

基于干扰对齐的认知 MIMO 系统频谱共享与用户调度

李钊, 李建东, 刘勤, 申彪

(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: 在认知 MIMO 多用户通信场景中, 设计基于干扰对齐的信号处理算法, 将认知信号与授权信号通过相互正交的子空间进行传输, 实现认知用户对授权系统空闲空间信道的无冲突利用, 并根据不同信道矩阵的空间传输性能的差异, 实现合理的用户调度。仿真结果表明, 所提方法能够有效利用空闲空间信道资源, 获得多用户分集增益, 在不影响授权业务的前提下提高认知用户的传输速率。

关键词: 干扰对齐; 认知无线电; MIMO 系统; 多用户

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)01-0167-06

Interference alignment based spectrum sharing and user scheduling for cognitive radio MIMO system

LI Zhao, LI Jian-dong, LIU Qin, SHEN Biao

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

Abstract: In communication scenario with multiple cognitive radio (CR) multi-input multi-output (MIMO) users, signal processing algorithm was designed based on interference alignment (IA) such that transmissions of cognitive and authorized signal were carried out in mutual orthogonal sub-spaces. Conflict-free utilization of spare spatial channel(s) authorized by primary system was achieved by cognitive user. Moreover, the difference of spatial transmission performance originating from various channel matrices was exploited to implement appropriate user scheduling. Simulation results show that the proposed method can utilize spare spatial channel resource effectively and obtain multiuser diversity gain. On the premise that authorized service is protected from disturbing, transmission rate of cognitive user is improved.

Key words: interference alignment; cognitive radio; MIMO system; multiuser

1 引言

随着无线通信系统的快速发展, 频谱资源稀缺与频谱利用率低的矛盾越来越受到人们的关注。认知无线电(CR, cognitive radio)作为一种非常有前景的提高频谱利用率的技术, 最早由 Mitola 提出^[1], 经过十几年的研究, 研究人员将认知通信场景主要划分为重叠(underlay)方式、覆盖(overlay)方式以及交织(interweave)方式^[2,3]。在 Underlay 方式中, 允

许认知业务与授权业务共存, 但认知发射端对授权接收端的干扰需控制在某一预设门限之下。Overlay 方式强调协作传输, 认知用户通过信号处理或编码等技术手段产生的信号能够使授权通信的质量得到改善。Interweave 方式则以机会的方式, 在不干扰授权业务的前提下利用空闲的时间、频率或空间空洞^[3]完成通信。

随着研究的深入, 人们对“频谱机会”的认识也更加丰富, 尝试从多个维度发掘通信机会, 空域

收稿日期: 2012-08-25; 修回日期: 2013-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61231008, 61102057); 重大专项基金资助项目(2012ZX03003005-005); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320404); 高等学校引智计划基金资助项目(B08038); 长江学者和创新团队发展基金资助项目(IRT0852); ISN 基金资助项目(ISN1103005)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61231008, 61102057); National S&T Major Project (2012ZX03003005-005); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320404); The 111 Project (B08038); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT0852); ISN Project (ISN1103005)

资源便是其中的一个重要方面。空域资源的利用主要得益于多输入多输出 (MIMO, multi-input multi-output) 技术的使用, 通过设计信号处理算法, 将认知信号(对授权系统是干扰)与授权信号放在相互正交的子空间中进行传输, 从而保证二者在空域上的无干扰共存。干扰对齐(IA, interference alignment)正是基于上述思想的一种典型设计, 将干扰(可能来自多个干扰源)限制在与期望信号空间完全正交的子空间中^[4], 进而研究相应的干扰消除和接收机制^[5]。

在相关研究中, 文献[6]基于授权用户利用注水功率分配优化传输速率, 从而导致一些空间子信道空闲这一事实, 设计了认知用户与授权用户的频谱共享方法, 这是较早的将 CR 与 MIMO 以及 IA 技术相结合的文献, 后续的工作^[7-9]也都是在这一基础上发展而来。但是, 文献[6~8]研究的系统仅包含一对认知收发信机, 并未对多认知用户场景进行讨论。文献[9, 10]考虑的认知系统包含多对收发信机, 但该场景更适合于分布式网络。对于中心式的蜂窝通信系统, 基站通常负责多个终端用户的通信, 因此, 对认知下行广播通信及认知上行多址接入进行研究成为必要。文献[8]在由一个基站、一个授权用户以及一个认知用户构成的上行通信场景中设计基于 IA 的频谱共享策略, 基站负责接收来自授权用户和认知用户的信号, 该场景具有很好的现实意义。这是因为从通信的发展看, 新技术对旧技术通常并不是立刻取代, 而是有一个演进过程, 并且, 新技术在原有系统的基础上展开, 有利于降低成本, 也符合市场化的要求。在上述场景中, 认知基站的建站不需要重新规划, 可以与现有网络设备共站。甚至说, 运营商可以针对一部分用户开展低优先级业务的支持, 只需要在现有设备上增加相应的功能模块即可。但是, 文献[8]的设计存在许多缺陷, 如未研究多认知用户场景; 对认知用户的检测能力要求很高, 不仅能够在频域感知, 也要感知空间子信道的使用状态; 资源受限的认知用户如何将位置编码(location coding)信息发送给基站等。

因此, 本文在中心式的多认知 MIMO 用户上行通信场景中, 设计基于 IA 的信号处理算法, 并利用不同信道的空间传输性能的差异, 进行合理的用户调度, 获得多用户分集增益。所提方法能够有效利用空闲空间信道资源, 实现授权业务与认知业务的无干扰共存。

2 系统模型

本文研究由 1 个基站、1 个授权用户、 K 个认知用户共同构成的上行通信系统, 如图 1 所示。

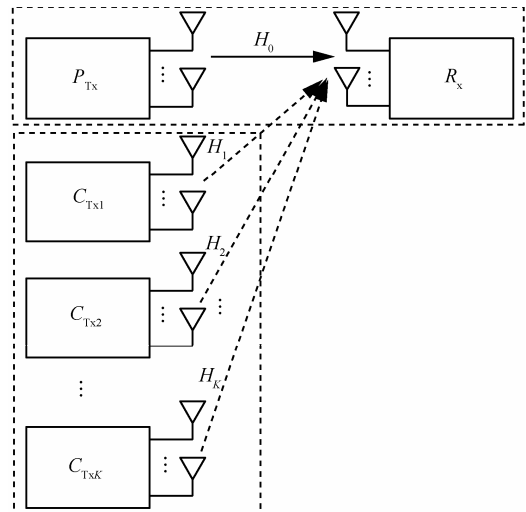


图 1 系统模型

基站(R_x)天线数为 N_R , 授权用户(P_{Tx})天线数为 N_{T0} , 认知终端(C_{Tx_i})天线数 N_{T_i} ($i=1,2,\dots,K$)。简单考虑, 取 $N_R = N_{T0} = N_{T_i} = N$ 。当天线数任意时, 需进行自由度讨论^[9], 本文不做论述。授权用户与基站之间的信道矩阵用 $H_0 \in \mathbb{C}^{N_R \times N_{T0}}$ 表示, 认知用户 i ($i=1,2,\dots,K$) 与基站间的信道矩阵用 $H_i \in \mathbb{C}^{N_R \times N_{T_i}}$ 表示, 信道矩阵的元素服从复高斯分布。假设信道是频率平坦衰落, 同时满足块衰落(block fading)特性, 即在一个传输周期内, 信道参数恒定, 在传输周期之间, 信道随机变化。假设授权用户能够准确估计 H_0 , 认知用户 i 能够获知 H_i , 并通过检测、监听^[11]等手段得到 H_0 以及授权系统使用空间子信道的信息, 基站能够获得全部信道信息^[7, 12]。假设用于信道信息传递的链路是可靠的, 并且时延相对于信道变化可以忽略^[13, 14], 即信道具有准静态特性。

终端用户根据信道状态信息, 通过功率分配优化传输速率。注水^[6, 8]是最优的策略, 但该方法基于迭代, 计算复杂度较高, 并且 MIMO 系统中天线配置决定可用空间子信道个数, 当 $\min(N_{T_i}, N_R)$ ($i=0,1,\dots,K$) 较小时, 相比于等功率分配, 注水算法对传输速率的改善优势并不明显。因此, 在本文的研究中采用一种折中方案——空间子信道等功率分配, 即授权用户将功率平均分配在最佳的 m_0 个

空间子信道上。

3 基于干扰对齐的认知 MIMO 系统频谱共享与用户调度

该部分首先给出基于干扰对齐的频谱共享方法，分别从授权系统和认知系统的角度进行阐述，然后在多用户场景中利用信道矩阵的空间传输特性差异设计用户调度机制。

3.1 授权系统信号处理

基站接收到的混合信号表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_0 \mathbf{P}_0 \mathbf{x}_0 + \sum_{i=1}^K \mathbf{1}_{\Theta}(i) \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{n} \quad (1)$$

等式右端第 1 项为授权用户信号，第 2 项为认知用户信号，第 3 项为加性高斯白噪声，噪声分量的方差均为 σ_n^2 。 \mathbf{x}_0 和 \mathbf{x}_i ($i=1,2,\dots,K$) 分别表示授权用户和激活(进行数据传输)认知用户的发射符号向量，满足 $E(\|\mathbf{x}_0\|^2) = E(\sum_{i=1}^K \mathbf{1}_{\Theta}(i) \|\mathbf{x}_i\|^2) = P_T$ ，即授权系统与认知系统的发射功率均为 P_T ， $E(\cdot)$ 表示求数学期望， $\|\cdot\|$ 表示矩阵或向量的 Frobenius 范数。 \mathbf{P}_0 和 \mathbf{P}_i ($i=1,2,\dots,K$) 分别为授权用户和激活认知用户的预编码矩阵。用 Θ 表示激活的认知用户集合， $\text{card}(\Theta) = \kappa$ ， $\text{card}(\cdot)$ 表示集合中的元素个数。 $\mathbf{1}_{\Theta}(i)$ 为指示函数(indicator function)^[7]，当 $i \in \Theta$ 时， $\mathbf{1}_{\Theta}(i) = 1$ ，否则， $\mathbf{1}_{\Theta}(i) = 0$ 。

对 \mathbf{H}_0 进行奇异值分解 $\mathbf{H}_0 = \mathbf{U}_0 \mathbf{A}_0 \mathbf{V}_0^H$ ， $(\cdot)^H$ 表示共轭转置，即将 \mathbf{H}_0 等效为 $\text{rank}(\mathbf{H}_0) = \min(N_{T_0}, N_R)$ 个去耦并行子信道， $\text{rank}(\cdot)$ 表示求矩阵的秩。子信道的空间特征由 \mathbf{U}_0 和 \mathbf{V}_0 的列向量决定，对角阵 \mathbf{A}_0 中的非零主对角元素反映空间子信道的增益，降序排列，即 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{N_R}$ 。

基站的接收滤波处理包括两方面，一方面是对授权用户信息的提取，另一方面是对可能存在的认知用户信息的提取。在所设计的机制中，授权用户通知接收端授权业务使用的子信道个数，因此基站可完成对授权用户信息的滤波处理，对剩余的子信道进行滤波得到的即是认知用户信息。

授权用户的业务不因认知用户而做任何改变。取 $\mathbf{P}_0 = \tilde{\mathbf{V}}_0 \subseteq \mathbf{V}_0$ ， \mathbf{P}_0 的列数用 m_0 表示。实际上，可以将 \mathbf{V}_0 和 \mathbf{U}_0 表示为 $\mathbf{V}_0 = [\tilde{\mathbf{V}}_0 \ \hat{\mathbf{V}}_0]$ ， $\mathbf{U}_0 = [\tilde{\mathbf{U}}_0 \ \hat{\mathbf{U}}_0]$ 。 $\tilde{\mathbf{V}}_0 \in \mathbb{C}^{N_{T_0} \times m_0}$ 和 $\tilde{\mathbf{U}}_0 \in \mathbb{C}^{N_R \times m_0}$ 的列向量反映了授权用户使用的子信道的空间特征， $\hat{\mathbf{V}}_0 \in \mathbb{C}^{N_{T_0} \times (N_{T_0} - m_0)}$ 和

$\hat{\mathbf{U}}_0 \in \mathbb{C}^{N_R \times (N_R - m_0)}$ 则表示授权用户空闲出来的子信道的空间特征。

根据以上讨论，基站对 \mathbf{y} 的估计值 $\tilde{\mathbf{y}}$ 也表示为两部分的组合 $\tilde{\mathbf{y}} = [\tilde{\mathbf{y}}^T \ \hat{\mathbf{y}}^T]^T$ ， $(\cdot)^T$ 表示转置。基站使用 \mathbf{U}_0^H 进行接收滤波，得到

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{y}} &= \mathbf{U}_0^H \mathbf{H}_0 \mathbf{P}_0 \mathbf{x}_0 + \mathbf{U}_0^H \sum_{i=1}^K \mathbf{1}_{\Theta}(i) \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{U}_0^H \mathbf{n} \\ &= \tilde{\mathbf{A}}_0 \mathbf{x}_0 + \mathbf{U}_0^H \sum_{i=1}^K \mathbf{1}_{\Theta}(i) \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{U}_0^H \mathbf{n} \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $\tilde{\mathbf{A}}_0 \in \mathbb{C}^{N_R \times m_0}$ ，注意 $m_0 \leq N_R$ ， $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{C}^{m_0 \times 1}$ 。 \mathbf{P}_i 的设计目标是使上式等号右端第 2 项为零，授权系统吞吐率由式(3)给出。

$$\tilde{R} = \text{lb} \left\{ \det \left[\mathbf{I}_{N_R} + \frac{P_T \tilde{\mathbf{A}}_0 \tilde{\mathbf{A}}_0^H}{m_0 \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_R}} \right] \right\} = \sum_{i=1}^{m_0} \text{lb} \left\{ 1 + \frac{P_T \lambda_i^2}{m_0 \sigma_n^2} \right\} \quad (3)$$

其中， $\text{lb}(\cdot)$ 表示以 2 为底的对数， $\det(\cdot)$ 表示求矩阵的行列式， \mathbf{I}_{N_R} 表示 $N_R \times N_R$ 单位阵，发射功率 P_T 在 m_0 个子信道上均分。

3.2 认知系统干扰对齐设计

对于认知用户而言，其优先级低于主用户，认知通信必须在不干扰授权业务的前提下进行。根据第 2 节讨论，授权用户将功率在最佳的 m_0 个空间子信道上均分，会空闲出部分子信道。设计基于 IA 的信号处理算法，使认知业务(对授权系统是干扰)在这些空闲的子信道上传输，从而实现与授权业务的无干扰共存。对于 $\mathbf{U}_0 = [\tilde{\mathbf{U}}_0 \ \hat{\mathbf{U}}_0]$ 和 $\mathbf{V}_0 = [\tilde{\mathbf{V}}_0 \ \hat{\mathbf{V}}_0]$ ， $\tilde{\mathbf{U}}_0$ 和 $\tilde{\mathbf{V}}_0$ 的列分别张成授权用户的信号子空间， $\hat{\mathbf{U}}_0$ 和 $\hat{\mathbf{V}}_0$ 的列分别张成未被授权用户使用的子空间，后者可用来传输认知业务，将其称为干扰子空间。通过设计 \mathbf{P}_i ($i \in \Theta$)，使 $\mathbf{H}_i \mathbf{P}_i$ 对齐到 $\hat{\mathbf{U}}_0$ 的列张成的子空间上，这样，在基站侧使用 \mathbf{U}_0^H 对 $\sum_{i=1}^K \mathbf{1}_{\Theta}(i) \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{x}_i$ 滤波便得到 $\hat{\mathbf{y}}$ 。重写式(2)如下

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{y}} \\ \hat{\mathbf{y}} \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{A}}_0 \mathbf{x}_0 + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{m_0} \\ \hat{\mathbf{U}}_0^H \sum_{i=1}^K \mathbf{1}_{\Theta}(i) \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{x}_i \end{bmatrix} + \mathbf{n}' \quad (4)$$

其中， $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^{m_i \times 1}$ ， m_i 表示激活认知用户 i 使用的空间子信道个数，应满足条件 $\sum_{i=1}^K \mathbf{1}_{\Theta}(i) m_i \leq N_R - m_0$ ， $\tilde{\mathbf{y}} \in \mathbb{C}^{m_0 \times 1}$ 和 $\hat{\mathbf{y}} \in \mathbb{C}^{(N_R - m_0) \times 1}$ 分别表示授权用户和认知用户的估计信号， $\mathbf{0}_M$ 表示 $M \times 1$ 零向量， $\mathbf{n}' = \mathbf{U}_0^H \mathbf{n}$ 。 $\mathbf{0}_{m_0}$ 在位置上恰好与 $\tilde{\mathbf{A}}_0 \mathbf{x}_0 \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ 的 N_R 个元素中的

前 m_0 个非零值对应。 $\hat{U}_0^H \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^{m_i \times 1}$ 在位置上恰好与 $\tilde{\Lambda}_0 \mathbf{x}_0$ 后 $N_R - m_0$ 个零值中的 m_i 个对应。为了避免认知用户之间的相互干扰， $\hat{U}_0^H \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i \mathbf{x}_i$ 与 $\hat{U}_0^H \mathbf{H}_j \mathbf{P}_j \mathbf{x}_j$ ($\{i, j\} \in \Theta$ 且 $i \neq j$) 所使用的子信道应满足正交性。

对于 i ($i \in \Theta$)，要求设计 \mathbf{P}_i 使 $\mathbf{H}_i \mathbf{P}_i$ 一方面与 \hat{U}_0 中的列向量对齐，另一方面与 \tilde{U}_0 中的列向量正交。注意到 \tilde{U}_0 与 \hat{U}_0 共同构成酉矩阵 U_0 ， \tilde{U}_0 与 \hat{U}_0 是相互正交的，因此仅需设计使 $\mathbf{H}_i \mathbf{P}_i$ 与 \hat{U}_0 中的列向量对齐的信号处理方法。为了简单，本文考虑每个传输周期仅有一个认知用户被激活的情况 ($\text{card}(\Theta) = \kappa = 1$)，即授权系统空闲出来的空间子信道由一个认知用户完全利用。激活认知用户 ($i \in \Theta$) 预编码矩阵 \mathbf{P}_i 的求解如下

$$\hat{U}_0^H (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_i) = \mathbf{I}_{N_R - m_0}, \quad i \in \Theta \quad (5)$$

由于 \hat{U}_0^H 不是方阵且行满秩 ($\text{rank}(\hat{U}_0^H) = N_R - m_0$)，其右伪逆 $\mathbf{R} = \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i$ 存在且唯一

$$\mathbf{R} = (\hat{U}_0^H)^H (\hat{U}_0^H (\hat{U}_0^H)^H)^{-1} = \hat{U}_0 \mathbf{I}_{N_R - m_0}^{-1} = \hat{U}_0 \quad (6)$$

所以有 $\mathbf{H}_i \mathbf{P}_i = \hat{U}_0$ ，容易计算

$$\mathbf{P}_i = (\mathbf{H}_i)^{-1} \hat{U}_0, \quad i \in \Theta \quad (7)$$

$\mathbf{P}_i = [\mathbf{p}_{i,1} \cdots \mathbf{p}_{i,m_i}]$ ， $\mathbf{p}_{i,l}$ ($l = 1, 2, \dots, m_i$) 表示用户 i 利用空间子信道 l 所需的预编码向量。注意 $\mathbf{P}_i^H \mathbf{P}_i$ 的值不一定为 $\mathbf{I}_{N_R - m_0}$ ，即在 $\mathbf{p}_{i,l}$ 中隐含了功率的增益或衰减。也就是说，通过不同的空间信道实现基于干扰对齐的数据传输是存在性能差异的，但使用由式(7)计算得到的预编码矩阵进行预处理后，原本差(输出信噪比低)的认知用户信号获得了功率补偿，而好(输出信噪比高)的认知信号被衰减，从而导致输出认知用户信号具有相同的信噪比。这种无差别处理在多认知用户场景中，对那些信道传输性能好的用户是不公平的，也不利于系统吞吐率的提升。因此，对式(7)做归一化处理，得

$$\bar{\mathbf{p}}_{i,l} = \frac{\mathbf{p}_{i,l}}{\|\mathbf{p}_{i,l}\|}, \quad l = 1, 2, \dots, m_i \quad (8)$$

根据上式，预编码向量的模值取为 1，不同空间子信道输出的认知信号质量差别得到体现。在 3.3 节认知用户的调度算法设计中，便根据信道传输性能的差异实现用户选择。认知系统吞吐率由下式给出

$$\hat{R} = \text{lb} \left\{ \det \left[\mathbf{I}_{N_R} + \frac{P_T \sum_{i=1}^K 1_{\Theta}(i) (\mathbf{U}_0^H \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i) (\mathbf{U}_0^H \mathbf{H}_i \mathbf{P}_i)^H}{(N_R - m_0) \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_R}} \right] \right\} \quad (9)$$

3.3 多用户调度机制设计

根据式(7)和式(8)可以发现，若 $\|\mathbf{p}_{i,l}\| > 1$ ，表明认知用户 i 使用空间子信道 l 实现对齐传输的性能差，利用该式计算的预编码向量中隐含了功率补偿；反之，若 $\|\mathbf{p}_{i,l}\| < 1$ ，表明空间子信道 l 传输性能好，预编码向量中隐含了功率衰减。

调度算法在基站侧执行，基站收集各个 \mathbf{H}_i (或 \mathbf{P}_i) 的信息，然后根据式(10)选择编号为 ξ 的用户，授权系统空闲出来的空间子信道由该认知用户完全利用。

$$\xi = \arg \min_{1 \leq i \leq K} \|\mathbf{P}_i\| = \arg \min_{1 \leq i \leq K} \left\| (\mathbf{H}_i)^{-1} \hat{U}_0 \right\| \quad (10)$$

采用上式进行用户选择，利用了不同信道的空间传输性能的差异，有利于提高认知系统吞吐率。

3.4 其他设计

上述分析是在授权频道始终被占用 ($m_0 > 0$) 的假设下进行的。在实际应用中，若 $m_0 = 0$ ，即授权频道空闲，此时关于 \mathbf{H}_0 的信息已无必要(若考虑到信道的时变特性，授权用户静默也将导致也无法获得 \mathbf{H}_0)，认知用户以传统的机会接入的方式完成通信，发射预编码与接收滤波设计依据信道矩阵 \mathbf{H}_i ($i \in \Theta$) 进行。该情况作为 3.1 节~3.3 节设计的补充，整体上所提策略属于空域—频域联合的 Interweave 方式。

此外，当授权业务与认知业务共存时，要求基站能够对两类业务进行有效区分。文献[8]设计了一种位置编码机制，由认知用户检测无线环境并将授权用户对空间子信道的使用情况通知给基站。该设计存在几方面问题：一是对认知用户的检测能力要求很高，不仅能够在频域感知，也要能够感知空间子信道的使用状态；二是认知用户是资源受限的，将位置编码信息发送给目的节点也是困难的。因此，本文的设计将位置编码放在授权用户侧，该编码信息可以通过低速控制信道或者携带在用户业务中发送给基站，认知节点以监听^[11]的方式获得位置编码等信息。这样做一方面提高了基站获取信息的准确性，另一方面降低了认知节点的感知复杂度。对于基站和认知用户，若未接收(监听)到位置编码信息，则判断无授权业务。

关于位置编码，本文进行精简设计。由于用户

对空间子信道的利用是依据质量降序进行，因此位置编码不需要针对每个空间子信道(对应 1bit 开销)进行，在空间子信道排序的基础上，采用 $\lceil \log_2 \{ \min(N_{T_0}, N_R) \} \rceil$ bit 即可， $\lceil a \rceil$ 表示取大于 a 的最小整数，该开销小于文献[8]的 $\min(N_{T_0}, N_R)$ bit。

4 仿真结果

本节在授权频道始终被占用的假设条件下，通过仿真验证了所提算法对空闲空间子信道的有效利用以及对认知用户的合理调度。与本文提出的方法相比，文献[8]的预编码矩阵设计对信道传输特性进行了无差别处理，因此在多用户场景中使用随机调度的方法。对这 2 种策略进行比较。

图 2 给出天线数 $N=2, 4, 6, 8$ ，授权系统与认知系统使用的空间子信道个数随信噪比(SNR)变化的情况。在低 SNR 处，授权通信以全部功率通过最好的空间子信道传输(波束成形, Beamforming)能够获得高的吞吐率，随着 SNR 的增加，授权通信将发射功率在多个较好的空间子信道上均分空间复用(spatial multiplexing)能够获得更好的吞吐率^[15]。因此，授权通信使用的空间子信道个数随着 SNR 的增加而增大，而认知通信能够利用的空闲子信道个数随着 SNR 的增加逐渐减少，二者之和恰好等于 N 。由于采用 2 种方法，认知系统都是对全部空闲空间子信道加以利用，因此认知系统的 2 条子信道个数曲线重合。

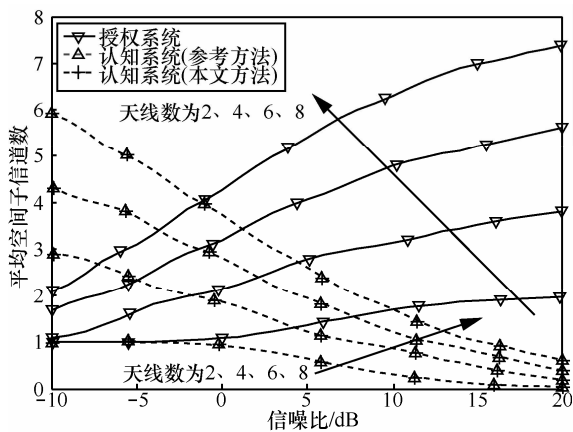


图 2 不同系统使用的空间子信道个数

图 3 给出天线数 $N=2, 4, 6, 8$ ，认知系统的中断概率，即无空闲空间信道资源可用的概率。由于认知系统的中断概率取决于授权系统对空间信道资源的使用情况，而授权通信使用的空间子信道个数随着 SNR 的增加而增大(如图 2 所示)，因此认

知系统中断概率随着 SNR 的增加而增大。由于天线数的增加导致空间子信道总数的增大，因此在相同 SNR 处， N 的数值越大，中断概率越小。

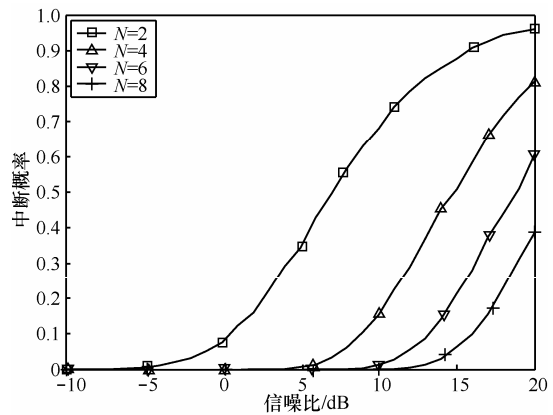


图 3 认知系统的中断概率

图 4 给出认知用户数 $K = 4$ ，天线数 $N=2, 4, 6, 8$ ，系统平均吞吐率随 SNR 变化的情况。授权业务不受认知业务的影响，自适应选择使用的空间子信道个数，传输速率随着 SNR 的增加而增大。对于认知系统，在低 SNR 处，虽然空闲子信道数目多，但由于 SNR 差，因此吞吐率低。随着 SNR 增加，虽然空闲子信道个数减少，但仍能够保证认知通信以高概率获得通信机会(空洞)，并且由于 SNR 的改善，认知系统吞吐率逐渐提高。当 SNR 增大到一定程度，授权系统以高概率占用更多甚至全部的空间子信道，认知系统获得通信机会的概率降低，对应中断概率逐渐增加并趋近于 1，因此高 SNR 处，认知系统吞吐率出现下降。由于所提方法利用不同认知用户信道传输性能的差异实现调度，因此吞吐率明显优于参考方法，并且，天线数的增加能够提供更多的空间自由度，因此增加天线配置对授权系统和认知系统的吞吐率均有改善。

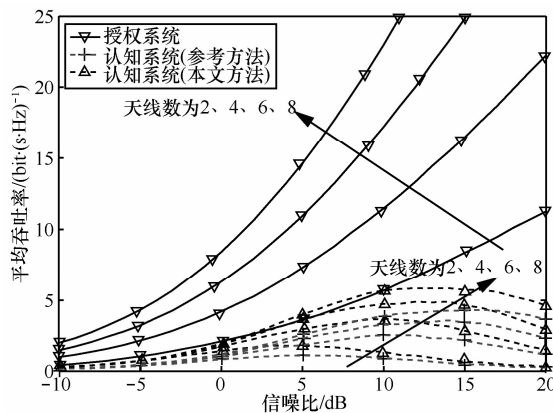


图 4 天线数与平均吞吐率的关系

图 5 给出天线数 $N = 4$ ，认知用户数 $K=2、4、8、12、16$ ，系统平均吞吐率随 SNR 变化的情况。所提方法利用不同认知用户信道传输性能的差异实现调度，能够获得多用户分集增益，吞吐率优于参考方法。参考方法对所有认知通信信道进行无差别处理，采用随机调度的方式，所得吞吐率未随认知用户数的增加而改善。

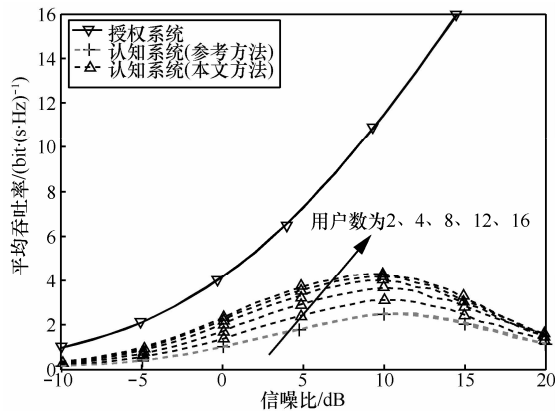


图 5 认知用户数与平均吞吐率的关系

5 结束语

本文在认知 MIMO 多用户上行通信场景中，利用干扰对齐设计信号处理算法，并根据信道矩阵空间传输性能的差异进行用户调度。该方法从频域—空域联合的角度发掘通信机会，通过考察信道差异获得多用户分集增益，在不影响授权业务的前提下提高认知用户的传输速率。未来可以在更具一般性的通信场景(如天线配置、多基站、自适应传输等)中进行研究，并对空间子信道的对齐传输性能进行探索，在此基础上设计更加细粒化(由本文的用户级选择拓展至子信道级选择)的联合频谱共享与调度机制，实现多认知用户对空闲子信道的高效利用。

参考文献:

[1] 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.
 [2] ZHOU H C, RATNARAJAH T. A novel interference draining scheme for cognitive radio based on interference alignment[A]. Proceedings of IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum[C]. Singapore, 2010. 1-6.
 [3] FRANCESCO N, IRFAN G, DIRK T M. Spatial interweave for a MIMO secondary interference channel with multiple primary users[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management[C]. Barcelona, Spain, 2011. 1-5.
 [4] NOSRAT-MAKOU EI B, ANDREWS J G, HEATH R W. A simple SINR characterization for linear interference alignment over uncertain

MIMO channels[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory[C]. Austin, USA, 2010. 2288-2292.
 [5] SHYAMNATH G, SAMUEL D P, DINA K. Interference alignment and cancellation[A]. Proceedings of the ACM SIGCOMM conference on Data communication[C]. Barcelona, Spain, 2009. 159-170.
 [6] PERLAZA S M, DEBBAH M, LASAULCE S, et al. Opportunistic interference alignment in MIMO interference channels[A]. Proceedings of IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]. Cannes, France, 2008. 1-5.
 [7] PERLAZA S M, FAWAZ N, LASAULCE S, et al. From spectrum pooling to space pooling: opportunistic interference alignment in MIMO cognitive networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(7): 3728-3741.
 [8] KRIKIDIS I. A SVD-based location coding for cognitive radio in MIMO uplink channels[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(10): 912-914.
 [9] AMIR M, EL-KEYI A, NAFIE M. Constrained interference alignment and the spatial degrees of freedom of MIMO cognitive networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(5): 2994-3004.
 [10] ZHOU H C, RATNARAJAH T, LIANG Y C. On secondary network interference alignment in cognitive radio[A]. Proceedings of IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum[C]. Aachen, Germany, 2011. 637-641.
 [11] BASHAR S, DING Z. Optimum routing protection against cumulative eavesdropping in multihop wireless networks[A]. Proceedings of IEEE Military Communications Conference[C]. Boston, USA, 2009. 1-7.
 [12] FAHEEM A K, MASOUIROS C, RATNARAJAH T. Interference driven linear precoding for cognitive radio downlink[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management[C]. Barcelona, Spain, 2011. 1-5.
 [13] 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.
 [14] BAKR O, JOHNSON M, MUDUMBAI R, et al. Multi-antenna interference cancellation techniques for cognitive radio applications[A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. Budapest, Hungary, 2009. 1-6.
 [15] TSE D, VISWANATH P. Fundamentals of Wireless Communication[M]. Cambridge University Press, United Kingdom, 2005.

作者简介:



李钊 (1981-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为 MIMO 无线通信和认知无线电。

李建东 (1962-), 男, 江苏阜宁人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带无线通信、大规模 ad hoc 网络、软件无线电。

刘勤 (1976-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线资源管理、认知无线电。

申彪 (1989-), 男, 山东菏泽人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为 MIMO 无线通信、认知无线电。