服从复高斯分布, 均值为零, 方差分别为  $\sigma_H^2 = P_1 + \beta^2 \lambda_i P_2$  和  $\sigma_N^2 = 1 + \beta^2 \lambda_i$ 。ED 的作用是通过检测统计值  $T(\bar{Y}) = |\bar{Y}|^2$ , 并与一个门限值  $V_T$  进行比较, 若统计值大于  $V_T$  则认为授权用户存在; 反之认为授权用户不存在。  $V_T$  由虚警概率  $\alpha$  得到。  $\alpha$  在本文中设为定值。推导出  $T(\bar{Y})$  在假设  $\psi_0, \psi_1$  下的期望值分别为

$$E\{T(\bar{Y}) | \psi_0\} = 1 + \beta^2 \lambda_i \quad (16)$$

$$E\{T(\bar{Y}) | \psi_1\} = P_1 + 1 + \beta^2 \lambda_i (P_2 + 1) \quad (17)$$

对  $\psi_0 (\theta = 0)$ , 有

$$F_0(V_T) = P(T(\bar{Y}) > V_T | \psi_0) = \exp\left\{\frac{-V_T}{1 + \beta^2 \lambda_i}\right\} = \alpha \quad (18)$$

则  $U_1$  第  $i$  根天线的协作检测概率为

$$\begin{aligned} p_{c,i}^{(1)} &= F_1(V_T) = P(T(\bar{Y}) > V_T | \psi_1) \\ &= \exp\left\{\frac{-V_T}{P_1 + 1 + \beta^2 \lambda_i (P_2 + 1)}\right\} \end{aligned} \quad (19)$$

得到  $U_1$  在  $U_2$  的协作下的检测概率为

$$p_c^{(1)} = \sum_{i=1}^N p_{c,i}^{(1)} - \sum_{1 \leq i < j \leq N} p_{c,i}^{(1)} p_{c,j}^{(1)} + \sum_{1 \leq i < j < k \leq N} p_{c,i}^{(1)} p_{c,j}^{(1)} p_{c,k}^{(1)} + \dots + (-1)^{N-1} \prod_{i=1}^N p_{c,i}^{(1)} \quad (20)$$

若取  $N = 2$ , 则有

$$p_c^{(1)} = p_{c,1}^{(1)} + p_{c,2}^{(1)} - p_{c,1}^{(1)} p_{c,2}^{(1)} \quad (21)$$

$U_1$  和  $U_2$  不协作时,  $\beta = 0$ , 推导各自的检测概率可以用上面类似的方法。这里可以把  $U_1$  和  $U_2$  的天线当成一个整体来分析, 并利用了  $\alpha = \exp(-V_T)$ , 得到各自的检测概率分别为

$$p_n^{(1)} = \alpha^{\frac{1}{NR_1+1}} \quad (22)$$

$$p_n^{(2)} = \alpha^{\frac{1}{NR_2+1}} \quad (23)$$

继而得到两用户感知网络不协作时总的检测概率为<sup>[2]</sup>  $p_n^{(1)} + p_n^{(2)} - p_n^{(1)} p_n^{(2)}$ ;  $U_1$  和  $U_2$  相互协作时总的检测概率为  $p_c^{(1)} + p_n^{(2)} - p_c^{(1)} p_n^{(2)}$ 。如果以感知网络检测授权用户所需要的时间来衡量检测性能, 以  $T_n$ ,  $T_c$  分别表示两用户网络不协作和协作模式下的检测时间, 单位为时隙数, 根据检测概率有<sup>[2]</sup>

$$T_n = \frac{\left(2 - \frac{p_n^{(1)} + p_n^{(2)}}{2}\right)}{\left(p_n^{(1)} + p_n^{(2)} - p_n^{(1)} p_n^{(2)}\right)} \quad (24)$$

$$T_c = \frac{\left(2 - \frac{p_c^{(1)} + p_n^{(2)}}{2}\right)}{\left(p_c^{(1)} + p_n^{(2)} - p_c^{(1)} p_n^{(2)}\right)} \quad (25)$$

比较  $T_n$  和  $T_c$  的大小就可以看出未协作和协作两种模式下检测时间的大小了。

#### 4 仿真结果与分析

考虑图 1 简单的两用户网络, 利用 AF 协作模式,  $U_2$  协作  $U_1$  对授权用户进行检测。如果用  $L$  表示感知用户  $U_i$  到授权用户的距离, 则将  $U_i$  从授权用户那里接收到的信号功率模型化为

$$P_i(L) = 1/L^n \quad (26)$$

其中,  $n$  是路径损耗指数, 一般取 3~6 之间。这里取  $n = 4$ 。将信道矩阵  $\mathbf{H}_{1,2}$ ,  $\mathbf{H}_{1,d}$  和  $\mathbf{H}_{2,d}$  中的元素模型化为零均值、独立循环对称复高斯随机变量, 方差分别为  $\sigma_{1,2}^2$ ,  $\sigma_{1,d}^2$  和  $\sigma_{2,d}^2$ 。用  $L_{1,2}(L_{2,d})$  表示  $U_2$  与  $U_1$  (接收机) 之间的距离。  $L_{1,d}$  表示  $U_1$  与接收机之间的距离并归一化为 1。利用路径损耗模型,  $\sigma_{1,2}^2 = L_{1,2}^{-n}$ ,  $\sigma_{2,d}^2 = L_{2,d}^{-n}$ ,  $P_1 = L_{P,1}^{-n}$ ,  $P_2 = L_{P,2}^{-n}$ 。定义感知网络总 SNR 为  $\text{SNR} = P_i / \sigma_d^2$ ,  $\sigma_d^2$  为接收机噪声方差。为简化分析, 设  $L_{1,2} = L_{p,1} - L_{p,2}$ ,  $L_{2,d} = L_{1,d} - L_{1,2}$ , 虚警概率  $\alpha = 0.1$ 。以两用户网络为研究对象, 对感知网络的检测性能进行蒙特卡罗仿真。

感知用户在授权用户处于非活动状态时可以使用授权频带, 并可以进行感知用户自身的数据传输。感知网络容量的大小反映了网络的数据传输能力和频谱利用率。图 5(a) 为接收端天线数目  $N_r$  变化时不同条件下的各态历经容量对比曲线图。SNR = 2 dB,  $P_1 = 0$  dB,  $P_2 = 5$  dB,  $N = 2$ 。可以得到: 各态历经容量随着天线数目的增加而增加, 并且基于协作和最优功率分配的容量大于未协作最优功率分配和未协作等功率分配时的各态历经容量。未协作感知网络等价于传统的 MIMO 系统, 此时  $\beta = 0$ 。如果在发端也采用最优功率分配, 其网络容量大于发端等功率分配时的网络容量, 也即对应的未协作等功率分配时的网络容量。图 5(b) 为系统信噪比变化时不同条件下的各态历经容量对比曲线图。  $P_1 = 0$  dB,  $P_2 = 5$  dB,  $N = N_r = 2$ 。可以得到: 不同条件下的容量随着信噪比的增加而增加。同时也有协作最优功率分配时的容量大于未协作最优功率分配和未协作等功率分配时的容量。说明了感知网络中基于协作最优功率分配具有最大的各态历经容量。

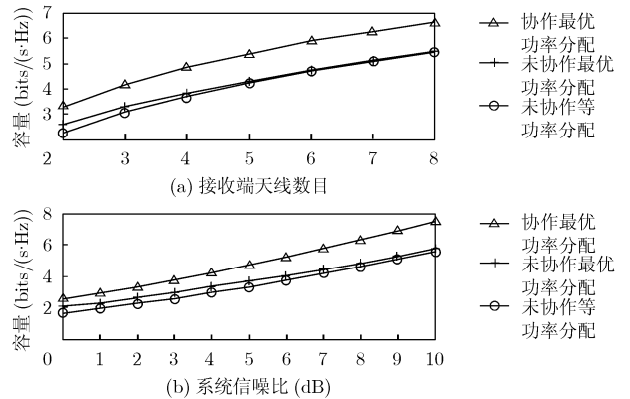


图 5 不同条件下对应的感知网络各态历经容量

图 6 为两用户网络总的检测概率随  $P_2$  变化的仿真曲线。可以得到 4 点结论: (1) 不同条件下的检测概率随着  $P_2$  的增加而增大, 当  $P_2$  为 20 dB 时, 检测概率都趋近于 1; (2) 协作时的检测概率大于未协作时的检测概率, 说明感知用户相互协作能合理改善总的检测概率。尤其当  $P_2$  越大时,  $U_2$  协作  $U_1$  的作用更加显著,  $U_1$  能通过  $U_2$  的协作来弥补自身检测性能的不足。(3) 采用 MIMO 预编码的检测性能优于未采用预编码的性能, 原因就在于预编码充分利用了感知用户的信道信息并在发端进行了最优功率分配, 这比在发端进行等功率分配的性能要好。(4) 感知用户是多天线时的检测概率也大于 SISO 单天线时的检测概率, 这可以通过接收到的信号功率来解

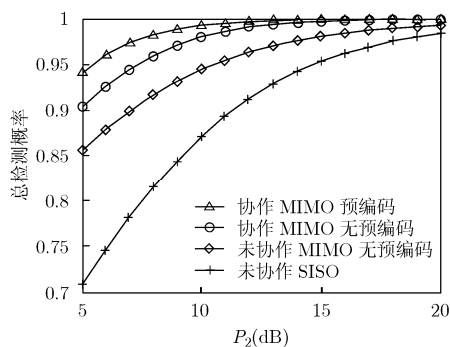


图6 感知网络在不同条件下的总的检测概率  
(SNR = 2 dB,  $P_1 = 0$  dB,  $N = N_r = 2$ )

释。多天线感知用户从授权用户那里接收到的信号功率大于单天线接收到的信号功率，而接收功率的大小与检测概率成正比。检测概率的改善对感知网络很重要，因为感知无线电需要连续感知频谱检测授权用户的存在。

图7为检测授权用户所需要的时间(时隙数)。在这4种情况下， $U_2$ 从授权用户那里接收到的信号功率 $P_2$ 越大，所需要的检测时间越少；采用MIMO预编码时检测授权用户所需要的时间少于未采用预编码时所需要的时间，同时也可以看到多天线感知用户检测授权用户所需要的时间少于单天线感知用户的检测时间。分析过程和上面是一样的，感知用户从授权用户那里接收到的功率越大，检测概率越大，相应所需要的检测时间就越少。

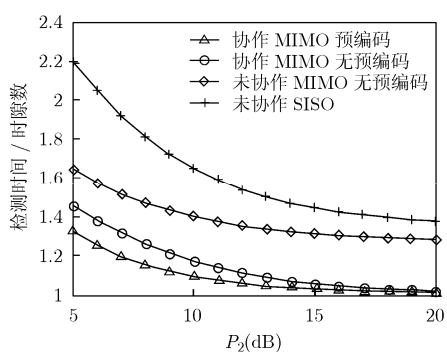


图7 感知网络在不同条件下检测授权用户所需要的时间  
(SNR = 2 dB,  $P_1 = 0$  dB,  $N = N_r = 2$ )

## 5 结束语

本文对感知无线电中两用户网络的协作频谱感知技术进行了研究。在感知用户为多天线情形下，基于协作分集和最优功率分配来改善网络的检测性能。仿真结果证明了协作分集在频谱检测中具有重要作用，有效改善了系统检测性能，提高了感知用户检测授权用户的概率并减少了检测时间。同时在

发端进行最优功率分配，使感知网络具有最大的各态历经容量，为感知用户在使用授权频带时进行数据传输创造了条件。由于实际环境的复杂性，往往需要考虑复杂度和有效性之间的折衷。本文中的模型可能只适用于特定的系统，但本文所提议的方案仍然具有理论研究价值。本文也可以扩展到多用户的情形，每个用户配置多天线，考虑如何将多用户进行两两分组，然后再利用本文中的算法进行分析，这将是下一步的工作。

## 参考文献

- [1] Simon H. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] Ganesan G and Ye Li. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio part 1: Two user networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(6): 2204-2213.
- [3] Ganesan G and Ye Li. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio part 2: Multiuser networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(6): 2214-2222.
- [4] Ghuru Gan, Ye Li, and Benny Bing. Spatiotemporal sensing in cognitive radio networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(1): 5-12.
- [5] Osvaldo S, Yeheskel B, and Umberto S. Stable throughput of cognitive radios with and without relaying capability. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(12): 2351-2360.
- [6] Edward P and Liang Ying-Chang. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Hong Kong, 2007: 27-32.
- [7] Hong Li, Ma Jun-fei, and Xu Fang-min. Optimization of collaborative spectrum sensing for cognitive radio. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Sanya, 2008: 1730-1733.
- [8] Unnik J and Veeravalli V. Cooperative sensing for primary detection in cognitive radio. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(1): 18-27.
- [9] Zhang Rui and Liang Ying-Chang. Exploiting multi-antennas for opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(1): 88-102.
- [10] Nosra A, Hunter T E, and Heda A. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 74-80.
- [11] Pan Cheng, Cai Yue-ming, and Xu You-yun. Precoding and power allocation for cooperative MIMO systems. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China, 2006: 1-4.

杨黎：男，1984年生，硕士生，研究方向为协作预编码、感知无线电。

王晓湘：女，1969年生，教授，博士生导师，研究方向为信息与通信理论、下一代网络技术、移动定位。