

多天线多用户认知系统中基于BD预编码的用户选择方法

周湘贞¹ 胡海波²

(郑州升达经贸管理学院信息工程系 郑州 451191)¹ (重庆大学软件学院 重庆 400045)²

摘 要 在次用户配置的多天线的认知多天线协作反馈系统中,信道方向信息存在量化误差,现有的用户选择方法不能使次用户系统容量最大化,而且增大了对主用户系统的干扰。为了消除量化误差对主用户系统的影响,提出了一种基于BD预编码的统计独立系数的用户选择方案。分析和仿真结果表明,所提方案在主用户系统干扰受限的条件下有效提升了次用户系统的容量。

关键词 认知无线电,频谱共享,多输入多输出,广播信道

中图分类号 TN929.53 **文献标识码** A

Selection Methods Based on Block Diagonalization Precoding for Multiuser Multiantenna Cognitive Radio System

ZHOU Xiang-zhen¹ HU Hai-bo²

(Information Engineering Department, Shengda Trade Economics & Management College of Zhengzhou, Zhengzhou 451191, China)¹

(School of Software, Chongqing University, Chongqing 400045, China)²

Abstract In the users' multiple antenna cognitive multiple antenna cooperation feedback system, the channel direction information has quantization error, thus the existing user selection method will not be able to maximize the second user system capacity, and increase the primary user system interference. In order to eliminate the influence of the quantization error on the primary and secondary user system, this paper put forward a kind of statistical independent factor second users selection method based on the BD precoding. Analysis and simulation results show that the proposed scheme effectively enhances the second user system capacity in the primary user system interference limited conditions.

Keywords Cognitive radio, Spectrum share, MIMO, Broadcast channels

1 引言

认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术能够充分利用传统无线通信中没有被有效利用的频谱,从而可以解决无线频谱资源不足的矛盾。为了对主用户(Primary User, PU)不造成干扰,同时也可以实现次用户(Second User, SU)系统的通信,不同的研究分别提出了充分利用频率、空间、码资源等不同的资源^[1-3]。其中多天线技术以充分利用空间资源的优势,得到广泛的关注和研究。在多天线多用户认知系统中,由于次用户较多,认知基站(Cognitive Base Station, CBS)无法同时服务所有的次用户,如何选择服务的次用户成为需要研究的问题。

以往的文章大多数是在次用户配置单天线的条件下进行多用户选择的,并且均假设CBS知道主用户到CBS信道的完全信道状态信息(Channel State Information, CSI)和次用户到CBS信道的完全信道状态信息^[4,5]。然而在实际应用中,次用户往往配置多天线,并且在频分双工(Frequency Division Duplex, FDD)系统中,信道状态信息需要接收端反馈得到。本文采用文献[6]的协作反馈方式,但是当SU配置多个天线

时,反馈的信道方向信息(Channel Direction Information, CDD)存在量化误差,影响次用户选择的结果,从而造成对PU系统的干扰和SU系统的容量损失。本文根据量化误差的统计特性,提出了一种基于块对角化(Block Diagonalization, BD)预编码方法的多用户选择算法,此算法具有较低的复杂度且能有效克服量化误差对SU系统的影响。由仿真结果和分析可知,此方法相对于其他已有方法,具有更高的SU系统吞吐量。

2 系统模型

类似于文献[6],所提方案的系统模型如图1所示,PU系统存在一个主用户基站(Primary Base Station, PBS),其将与一个主用户进行通信。SU认知网络有一个认知基站(Cognitive Base Station, CBS)服务于K个次用户。其中,PBS和CBS均配置M个天线,并且主用户和K个次用户配置N个接收天线。在同一个频率内,主用户所接收的信号将受到CBS所发送信号的干扰。在同一个时隙里,从CBS发送的信息符号为 $s = [s_1, s_2, \dots, s_K]^T$,其中 s_k 为将要发给次用户 $k(k=1, \dots, K)$ 的信号。假设 s 是单位能量的向量即 $E[s s^H] = I_K$ 。

收稿日期:2012-10-11 返修日期:2013-02-25

周湘贞(1976—),女,硕士,讲师,主要研究方向为计算机网络应用、计算机软件与理论,E-mail:619543699@qq.com;胡海波(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为软件工程。

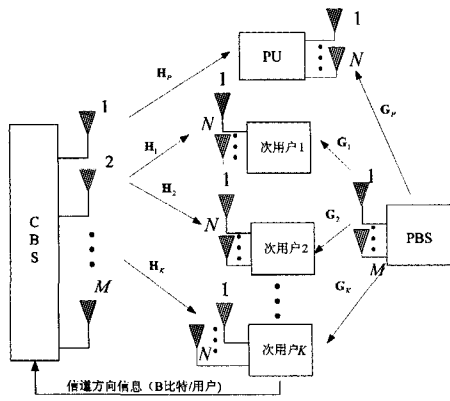


图1 认知多用户场景

CBS所发送的信号可以写为

$$x = Ts \quad (1)$$

式中, $T = [t_1, t_2, \dots, t_K]$ 为CBS发送时的预编码矩阵, t_k ($k = 1, \dots, K$) 为 $M \times 1$ 的向量。则次用户 k 接收到的信号为

$$y_k = \sqrt{\beta_k} H_k x + \sqrt{P_p} G_k s_p + n_k \quad (2)$$

式中, $s_p \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为PBS发送的信号, β_k 是CBS到次用户 k 的路径损耗; P_p 为PBS的发送功率; $H_k \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 是CBS到次用户 k 的信道 ($1 \leq k \leq K$); $G_k \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 是PBS到次用户 k 的信道 ($1 \leq k \leq K$); $G_p \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 为PBS到主用户的信道, $H_k G_k$ 和 G_p 中的元素是独立同分布的复高斯随机变量, 均值为0, 方差为1; $n_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 是一个均值为0的噪声向量, 其协方差矩阵为 $R_{n_k n_k} = E[n_k n_k^H] = I_N$ 。而主用户接收到的信号为

$$y_p = \sqrt{P_p} G_p s_p + H_p x + n_p \quad (3)$$

式中, $H_p \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 是CBS到主用户的信道; $n_p \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 是一个均值为0的噪声向量, 其协方差矩阵为 $R_{n_p n_p} = E[n_p n_p^H] = I_N$ 。

次用户和主用户所用的码本与PBS和CBS端均约定, 采用类似文献[7]的码本 $\mathcal{C}$, 其共有 2^B 个 $\mathbb{C}^{M \times N}$ 维矩阵, 记为 $(W_1, \dots, W_{2^B})$, B 为每个次用户反馈给CBS的比特数 (也为主用户反馈给PBS的比特数)。按照文献[7]的量化方法, 信道矩阵 H_k 的量化矩阵为 $\hat{H}_k$, 其选择标准依据以下原则:

$$\hat{H}_k = \arg \min_{W \in \mathcal{C}} d^2(H_k, W) \quad (4)$$

式中, $d(H_k, W)$ 是距离矩阵, 其为弦距离, 定义为

$$D = d(H_k, W) = \sqrt{\sum_{j=1}^N \sin^2 \theta_j} \quad (5)$$

$$\tilde{H}_k = \hat{H}_k X_k Y_k + S_k Z_k \quad (6)$$

式中, S_k 和 Z_k 相互独立, $\hat{H}_k$, X_k 和 Y_k 相互独立。 $\tilde{H}_k$ 是 H_k 的列组成的一组子空间正交基, $\hat{H}_k$ 为量化得到的矩阵, X_k 在格拉斯曼流形 $Grass(N, N)$ 平均分布, 与码书矩阵具有相同的列空间; Y_k 是上三角形矩阵, 对角元素是正的^[8], 为投影在码书矩阵列空间的值; S_k 是码书矩阵的零空间, Z_k 是上三角形矩阵, 对角元素是正的^[8], 为投影在码书矩阵零空间的值即量化误差。

其中 θ_j 是矩阵的列 H_k 和 W 所组成的两个子空间主角。因为主角只与矩阵的列向量组成的子空间有关, 所以本文所用的码书中的矩阵都是酉矩阵。同理, G_k 和 G_p 均可以按照

以上原则量化进行反馈, 量化后的信道矩阵分别为 $\hat{G}_k$ 和 $\hat{G}_p$ 。

3 次用户选择算法及其分析

3.1 次用户选择算法

定义1 令

$$\theta(\hat{H}_i, \hat{H}_j) \triangleq \frac{\|\hat{H}_i - S_i \hat{H}_j\|_F}{\|\hat{H}_i\|_F \|\hat{H}_j\|_F} \quad (7)$$

为用户 i 和用户 j 的独立性参数。

根据此参数, 本文设计一种用户选择算法。算法的思路如下:

首先选择与CBS到主用户信道 H_p 的独立的次用户作为服务的首选目标, 淘汰与 H_p 相关的次用户, 即对主用户干扰大的用户; 其次在剩下的次用户中挑选出信道条件最好的次用户, 并以此次用户为基准, 找出与它独立性较小的次用户, 最终选出次用户集 $\mathfrak{I}$ 。

算法步骤总结如下:

步骤1 θ_p 独立性参数用户选择

1) $\mathfrak{I} = \emptyset$

2) 用户选择独立性满足 θ_p 的用户, 表示为

$$\varphi_1 = \{k | \theta(\hat{H}_k, \hat{H}_p) \geq \theta_p, k = 1, \dots, K\} \quad (8)$$

3) 基准次用户的确定

$$\mathfrak{I}(1) = \arg \max_{k \in \varphi_1} \|H_k\|_F \quad (9)$$

步骤2 θ_s 独立性参数用户选择

1) $i = 1$;

2) 若 $i < M$,

a) $i = i + 1$;

b) 选择用户满足 θ_s 独立性, 可以表示为

$$\varphi_i = \{k | \theta(\hat{H}_i, \hat{H}_k) \leq \theta_s, \forall k \in \varphi_{i-1}\} \quad (10)$$

c) 第 i 个选择次用户确定

$$\mathfrak{I}(i) = \arg \max_{k \in \varphi_i} \|H_k\|_F \quad (11)$$

结束。

3.2 次用户选择参数的确定

由以上算法可以知道, θ_p 和 θ_s 是关系到选择算法性能的关键参数, 这两个参数的确定, 关系到系统性能的好坏。本部分主要针对其统计分布特点进行分析, 最后得到最优的 θ_p 和 θ_s 。

1) θ_p 的分布

$$\theta(\hat{H}_i, \hat{H}_p)^2 = \frac{\|\hat{H}_i - S_i \hat{H}_p\|_F^2}{\|\hat{H}_i\|_F^2 \|\hat{H}_p\|_F^2} \quad (12)$$

由文献[7]可知, 其分布为Beta分布, 应用Beta分布的定义可知

$$\frac{\|\hat{H}_i - S_i \hat{H}_p\|_F^2}{\|\hat{H}_i\|_F^2 \|\hat{H}_p\|_F^2} \sim \beta(N, M-1) \quad (12)$$

应用 $\beta(N, M-1)$ 的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 为不完全Beta函数 $I_x(a, b)$, 可以得到

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{k \in \varphi_1\} &= \text{Prob}\left\{\frac{\|\hat{H}_i - S_i \hat{H}_p\|_F^2}{\|\hat{H}_i\|_F^2 \|\hat{H}_p\|_F^2} \geq \theta_p^2\right\} \\ &= 1 - I_{\theta_p^2}(N, M-1) \end{aligned} \quad (13)$$

因此可以得到 $Prob\{k \in \varphi_1\} = (1 - \theta_p)^{M-1}$ 。

2) θ_s 的分布

$$\text{同理, } Prob\{k \in \varphi_1\} = Prob\left\{\frac{\|\hat{H}_i - S_i \hat{H}_j\|_F^2}{\|\hat{H}_i\|_F^2 \|\hat{H}_j\|_F^2} \leq \theta_s^2\right\} =$$

$$I_{\theta_s}^2(N-i, M-i).$$

3) θ_p 和 θ_s 的确定

为了确保第 1) 步所选择的次用户大于目标数量 K , 需要满足

$$K(1 - \theta_p)^{M-1} \geq M \quad (14)$$

可以推导出

$$\theta_p \geq \sqrt{(1 - \frac{M}{K})^{\frac{1}{M-1}}} \quad (15)$$

为了确保第 2) 步所选的次用户数大于 1, θ_s 需要满足

$$S_1 \cdot I_{\theta_s}^2(N-1, M-1) \geq 1 \quad (16)$$

式中, S_1 为步骤 1 得到的用户数。

4 仿真结果

在本部分, 主要仿真了所提方案的最大互信息的性能, 图 2 为不同 CBS 不同天线数所对应的最大互信息的性能。仿真的条件为: $\theta_p = 0.8$ 并且 $\theta_s = 0.6$, 发送天线数 M 分别为 4, 8 和 12, 每个次用户的接收天线 N 为 2, $P = 20\text{dB}$ 。可以很明显的看出, 次用户的最大互信息随着 $\min\{M, \frac{M}{N}\}$ 线性增加, 服务的用户数越多, 其吞吐量越大, 这主要是因为本文所提的算法保证了各个用户的相对独立性, 增加了多用户分集, 近似可以达到满用户分集增益。

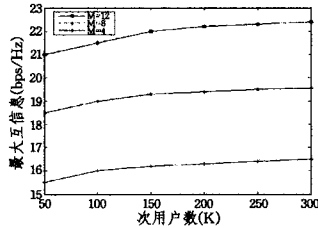


图 2 不同发送天线数最大互信息

图 3 为当 $\theta_p = 0.8$, $P = 20\text{dB}$, 接收天线 N 为 2, $M = 4$ 时, 不同 θ_s 下所对应的次用户系统的最大互信息的值。从图 3 可以看出最大互信息的值并不是关于 θ_s 的增函数, 所以需要按照 3.2 节的方法去确定最优的 θ_s 。

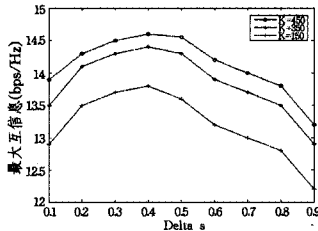


图 3 不同 θ_s 所对应的最大互信息

图 4 为当 $\theta_p = 0.8$, $P = 20\text{dB}$, 接收天线 N 为 2, $M = 4$ 时, 不同 θ_p 下所对应的次用户系统的最大互信息的值。从图 4 可以看出最大互信息的值是关于 θ_p 的增函数, 可随意在 θ_s 确定的条件下选择最大的 θ_p 。

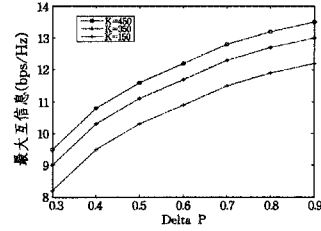


图 4 不同 θ_p 所对应的最大互信息

结束语 本文研究了多用户多天线认知无线电系统中次用户选择算法, 提出了一种基于 BD 预编码方法的多用户选择算法, 此算法是以独立性参数为标准进行的多用户的选择, 此独立性参数考虑到了量化误差的空间, 并且分析了独立性参数的统计特性, 得到了最优的独立性参数。

参考文献

- [1] Zhang Y, Lee C, Niyato D, et al. Auction Approaches for Resource Allocation in Wireless Systems: A Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 99(99): 1-22
- [2] Vaze C S, Varanasi M K. The Degree-of-Freedom Regions of MIMO Broadcast, Interference, and Cognitive Radio Channels With No CSIT [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(8): 5354-5374
- [3] Nosrat-Makouei B, Andrews J G, Heath R W. User Arrival in MIMO Interference Alignment Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(2): 842-851
- [4] Gui Xin, Kang Gui-xia, Zhang Ping. Linear Precoding Design in Multi-User Cognitive MIMO Systems with Cooperative Feedback [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10): 1580-1583
- [5] Jinal N. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 56(11): 5045-5060
- [6] Cumanan K, Zhang Rui, Lambotcharan S. A New Design Paradigm for MIMO Cognitive Radio with Primary User Rate Constraint [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(5): 706-709
- [7] 赵伟, 袁超伟, 张金波. MIMO 广播有限反馈系统中联合预编码方法 [J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(2): 24-27
- [8] Muirhead R. Aspects of multivariate statistical theory [M]. Wiley New York, 1982
- [9] 陈建白, 郑宝玉. 认知无线网络中双中继协作策略及其差错性能分析 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2012, 24(5): 615-619