

文章编号:1007-5321(2011)06-0028-05

认知无线网络基于空分复用的联合频谱共享

李 钊, 杨家玮, 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, 西安 710071)

摘要: 针对多天线认知无线网络提出一种基于空分复用的收发联合频谱共享方法. 综合利用认知通信与系统间干扰的空间相关特性, 在无空闲频谱资源可用时合理选择授权系统及其频道, 并以空分复用的方式实现频谱共享. 相比于仅在认知基站端进行选择以及穷举搜索, 该方法能获得接近最佳的系统吞吐率特性, 并且具有低的复杂度.

关键词: 认知无线电; 多天线; 空分复用; 波束成形; 预编码

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Space Division Multiplexing Based Joint Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks

LI Zhao, YANG Jia-wei, XIAO Li-yuan

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

Abstract: A space division multiplexing based joint transmit-receive spectrum sharing method in cognitive radio networks is proposed. By exploiting spatial correlation features between cognitive transmission and interference among different systems, appropriate primary system and its channel could be selected under the condition that no idle spectrum resource is available. Consequently, the spectrum sharing is carried out using space division multiplexing. Compared with the method implemented only at cognitive base station and exhaustive searching, the proposed scheme could achieve near-optimal system throughput performance with reduced complexity.

Key words: cognitive radio; multiple antennas; space division multiplexing; beamforming; precoding

近年来, 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], 作为频谱共享与重用技术重要研究内容的认知无线电^[2] (CR) 和认知无线网络^[3] (CRN) 技术受到了广泛关注. 传统的 CR 或 CRN 关注频谱资源的机会共享^[4], 而通信是对包括频率在内的多种类型资源的综合使用^[5]. 一部分研究将多输入多输出技术与 CR 结合, 设计频谱共享和联合资源管理方法^[6-8].

在实际应用中, 多种通信系统覆盖同一地区非常普遍, 笔者针对多天线 CRN 设计了一种基于空分复用的收发联合频谱共享方法, 综合利用认知通信与授权通信和系统间干扰的空间特征, 实现了基于空分复用的联合频谱共享.

1 系统模型

研究 K 个授权系统与认知系统共同覆盖的下

收稿日期: 2011-01-12

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(60725105); 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB320404); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0852); 国家自然科学基金项目(61102057); 高等学校引智计划项目(B08038); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(K50510010022); ISN 项目(ISN1103005)

作者简介: 李 钊(1981—), 男, 博士, 副教授, E-mail: zli_19912@126.com.

行通信场景,每个授权系统包含 1 个基站和多个用户,认知系统中包含 1 个基站和 1 个用户,即不考虑认知用户 (CU, cognitive user) 之间的竞争与干扰,如图 1 所示。

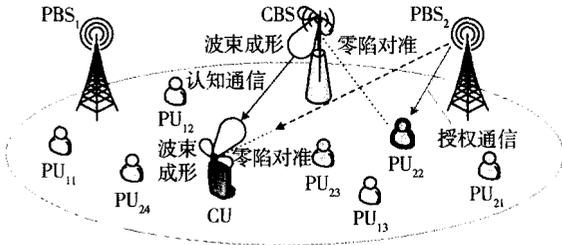


图 1 系统模型

授权系统 $k (k = 1, 2, \dots, K)$ 中,授权基站 (PBS, primary base station) 天线数为 $M_{p,k}^p$;授权用户 (PU, primary user) 天线数为 $M_{r,k}^p$;认知基站 (CBS, cognitive base station) 天线数为 M^c ;CU 天线数为 M^c 。授权系统 k 拥有 L_k 个频道,假设各频道的带宽均为 B ,具有频率平坦衰落特性。为便于讨论,假设所有授权系统天线配置、授权频道数相同,有 $M_{p,k}^p = M_p^p$, $M_{r,k}^p = M_r^p, L_k = L$ 。多个 PU 以动态的方式共享频率资源,任一时刻 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方式进行通信,即上下行信道具有相同特性,基站与用户的通信遵循时隙同步结构。

某一时隙授权系统 k 中, PBS_k 与占用其频道 $l (l = 1, 2, \dots, L)$ 的 PU (PU_{lk}) 之间的信道矩阵为 H_{lk}^p ;CBS 与共享授权系统 k 中频道 l 的 CU 之间的信道矩阵为 H_{lk}^c ;CBS 与 PU_{lk} 之间 (干扰) 的信道矩阵为 H_{lk}^{cp} ; PBS_k 与共存于其频道 l 中 CU 之间的信道矩阵为 H_{lk}^{pc} 。假设系统能准确获得信道信息,并且用于信道信息传递的链路是可靠的,其时延相对于信道变化可以忽略^[9],即信道具有准静态特性。

为便于分析,假设所研究的授权频段有限,且具有平稳的频率特性,即 PBS_k 与 CU 以及 CBS 与 CU 之间的信道状态主要取决于设备的空间位置和通信环境中的散射体分布,工作频率的影响可以忽略,有 $H_{1k}^{pc} = \dots = H_{Lk}^{pc} = H_k^{pc}, H_{11}^c = \dots = H_{Lk}^c = H^c$ 。

2 收发联合频谱共享

本文研究认知系统利用空域信息选择适合共存的授权系统及其频道,从而在无空闲频谱可用的情况下实现认知通信,并保证对授权用户无干扰。以

下讨论在授权频道全忙的假设下进行,这与传统认知的机会频谱接入并不矛盾,而是作为存在空闲频谱时机会接入策略的补充。

2.1 信号处理

研究下行通信时, PBS_k 与 CBS 的发射功率分别为 E_k^p 和 E^c ,为便于分析,假设各基站发射功率相同,有 $E_k^p = E^p = E^c$ 。基站与用户采用波束成形 (BF, beamforming) 的方式进行通信,则 PBS_k 向占用频道 l 的 PU_{lk} 发射的符号为 x_{lk}^p , CBS 发送给 CU 的符号为 x^c 。用 p_{lk}^p 表示 PBS_k 向 PU_{lk} 发射的预编码向量, p_{lk}^c 表示 CBS 向共享授权系统 k 中频道 l 的 CU 发射的预编码向量。类似地, PU_{lk} 与 CU 的接收滤波向量为 f_{lk}^p 和 f_{lk}^c 。

对 H_{lk}^p 进行奇异值分解 $H_{lk}^p = U_{lk}^p A_{lk}^p (V_{lk}^p)^H$, $\lambda_{lk,1}^p$ 为 H_{lk}^p 的最大奇异值。 PBS_k 采用主右奇异向量 $v_{lk,1}^p$ (与 $\lambda_{lk,1}^p$ 对应) 对 x_{lk}^p 进行预处理; PU_{lk} 采用主左奇异向量的共轭转置 $(u_{lk,1}^p)^H$ 进行接收滤波,即 $p_{lk}^p = v_{lk,1}^p, f_{lk}^p = u_{lk,1}^p$ 。 PU_{lk} 获得的估计信号为

$$\begin{aligned} \bar{y}_{lk}^p &= (u_{lk,1}^p)^H H_{lk}^p v_{lk,1}^p x_{lk}^p + (u_{lk,1}^p)^H H_{lk}^{cp} p_{lk}^c x^c + \\ & (u_{lk,1}^p)^H n = \lambda_{lk,1}^p x_{lk}^p + (u_{lk,1}^p)^H H_{lk}^{cp} p_{lk}^c x^c + (u_{lk,1}^p)^H n \end{aligned} \quad (1)$$

其中, n 为加性高斯白噪声向量,各分量的方差均为 σ_n^2 。式(1)等号右端第 2 项表示来自认知通信的干扰,需要合理设计 p_{lk}^c ,使 $(u_{lk,1}^p)^H H_{lk}^{cp} p_{lk}^c = 0$ 。

当认知通信无法获得空闲频谱并尝试以空分复用方式与授权通信进行频谱共享时,某一时隙共享授权系统 k 中频道 l 的 CU 接收到的信号为

$$y_{lk}^c = H^c p_{lk}^c x^c + H_k^{pc} v_{lk,1}^p x_{lk}^p + n \quad (2)$$

式(2)等号右端第 2 项表示来自 PBS_k 的干扰。采用 f_{lk}^c 进行接收滤波后 CU 的估计信号为

$$\bar{y}_{lk}^c = (f_{lk}^c)^H H^c p_{lk}^c x^c + (f_{lk}^c)^H H_k^{pc} v_{lk,1}^p x_{lk}^p + (f_{lk}^c)^H n \quad (3)$$

f_{lk}^c 的设计目标是在 CU 端消除来自 PBS_k 的干扰,即 $(f_{lk}^c)^H H_k^{pc} v_{lk,1}^p = 0$ 。对 H^c 进行奇异值分解 $H^c = U^c A^c (V^c)^H$,通过对 u_1^c 和 v_1^c 进行处理^[8] 获得 p_{lk}^c 和 f_{lk}^c 。下面分别给出 CBS 预编码和 CU 接收滤波算法。

CBS 预编码算法如下。

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

2) 将 \mathbf{v}_1^c 投影到 $\bar{\mathbf{T}}_{ik}^c$ 的正交子空间上, 得

$$\hat{\mathbf{v}}_{ik}^c = \mathbf{v}_1^c - \sum_{m=1}^{\text{rank}(\mathbf{H}_{ik}^{\text{cp}})} [\bar{\mathbf{t}}_{ik,m}^{\text{cp}}]^H \mathbf{v}_1^c \bar{\mathbf{t}}_{ik,m}^{\text{cp}} - \sum_{n=2}^{\text{rank}(\mathbf{H}^c)} [\bar{\mathbf{t}}_n^c]^H \mathbf{v}_1^c \bar{\mathbf{t}}_n^c \quad (4)$$

其中, $\text{rank}(\cdot)$ 表示矩阵的秩.

3) 对 $\hat{\mathbf{v}}_{ik}^c$ 归一化, 得预编码向量 $\mathbf{p}_{ik}^c = \hat{\mathbf{v}}_{ik}^c / \|\hat{\mathbf{v}}_{ik}^c\|$.

对 \mathbf{H}_k^{pc} 进行奇异值分解 $\mathbf{H}_k^{\text{pc}} = \mathbf{U}_k^{\text{pc}} \mathbf{\Lambda}_k^{\text{pc}} (\mathbf{V}_k^{\text{pc}})^H$, CU 接收滤波算法如下.

1) 构造矩阵 $\mathbf{R}_k^c = [\mathbf{u}_{k,1}^{\text{pc}}, \dots, \mathbf{u}_{k,\text{rank}(\mathbf{H}_k^{\text{pc}})}^{\text{pc}}]$, 考虑到 \mathbf{U}_k^{pc} 由 1 组标准正交基构成, 引入 $\bar{\mathbf{R}}_k^c = \mathbf{R}_k^c$.

2) 将 $\mathbf{u}_{k,1}^c$ 投影到 $\bar{\mathbf{R}}_k^c$ 的正交子空间上, 得

$$\hat{\mathbf{u}}_{k,1}^c = \mathbf{u}_{k,1}^c - \sum_{m=1}^{\text{rank}(\mathbf{H}_k^{\text{pc}})} [\bar{\mathbf{u}}_{k,m}^{\text{pc}}]^H \mathbf{u}_{k,1}^c \bar{\mathbf{u}}_{k,m}^{\text{pc}} \quad (5)$$

3) 对 $\hat{\mathbf{u}}_{k,1}^c$ 归一化, 得到接收滤波向量

$$\mathbf{f}_{ik}^c = \hat{\mathbf{u}}_{k,1}^c / \|\hat{\mathbf{u}}_{k,1}^c\|$$

认知通信的实现如图 1 所示, 认知通信选择与授权通信共享授权系统 2 的 2 号频道 (被 PU_{22} 占用). 经过发端与收端的信号处理 (CBS 进行发射波束成形, 将零陷对准 PU_{22} ; CU 进行接收波束成形, 将零陷对准来自 PBS_2 的干扰), CBS 不会对 PU_{22} 产生干扰, 并且 CU 能对来自 PBS_2 的干扰进行抑制.

认知系统数据速率为

$$R_{ik}^c = \text{lb} \left(1 + \frac{E^c (\lambda_1^c)^2 |\chi_{ik}|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (6)$$

其中, λ_1^c 为 \mathbf{H}^c 的最大奇异值; $\chi_{ik} = (\mathbf{f}_{ik}^c)^H \mathbf{u}_1^c (\mathbf{v}_1^c)^H \times \mathbf{p}_{ik}^c$. 注意到 $|\langle \mathbf{v}_1^c, \mathbf{p}_{ik}^c \rangle|^2 < 1$ 且 $|\langle \mathbf{f}_{ik}^c, \mathbf{u}_1^c \rangle|^2 < 1$, 即为了实现 CBS 发射对 PU_{ik} 无干扰以及 CU 抑制来自 PBS_k 的干扰, 有用信号功率降低.

2.2 联合频谱共享算法

根据 2.1 节的算法, 文献 [8] 利用认知通信与 CBS 对 PU 干扰之间的空间相关特性进行共享频道选择, 可以表述如下:

1) CBS 感知其与 PU_{ik} 和 CU 之间的信道状态 $\mathbf{H}_{ik}^{\text{cp}}$ 和 \mathbf{H}^c , $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$;

2) 计算认知通信与 CBS 对 PU_{ik} 干扰的空间相关度为

$$C_{ik}^{\text{CBS}} = \sum_{n=1}^{\text{rank}(\mathbf{H}_{ik}^{\text{cp}})} |\langle \mathbf{v}_1^c, \mathbf{v}_{ik,n}^{\text{cp}} \rangle| \quad (7)$$

3) 确定共享授权系统和频道标识为

$$(l_{\text{igt}}, k_{\text{igt}}) = \arg \min_{l \in \{1, 2, \dots, L\}, k \in \{1, 2, \dots, K\}} (C_{ik}^{\text{CBS}}) \quad (8)$$

4) 根据 2.1 节的信号处理算法实现认知通信

对授权通信的无干扰共存.

以上方法研究单授权系统场景, 决策完全由 CBS 完成; 而在实际应用中, 多种通信系统覆盖同一地区非常普遍, 因此, 认知系统在设计时应综合利用 CBS 与不同 PU 之间以及 CU 与不同 PBS 之间的空间特征差异进行授权系统及其频道的合理选择, 实现频谱共享. 故提出一种收发联合频谱共享方法.

1) CU 感知其与 CBS 和 PBS_k 之间的信道信息 \mathbf{H}^c 、 \mathbf{H}_k^{pc} .

2) CU 计算用户侧认知通信与 PBS_k 对 CU 干扰的空间相关度为

$$C_k^{\text{CU}} = \sum_{n=1}^{\text{rank}(\mathbf{H}_k^{\text{pc}})} |\langle \mathbf{u}_1^c, \mathbf{u}_{k,n}^{\text{pc}} \rangle| \quad (9)$$

3) CU 确定共享频道所属授权系统标识为

$$k_{\text{igt}} = \arg \min_{k \in \{1, 2, \dots, K\}} (C_k^{\text{CU}}) \quad (10)$$

4) CBS 感知其与各 $\text{PU}_{l_{\text{igt}}}$ 之间的信道状态 $\mathbf{H}_{l_{\text{igt}}}^{\text{cp}}$, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$. CBS 获得其与 CU 之间的信道状态 \mathbf{H}^c .

5) CBS 计算基站侧认知通信与 CBS 对 $\text{PU}_{l_{\text{igt}}}$ 干扰的空间相关度为

$$C_{l_{\text{igt}}}^{\text{CBS}} = \sum_{n=1}^{\text{rank}(\mathbf{H}_{l_{\text{igt}}}^{\text{cp}})} |\langle \mathbf{v}_1^c, \mathbf{v}_{l_{\text{igt}},n}^{\text{cp}} \rangle| \quad (11)$$

6) CBS 确定授权系统 k_{igt} 中共享频道标识为

$$l_{\text{igt}} = \arg \min_{l \in \{1, 2, \dots, L\}} (C_{l_{\text{igt}}}^{\text{CBS}}) \quad (12)$$

7) 根据 2.1 节的信号处理算法实现认知通信对授权通信的无干扰共存.

为了进行比较, 给出穷举搜索频谱共享方法.

1) CBS 感知其与 PU_{ik} 和 CU 之间的信道状态 $\mathbf{H}_{ik}^{\text{cp}}$ 、 \mathbf{H}^c , $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, $l \in \{1, 2, \dots, L\}$. CU 感知其与 PBS_k 之间的信道状态 \mathbf{H}_k^{pc} .

2) CBS 计算基站侧认知通信与 CBS 对 PU_{ik} 干扰的空间相关度为

$$C_{ik}^{\text{CBS}} = \sum_{n=1}^{\text{rank}(\mathbf{H}_{ik}^{\text{cp}})} |\langle \mathbf{v}_1^c, \mathbf{v}_{ik,n}^{\text{cp}} \rangle| \quad (13)$$

3) CBS 遍历各个授权系统, 确定授权系统 k 中共享频道标识为

$$l_{\text{igt}}^k = \arg \min_{l \in \{1, 2, \dots, L\}} (C_{ik}^{\text{CBS}}) \quad (14)$$

4) CU 将 (l_{igt}^k, k) 代入 2.1 节的信号处理算法, 并根据式 (6) 计算 $R_{l_{\text{igt}}^k, k}^c$, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, 共享授权系统及其频道标识为

$$(l_{\text{igt}}, k_{\text{igt}}) = \arg \max_{k \in \{1, 2, \dots, K\}} (R_{l_{\text{igt}}^k, k}^c) \quad (15)$$

5) 根据 2.1 节的信号处理算法, 实现认知通信对授权通信的无干扰共存.

2.3 复杂度分析

该部分从信道信息感知、主要计算(包括奇异值分解、相关度计算、预编码与接收滤波处理)以及搜索算法几方面分析了 3 种频谱共享方法的复杂度, 如表 1 所示. 由于 3 种方法最后一步均是根据 2.1 节进行信号处理, 所以表 1 中仅对 $(l_{\text{igt}}, k_{\text{igt}})$ 搜索过程的复杂度进行分析.

表 1 复杂度分析

| 频谱共享方法 | CBS 选择 | 联合选择 | 穷举搜索 |
|----------|----------|--|---|
| 信道信息感知 | $KL + 1$ | $\frac{L+1}{\text{CBS}} + \frac{K+1}{\text{CU}}$ | $\frac{KL+1}{\text{CBS}} + \frac{K+1}{\text{CU}}$ |
| 奇异值分解 | $KL + 1$ | $\frac{L+1}{\text{CBS}} + \frac{K+1}{\text{CU}}$ | $\frac{KL+1}{\text{CBS}} + \frac{K+1}{\text{CU}}$ |
| 相关度计算 | KL | $\frac{L}{\text{CBS}} + \frac{K}{\text{CU}}$ | $\frac{KL}{\text{CBS}}$ |
| 预编码与接收滤波 | 0 | 0 | $\frac{K}{\text{CU}}$ |
| 搜索算法 | $KL - 1$ | $\frac{L-1}{\text{CBS}} + \frac{K-1}{\text{CU}}$ | $\frac{(L-1)K + K-1}{\text{CBS}} + \frac{K-1}{\text{CU}}$ |

采用“执行次数”衡量信道信息感知、奇异值分解以及相关度计算的复杂度, 如 CBS 选择方法需要对 CBS 与所有 PU 以及 CU 之间共 $KL + 1$ 个信道矩阵进行感知, 相应的需要执行 $KL + 1$ 次奇异值分解, 根据式(7), CBS 需计算 KL 个相关值. 联合选择与穷举搜索方法需要 CBS 与 CU 共同完成, 表 1 中对不同实体的运算量进行了标注. 在共享授权系统及其频道的选择过程中, CBS 选择与联合选择不需要进行预编码和接收滤波计算, 穷举搜索方法则需要在 CU 端进行 K 次以获得认知通信数据速率, 并依据该结果完成决策. 搜索算法的复杂度采用“比较次数”进行评价, 如 CBS 选择方法中, 根据式(8)需要在 KL 个相关值中搜索以确定共享授权系统及其频道标识, 比较次数为 $KL - 1$. 穷举搜索方法根据式(14), CBS 从 K 个授权系统的 L 个频道选择最佳, 比较次数为 $(L - 1)K$; 根据式(15), CU 从 CBS 提供的 K 个候选中选择最佳, 比较次数为 $K - 1$.

由表 1 可以发现, 穷举搜索方法复杂度最高. 比较联合选择与 CBS 选择方法, 容易推得当 $K \geq L/(L - 1)$ 时 $KL \geq L + K$ 成立, 实际应用中通常 $L \gg K$, 因此 $LK \geq L + K$ 容易满足, 即联合选择方法复杂度更低.

3 仿真结果

该部分对 CBS 选择、联合选择与穷举搜索 3 种

方法的认知系统平均吞吐率进行了 Matlab 仿真. 系统天线配置^[8]采用 $M_t^p = M_r^p = 2, M_t^c = 5, M_r^c = 3$. 授权通信与认知通信均为 BF 方式. 对于不同的天线配置也能得到相同的结论, 限于篇幅本文未给出相关结果.

图 2 给出了授权系统数 $K = 4$, 授权频道数 L 分别为 8 和 20 这 3 种方法的认知系统平均吞吐率随信噪比 S 变化的情况. 对于相同的 L , CBS 选择方法性能最差, 穷举搜索方法获得的吞吐率最大, 联合选择方法的性能与穷举搜索方法接近. 增大 L 会带来多用户分集增益的增加, 因此对于同一方法, L 越大吞吐率越高.

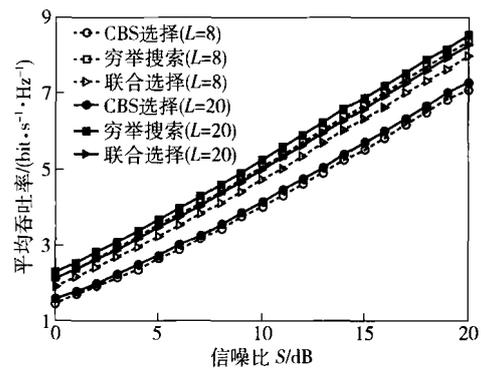


图 2 平均吞吐率 (授权系统数为 4)

图 3 给出了 $S = 5$ dB, 授权频道数 L 分别为 8 和 20 这 3 种方法的认知系统平均吞吐率随授权系统数 K 变化的情况. 随着 K 的增大, 多个授权系统带来的分集增益增加, 吞吐率提高, 当 K 增大到一定程度时, 吞吐率趋于饱和. 对于相同的 L , 当 $K > 1$ 时 CBS 选择性能最差, 联合选择明显优于 CBS 选择, 其吞吐率特性与最佳的穷举搜索方法接近; 当 $K = 1$ 时, 3 种方法都是在唯一的授权系统中根据空间相关特性选择授权频道, 因此吞吐率相同.

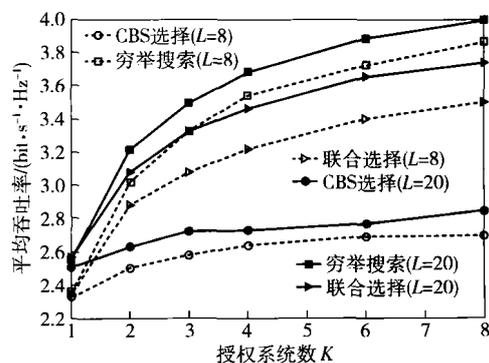


图 3 平均吞吐率 (信噪比为 5 dB)

4 结束语

针对多天线 CRN 提出一种基于空分复用的收发联合频谱共享方法,综合利用认知通信与 CBS 对 PU 干扰之间以及与 PBS 对 CU 干扰之间的空间相关特性,在无空闲频谱资源可用的情况下合理选择授权系统及其频道实现共享. 理论分析与仿真结果表明,相比于仅在 CBS 端进行选择 and 穷举搜索方法,该方法能获得接近最佳的系统吞吐率特性,并且具有低的复杂度.

参考文献:

- [1] Krenik W, Batra A. Cognitive radio techniques for wide area networks [C]//DAC 2005. Anaheim: ACM Press, 2005: 409-412.
- [2] Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communication [C]//MuMoC 1999. San Diego: IEEE Press, 1999: 3-10.
- [3] Devroye N, Vu M, Tarokh V. Cognitive radio networks [J]. IEEE Sig Process Mag, 2008, 25(6): 12-23.
- [4] 彭涛, 郭晨, 王文博. 认知无线网络高效率协作频谱感知技术 [J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(4): 93-96.
- [5] Peng Tao, Guo Chen, Wang Wenbo. Energy-efficient cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(4): 93-96.
- [6] Vuk Marojevic, José Salazar, Xavier Revés, et al. Resource modeling for a joint resource management in cognitive radio [C]//ICC 2008. Beijing: IEEE Press, 2008: 4175-4180.
- [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]//DySPAN 2008. Chicago: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [9] Li Z, Liu Q, Zhao L. Space division multiplexing aided opportunistic spectrum access for cognitive radio networks [C]//AINA 2011. Singapore: IEEE Press, 2011: 232-237.
- [10] Hamdi K, Wei Zhang, Letaief K. Opportunistic spectrum sharing in cognitive MIMO wireless networks [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2009, 8(8): 4098-4107.

(上接第 27 页)

参考文献:

- [1] Yu M, Yi Y, Rexford J, et al. Rethinking virtual network embedding: substrate support for path splitting and migration [J]. ACM SIGCOMM CCR, 2008, 38(2): 17-29.
- [2] Zaheer F E, Xiao J, Boutaba R. Multi-provider service negotiation and contracting in network virtualization [C]//IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS). Osaka: [s. n.], 2010: 471-478.
- [3] 杨明, 刘元安, 马晓雷, 等. 基于加权平均的网格资源分配与定价 [J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(6): 9-13.
- Yang Ming, Liu Yuan'an, Ma Xiaolei, et al. Grid resource allocation-pricing based on weighted average [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(6): 9-13.
- [4] 郭超平, 张恒, 张海林. 自私网络中带宽与路由的联合分配机制 [J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(5): 61-65.
- Guo Chaoping, Zhang Heng, Zhang Hailin. Joint assignment of bandwidth and route in selfish networks [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(5): 61-65.
- [5] Xia M, Stallaert J, Whinston A B. Solving the combinatorial double auction problem [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(1): 239-251.
- [6] Rubinstein A. Perfect equilibrium in a bargaining model [J]. Econometrica, 1982, 50(1): 97-109.
- [7] Cramton P. Strategic delay in bargaining with two-sided uncertainty [J]. Review of Economic Studies, 1992, 59(1): 205-225.
- [8] 黄河, 陈剑. 组合拍卖与议价谈判机制设计研究 [J]. 管理科学学报, 2010, 13(2): 1-11.
- Huang He, Chen Jian. Design and research of combinatorial auction and bargaining negotiation mechanism [J]. Journal of Management Sciences, 2010, 13(2): 1-11.