

认知无线网络基于空分复用的机会频谱接入

李钊* 赵林靖 刘勤

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要:传统的认知无线电技术采用机会频谱接入,认知用户的通信质量难以得到保证。通过利用多天线技术提供的空间信号处理能力,该文提出一种基于空分复用的机会频谱接入方法,当存在频谱空洞时,采用传统的机会频谱接入;无空闲频率资源可用时,认知系统利用空域信息完成发射预编码与接收滤波,从而以空分复用的方式实现通信。文中对认知系统天线配置要求进行了分析,当满足该要求时,认知系统能够与授权系统在同一授权频道实现无互扰共存。仿真结果表明,与传统的机会频谱接入相比,所提方法能够在不影响授权系统性能的情况下有效改善认知系统的通信性能。

关键词: 认知无线网络; 多天线; 预编码; 空分复用; 阻塞概率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)05-1172-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01051

Space Division Multiplexing Based Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Network

Li Zhao Zhao Lin-jing Liu Qin

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Traditional cognitive radio employs Opportunistic Spectrum Access (OSA), the quality of cognitive transmission could not be guaranteed. By exploiting the spatial signal processing ability provided by multiple antennas, a Space Division Multiplexing based OSA (SDM-OA) scheme for cognitive radio networks is proposed. When spectrum holes exist traditional OSA is employed. While there is no idle spectrum available cognitive system utilizes spatial information to implement transmit precoding and receive filtering, so that cognitive transmission is carried out using SDM. Antenna requirements in cognitive system are further discussed. When this demand is met, cognitive transmission could coexist with the primary (licensed) in an occupied authorized frequency channel with mutual interference eliminated. Compared with traditional cognitive radio which employs OSA to utilize the temporally spare frequency resource, the proposed scheme could effectively improve the performance of cognitive system and impose no interference on the primary.

Key words: Cognitive Radio Networks (CRN); Multiple antennas; Precoding; Space Division Multiplexing (SDM); Blocking probability

1 引言

由于用户业务的动态性,传统的固定频谱分配方式对频率资源的利用率很低^[1]。因此,能够根据电磁环境进行动态频谱利用的认知无线电技术^[2](Cognitive Radio, CR)应运而生。随着研究的深入,人们提出认知无线网络^[3,4](CRN),研究复杂网络环境中认知无线电设备如何通过相互协作,达到对

频谱资源的高效利用。

但是,传统的有关CR或CRN的研究关注频谱资源的机会共享,即认知用户进行通信环境检测以发现空闲频谱,通过借用该频率资源完成通信。由于认知用户是非授权的,具有低优先级,因此当授权用户出现时,认知用户必须及时释放频率资源。对于机会频谱接入(OA),认知通信能否进行取决于是否存在“机会”,即空闲频谱。因此,采用传统的OSA,认知用户的通信质量难以得到保证。

通信是对包括频率在内的多种类型资源,如时间、功率、空间和计算能力等的综合使用^[5],因此通过资源维度拓展寻找接入“机会”成为可能。多天线技术,包括多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)与智能天线,通过空域信号处理能

2010-09-29 收到, 2011-02-14 改回

国家杰出青年科学基金(60725105), 国家 973 计划项目(2009CB320404), 长江学者和创新团队发展计划(IRT0852), 国家自然科学基金(60902032), 高等学校引智计划(B08038), 教育部科学技术研究重点项目(107103), 重大专项(2009ZX03007-004)和中央高校基本科研业务费专项资金(K50510010022)资助课题

*通信作者: 李钊 zli_19912@126.com

够获得传输效率与链路可靠性的提高^[6]，近年来得到认知技术研究人员的关注。文献[7]提出一种基于多天线的频谱感知方法，文献[8]对认知 MIMO 信道容量进行推导，文献[9]从博弈论角度研究分布式认知 MIMO 用户与授权用户的共存通信，文献[10]将蜂窝网作为研究场景，提出一种基于协作的上行链路频率复用机制，文献[11]通过研究认知 MIMO 传输与多天线安全通信的关系，对后者的可达信息速率进行了推导。

但是，已有工作在讨论认知系统与授权系统的频谱共享时，并未针对多域资源管理给出具体的信号处理算法和频谱共享方法，因此本文提出一种基于空分复用的机会频谱接入方法(SDM-OSA)，通过空频资源联合管理，当认知系统检测无线环境却无法获得空闲频率时，仍能够通过空分复用的方式完成通信。仿真结果表明，与传统的机会频谱接入相比，该方法能够在不影响授权系统的情况下有效改善认知系统的通信性能。

2 系统模型

考虑授权系统与认知系统共同覆盖的单小区场景，如图 1 所示，研究下行通信。授权系统包含一个基站和多个用户。简单起见，认知系统由一个基站和一个用户构成，即不存在认知用户(Cognitive User, CU)之间的竞争与干扰。授权基站(Primary Base Station, PBS)天线数 M_T^p ，授权用户(Primary User, PU)天线数为 M_R^p ；认知基站(Cognitive Base Station, CBS)天线数 M_T^c ，认知用户天线数为 M_R^c 。

授权系统拥有 N 个频道，假设各频道的带宽均为 B ，具有频率平坦衰落特性。多个 PU 以动态的方式共享频率资源。基站与用户的通信遵循时隙同步结构， N 个频道的占用服从状态数为 $M = 2^N$ 的离散时间 Markov 过程^[12]。Markov 信道模型如图 2 所示。图中，授权频道 i 从状态 1(忙)转移至状态 0(闲)

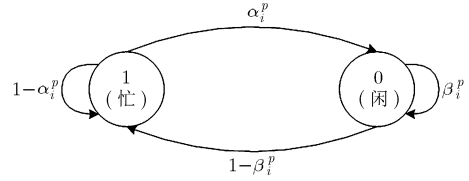


图 2 Markov 信道模型

的概率为 α_i^p ，保持在状态 0 的概率为 β_i^p ；类似地，频道 i 从状态 0 转移至状态 1 的概率为 $1 - \beta_i^p$ ，保持在状态 1 的概率为 $1 - \alpha_i^p$ 。认知用户的忙闲用另一个独立的 Markov 过程模拟，与图 2 类似，其转移概率分别为 α^c 和 β^c 。

在时隙 t ，PBS 能够获得其与占据频道 i 的 PU(PU- i)之间的信道信息 $H_i^p(t)$ ，其中 $i = 1, \dots, N$ ；CBS 能够获得其与 CU 以及与 PU- i 之间的信道信息 $H^c(t)$ 和 $H_i^{cp}(t)$ ，并通过与 PBS 交互获得 PBS 与 CU 之间的信道信息 $H^{pc}(t)$ 。在本文的讨论中，假设授权系统与认知系统间存在协作，各反馈链路(包括 CBS 与 PBS 的信息交互)是可靠的，并且反馈时延相对于信道变化可以忽略^[13,14]。以下叙述中，在一个时隙内讨论为了简便，省略时间标记 t 。

3 信号处理算法与频谱接入方法设计

对于传统的 OSA，认知用户搜索并借用空闲的授权频道以完成通信，但是认知通信不能与授权通信同时同频共存。一方面，当认知用户试图借用授权频道开始一次新的通信而无法获得相应资源时，认知通信阻塞(Blocking)；另一方面，当授权用户在认知通信进行过程中出现时，认知用户必须及时释放借用资源，若能够找到备用频道，则认知通信可持续，否则中断(Outage)。通过将多天线技术引入 CRN，当认知用户能够获得空闲频谱时，按照传统的 OSA 进行机会接入；当无空闲频率资源可用时，认知用户仍能够通过空分复用的方式完成通信(与授权用户共存)，同时避免对授权用户产生干扰。以下对共存场景中的信号处理算法进行设计，并在此基础上给出频谱接入方法(SDM-OSA)。

3.1 授权系统

授权系统中占用频道 i 的用户 PU- i 的接收信号为

$$y_i^p = H_i^p x_i^p + H_i^{cp} x^c + n \quad (1)$$

其中 x_i^p 与 x^c 分别表示 PBS 和 CBS 的发射符号向量，等号右端第 2 项表示 CBS 发射信号对 PU- i 的干扰。

在本文的讨论中，假设授权系统采用波束成形^[6,14](Beamforming, BF)的方式进行通信($x_i^p =$

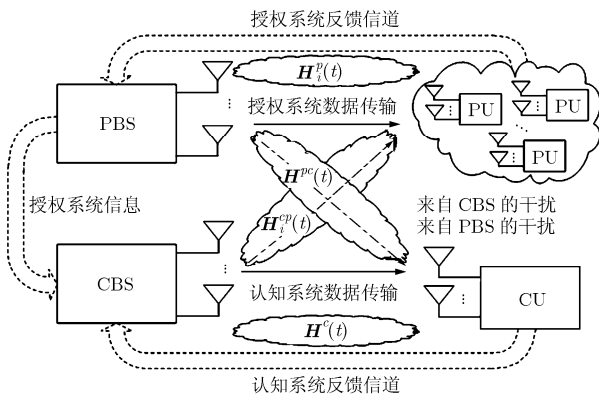


图 1 系统模型

$[x_{i,1}^p \ 0 \cdots 0]^T$)。对 \mathbf{H}_i^p 进行奇异值分解 $\mathbf{H}_i^p = \mathbf{U}_i^p \boldsymbol{\Lambda}_i^p (\mathbf{V}_i^p)^H$, PBS 采用 $\widehat{\mathbf{V}}_i^p = [v_{i,1}^p \ \mathbf{0} \cdots \mathbf{0}]$ 对 \mathbf{x}_i^p 进行预处理, 其中 $v_{i,1}^p$ 为 \mathbf{H}_i^p 的主右奇异向量(与 \mathbf{H}_i^p 的最大奇异值对应); PU- i 采用 $\widehat{\mathbf{U}}_i^p = [u_{i,1}^p \ \mathbf{0} \cdots \mathbf{0}]$ 的共轭转置进行接收滤波, $u_{i,1}^p$ 为 \mathbf{H}_i^p 的主左奇异向量, 得到估计信号

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{y}}_i^p &= (\widehat{\mathbf{U}}_i^p)^H \mathbf{H}_i^p \widehat{\mathbf{V}}_i^p \mathbf{x}_i^p + (\widehat{\mathbf{U}}_i^p)^H \mathbf{H}_i^{cp} \mathbf{x}^c + (\widehat{\mathbf{U}}_i^p)^H \mathbf{n} \\ &= \begin{bmatrix} \lambda_{i,1}^p & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_i^p + (\widehat{\mathbf{U}}_i^p)^H \mathbf{H}_i^{cp} \mathbf{x}^c + (\widehat{\mathbf{U}}_i^p)^H \mathbf{n} \quad (2) \end{aligned}$$

其中 $\lambda_{i,1}^p$ 为 \mathbf{H}_i^p 的最大奇异值。

为了消除认知通信对授权用户的干扰, CBS 采用预处理矩阵 \mathbf{P} 进行发射预编码, 式(2)重写为

$$\bar{\mathbf{y}}_i^p = \begin{bmatrix} \lambda_{i,1}^p & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_i^p + (\widehat{\mathbf{U}}_i^p)^H \mathbf{H}_i^{cp} \mathbf{P} \mathbf{x}^c + (\widehat{\mathbf{U}}_i^p)^H \mathbf{n} \quad (3)$$

可以得到授权频道 i 授权通信的数据速率为

$$R_{i,\text{BF}}^p = \log_2 \left[1 + \frac{P_T^p (\lambda_{i,1}^p)^2}{P_T^c (\widehat{\mathbf{U}}_i^p)^H \mathbf{H}_i^{cp} \mathbf{P} \mathbf{P}^H (\mathbf{H}_i^{cp})^H \widehat{\mathbf{U}}_i^p + \sigma_n^2} \right] \quad (4)$$

P_T^p 与 P_T^c 分别表示 PBS 和 CBS 的发射功率, 假设 $P_T^p = P_T^c$ 。通过设计 \mathbf{P} , 使式(3)中 $(\widehat{\mathbf{U}}_i^p)^H \mathbf{H}_i^{cp} \mathbf{P} = \mathbf{0}$ 。需要注意的是, 预编码矩阵 \mathbf{P} 是以对授权用户无干扰为目标进行设计的, 独立于授权通信方式。

3.2 认知系统

令认知通信采用 BF 方式 ($\mathbf{x}^c = [x_1^c \ 0 \cdots 0]^T$), 对 \mathbf{H}^c 进行奇异值分解 $\mathbf{H}^c = \mathbf{U}^c \boldsymbol{\Lambda}^c (\mathbf{V}^c)^H$ 。当认知用户无法获得空闲频道时, 尝试以空分复用方式与授权通信共享频谱, 某一时隙共享授权频道 i 的 CU 接收到的信号由式(5)给出

$$\mathbf{y}^c = \mathbf{H}^c \mathbf{P} \mathbf{x}^c + \mathbf{H}^{pc} \widehat{\mathbf{V}}_i^p \mathbf{x}_i^p + \mathbf{n} \quad (5)$$

其中, 等号右端第 2 项表示 PBS 发送给 PU- i 的信号对 CU 的干扰。认知系统发射预编码与接收滤波设计如下。

3.2.1 CBS 发射预编码 由于认知通信采用 BF 方式, $\mathbf{P} = [p \ \mathbf{0} \cdots \mathbf{0}]$ 。为使式(4)中干扰项 $(\widehat{\mathbf{U}}_i^p)^H \mathbf{H}_i^{cp} \mathbf{P} = \mathbf{0}$, 等价于 $(u_{i,1}^p)^H \mathbf{H}_i^{cp} p = 0$, p 的设计如下:

(1) 构造矩阵 $\mathbf{T}^c = [v_{i,1}^{cp}, \cdots, v_{i,\text{rank}(\mathbf{H}_i^{cp})}^{cp}, v_2^c, \cdots, v_{\text{rank}(\mathbf{H}^c)}^c]$, 采用 Gram-Schmidt 方法对 \mathbf{T}^c 标准正交化, 得到 $\bar{\mathbf{T}}^c = [\bar{t}_{i,1}^{cp}, \cdots, \bar{t}_{i,\text{rank}(\mathbf{H}_i^{cp})}^{cp}, \bar{t}_2^c, \cdots, \bar{t}_{\text{rank}(\mathbf{H}^c)}^c]$ 。

(2) 使 p 与 $\bar{\mathbf{T}}^c$ 正交, 将 v_1^c 投影到 $\bar{\mathbf{T}}^c$ 的正交子空间

$$\tilde{v}_1^c = v_1^c - \sum_{m=1}^{\text{rank}(\mathbf{H}_i^{cp})} [\bar{t}_{i,m}^{cp}]^H v_1^c \bar{t}_{i,m}^{cp} - \sum_{n=2}^{\text{rank}(\mathbf{H}^c)} [\bar{t}_n^c]^H v_1^c \bar{t}_n^c \quad (6)$$

其中 $\text{rank}(\cdot)$ 表示矩阵的秩。

(3) 对 \tilde{v}_1^c 归一化, 得到预编码向量 $p = \tilde{v}_1^c / \|\tilde{v}_1^c\|$ 。

注意到 p 存在非零解的条件是 \mathbf{T}^c 列满秩, 即 $\text{rank}(\mathbf{T}^c) < M_T^c$, 因此算法对认知系统天线配置有要求, 将在 3.4 节专门讨论。

3.2.2 CU 接收滤波 采用 $\mathbf{F} = [f \ \mathbf{0} \cdots \mathbf{0}]$ 的共轭转置进行接收滤波, CU 的估计信号如下:

$$\bar{\mathbf{y}}^c = \mathbf{F}^H \mathbf{H}^c \mathbf{P} \mathbf{x}^c + \mathbf{F}^H \mathbf{H}^{pc} \widehat{\mathbf{V}}_i^p \mathbf{x}_i^p + \mathbf{F}^H \mathbf{n} \quad (7)$$

设计 \mathbf{F} 使 $\mathbf{F}^H \mathbf{H}^{pc} \widehat{\mathbf{V}}_i^p = \mathbf{0}$, 等价于 $f^H \mathbf{H}^{pc} v_{i,1}^p = 0$, 即消除来自 PBS 的干扰。注意到 $\mathbf{H}^{pc} = \mathbf{U}^{pc} \boldsymbol{\Lambda}^{pc} \mathbf{V}^{pc}$, 并且根据 3.2.1 节, p 与 v_i^c ($i = 2, \cdots, \text{rank}(\mathbf{H}^c)$) 正交。 f 的设计如下:

(1) 构造矩阵 $\mathbf{R}^c = [u_1^{pc}, \cdots, u_{\text{rank}(\mathbf{H}^{pc})}^{pc}]$, 考虑到 \mathbf{U}^{pc} 由一组标准正交基构成, 令 $\bar{\mathbf{R}}^c = \mathbf{R}^c$ 。

(2) 使 f 与 $\bar{\mathbf{R}}^c$ 正交, 将 u_1^c 投影到 $\bar{\mathbf{R}}^c$ 的正交子空间

$$\tilde{u}_1^c = u_1^c - \sum_{m=1}^{\text{rank}(\mathbf{H}^{pc})} [\bar{u}_m^{pc}]^H u_1^c \bar{u}_m^{pc} \quad (8)$$

(3) 对 \tilde{u}_1^c 归一化, 得到接收滤波向量 $f = \tilde{u}_1^c / \|\tilde{u}_1^c\|$ 。

注意到 f 存在非零解的条件是 \mathbf{R}^c 列满秩, 即 $\text{rank}(\mathbf{R}^c) < M_R^c$ 。认知系统数据速率为

$$\begin{aligned} R_{\text{BF}}^c &= \log_2 \left[1 + \frac{P_T^c (f^H \mathbf{H}^c p) (f^H \mathbf{H}^c p)^H}{P_T^p (f^H \mathbf{H}^{pc} v_{i,1}^p) (f^H \mathbf{H}^{pc} v_{i,1}^p)^H + \sigma_n^2} \right] \\ &= \log_2 \left[1 + \frac{P_T^c (\lambda_i^c)^2 |\chi|^2}{\sigma_n^2} \right] \quad (9) \end{aligned}$$

其中 $\chi = f^H u_1^c (v_1^c)^H p$ 。注意到 $|\langle v_1^c, p \rangle|^2 < 1$ 且 $|\langle f, u_1^c \rangle|^2 < 1$, 即在共存状态下, 认知通信为了避免对 PU 产生干扰, 同时对来自 PBS 的干扰进行抑制, 需要牺牲一部分有用信号功率。

3.3 基于空分复用的机会频谱接入

对于传统的机会频谱接入, 是频域资源在时域的动态管理; 当引入多天线时, 则考虑频域资源在空时域联合管理。根据系统模型, 频域资源用向量 $\mathbf{R}_f = [f_1, \cdots, f_N]$ 表示, 其中 N 为授权频道数, f_i 为布尔变量, $f_i \in \{0(\text{空闲}), 1(\text{占用})\}$ 。用式(10)表示认知基站观测到的频道 i 的空域质量

$$s_i = \sum_{n=1}^{\text{rank}(\mathbf{H}_i^{cp})} \left| \langle v_1^c, v_{i,n}^{cp} \rangle \right|^2 \quad (10)$$

s_i 反映了与授权通信共享频道 i 的认知通信空间特征与 CBS 对 PU- i 干扰空间特征的相关程度, 其值越大, 表明认知通信与干扰越匹配, 则 CBS 进行预编码后有用信号功率降低越严重, 即该频道的空域质量越差。

空频联合资源可表示为

$$\mathbf{R}_{sf} = \text{diag}(\mathbf{R}_f)\mathbf{R}_s = [r_1, \dots, r_N]^T \quad (11)$$

其中 $\text{diag}(\bullet)$ 表示对角化，空域资源向量 $\mathbf{R}_s = [s_1, \dots, s_N]^T$ 。容易发现，若频道 i 未被授权用户占用， $r_i = 0$ ；否则， $r_i > 0$ 。

SDM-OSA 方法如下：

(1)根据环境感知结果及系统间协作，初始化资源矩阵 \mathbf{R}_{sf} ；

(2)CBS 选择授权频道 $\xi = \arg \min_{1 \leq i \leq N} (r_i)$ ，并将相

关参数通知 CU 以完成认知通信。信号处理按照 3.2 节进行。

对于第(2)步，当 $\min(r_i) = 0$ 时表示有空闲频道，认知通信按照传统 OSA 以机会方式接入；当 $\min(r_i) > 0$ 时表示无空闲频道，认知通信以空分复用方式选择最佳(r_i 最小)频道实现共享。注意到可能出现多个 r_i 均为最小值(或 0)的情况，本文采取随机选择的策略。

根据以上讨论可以发现，本文提出的频谱共享方法中基于 SDM 的系统共存设计是对传统 OSA 的补充，即认知系统通过配置多天线并利用空域信息，在无空闲频谱时以空分方式实现通信，其代价包含天线配置(将在 3.4 节讨论)以及空域信道信息感知两方面。

3.4 认知系统天线配置讨论

定理 1 认知通信采用 BF 方式，当天线配置满足条件式(12)，式(13)时，能够根据 3.2.1 节计算 \mathbf{p} 实现 CBS 对 PU 无干扰，同时根据 3.2.2 节计算 \mathbf{f} 使 CU 消除来自 PBS 的干扰。

$$M_R^c > M_T^p \quad (12)$$

$$M_T^c > M_R^p + M_R^c - 1 \quad (13)$$

证明

(1)根据 3.2.1 节，CBS 预编码向量 \mathbf{p} 存在非零解的条件是 $\text{rank}(\mathbf{T}^c) < M_T^c$ ，即

$$\text{rank}(\mathbf{H}_i^{cp}) + \text{rank}(\mathbf{H}^c) - 1 < M_T^c \quad (14)$$

$$\min(M_T^c, M_R^p) + \min(M_T^c, M_R^c) < M_T^c + 1 \quad (15)$$

式(15)成立的条件是 $M_T^c > M_R^p$ 且 $M_T^c > M_R^c$ ，否则易推得 $\min(M_T^c, M_R^c) < 1$ 或者 $\min(M_T^c, M_R^p) < 1$ ，不合理。

当 $M_T^c > M_R^p$ 且 $M_T^c > M_R^c$ 时

$$M_R^p + M_R^c < M_T^c + 1 \quad (16)$$

(2)根据 3.2.2 节，CU 接收滤波向量 \mathbf{f} 存在非零解的条件是 $\text{rank}(\mathbf{R}^c) < M_R^c$ ，即

$$\text{rank}(\mathbf{H}^{pc}) < M_R^c \quad (17)$$

$$\min(M_T^p, M_R^c) < M_R^c \quad (18)$$

式(18)成立的条件是 $M_T^p < M_R^c$ ，否则有 $M_R^c < M_R^c$ ，

不合理。式(12)得证。

将式(12)与式(16)相加

$$M_R^p + M_T^p < M_T^c + 1 \quad (19)$$

综合式(16)和式(19)，并且注意到 $M_R^c > M_T^p$ ，即可得到式(13)。证毕

表 1 给出授权系统采用一些常见天线配置时认知系统的天线数要求。

表 1 认知系统天线配置要求

M_T^p	1	1	2	2	4	4	4
M_R^p	1	2	1	2	1	2	4
M_T^c	3	4	4	5	6	7	9
M_R^c	2	2	3	3	5	5	5

可以发现，为了实现与授权用户的无干扰共存通信，认知系统需配备较多的天线。实际设计中，需要在认知通信性能与系统复杂度及成本间进行折衷。例如，通过放松系统间干扰约束，即将干扰控制于某一门限之下^[14,15]，以降低认知系统复杂度。

以上讨论中，授权系统的通信方式不受限制，认知系统采用 BF 方式，若认知通信采用多子数据流并行传输，如空间复用(Spatial Multiplexing, SM)，此时 $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \dots \mathbf{p}_{\text{rank}(\mathbf{H}^c)} \mathbf{0} \dots \mathbf{0}]$ ， $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1 \dots \mathbf{f}_{\text{rank}(\mathbf{H}^c)} \mathbf{0} \dots \mathbf{0}]$ ， $\text{rank}(\mathbf{H}^c)$ 反映最大可能的并行子数据流个数。以 \mathbf{p}_1 和 \mathbf{f}_1 的计算为例(其它 \mathbf{p}_i 和 \mathbf{f}_i 的计算与之类似)，为保证子数据流之间的正交性，CBS 预编码中 \mathbf{T}^c 的构造按照 3.2.1 节进行，CU 接收滤波需重新构造 $\mathbf{R}^c = [\mathbf{u}_1^{pc}, \dots, \mathbf{u}_{\text{rank}(\mathbf{H}^{pc})}^{pc}, \mathbf{u}_2^c, \dots, \mathbf{u}_{\text{rank}(\mathbf{H}^c)}^c]$ ，有以下引理。

引理 1 认知通信采用 SM 方式，无法在保证 CBS 对 PU 无干扰的同时，于 CU 端完全消除来自 PBS 的干扰，并且使认知通信子数据流之间无相互干扰。

证明

(1)根据定理 1 的证明(1)，天线配置需满足 $M_T^c > M_R^p$ 且 $M_T^c > M_R^c$ 。

(2)类似定理 1 的证明(2)，CU 接收滤波矩阵 \mathbf{f} 存在非零解得条件是 $\text{rank}(\mathbf{R}^c) < M_R^c$ ，即

$$\text{rank}(\mathbf{H}^{pc}) + \text{rank}(\mathbf{H}^c) - 1 < M_R^c \quad (20)$$

$$\min(M_T^p, M_R^c) + \min(M_T^c, M_R^c) < M_R^c + 1 \quad (21)$$

式(21)成立的条件是 $M_T^p < M_R^c$ 且 $M_T^c < M_R^c$ ，否则易推得 $\min(M_T^c, M_R^c) < 1$ 或者 $\min(M_T^p, M_R^c) < 1$ ，不合理。

比较证明(1)与证明(2)中的天线配置要求可以发现，同时要求 $M_T^c > M_R^c$ 和 $M_T^c < M_R^c$ 是矛盾的。

证毕

4 仿真结果

该部分给出仿真结果。授权系统天线配置 $M_T^p = M_R^p = 2$ ，认知系统天线配置 $M_T^c = 5$ ， $M_R^c = 3$ ，通信方式均采用 BF。Markov 信道模型转移概率 $\alpha_i^p = \alpha^c = 0.2, \beta_i^p = \beta^c = 0.8 (i = 1, \dots, N)$ 。对于不同的仿真参数也可得到相同的结论。

研究 3 种频谱接入方法：传统的(非共存)机会频谱接入(OSA)；CBS 根据 3.2.1 节计算 \mathbf{P} 进行发射预编码，CU 根据 3.2.2 节计算 \mathbf{F} 完成接收滤波的空分复用机会频谱接入(SDM-OSA-1)；CBS 根据 3.2.1 节计算 \mathbf{P} 进行发射预编码，CU 采用 $\mathbf{F} = [\mathbf{u}_1^c \ \mathbf{0} \ \dots \ \mathbf{0}]$ 完成接收滤波的共享方法(SDM-OSA-2)。对于 SDM-OSA-2, CU 未对来自 PBS 的干扰进行抑制，虽然相比于 SDM-OSA-1 复杂度降低，但通信性能也有一定损失。

图 3 给出授权频道数 $N=2$ ，采用不同方法得到的认知系统阻塞概率与中断概率随 SNR 变化的情况。由图可见，采用 OSA，认知系统的中断概率和阻塞概率均非零。采用 SDM-OSA，认知系统以能够开始或维持通信为首要目标，通过空域信号处理，以一定的通信性能降低为代价实现与授权系统共存，其阻塞概率与中断概率均为 0。实际系统中，考虑到用户的服务质量(Quality of Service, QoS)，有可能出现认知系统为了共存，自身通信性能损失严重，以至于无法满足 QoS 要求的情况，此时的中断概率与阻塞概率非零，与 QoS 设置有关。

图 4 给出授权频道数 $N=2$ ，采用不同方法的系统吞吐率随 SNR 变化的情况。由于认知系统对授权系统无干扰，OSA 与 SDM-OSA 获得的授权系统吞吐率相同。对于认知系统，OSA 的吞吐率最低，SDM-OSA 增加了对空域资源的利用，避免了阻塞与中断，吞吐率有一定程度提高。SDM-OSA-1 在 SNR 较高时优于 SDM-OSA-2，而当 $\text{SNR} < 4 \text{ dB}$ 时，

与 SDM-OSA-2 接近。这是由于低 SNR 处，噪声是影响通信性能的主要因素，采用 SDM-OSA-1，CU 在抑制来自 PBS 干扰的同时也削弱了有用信号功率，该削弱效果会抵消干扰抑制带来的改善；高 SNR 处，干扰成为主要因素，SDM-OSA-1 的 CU 端干扰抑制带来的吞吐率改善明显，并且随着 SNR 的增加而增大。图 4 中认知系统吞吐率参考上界是在不考虑授权系统(授权系统业务量为 0)，并且仅有一个 CU 的情况下得到的。与 SDM-OSA-2 相比，SDM-OSA-1 在高 SNR 处获得的吞吐率更接近该上界。

图 5 给出 $\text{SNR}=20 \text{ dB}$ ，采用不同方法得到的认知系统阻塞概率与中断概率随授权频道数 N 变化的情况。由图可见，OSA 的中断概率与阻塞概率随着 N 的增加而降低，当 N 足够大时趋于 0。与图 3 的结果相同，采用 SDM-OSA，认知系统的阻塞概率与中断概率均为 0。

图 6 给出 $\text{SNR}=20 \text{ dB}$ ，采用不同方法的系统吞吐率随授权频道数 N 变化的情况。由图可见，采用任何方法，授权系统不会受到认知系统的干扰，其吞吐率随 N 的增加而线性增大。由于授权频道数增加使认知用户无法获得空闲频道的概率降低，因此认知系统的吞吐率随着 N 的增加趋于参考上界，其中 OSA 得到的吞吐率最低，SDM-OSA-1 优于 SDM-OSA-2，这一优势在 N 较小时更明显。由于参考上界是在授权系统业务量为 0 情况下的单用户认知系统吞吐率，因此与 N 无关，呈现为一条水平线。注意到图中当 $N > 6$ 时，3 种方法获得的吞吐率与参考上界相差无几，这是由于该仿真结果是在授权系统业务较轻 ($\alpha_i^p = 0.2, \beta_i^p = 0.8$ ，其中 $i = 1, \dots, N$) 的情况下得到的。当授权业务繁忙时，3 种方法均需要在 N 更大时才能够逼近参考上界。

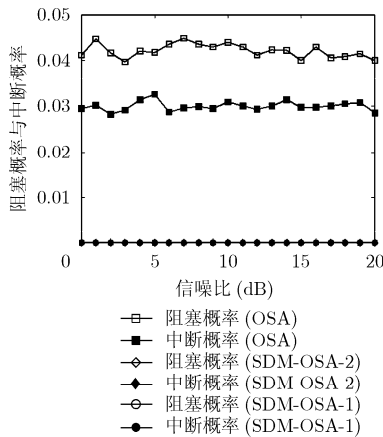


图 3 中断概率和阻塞概率($N=2$)随 SAR 变化的情况

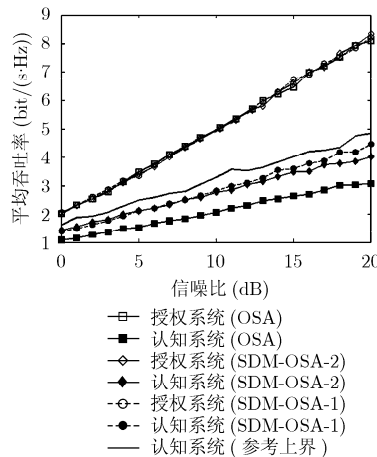


图 4 系统吞吐率($N=2$)随 SAR 变化的情况

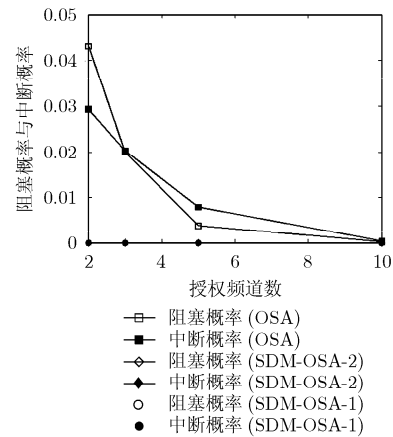


图 5 中断概率和阻塞概率($\text{SNR}=20 \text{ dB}$)随授权频道数变化的情况

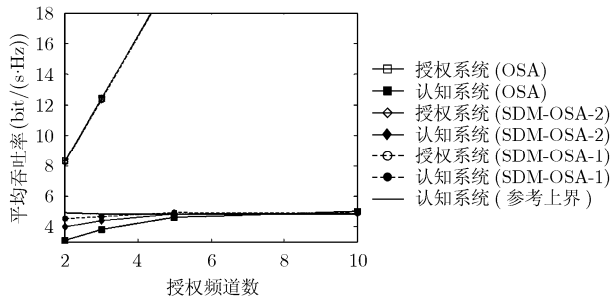


图6 系统吞吐量 (SNR=20 dB)
随授权频道数变化的情况

5 结束语

本文针对多天线认知无线网络提出一种基于空分复用的频谱接入方法(SDM-OSA),并对认知系统发射端与接收端的信号处理算法进行设计,当认知系统无法获得空闲频率资源时,仍能够通过空分复用的方式完成通信。仿真结果表明,与传统的非共存机会频谱接入(OSA)相比,所提方法能够在不影响授权系统性能的情况下降低认知通信的阻塞概率与中断概率,并且显著提高认知系统的吞吐量。

参考文献

- [1] Krenik W and Batra A. Cognitive radio techniques for wide area networks [C]. Design Automation Conference (DAC'05), Anaheim, 2005: 409-412.
- [2] Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communication [C]. IEEE International Workshop Mobile Multimedia Communication, San Diego, 1999: 3-10.
- [3] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201-220.
- [4] Devroye N, Vu M, and Tarokh V. Cognitive radio networks [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(6): 12-23.
- [5] Vuk Marojevic, José Salazar, and Xavier Revés, *et al.* Resource modeling for a joint resource management in cognitive radio [C]. IEEE International Conference on Communications, Beijing, 2008: 4175-4180.
- [6] Li Zhao, Yang Jia-wei, and Yao Jun-liang. Adaptive opportunistic transmission in MU-MIMO downlink with reduced feedback [J]. *Journal of Communications*, 2010, 5(7): 511-520.
- [7] Zhang Rui, Lim Teng, Liang Ying-chang, and Zeng Yong-hong. Multi-antenna based spectrum sensing for cognitive radios: a GLRT approach [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(1): 84-88.
- [8] Yong Peng and Rajan D. Capacity bounds for a cognitive MIMO Gaussian Z-interference channel [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(4): 1865-1876.
- [9] Scutari G and Palomar D P. MIMO cognitive radio: a game theoretical approach [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(2): 761-780.
- [10] Bakr O, Johnson M, and Wild B, *et al.* A multi-antenna framework for spectrum reuse based on primary-secondary cooperation [C]. IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Chicago, 2008: 1-5.
- [11] Zhang Lan, Zhang Rui, and Liang Ying-chang, *et al.* On the relationship between the multi-antenna secrecy communications and cognitive radio communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(6): 1877-1886.
- [12] Zhao Q, Tong L, and Swami A, *et al.* Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in Ad hoc networks: a POMDP framework [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(3): 589-600.
- [13] Bakr O, Johnson M, and Mudumbai R, *et al.* Multi-antenna interference cancellation techniques for cognitive radio applications [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest, 2009: 1-6.
- [14] Jitvanichphaibool K, Liang Ying-chang, and Zhang Rui. Beamforming and power control for multi-antenna cognitive two-way relaying [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest, 2009: 1-6.
- [15] Hamdi K, Zhang Wei, and Letaief K. Opportunistic spectrum sharing in cognitive MIMO wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(8): 4098-4107.

李 钊：男，1981年生，副教授，博士，从事MIMO无线通信、认知无线电研究。

赵林靖：女，1976年生，副教授，博士，从事无线移动通信、认知无线电研究。

刘 勤：男，1976年生，副教授，博士，从事无线移动通信、认知无线电研究。