

认知 MIMO 系统基于授权通信模式信息的空频域机会接入

李钊, 李建东, 肖丽媛

(西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对认知 MIMO 系统设计一种空频域机会接入策略。当存在频谱空洞时, 认知业务以交叉共享方式实现传输; 当无空闲频谱资源可用时, 利用授权通信模式信息与系统间干扰信道信息, 以重叠共享方式实现认知业务传输。该方法综合利用空间相关度与特征模式传输增益进行空域资源质量评价, 实现授权频道与认知特征模式的选择分集。并且, 基于授权通信模式信息的信号处理降低了认知系统天线配置要求以及认知信号的功率损失。仿真结果表明, 所提策略能够在不影响授权业务的前提下显著改善认知业务性能, 获得接近最佳的认知吞吐率。

关键词: 认知无线电; MIMO; 频谱共享; 正交投影

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)01-0038-07

Spatio-frequency domain opportunistic access in CR-MIMO system based on primary transmission mode information

LI Zhao, LI Jian-dong, XIAO Li-yuan

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

Abstract: An opportunistic spatio-frequency access (OSFA) strategy for CR-MIMO system was designed. When spectrum holes exist, cognitive service was implemented applying overlay approach. While there was no idle spectrum available, primary transmission mode information (PTMI) and inter-system interference channel information were exploited. And cognitive service was implemented using underlay approach. The method utilizes both spatial correlation and eigenmode transmission gain in spatial resource quality evaluation. Consequently, selection diversity of both authorized channel and cognitive eigenmode was achieved. Moreover, PTMI based signal processing reduced the antenna requirement for cognitive system as well as the power loss of cognitive signal. Simulation results indicate that the proposed method could achieve significant improvement of cognitive service and near-optimal cognitive throughput on the premise that no interference is imposed on the primary.

Key words: cognitive radio; MIMO; spectrum sharing; orthogonal projection

收稿日期: 2011-07-31; 修回日期: 2011-11-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320404); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT0852); 国家自然科学基金资助项目(61102057); 高等学校引智计划基金资助项目(B08038); 国家杰出青年科学基金资助项目(60725105); ISN 基金资助项目(ISN1103005)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320404); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT0852); The National Nature Science Foundation of China (61102057); The 111 Project (B08038); The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (60725105); ISN Project (ISN1103005)

1 引言

近年来，动态频谱共享技术受到越来越广泛的关注，这主要源于以下 2 个方面事实，可分配给新应用的频谱资源越来越稀缺，目前已分配频谱的利用率低。因此，频谱短缺的问题更主要的是由于频谱管理政策的不合理，而不是可用频率资源的不足^[1]。

动态频谱共享是在保证授权业务服务质量的前提下允许非授权应用共享已分配的频率资源，实现频谱共享的基本方法包括重叠(underlay)共享方式和交叉(overlay)共享方式^[2]。重叠共享允许次级业务持续接入频谱，但认知用户的发射功率受到严格控制，即认知用户对授权通信的干扰需满足干扰容限。交叉共享对认知用户的发射功率没有严格约束，但需要通过准确感知频谱环境，合理选择空闲频谱完成认知通信。在重叠共享方式中，即便授权用户不发射，次级业务同样受到干扰容限的约束，对潜在的通过检测授权用户行为可获得的频谱机会未加利用；而交叉共享未考虑授权业务的干扰容限，忽略了系统共存的可能。这 2 种方法对频谱资源的利用都存在不足，因此也出现了将交叉共享与重叠共享相结合的混合策略的研究^[2]。

认知无线电(CR, cognitive radio)技术^[3]根据电磁环境进行动态频谱利用，在频谱共享领域具有重要研究意义。随着研究的深入，一部分工作将认知技术与多输入多输出(MIMO, multi-input multi-output)技术相结合，利用多天线提供的空域信号处理能力设计频谱感知与共享方法^[4-7]。其中，文献[4]提出一种基于多天线的频谱感知方法，文献[5]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[6]针对认知 MIMO 上行通信设计了传输策略，将频域空洞拓展至空域，但在其研究场景中要求授权业务与认知业务的通信目的相同，并且授权与认知通信的空间信道特征完全对齐(alignment)，这些条件在实际中难以满足。文献[7]针对认知 MIMO 系统设计一种混合频谱共享策略，当存在频谱空洞时，认知业务以交叉方式实现频谱共享，当无空闲频谱资源可用时，则采用基于空分复用(SDM, space division multiplexing)的重叠共享方式。但是文献[7]仅根据干扰信道信息设计信号处理算法，未考虑授权业务传输方式的影响，对认知系统天线配置要求高，增加了实现的困难。另外，

基于空间相关度的空域资源质量评价未考虑特征模式(eigenmode)的传输增益，以及认知业务固定地采用主特征模式，这些都导致空域资源的评估与利用不够合理。

事实上，多天线通信系统中空域资源的状态受到授权通信空间信号处理方式的影响。本文综合利用系统间干扰信道信息以及授权业务通信模式信息，对文献[7]所提策略的重叠共享部分重新设计，显著降低认知系统天线配置要求。另外，在空域资源质量评价方面综合考察空间相关度与特征模式传输增益，实现授权频道与认知特征模式的合理选择。

2 系统模型

本文研究授权系统与认知系统共同覆盖的单小区下行通信，如图 1 所示。授权系统包含一个基站和多个用户。为了简单，认知系统由一个基站和一个用户构成，即不考虑认知用户(CU, cognitive user)之间的竞争与干扰。授权基站(PBS, primary base station)天线数 M_{BS}^p ，授权用户(PU, primary user)天线数为 M_U^p ；认知基站(CBS, cognitive base station)天线数 M_{BS}^c ，认知用户天线数为 M_U^c 。

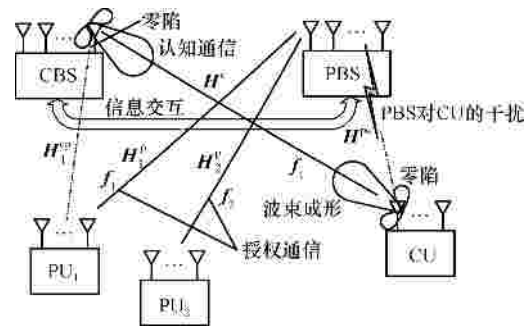


图 1 系统模型

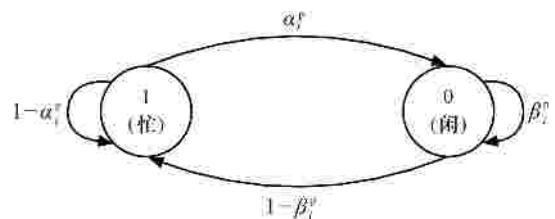


图 2 Markov 信道模型

授权系统拥有 N 个频道，为了简明，图中仅画出 $N = 2$ 的情况。假设各频道的带宽相同，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,任时刻一个授权频道至多由一个 PU 占用。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 2^N 的离散时间 Markov 过程^[8]。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)的概率为 a_i^p ,保持在状态 0 的概率为 b_i^p 。类似地,频道 i 从状态 0 转移至状态 1 的概率为 $1-b_i^p$,保持在状态 1 的概率为 $1-a_i^p$ 。认知业务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 a^c 和 b^c 。状态转移概率 $a_i^{p(c)}$ 与 $b_i^{p(c)}$ 反映了系统业务负荷的轻重,其值越低表明频谱空洞越稀缺以及对频谱空洞的需求越大。

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, $i=1, L, N$; 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^[9, 10]。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 基于授权通信模式信息的空频域机会接入

本节给出基于授权通信模式信息(PTMI, primary transmission mode information)的空频域机会接入(OSFA, opportunistic spatio-frequency access)策略。当存在频谱空洞时,认知业务以交叉共享方式实现传输;当无空闲频谱资源可用时,综合利用授权通信模式信息与系统间干扰信道信息,以重叠共享方式实现认知业务传输。OSFA-PTMI 是一种混合频谱共享策略,其设计重点在于重叠共享部分,因此以下讨论在认知业务与授权业务共存的场景中进行。假设授权通信可进行空间复用(SM, spatial multiplexing)与波束成形(BF, beamforming)2 种模式的自适应,认知通信在交叉共享方式下采用与授权通信相同的模式自适应,但在重叠共享方式下,考虑到认知系统需要避免对授权系统的干扰,同时抑制来自对方的干扰,采用可靠性更高的 BF 方式。

3.1 基本信号处理

在进行 OSFA-PTMI 具体设计前,首先给出授权系统与认知系统的基本信号处理。以频道 i 为例,经

过发射预编码与接收滤波处理的 PU _{i} 接收信号为

$$\begin{aligned} \bar{y}_i^p &= (\mathcal{U}_i^p)^H H_i^p \mathcal{V}_i^p x_i^p + (\mathcal{U}_i^p)^H H_i^{cp} P^c x^c + (\mathcal{U}_i^p)^H n \\ &= \mathcal{V}_i^p x_i^p + M_i^{c_1} P^c x^c + (\mathcal{U}_i^p)^H n \end{aligned} \quad (1)$$

其中, x_i^p 表示 PBS 发射符号(向量),其维度取决于于授权业务使用的特征模式个数 m_i^p 。当 $m_i^p=1$,授权通信模式为 BF;若 $m_i^p>1$,则为 SM。发射预编码矩阵(向量) \mathcal{V}_i^p 与接收滤波矩阵(向量) \mathcal{U}_i^p 通过对 H_i^p 进行奇异值分解 $H_i^p = U_i^p \Sigma_i^p (V_i^p)^H$ 得到, $\mathcal{V}_i^p \subseteq V_i^p$, $\mathcal{U}_i^p \subseteq U_i^p$, \mathcal{V}_i^p 与 \mathcal{U}_i^p 的列数等于授权业务特征模式数 m_i^p 。 n 为加性高斯白噪声向量,各个分量的方差均为 s_n^2 。重叠共享方式下认知通信采用 BF 方式, x^c 表示 CBS 发射符号, P^c 表示 CBS 发射预编码向量。式(1)中等号右端第 2 项表示 CBS 对 PU _{i} 的干扰,应通过设计 P^c 使 $(\mathcal{U}_i^p)^H H_i^{cp} P^c = 0$ 。 $M_i^{c_1}$ 表示授权业务传输模式信息 \mathcal{U}_i^p 与 CBS 对 PU _{i} 干扰信道信息 H_i^{cp} 合成得到的等效矩阵。

对于与授权业务共享频道 i 的认知业务,经过收发端信号处理后 CU 的接收信号由式(2)给出。

$$\begin{aligned} \bar{y}^c &= (F^c)^H H^c P^c x^c + (F^c)^H H^{pc} \mathcal{V}_i^p x_i^p + (F^c)^H n \\ &= (F^c)^H H^c P^c x^c + (F^c)^H M_i^{c_2} x_i^p + (F^c)^H n \end{aligned} \quad (2)$$

其中, F^c 表示 CU 接收滤波向量,等号右端第 2 项表示 PBS 与 PU _{i} 的通信对 CU 的干扰,需要设计 F^c 使 $(F^c)^H H^{pc} \mathcal{V}_i^p = 0$ 。 $M_i^{c_2}$ 表示授权业务传输模式信息 \mathcal{V}_i^p 与 PBS 对 CU 干扰信道信息 H^{pc} 合成得到的等效矩阵。类似地,定义认知业务使用的特征模式个数为 m^c 。以上讨论是在 Underlay 共享方式下进行的,需要指出的是,当存在频谱空洞时,认知通信自适应选择 m^c ,认知发射符号(向量)可表示为 x^c ,其维度取决于 m^c , P^c 和 F^c 的列数等于认知业务采用的特征模式数 m^c 。

3.2 重叠共享方式的认知信号处理

如前所述,OSFA-PTMI 属于混合频谱共享,其设计重点在于重叠共享部分的设计。根据式(1)和式(2),综合考虑干扰抑制与认知业务服务质量以及认知移动终端的硬件约束,将主要信号处理放在 CBS,即设计 P^c 使 CBS 实现对 PU _{i} 干扰消除以及对 CU 的发射波束成形,在 CU 端设计 F^c 滤出经由与 P^c 对应的特征模式传输的信息,并完成对来自 PBS 干扰的抑制。重叠共享方式的认知信号

处理算法如下。

步骤 1 遍历全体授权频道 ($1 \leq i \leq N$) 和认知通信特征模式 ($1 \leq j \leq \text{rank}(H^c)$)，分别对等效矩阵 $M_i^{e_1}$ 和 $M_i^{e_2}$ 进行奇异值分解， $M_i^{e_1} = U_i^{e_1} \Lambda_i^{e_1} (V_i^{e_1})^H$ ， $M_i^{e_2} = U_i^{e_2} \Lambda_i^{e_2} (V_i^{e_2})^H$ 。对频道 i 和模式 j ，CBS 构造矩阵 $T_{i,j} = [v_{i,1}^c, \dots, v_{i, \text{rank}(M_i^{e_1})}^c, v_1^c, \dots, v_{j-1}^c, v_{j+1}^c, \dots, v_{\text{rank}(H^c)}^c]$ ，采用 Gram-Schmidt 方法对 $T_{i,j}$ 标准正交化，得到 $\bar{T}_{i,j} = [\bar{t}_{i,1}^c, \dots, \bar{t}_{i, \text{rank}(M_i^{e_1})}^c, \bar{t}_1^c, \dots, \bar{t}_{j-1}^c, \bar{t}_{j+1}^c, \dots, \bar{t}_{\text{rank}(H^c)}^c]$ 。CU 端构造矩阵 $R_{i,j} = U_i^{e_2} = [u_{i,1}^{e_2}, \dots, u_{i, \text{rank}(M_i^{e_2})}^{e_2}]$ ，注意到 $R_{i,j}$ 由一组标准正交基构成，取 $\bar{R}_{i,j} = R_{i,j} = [\bar{r}_{i,1}^{e_2}, \dots, \bar{r}_{i, \text{rank}(M_i^{e_2})}^{e_2}]$ 。

步骤 2 计算空域资源质量评价因子：

$$Q_{i,j} = l_j^c / (CO_{i,j}^{\text{CBS}} \cdot CO_{i,j}^{\text{CU}}) \quad (3)$$

其中， l_j^c 表示 H^c 的第 j 个奇异值， $CO_{i,j}^{\text{CBS}}$ 与 $CO_{i,j}^{\text{CU}}$ 分别为 CBS 端和 CU 端的空间相关度评价。

$$CO_{i,j}^{\text{CBS}} = \sum_{m=1}^{\text{rank}(M_i^{e_1})} \left| \langle v_j^c, \bar{t}_{i,m}^c \rangle \right|^2 + \sum_{n \neq j}^{\text{rank}(H^c)} \left| \langle v_j^c, \bar{t}_n^c \rangle \right|^2 \quad (4)$$

$$CO_{i,j}^{\text{CU}} = \sum_{m=1}^{\text{rank}(M_i^{e_2})} \left| \langle u_j^c, \bar{r}_{i,m}^{e_2} \rangle \right|^2 \quad (5)$$

其中， $\langle a, b \rangle$ 和 $|\cdot|$ 分别表示向量内积与求模运算。

根据式(4)，CBS 端空间相关度评估包括 2 个方面，

认知业务特征模式 j 与 CBS 对 PU_i 有效干扰的空间相关度，认知业务特征模式 j 与其他认知模式的空间相关度。CU 端空间相关度评价由认知通信特征模式 j 与 PBS 对 CU 有效干扰的空间相关度决定。根据式(3)， $Q_{i,j}$ 综合考察了认知通信与干扰(包括授权与认知系统间以及认知系统内)的空间相关度以及认知特征模式的传输增益。

步骤 3 选择授权频道 \hat{i} 和特征模式 \hat{j} 完成认知通信。

$$(\hat{i}, \hat{j}) = \arg \max_{1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq \text{rank}(H^c)} (Q_{i,j}) \quad (6)$$

根据式(6)，所提方法能够获得授权频道与特征模式的选择分集增益。CBS 与 CU 的信号处理分别由步骤 4 和步骤 5 给出。

步骤 4 CBS 端信号处理。将 v_j^c 投影到 $\bar{T}_{i,j}$ 的正交子空间。

$$\mathbb{W}_j^c = v_j^c - \sum_{m=1}^{\text{rank}(M_i^{e_1})} (\bar{t}_{i,m}^c)^H v_j^c \bar{t}_{i,m}^c - \sum_{n \neq j}^{\text{rank}(H^c)} (\bar{t}_n^c)^H v_j^c \bar{t}_n^c \quad (7)$$

对 \mathbb{W}_j^c 归一化，得到发射预编码向量 $P^c = \mathbb{W}_j^c / \|\mathbb{W}_j^c\|$ ， $\|\cdot\|$ 表示 Euclidean 范数。

步骤 5 CU 端信号处理。将 u_j^c 投影到 $\bar{R}_{i,j}$ 的正交子空间。

$$\mathbb{W}_j^c = u_j^c - \sum_{m=1}^{\text{rank}(M_i^{e_2})} (\bar{r}_{i,m}^{e_2})^H u_j^c \bar{r}_{i,m}^{e_2} \quad (8)$$

对 \mathbb{W}_j^c 归一化，得到接收滤波向量 $F^c = \mathbb{W}_j^c / \|\mathbb{W}_j^c\|$ 。

根据上述算法，重叠共享场景中认知系统吞吐率由式(9)给出，

$$R^c(\hat{i}, \hat{j}) = \text{lb} \left(1 + \frac{E^c ((F^c)^H H^c P^c) ((F^c)^H H^c P^c)^H}{E^p ((F^c)^H H^p \mathbb{V}_i^p) ((F^c)^H H^p \mathbb{V}_i^p)^H + s_n^2} \right) = \text{lb} \left(1 + \frac{E^c (l_j^c)^2 |\hat{?}_{i,j}|^2}{s_n^2} \right) \quad (9)$$

其中， $\hat{?}_{i,j} = (F^c)^H u_j^c (v_j^c)^H P^c$ ， E^p 和 E^c 分别表示 PBS 和 CBS 的发射功率，假设 $E^p = E^c$ 。由于 $|\langle v_j^c, P^c \rangle|^2 < 1$ 且 $|\langle F^c, u_j^c \rangle|^2 < 1$ ，认知信号在经过 CBS 与 CU 处理后，存在一定程度的功率衰减。

3.3 认知系统天线配置讨论

根据 3.2 节信号处理算法的描述，认知业务采用重叠共享方式的基础是空间正交投影的实现， P^c 与 F^c 有非零解取决于授权业务与认知业务采用的空间特征模式个数以及认知系统的天线配置。以下不对认知业务传输模式约束，进行更具一般性 ($m^c = 1$) 的讨论。

首先讨论 P^c 有非零解的认知系统天线配置要求。假设认知业务采用的特征模式集合为 $J = \{j_1, \dots, j_{m^c}\}$ 。根据 3.2 节，一方面为避免对 PU_i 产生干扰， P^c 需要与 $[\bar{t}_{i,1}^c, \dots, \bar{t}_{i, \text{rank}(M_i^{e_1})}^c]$ 正交；另一方面， P^c 需要与 $j \in J$ 以外的其余认知特征模式正交(包括认知业务采用的和未采用的模式)，即 P^c 与 $[\bar{t}_1^c, \dots, \bar{t}_{j-1}^c, \bar{t}_{j+1}^c, \dots, \bar{t}_{\text{rank}(H^c)}^c]$ 正交。并且， P^c 的各个列向量也要保证相互正交。根据上述讨论，需要以下不等式成立：

$$M_{BS}^c = \text{rank}(M_i^{c_1}) + m^c + (\text{rank}(H^c) - m^c) = \min(m_i^p, M_{BS}^c) + \min(M_{BS}^c, M_U^c) \quad (10)$$

式(10)成立的条件是 $M_{BS}^c > m_i^p$ 且 $M_{BS}^c > M_U^c$,可以进一步得到

$$M_{BS}^c = m_i^p + M_U^c \quad (11)$$

接下来讨论 F^c 有非零解的认知系统天线配置要求。根据 3.2 节, F^c 仅完成对来自 PBS 干扰的抑制, 即 F^c 与 $\bar{R}_{i,j} (= U_{i^2}^{c_2})$ 中前 m_i^p 列正交, 因此要求以下不等式成立:

$$M_U^c = m_i^p + m^c \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得

$$M_{BS}^c = 2m_i^p + m^c \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可以发现, 认知系统的天线配置独立于授权系统天线配置, 仅取决于授权业务与认知业务的传输模式。另外, 以上讨论未约束 m^c , 在本文设计的具体算法和仿真中, 固定 $m^c = 1$ 。

根据以上讨论, 表 1 给出授权业务采用自适应通信(包括 BF 和 SM), 认知业务采用 BF 方式实现重叠频谱共享需满足的天线配置要求。为了简单, 限定 $m_i^p = 2$ 。

表 1 认知系统天线配置要求

M_{BS}^p	M_U^p	m_i^p	M_{BS}^c	M_U^c
1	1	1	3	2
1	2	1	3	2
2	1	1	3	2
2	2	1	3	2
		2	5	3
4	1	1	3	2
		1	3	2
4	2	2	5	3
		1	3	2
4	4	1	3	2
		2	5	3

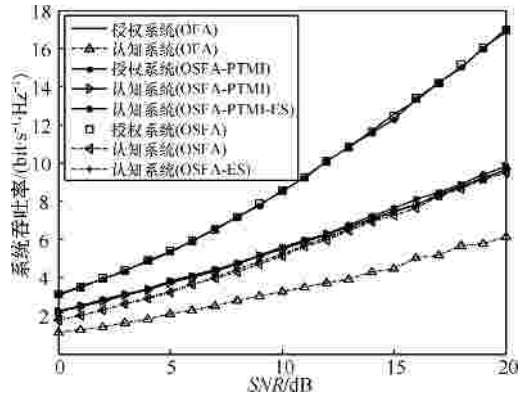
根据表 1, 若授权业务固定采用 BF 方式 ($m_i^p = 1$), M_{BS}^c 和 M_U^c 分别取 3 和 2; 若 m_i^p 在 1 与

2 之间自适应, 则 M_{BS}^c 和 M_U^c 分别取 5 和 3。与文献[7]的结果相比, 认知系统天线配置要求显著降低。

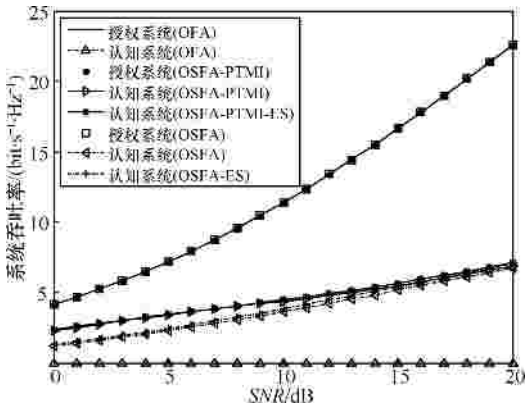
4 仿真结果

认知系统天线配置采用 $M_{BS}^p = M_U^p = 2$, $M_{BS}^c = 5$, $M_U^c = 3$, 因此 $m_i^p \in \{1, 2\}$, 为了简单, 限定交叉共享模式认知业务 $m^c = 2$, 重叠共享模式 $m^c = 1$ 。研究的方法包括: 传统频域机会接入(OFA), 空频域机会接入(OSFA)(基于文献[7], 对空域资源质量评价进行改进, 综合考察空间相关度与认知特征模式传输增益), 本文提出的基于授权通信模式信息的空频域机会接入(OSFA-PTMI), 以及对授权频道与认知特征模式进行遍历搜索(ES, exhaustive searching)的方法。

图 3 给出授权频道数 $N=2$, 不同方法获得的系统吞吐率。图 3(a)在 $a_i^{p(c)} = 0.2$, $b_i^{p(c)} = 0.4 (i=1, L, N)$ 的情况下得到, 图 3(b)在 $a_i^{p(c)} = b_i^{p(c)} = 0 (i=1, L, N)$ 的情况下得到。对于所有方法, 由于 CBS 与 CU 的信号处理算法能够保证授权业务不受干扰, 因此得到的授权系统吞吐率相同。如图 3 所示, 几种方法的系统吞吐率均随着信噪比的增加而增大。对于认知系统, 由于 ES 进行授权频道与特征模式的遍历选择, 性能最优。OSFA/OSFA-PTMI 策略在评价空域资源质量时综合考虑 CBS 端和 CU 端空间相关度以及特征模式传输增益, 实现了空域资源的合理利用, 吞吐率性能较 OFA 有明显提升, 与 ES 接近。OSFA-PTMI 利用了授权业务传输模式信息进行信号处理算法设计, 吞吐率性能优于 OSFA。当 SNR 较低时, OSFA-PTMI 的优势更明显, 这是由于此时授权业务以高概率选择 BF 方式, OSFA-PTMI 根据等效矩阵 $M_i^{c_1}$ 和 $M_i^{c_2}$ 进行信号处理, 有用信号功率损失低于仅根据干扰信道矩阵 H_i^{cp} 和 H^{pc} 进行处理的 OSFA 方法。随着 SNR 增加, 授权业务选择 SM 方式的概率逐渐增大, 采用 OSFA-PTMI 的有用信号功率损失逐渐逼近 OSFA, 因此二者的吞吐率性能逐渐接近。关于 $a_i^{p(c)}$ 与 $b_i^{p(c)}$ 取值对算法性能的影响, 可以发现, 当授权业务始终占用全部授权频道时, 传统 OFA 无法工作, 如图 3(b)所示。授权与认知业务越繁忙, OSFA/OSFA-PTMI 策略相对于 OFA 的吞吐率改善越显著。

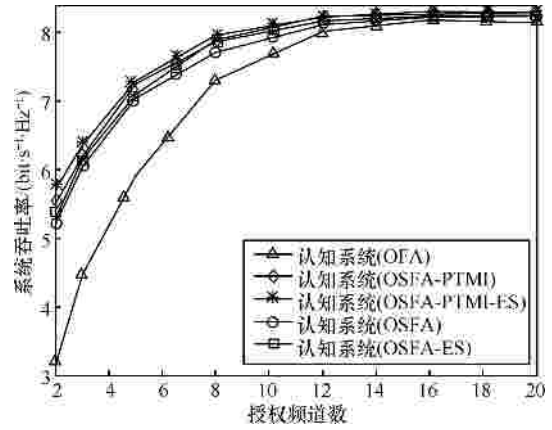


(a) $a_i^{p(c)} = 0.2, b_i^{p(c)} = 0.4$

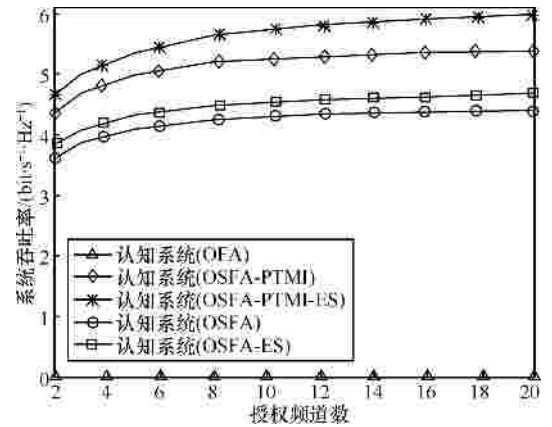


(b) $a_i^{p(c)} = b_i^{p(c)} = 0$

图 3 系统吞吐量($N=2$)



(a) $a_i^{p(c)} = 0.2, b_i^{p(c)} = 0.4$



(b) $a_i^{p(c)} = b_i^{p(c)} = 0$

图 4 系统吞吐量($SNR=10\text{dB}$)

图 4 给出信噪比 $SNR=10\text{dB}$ ，不同方法得到的系统吞吐量。图 4(a)在 $a_i^{p(c)} = 0.2, b_i^{p(c)} = 0.4$ ($i = 1, L, N$) 的情况下得到，图 4(b)在 $a_i^{p(c)} = b_i^{p(c)} = 0$ ($i = 1, L, N$) 的情况下得到。由于几种策略均确保授权业务不受干扰，因此图 4 仅考察认知通信性能。由图 4(a)可以发现，较小的 N 导致无空闲频道可用的概率较高，OSFA/OSFA-PTMI 相比于传统 OFA 能够显著改善认知系统吞吐量，与最佳的 ES 方法近似，并且 OSFA-PTMI 更优；随着 N 的增加，认知用户无法获得空闲频道的概率降低，几种方法的认知系统吞吐量趋于饱和，并且当 N 足够大时，认知业务能够以接近 1 的概率获得空闲频道，采用交叉共享方式即可，因此 OSFA/OSFA-PTMI 与 OFA 相比优势逐渐消失。对于图 4(b)，无空闲频谱可用，OFA 失效，由于频道选择分集增益随着 N 的增加而增大并趋于饱和，因此 OSFA/OSFA-PTMI 方法的吞吐量也随着 N 的增加趋于饱和，并且 OSFA-PTMI 优于 OSFA。

5 结束语

本文针对认知 MIMO 系统提出一种空频域机会接入策略 OSFA-PTMI。当存在频谱空洞时，认知业务以交叉共享方式实现传输；当无空闲频谱资源可用时，综合利用授权通信模式信息与系统间干扰信道信息，以重叠共享方式实现认知业务传输。该方法综合考察空间相关度与特征模式传输增益进行空域资源质量评价，能够获得授权频道与认知特征模式的选择分集增益。并且，基于 PTMI 的信号处理降低了认知系统天线配置要求以及认知信号的功率损失。仿真结果表明，所提策略能够在不影响授权业务的前提下显著改善认知业务性能，获得接近最佳的认知吞吐量。

参考文献：

[1] ZHAO Q, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.

- [2] KHOSHKHOLGH M G, NAVAIE K, YANIKOMEROGLU H. Access strategies for spectrum sharing in fading environment: overlay, underlay, and mixed[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(12): 1780-1793.
- [3] MITOLA J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communication[A]. Proceedings of IEEE International Workshop Mobile Multimedia Communication[C]. San Diego, USA, 1999. 3-10.
- [4] ZHANG R, TENG J L, LIANG Y C, ZENG Y H. Multi-antenna based spectrum sensing for cognitive radios: a GLRT approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(1): 84-88.
- [5] SCUTARI G, PALOMAR D P. MIMO cognitive radio: a game theoretical approach[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(2): 761-780.
- [6] KRIKIDIS I. A SVD-based location coding for cognitive radio in MIMO uplink channels[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(10): 912-914.
- [7] 李钊, 赵林靖, 刘勤. 认知无线网络基于空分复用的机会频谱接入[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1172-1177.
LI Z, ZHAO L J, LIU Q. Space division multiplexing based opportunistic spectrum access in cognitive radio network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(5): 1172-1177.
- [8] ZHAO Q, TONG L, SWAMI A, CHEN Y X. 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.
- [9] BAKR O, JOHNSON M, MUDUMBAI R, RAMCHANDRAN K. Multi-antenna interference cancellation techniques for cognitive radio applications[A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C], Budapest, Hungary, 2009. 1-6.
- [10] JITVANICHPHAIBOOL K, LIANG Y C, ZHANG R. Beamforming

and power control for multi-antenna cognitive two-way relaying[A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C], Budapest, Hungary, 2009. 1-6.

作者简介:



李钊 (1981-), 男, 陕西西安人, 西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为 MIMO 无线通信系统、认知无线电、无线资源管理等。



李建东 (1962-), 男, 江苏阜宁人, 西安电子科技大学研究生院常务副院长和综合业务网理论及关键技术国家重点实验室主任、教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线 IP 技术、移动通信、软件无线电、ad hoc 自组织网络等。



肖丽媛 (1981-), 女, 陕西咸阳人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为移动 IPv6、WiMax 及认知网络中的切换与资源管理等。