

CR 系统中基于空分复用的上行链路设计

李 钊 刘 勤 赵林靖

(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, 陕西 西安 710071)

摘要 设计了多天线认知无线电系统上行信号处理算法. 该算法考虑移动终端尺寸、复杂度方面的约束, 由认知基站完成接收波束成形及干扰抑制, 认知终端仅进行发射波束成形, 降低了终端复杂度, 便于系统实现. 在此基础上提出基于空分复用的机会频谱接入方法, 认知系统通过合理的天线配置, 当无法获得空闲频谱资源时以空分复用方式完成通信, 并且保证对授权系统无干扰, 相比于传统的机会频谱接入方法能够显著提高系统吞吐率.

关键词 认知无线电; 多天线; 上行链路; 预编码; 空分复用

中图分类号 TN929.5 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2011)11-0029-05

Space division multiplexing-based uplink design for CR systems

Li Zhao Liu Qin Zhao Linjing

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

Abstract A signal processing algorithm for uplink transmission in multi-antenna cognitive radio system was designed, in which the equipment size and complexity constraints of the mobile station were considered. The cognitive base station carried out receiving beamforming and interference elimination, whereas cognitive terminal implemented transmitting beamforming only. The complexity of cognitive terminal was reduced and the system implementation was facilitated. Based on the above work, an opportunistic spectrum access scheme based on space division multiplexing (SDM-OSA) was proposed. With proper antenna configuration, cognitive transmission could be carried out using SDM on the premise that no interference was imposed on the primary even though there was no idle spectrum available. Compared with traditional OSA, throughput of cognitive system was notably enhanced.

Key words cognitive radio (CR); multiple antennas; uplink; precoding; space division multiplexing

随着无线通信的快速发展, 频谱资源稀缺与传统的固定频谱分配方式导致的频谱资源利用率低的矛盾日益突出^[1]. 目前, 3 GHz 以下的所有频段已分配完毕^[2], 为了使新的无线通信系统得以应用, 频谱共享与重用技术受到越来越多的关注. 认知无线电(CR)技术^[3]通过感知电磁环境实现动态频谱利用, 近年来得到学术界与产业界的重视. 随着研究的深入, 人们又提出认知无线网络(CRN)^[4], 进一步对复杂网络环境中频谱资源的高效利用进行研究. 传统的 CR 和 CRN 关注频谱

资源的机会共享, 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, 认知通信能否进行取决于是否存在空闲频谱. 而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]. 近年来, 一部分研究将多输入多输出(MIMO)技术与认知无线电相结合, 设计频谱感知、频谱共享以及联合资源管理方法^[6-9]. 上述研究^[8-9]虽然给出基于多天线的认知系统对授权系统无干扰共存方法, 但是没有从硬件约束(设备尺

收稿日期 2011-03-16.

作者简介 李 钊(1981-), 男, 副教授, E-mail: zli@xidian.edu.cn.

基金项目 国家杰出青年科学基金资助项目(60725105); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB320404); 国家自然科学基金资助项目(61102057); 高等学校引智计划资助项目(B08038); ISN项目(ISN1103005).

寸、复杂度等)的角度考察所提方法的适用性,因此缺乏对实际应用的指导意义.

本文针对中心式认知上行通信设计基于空分复用的机会频谱接入(SDM-OSA)方法,通过算法设计,将主要的信号处理工作放在认知基站,从而有效降低认知终端的复杂度.认知系统进行合理的天线配置,能够在无空闲频谱资源可用时空分方式实现对授权系统的无干扰共存,提高频谱效率,改善自身的通信性能.

1 系统模型

研究授权系统与认知系统共同覆盖的单小区场景系统模型,如图 1 所示.授权系统包含 1 个基站和多个用户.简单起见,认知系统由 1 个基站和 1 个用户构成,即不存在认知用户(CU)之间的竞争与干扰.授权基站(PBS)天线数为 M_{PBS} ,授权用户(PU)天线数为 M_{PU} ,认知基站(CBS)天线数为 M_{CBS} ,认知用户天线数为 M_{CU} .须要指出的是:图 1 对上下行通信都进行了描述,这里仅对上行链路进行研究.

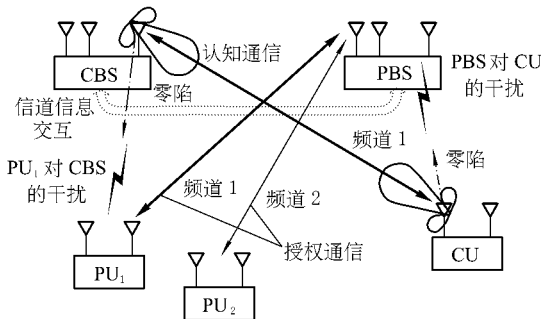


图 1 单小区场景系统模型

授权系统拥有 N 个频道(图 1 中 $N=2$),各频道的带宽均为 B ,具有频率平坦衰落特性.授权系统的频道分配原则为 1 个授权频道至多由 1 个 PU 占用.基站与移动台采用时分双工(TDD)方式进行通信,即上行与下行信道具有相同特性.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 的离散时间马尔可夫过程^[10].马尔可夫信道模型如图 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 $\alpha_{p,i}$,保持在状态 0 的概率为 $\beta_{p,i}$;类似地,频道 i 从状态 0 转移至状态 1 的概率为 $1-\beta_{p,i}$,保持在状态 1 的概率为 $1-\alpha_{p,i}$.认知用户的忙闲用另一独立的马尔可夫过程模拟,其转移概率分别为 α_c 和 β_c .

在时隙 t ,占据频道 i 的 PU(PU_i)与 PBS 之间的信道信息表示为 $\mathbf{H}_{p,i}(t)$ ($i=1,2,\dots,N$),

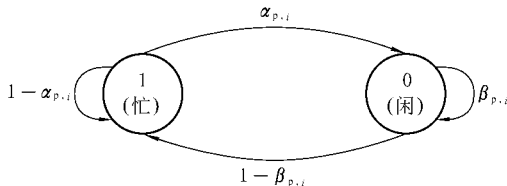


图 2 马尔可夫信道模型

CU 与 CBS 之间的信道信息为 $\mathbf{H}_c(t)$;当认知通信与授权通信在频道 i 实现共存时, PU_i 与 CBS 之间的信道信息为 $\mathbf{H}_{\text{PUC},i}(t)$,CU 与 PBS 之间的信道信息为 $\mathbf{H}_{\text{CUP},i}(t)$.假设认知系统与授权系统能够准确获得各自的信道信息,并且认知系统通过与授权系统协作^[8]获得信号处理所需的信息,协作可以采用有线方式或借助专用信道^[11].假设用于信道信息传递的链路是可靠的,并且其时延相对于信道变化可以忽略^[12],即信道具有准静态特性.为了简便讨论以下叙述在一个时隙内,省略时间标记 t .

2 认知系统上行通信设计

将多天线技术与 CR 结合,当认知用户能够获得空闲频谱时,采用传统的机会频谱接入(OSA);当无空闲频率资源可用时,认知用户采用空分复用(SDM)的方式完成通信(与授权用户共存,图 1 中 CU 选择与 PU_1 共存于频道 1),同时避免对授权系统产生干扰.讨论中,授权系统采用自适应传输^[13]以获得高的频谱效率,包括空间复用(SM)和波束成形(BF);对于认知系统,在 OSA 模式下采取与授权系统相同的自适应传输,在 SDM 模式下,考虑到认知系统须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.以下对共存场景中的上行信号处理算法进行设计,并给出基于空分复用的频谱接入方法 SDM-OSA.

2.1 授权系统信号处理

在设计认知上行通信信号处理算法前,首先给出授权系统的信号处理过程.选取 PU_i 的发射预编码矩阵为 $\mathbf{P}_p$,PBS 的接收滤波矩阵为 $\mathbf{F}_p$.对 $\mathbf{H}_{p,i}$ 进行奇异值分解 $\mathbf{H}_{p,i}=\mathbf{U}_{p,i}\mathbf{\Lambda}_{p,i}(\mathbf{V}_{p,i})^H$.当授权通信采用 SM 方式时, $\mathbf{P}_p=\mathbf{V}_{p,i}$, $\mathbf{F}_p=\mathbf{U}_{p,i}$;采用 BF 方式时, $\mathbf{P}_p=\mathbf{v}_{p,i,1}$, $\mathbf{F}_p=\mathbf{u}_{p,i,1}$, $\lambda_{p,i,1}$ 表示 $\mathbf{H}_{p,i}$ 的最大奇异值, $\mathbf{v}_{p,i,1}$ 和 $\mathbf{u}_{p,i,1}$ 与 $\lambda_{p,i,1}$ 对应,分别为主右奇异值向量和主左奇异值向量.某一时刻,经过 PU_i 发射预处理以及 PBS 接收滤波后的估计信号可表示为^[13]

$$\bar{\mathbf{y}}_{p,i}=\mathbf{\Lambda}_{p,i}\mathbf{x}_{p,i}+(\mathbf{U}_{p,i})^H\mathbf{H}_{\text{CUP},i}\mathbf{P}_c\mathbf{x}_c+$$

$(U_{P,i})^H n \quad (\text{SM 方式}); \tag{1}$

$\bar{y}_{P,i} = \lambda_{P,i,1} x_{P,i} + (u_{P,i,1})^H H_{CUP,i} P_C x_C +$

$(u_{P,i,1})^H n \quad (\text{BF 方式}), \tag{2}$

式中: n 为加性高斯白噪声向量, 各个分量的方差为 σ_n^2 ; $x_{P,i}$ 为采用 SM 方式 PU_i 的发射符号向量, 当采用 BF 方式时发射符号为 $x_{P,i}$, $x_{P,i}$ 或 $x_{P,i}$ 经过 P_P 预处理映射至天线阵列进行发送; P_C 为 CU 的发射预编码矩阵, 考虑到共存状态下认知通信采用 BF 方式, CU 发射符号为 x_C . 式(1)和(2)等号右端第 2 项表示 CU 对 PBS 的干扰, 需要通过设计 P_C 使该项为零. 当 $H_{CUP,i} P_C = 0$ 时, 频道 i 中授权通信的数据速率

$$R_{P,i} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{\text{rank}(H_{P,i})} \log_2 \left(1 + \frac{E_P (\lambda_{P,i,k})^2}{M_{PU} \sigma_n^2} \right) & (\text{SM 方式}); \\ \log_2 \left(1 + \frac{E_P (\lambda_{P,i,1})^2}{\sigma_n^2} \right) & (\text{BF 方式}), \end{cases}$$

式中: $\text{rank}(\cdot)$ 表示矩阵的秩; E_P 与 E_C 分别为 PU_i 和 CU 的发射功率, 假设 $E_P = E_C$.

2.2 认知系统信号处理

文献[12,14]对基于多天线的频谱共享机制进行研究, 文献[14]针对下行链路信号处理算法进行了设计, 并给出认知系统天线配置要求, 如表 1 所示(CBS 为发射端, CU 为接收端).

表 1 认知系统天线配置要求

通信系统		天线数						
授权系统	M_{PBS}	1	1	2	2	4	4	4
	M_{PU}	1	2	1	2	1	2	4
认识系统	M_{CU}	2	2	3	3	5	5	5
	M_{CBS}	3	4	4	5	6	7	9

文献[14]的算法应用于上行通信, 要求 CU 配置天线数多, 增加了认知系统接收终端的设计难度. 考虑到移动终端比基站有更严格的尺寸、功耗、复杂度等限制, 需要重新设计适用于上行通信的算法.

通过研究该下行算法可以发现: CBS 完成发射波束成形以及对 PU 的干扰消除, CU 仅对来自 PBS 的干扰进行抑制. 由于 CBS 端发射波束成形已确保认知通信各特征模式间的正交性, CU 的接收滤波得以简化, 因此当进行上行设计时, 考虑降低 CU(发射端)的负荷, 将更多的处理工作移至 CBS(接收端). 注意到认知通信采用 BF 方式, P_C 与 F_C 分别表示 CU 发射预编码和 CBS 接收滤波向量, 则经过 CBS 接收处理的估计信号可表示为

$\bar{y}_C = (F_C)^H H_C P_C x_C +$

$(F_C)^H H_{PUC,i} P_P x_{P,i} + (F_C)^H n. \tag{3}$

结合式(1)~(3)考虑如下设计: 干扰抑制方面, 为了实现 CU 对 PBS 无干扰共存, 同时消除来自 PU_i (频道 i 共存) 的干扰, 须在 CU 端设计 P_C 使 $H_{CUP,i} P_C = 0$, 并在 CBS 端设计 F_C 使 $(F_C)^H H_{PUC,i} = 0$; 另外, 由于移动终端体积成本受限, 将波束成形放在接收端(CBS), 使主瓣对准认知通信主特征模式, 零陷对准其他模式, 消除认知通信模式间干扰. 分别对 H_C , $H_{CUP,i}$ 和 $H_{PUC,i}$ 进行奇异值分解, 得到 $H_C = U_C \Lambda_C (V_C)^H$, $H_{CUP,i} = U_{CUP,i} \Lambda_{CUP,i} (V_{CUP,i})^H$ 和 $H_{PUC,i} = U_{PUC,i} \Lambda_{PUC,i} (V_{PUC,i})^H$. 上行链路信号处理算法如下.

发射端(CU)算法: a. 构造矩阵 $T_C = [v_{CUP,i,1}, v_{CUP,i,2}, \dots, v_{CUP,i,\text{rank}(H_{CUP,i})}]$; b. 考虑到 $v_{CUP,i}$ 由一组标准正交基构成, 将 $v_{C,1}$ 投影到 T_C 的正交子空间上,

$$\tilde{v}_{C,1} = v_{C,1} - \sum_{m=1}^{\text{rank}(H_{CUP,i})} (v_{CUP,i,m})^H v_{C,1} v_{CUP,i,m};$$

c. 对 $\tilde{v}_{C,1}$ 归一化, 得到预编码向量 $P_C = \tilde{v}_{C,1} / \|\tilde{v}_{C,1}\|$.

接收端(CBS)算法: a. 构造矩阵 $R_C = [u_{PUC,i,1}, u_{PUC,i,2}, \dots, u_{PUC,i,\text{rank}(H_{PUC,i})}, u_{C,2}, u_{C,3}, \dots, u_{C,\text{rank}(H_C)}]$, 采用格拉姆-施密特方法对 R_C 标准正交化, 得到 $\bar{R}_C = [\bar{u}_{PUC,i,1}, \bar{u}_{PUC,i,2}, \dots, \bar{u}_{PUC,i,\text{rank}(H_{PUC,i})}, \bar{u}_{C,2}, \bar{u}_{C,3}, \dots, \bar{u}_{C,\text{rank}(H_C)}]$; b. 将 $u_{C,1}$ 投影到 $\bar{R}_C$ 的正交子空间上,

$$\tilde{u}_{C,1} = u_{C,1} - \sum_{m=1}^{\text{rank}(H_{PUC,i})} (\bar{u}_{PUC,i,m})^H u_{C,1} \bar{u}_{PUC,i,m} - \sum_{n=2}^{\text{rank}(H_C)} (\bar{u}_{C,n})^H u_{C,1} \bar{u}_{C,n};$$

c. 对 $\tilde{u}_{C,1}$ 归一化, 得到接收滤波向量 $F_C = \tilde{u}_{C,1} / \|\tilde{u}_{C,1}\|$.

需要注意的是: P_C 是以对授权用户无干扰为目标进行设计的, 与授权通信方式无关. 可以得到共存状态下认知系统的数据速率

$$R_C = \log_2 \left(1 + \frac{E_C (\lambda_{C,1})^2 |\chi|^2}{\sigma_n^2} \right),$$

式中: $\chi = (F_C)^H u_{C,1} (v_{C,1})^H P_C$, $v_{C,1}$ 与 $u_{C,1}$ 分别为对应的主右奇异值向量和主左奇异值向量; $\lambda_{C,1}$ 为 H_C 的最大奇异值. 注意到 $|\chi|^2 < 1$, 即在共存状态下, 认知通信有用信号功率降低.

通过分析以上算法可以发现: CU 端算法仅考虑对 PBS 的干扰抑制, 即保证认知通信主特征模式($\tilde{v}_{C,1}$)与 CU 对 PBS 干扰的空间特征(T_C)正交, 而认知通信各特征模式间不满足正交性(即存在相互干扰); CBS 端算法实现了对来自 PU_i 的

干扰抑制与对来自 CU 信号的接收波束成形,即将接收波束零陷对准来自 PU_i 以及认知通信非主特征模式的干扰,而将主瓣对准认知通信主特征模式.

通过对所设计的算法进行分析,可以得到与表 1 类似的认知系统天线配置要求,但 CBS 为接收端,天线数按照表 1 第 4 行选取.可见,新算法 CU 为发射端,对认知系统接收终端的天线数要求降低.

2.3 基于空分复用的机会频谱接入

根据系统模型,频域资源用向量 $\mathbf{F}=[f_1, f_2, \dots, f_N]$ 表示,其中 f_i 为布尔变量, $f_i \in \{0(\text{空闲}), 1(\text{占用})\}$. 用下式表示 CU 对频道 i 空域质量的评价,

$$s_i = \sum_{n=1}^{\text{rank}(H_{\text{CUP},i})} |\langle \mathbf{v}_{\text{C},1}, \mathbf{v}_{\text{CUP},i,n} \rangle|,$$

式中 s_i 反映与授权通信共享频道 i 的认知通信空间特征与 CU 对 PBS 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,进行信号处理后有用信号功率损耗越严重,该频道的空域质量越差.

SDM-OSA 方法的步骤如下.

步骤 1 根据环境感知结果以及系统间协作, CU 初始化资源矩阵

$$\mathbf{R} = \text{diag}(\mathbf{F})\mathbf{S} = [r_1, r_2, \dots, r_N]^T,$$

式中: $\text{diag}(\cdot)$ 表示向量对角化; r_i 的值反映频道 i 的空频资源质量,若频道 i 空闲,则 $r_i=0$, 否则 $r_i>0$.

步骤 2 CU 选择授权频道 $\xi = \arg \min_{1 \leq i \leq N} (r_i)$, 并将相关参数通知 CBS 以完成认知通信.

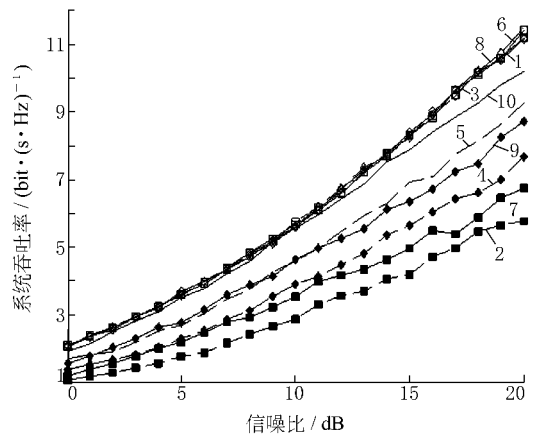
对于步骤 2, 当 $\min(r_i)=0$ 时表示有空闲频谱, 认知用户采用机会接入方式 (OSA) 完成通信; 当 $\min(r_i)>0$ 时表示无空闲频谱, 认知通信以空分复用方式选择最佳 (r_i 最小) 频道实现共享. 对于可能的出现多个 r_i 均为最小值 (或 0) 的情况, 采取随机选择的策略.

3 仿真结果

研究 2 种频谱接入机制: 传统的 (非共存) 机会频谱接入 (OSA) 和基于空分复用的机会频谱接入 (SDM-OSA). 上行信号处理算法分别采用文献 [14] 算法 (UL1) 和本文算法 (UL2). 授权系统天线配置 $M_{\text{PBS}}=M_{\text{PU}}=2$, 认知系统天线配置采用 UL1 时 $M_{\text{CBS}}=3, M_{\text{CU}}=5$; 采用 UL2 时 $M_{\text{CBS}}=5, M_{\text{CU}}=3$. 授权系统采用自适应传输 (包括 SM

与 BF), 认知通信在 OSA 模式下采用与授权系统相同的自适应传输, 在 SDM 模式下采用可靠性更高的 BF 方式. 马尔可夫信道模型转移概率 $\alpha_{\text{P},i}=\alpha_{\text{C}}=0.2, \beta_{\text{P},i}=\beta_{\text{C}}=0.8 (i=1,2,\dots,N)$. 对于不同的仿真参数也能够得到相同的结论, 限于篇幅, 省略相关结果.

图 3 给出 $N=2$ 时, 系统吞吐率随信噪比变化的情况. 由于认知系统成功实现了对授权系统无干扰, 并且授权系统 PBS 与 PU 均配置 2 根天线, 因此几种方法获得的授权系统上行吞吐率相同. 图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. 对于认知系统上行通信, 固定信号处理算法 (UL1 或 UL2), OSA 的吞吐率低于 SDM-OSA, 由于后者增加了对空域资源的利用, 避免了阻塞与中断, 吞吐率改善明显, 相比于 OSA 更接近参考上界. 若固定频谱接入方式 (OSA 或 SDM-OSA), 则 UL1 所需天线配置为 5 发 3 收, CU 端难以实现. 采用本文算法 (UL2), 要求认知系统天线配置为 3 发 5 收, 则有效降低了 CU 端的复杂度. 并且由图 3 可以发现: 对于特定的频谱接入机制, UL2 获得的认知系统吞吐率优于 UL1 的.



1—授权系统 (OSA-UL1); 2—认知系统 (OSA-UL1); 3—授权系统 (SDM-OSA-UL1); 4—认知系统 (SDM-OSA-UL1); 5—认知系统 (参考上界-UL1); 6—授权系统 (OSA-UL2); 7—认知系统 (OSA-UL2); 8—授权系统 (SDM-OSA-UL2); 9—认知系统 (SDM-OSA-UL2); 10—认知系统 (参考上界-UL2)(下同).

图 3 系统吞吐率随信噪比变化的情况

图 4 给出信噪比为 10 dB 时, 系统吞吐率随 N 变化的情况. 授权系统未受到认知系统的干扰, 其吞吐率随 N 的增加而线性增大. 图中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, 与 N 无关, 呈现为一条水平线. 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. 对于特定的信号处理算法,SDM-OSA 获得的认知系统吞吐率优于 OSA 的;对于特定的频谱接入机制,UL2 优于 UL1 的.

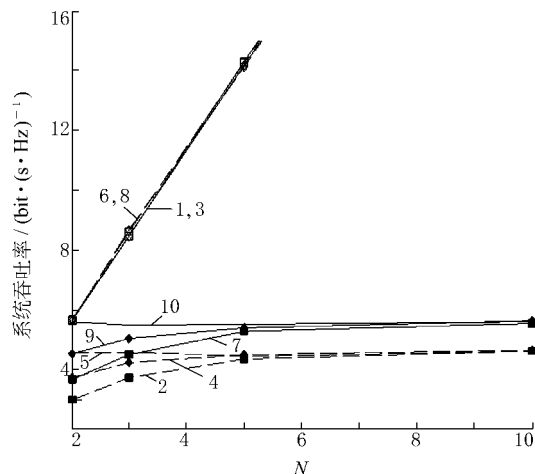


图 4 系统吞吐率随授权频道数变化的情况

综合图 3 与图 4 可知:SDM-OSA-UL2 的认知系统吞吐率特性最佳.

针对多天线认知无线电系统上行通信设计信号处理算法,提出基于空分复用的机会频谱接入方法. 所提方法考虑了移动终端的硬件约束,将主要信号处理工作放在认知基站,有效降低认知终端的复杂度. 认知系统通过合理的天线配置,能够在无法获得空闲频率资源情况下采用空分复用的方式完成通信,显著提高系统吞吐率,同时保证对授权系统无干扰.

参 考 文 献

- [1] Krenik W, Batra A. Cognitive radio techniques for wide area networks[C]//Design Automation Conference. Anaheim: ACM Press, 2005: 409-412.
- [2] Sahai A, Tandra R, Mishra S M, et al. Fundamental design tradeoffs in cognitive radio systems[C]//ACM International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum. Boston: ACM Press, 2006: 1-9.
- [3] Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communication[C]//IEEE Int Workshop Mobile Multimedia Commun. San Diego: IEEE Press, 1999: 3-10.
- [4] Devroye N, Vu M, Tarokh V. Cognitive radio networks[J]. IEEE Sig Process Mag, 2008, 25(6): 12-23.
- [5] Vuk Marojevic, José Salazar, Xavier Revés, et al. Resource modeling for a joint resource management in cognitive radio[C]//IEEE Int Conf on Commun. Beijing: IEEE Press, 2008: 4175-4180.
- [6] Zhang Rui, Lim Teng, Liang Yingchang, et al. Multi-antenna based spectrum sensing for cognitive radios: a GLRT approach [J]. IEEE Trans Commun, 2010, 58(1): 84-88.
- [7] Scutari G, Palomar D P. MIMO cognitive radio: a game theoretical approach [J]. IEEE Trans Sig Process, 2010, 58(2): 761-780.
- [8] Bakr O, Johnson M, Wild B, et al. A multi-antenna framework for spectrum reuse based on primary-secondary cooperation[C]//IEEE Symp on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Chicago: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [9] 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.
- [10] Zhao Q, Tong L, Swami A, et al. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad Hoc networks: a POMDP framework[J]. IEEE J Select Areas in Commun, 2007, 25(3): 589-600.
- [11] IEEE P1900.4 Working Group. IEEE Std 1900. 4-2009. IEEE standard for architectural building blocks enabling network-device distributed decision making for optimized radio resource usage in heterogeneous wireless access networks[S]. New York: IEEE, 2009.
- [12] Hamdi K, Zhang Wei, Letaief K. Opportunistic spectrum sharing in cognitive MIMO wireless networks[J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2009, 8(8): 4098-4107.
- [13] Li Z, Yang J, Yao J. Adaptive opportunistic transmission in MU-MIMO downlink with reduced feedback[J]. Journal of Communications, 2010, 5(7): 511-520.
- [14] Li Z, Liu Q, Zhao L. Space division multiplexing aided opportunistic spectrum access for cognitive radio networks[C]//IEEE Intern Conf on Advanced Information Networking and Applications. Singapore: IEEE Press, 2008: 1-6.