

# 一种认知无线电中新型干扰对齐算法

王小冲<sup>1</sup>, 刘 陈<sup>1</sup>, 傅友华<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003;  
2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 干扰对齐作为一种新兴的干扰管理方法, 由于可以压缩干扰信号空间, 并且提高系统自由度, 因而近些年来受到了广泛的研究。在 1 对主用户和  $K$  对次用户的多天线多输入多输出 (MIMO) 网络中, 文中重新设计了主用户和次用户的预编码矩阵和接收矩阵, 并且提出了一种新型的次用户双层预编码干扰对齐算法。在保证主用户获得最小均方误差 (MMSE) 性能的同时, 通过设计次用户的第一层预编码矩阵, 使得次用户能够和主用户在同一频段上进行数据传输, 并且不对主用户产生任何干扰, 从而提高了系统的频谱利用率。次用户的第二层预编码矩阵保证了次用户之间的干扰对齐, 提高了次用户的容量和自由度。仿真结果显示, 相较于传统的认知无线电中单层预编码干扰对齐算法, 本算法中的次用户可以获得更高的数据速率。

**关键词:** 双层预编码; 干扰对齐; 认知无线电; 多输入多输出

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2015)08-0103-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.08.022

## A New Interference Alignment Algorithm in Cognitive Radio System

WANG Xiao-chong<sup>1</sup>, LIU Chen<sup>1</sup>, FU You-hua<sup>1,2</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and  
Telecommunications, Nanjing 210003, China;  
2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University,  
Nanjing 210096, China)

**Abstract:** As a new interference management method, interference alignment can compress the interference signal space and improve the Degree Of Freedom (DOF), much attention has been paid to the interference alignment. In this paper, propose a dual-layer pre-coding interference alignment scheme in a Multiple Input Multiple Output (MIMO) cognitive radio system including one primary user and  $K$  secondary users. The Minimum Mean Square Error (MMSE) of the primary user is guaranteed, at the same time, the first layer pre-coding matrix allows the secondary users to share the same frequency band of the primary user without generating any interference to the primary user, thus improving the spectrum efficiency of the system. The second layer pre-coding matrix assures the interference between the secondary users is aligned, improving the capability and DOF of second users. The numerical results show that compared with conventional interference alignment schemes in cognitive radio system, a higher data rate of the secondary users is achieved.

**Key words:** dual-layer pre-coding; interference alignment; cognitive radio; MIMO

## 0 引 言

近些年来随着无线移动用户数量和业务的爆发式增长, 可用频谱资源的稀缺, 干扰问题变得日益严重, 直接影响着系统的性能。因此, 如何有效处理用户之间的干扰问题就成为了重要的研究方向。

加州大学的 Jafar 教授最早提出利用干扰对齐<sup>[1]</sup>解决干扰问题。干扰对齐的实现是通过在发送端采用预编码矩阵将期望信号和干扰信号在空间、时间或频率上隔离, 并利用波束成形技术压缩干扰信号在非期望接收机上的维度, 最后在接收端采用接收矩阵最小

收稿日期: 2014-10-06

修回日期: 2015-01-14

网络出版时间: 2015-07-21

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61372126, 61302101); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20130874); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金课题(2012D11)

**作者简介:** 王小冲(1989-), 男, 研究方向为 MIMO 无线通信中的干扰对齐技术; 刘 陈, 博士生导师, 教授, 研究方向为无线通信中的信号处理, 空时信号处理和空时编码、协作通信方式; 傅友华, 硕士生导师, 副教授, 研究方向为 MIMO 无线通信、中继协作通信。

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20150721.1453.076.html>

化干扰和噪声所带来的影响。相较于“切蛋糕”式的正交化频谱共享方式,干扰对齐技术能够极大地提高频谱利用率,获得更高的系统自由度(DOF)。文献[2]对MIMO广播信道(BC)、MIMO多址信道(MAC)、MIMO X信道的系统自由度进行了详细分析,而且给出了MIMO X信道的干扰对齐算法。同时指出终端具有认知能力的重要性,即如果终端能够协作共享信息能提高系统的自由度。文献[3]给出了在终端没有协作的情况下,设计线性的终端滤波器实现MIMO X信道的分解,达到干扰对齐的算法。文献[4]给出了两种分布式干扰对齐的算法:最小干扰泄露算法和最大信干噪比算法。利用信道的互易性,在收发端采用相互迭代的方法求得预编码矩阵和接收矩阵,渐近使系统获得最小的干扰泄露功率或最大的信干噪比。干扰对齐的实现一般都依赖于发送端知道信道状态信息(CSI),文献[5]指出即使发送端不知道CSI,仍然可以通过信道的相关性来实现盲干扰对齐。文献[6]系统地阐述了干扰对齐的最新进展、应用及其存在的问题和挑战。

此后在多用户MIMO网络中,采用干扰对齐逐渐成为研究的热点<sup>[7-10]</sup>。文献[7]研究了在1对主用户和1对次用户的认知网络中干扰对齐的实现,次用户利用预编码矩阵将干扰对齐在主用户的空闲信道上,从而不会对主用户产生干扰,次用户可以和主用户在相同的频段上进行通信,并且还设计了接收矩阵用来白化干扰和噪声。文献[8]研究了在次用户不知道主用户CSI的情况下,盲干扰对齐的实现。文献[9-10]研究了在1对主用户和K对次用户的认知网络中干扰对齐的实现。文献[9]中的主用户是否存在空闲子信道取决于主用户的注水功率分配,而次用户需要在主用户进行数据传输的过程中检测出主用户的空闲子信道,这一过程的实现依赖于认知无线电中频谱感知的技术<sup>[11]</sup>。虽然注水功率分配算法使主用户获得了容量的最优解,但是为了达到此最优解,主用户每个子信道的数据速率可能不一样,因此,调制方式也有可能不一样,这就增加了接收端的设计难度。

文中提出了在1对主用户和K对次用户的MIMO认知网络中,一种新型的双层预编码干扰对齐算法,重新设计了主用户以及次用户的预编码矩阵和接收矩阵。利用主用户的CSI,经过计算得出使得主用户在恒定的数据速率R下获得MMSE(最小均方误差)性能时的最优传输子信道数目 $p$ ,并且 $p$ 个子信道采用相同的数据速率和调制方式,同时预编码矩阵和接收矩阵使得主用户的 $p$ 个子信道可以获得相同的误码率(BER)。而次用户可以在主用户相同的频段下进行数据传输并且不会对主用户产生任何干扰。更重要的

是,次用户之间也实现了干扰对齐。相较于传统的认知无线网络中的干扰对齐算法,本方案中的次用户可以获得更高的数据速率。

符号说明: $\mathbf{a}$ 表示矢量, $\mathbf{A}$ 表示矩阵, $E\|\mathbf{A}\|$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 的期望, $\text{tr}(\mathbf{A})$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 的迹, $\mathbf{A}^H$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 的共轭转置, $v_d(\mathbf{A})$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 第 $d$ 个最小特征值对应的特征向量。

## 1 系统模型

系统模型如图1所示。

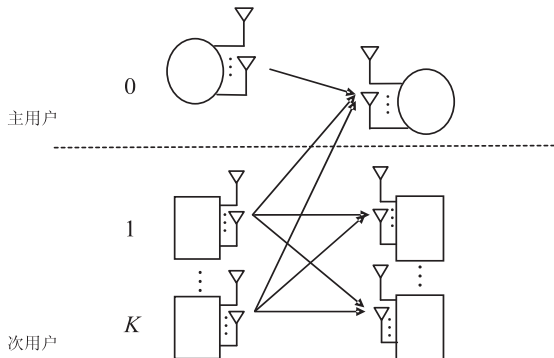


图1 MIMO 干扰信道

网络中存在 $1+K$ 对用户进行通信,所有用户的发送端和接收端均配备 $N$ 根天线。其中用户0为主用户,具有较高的优先级,用户0只需知道自身的CSI即可进行自由的数据传输而不必关心对其他用户所造成的干扰。相对于用户0,用户 $k \in (1, 2, \dots, K)$ 为次用户,如果要在与用户0相同的频段上进行数据传输,必须满足不会对用户0产生干扰的前提,可见用户 $k$ 具有较低的优先级。因此,用户 $k$ 的接入受限用户0,用户 $k$ 必须知道用户0的CSI,才能进行无干扰通信。

定义发送端 $j \in (0, 1, \dots, K)$ 与接收端 $i \in (0, 1, \dots, K)$ 的 $N \times N$ 维信道矩阵为 $\mathbf{H}_{ij}$ 。假设信道为准静态衰落信道,信道中元素均值为0,方差为1且满足独立同分布。

## 2 主用户的设计

如图1所示,主用户0之间的通信,其实是点到点的传输模型:

$$\mathbf{y}_0 = \mathbf{H}_{00}\mathbf{F}_0\mathbf{s}_0 + \mathbf{n}_0$$

其中, $\mathbf{s}_0$ 为主用户0的发送信号矢量; $\mathbf{F}_0$ 为预编码矩阵; $\mathbf{n}_0$ 为加性高斯白噪声。

在接收端利用 $\mathbf{E}_0^H$ 对 $\mathbf{s}_0$ 进行估计:

$$\hat{\mathbf{s}}_0 = \mathbf{E}_0^H \mathbf{y}_0 = \mathbf{E}_0^H \mathbf{H}_{00} \mathbf{F}_0 \mathbf{s}_0 + \mathbf{E}_0^H \mathbf{n}_0 \quad (1)$$

传统的算法中,通过将MIMO信道分解成多个独立的并行子信道,从而获得复用增益。而当主用户0

的发送端和接收端都已知  $\mathbf{H}_{00}$  时,主用户 0 通过经典的注水功率分配算法便可以获得信道容量的最优解。其原理是当主用户 0 的信道状态比较差时,主用户 0 会把功率集中分配在信道状态比较好的子信道上。因此,并不是所有的子信道都会被分配功率,主用户 0 在特定的子信道上可能并没有进行数据的传输,这个子信道对于主用户 0 是空闲的。如果次用户  $k$  把对主用户 0 的干扰全部对齐在主用户 0 的空闲子信道上,就不会对主用户 0 产生干扰。虽然主用户 0 信道状态好的子信道分配较多的功率,从而获得较高的数据速率。但是这会导致主用户 0 每个子信道获得不同的数据速率,不同的数据速率就会需要不同的调制方式,最终势必会增加接收端的设计难度。

文献[12]指出,当用户的数据速率  $R$  恒定时,存在一个最优的子信道数目  $p$ ,利用  $p$  个最优的子信道进行数据传输便可以获得 MMSE 性能,并且留下  $d(d = N - p)$  个空闲子信道。把这个思想用于文中主用户传输优化中,既可以保证主用户 0 的通信性能,又能预留给次用户  $k$  空闲子信道进行网络接入。

首先,对  $\mathbf{H}_{00}$  进行奇异值分解:

$$\mathbf{H}_{00} = (\mathbf{U}_p \ \mathbf{U}_d) \begin{pmatrix} \sum_p & 0 \\ 0 & \sum_d \end{pmatrix} (\mathbf{V}_p \ \mathbf{V}_d)^H \quad (2)$$

其中,  $\sum_p$  和  $\sum_d$  为  $\mathbf{H}_{00}$  的奇异值矩阵,其中的奇异值均为降序排列;  $\mathbf{U}_p$  和  $\mathbf{V}_p$  为  $\mathbf{H}_{00}$  最大的  $p$  个奇异值对应的酉矩阵;  $\mathbf{U}_d$  和  $\mathbf{V}_d$  为  $\mathbf{H}_{00}$  最小的  $d$  个奇异值对应的酉矩阵。根据文献[12]的算法得到  $p$  的最优解:

$$p_{\text{opt}} \approx \argmin \text{Err}_p$$

$$\text{Err}_p = E_s \cdot \left\{ \text{tr} \left( \sum_p^{-1} \right) \right\}^2 \quad (3)$$

其中,  $E_s$  为平均符号能量。

同时主用户 0 的调制方式也随之确定:

$$R = p \times \log_2(M_p) \quad (4)$$

其中,  $M_p$  为星座点的个数。

其次,在确定主用户 0 的调制方式后,根据需要设计式(1)中主用户 0 的预编码矩阵  $\mathbf{F}_0$  和接收矩阵  $\mathbf{E}_0^H$ 。文献[13]给出了一种加权 MMSE 的设计方法,在设定的加权矩阵  $\mathbf{W}$  下设计来获得最小的加权 MSE。在此,简要介绍其中的方法。为了不失一般性,最优的  $\mathbf{F}_0$  和  $\mathbf{E}_0^H$  可以表示为:

$$\mathbf{F}_0 = \mathbf{V}_p \Phi_f$$

$$\mathbf{E}_0^H = \Phi_e \mathbf{V}_p^H \mathbf{H}_{00}^H \quad (5)$$

可以根据不同业务的不同需求来设置加权矩阵  $\mathbf{W}$ 。以不同子信道获得相对信噪比为例:

$$\mathbf{W}^{1/2} = (\mathbf{I} + \gamma \mathbf{B}) \sum_p^{-1} \mu^{1/2} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{W}^{1/2}$  是  $p \times p$  维的对角阵,且其中的元素为

加权矩阵  $\mathbf{W}$  的平方根;  $\mathbf{B} = \text{diag}([b_1, b_2, \dots, b_p])$  是相对信噪比矩阵,且  $\sum_{i=1}^p b_i = 1, \gamma = \frac{P_0}{\text{tr}(\mathbf{B} \sum_p^{-2})}$ ;  $\mu$  是为

了满足发送功率限制。当主用户 0 的传输速率固定,  $p$  个子信道传输相同的业务并且有相同的传输速率和调制方式时,为了体现公平性,有必要设置  $\mathbf{B} = (1/p) \mathbf{I}$  来保证主用户的  $p$  个子信道获得相同的信噪比,进而获得相同的误码率。此时

$$\Phi_f = \gamma^{1/2} \sum_p^{-1} \quad (7)$$

$$\Phi_e = \gamma^{1/2} (\mathbf{I} + \gamma)^{-1} \sum_p^{-1}$$

到此,就完成了主用户的设计。

### 3 次用户的设计

本节中,针对次用户提出了一种新型的双层预编码干扰对齐算法,同时介绍传统干扰对齐算法并与之对比。

对于次用户  $k$  的接收端来说,来自对应用户的发送端的信号为期望信号,而来自其他用户的发送端的信号为干扰信号。由于主用户 0 的发送端与次用户  $k$  的接收端距离较远,因此,主用户 0 的发送端对次用户  $k$  的接收端造成的干扰可以忽略不计<sup>[10]</sup>,那么次用户  $k$  的接收端接收到的信号矢量  $\mathbf{y}_k$  可以表示为:

$$\mathbf{y}_k = \sum_{i=1}^K \mathbf{H}_{ki} \mathbf{F}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{n}_k = \mathbf{H}_{kk} \mathbf{F}_k \mathbf{s}_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_{ki} \mathbf{F}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{n}_k \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{s}_k$  为次用户  $k$  的发送端发送的信号矢量;  $\mathbf{n}_k$  为次用户  $k$  的接收端接收到的加性高斯白噪声矢量,服从均值为 0 和方差为  $\sigma^2 \mathbf{I}_N$  的分布。功率分配矩阵  $\mathbf{P}_k = E \|\mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H\|$ ,发送端的最大发送功率为  $P_{\max}$ ,  $\mathbf{F}_k$  为次用户  $k$  的预编码矩阵。在接收端  $k$  通过线性接收,利用接收矩阵  $\mathbf{E}_k^H$  实现对期望信号  $\mathbf{s}_k$  的估计:

$$\tilde{\mathbf{s}}_k = \mathbf{E}_k^H \mathbf{y}_k = \mathbf{E}_k^H \mathbf{H}_{kk} \mathbf{F}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{E}_k^H \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_{ki} \mathbf{F}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{E}_k^H \mathbf{n}_k \quad (9)$$

对于次用户  $k$  的预编码矩阵  $\mathbf{F}_k$ ,采取双层预编码的设计方式:

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{T}_k \quad (10)$$

其中,  $\mathbf{T}_k$  为酉矩阵。

#### 3.1 第一层预编码设计

只有当主用户有空闲子信道时,次用户才能接入网络,并且保证不能对主用户产生干扰。因此,第一层预编码矩阵  $\mathbf{C}_k$  需保证次用户  $k$  对主用户 0 的干扰全部对齐并且落在主用户 0 的  $d$  个空闲子信道上,此时  $\mathbf{C}_k$  须满足:

$$\mathbf{E}_0^H \mathbf{H}_{0k} \mathbf{C}_k = \alpha \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{I}_d \end{pmatrix} \quad (11)$$

这样主用户0接收到的期望信号和来自次用户 $k$ 的干扰信号在空间上相互正交,次用户 $k$ 就不会对主用户0产生干扰。此时:

$$\mathbf{C}_k = \alpha \mathbf{H}_{0k}^{-1} \mathbf{E}_0 \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{I}_d \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \text{tr}(\mathbf{F}_k \mathbf{F}_k^H) = P_{\max}$$

其中,  $\mathbf{I}_d$  为  $d \times d$  维的单位阵;  $\alpha$  是为了满足发送功率限制。

### 3.2 第二层预编码设计

虽然第一层预编码  $\mathbf{C}_k$  保证了次用户不会对主用户产生干扰,但是次用户之间的干扰却依旧存在。因此,有必要设计第二层预编码  $\mathbf{T}_k$  使得次用户之间的干扰相互对齐,从而获得更高的数据速率。干扰对齐是收发端联合的线性设计,只有下列方程满足时才能实现干扰对齐:

$$\mathbf{E}_k^H \mathbf{H}_{kl} \mathbf{F}_l = 0, \forall l \neq k \quad (13)$$

$$\text{rank}(\mathbf{E}_k^H \mathbf{H}_{kk} \mathbf{F}_k) = d_k, \forall k = \{1, 2, \dots, K\} \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{E}_k^H$  为酉矩阵;  $d_k$  表示次用户  $k$  发送的独立数据流(自由度)。

式(13)保证了次用户  $k$  接收到的干扰信号全部落在  $\mathbf{E}_k$  的零空间;式(14)保证了次用户  $k$  接收到的干扰信号和期望信号相互独立。文献[14]对 MIMO 网络中干扰对齐的可行性进行了分析,指出只有当用户的天线数  $N$ , 次用户的数量  $K$  和次用户传输的数据流  $d_k$  满足特定的关系时,干扰对齐方案才是可行的。文中干扰对齐的实现需满足下面的关系式:

$$\sum_{k=1}^K d_k (2d - 2d_k) \geq \sum_{k \neq j}^K d_k d_j \quad (15)$$

当  $d_1 = d_2 = \dots = d_k$  时,式(15)可以改写为:

$$2d - (K + 1) d_k \geq 0 \quad (16)$$

进一步,当  $d_1 = d_2 = \dots = d_k = 1$  时,可以使得最多的次用户接入网络,并且能够实现干扰对齐。此时:

$$K \leq 2d - 1 \quad (17)$$

(1)  $K \leq 2d - 1$  时。

当式(17)成立时,文献[4]给出了一种迭代的算法求解  $\mathbf{T}_k$  和  $\mathbf{E}_k$  实现干扰对齐,利用信道的互易性在收发端相互迭代以达到最小干扰泄露的目的。

$$\mathbf{T}_k = v_s \left( \sum_{l \neq k} \frac{P_{\max}}{d_k} \bar{\mathbf{H}}_{lk}^H \mathbf{E}_l^H \mathbf{E}_l \bar{\mathbf{H}}_{lk} \right), s = 1, 2, \dots, d_k \quad (18)$$

$$\mathbf{E}_k = v_s \left( \sum_{l \neq k} \frac{P_{\max}}{d_k} \bar{\mathbf{H}}_{kl} \mathbf{T}_l^H \bar{\mathbf{H}}_{kl}^H \right), s = 1, 2, \dots, d_k$$

其中,  $\bar{\mathbf{H}}_{kl} = \mathbf{H}_{kl} \mathbf{C}_l$ 。

(2)  $K > 2d - 1$  时。

当存在过多的次用户时,即式(17)不成立时,全部次用户的干扰对齐是不能实现的。因此,为了实现全部次用户的干扰对齐,使次用户获得更好的性能,一种简单的方法就是限制次用户的接入数目。因为次用户的接入本来就是受限于主用户的,并且优先级较低,主用户有空闲子信道时,次用户才能接入,所以,完全可以限制次用户的接入数目以达到干扰对齐的目的。因此,当次用户的数目过多以至于不能实现干扰对齐时,可以将一些次用户剔除出网络直至式(17)成立,以保证其余次用户的干扰对齐。

在此,计算每对次用户  $k$  在干扰对齐时所能获得的数据速率  $R_k$ :

$$R_k = \log_2 |\mathbf{H}_{kk} \mathbf{C}_k \mathbf{C}_k^H \mathbf{H}_{kk}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_N| \quad (19)$$

然后对其进行排序,逐个剔除数据速率最小的次用户直至式(17)成立。

例如,在某一时刻,当主用户和次用户的收发端均配备6根天线并且主用户0的传输速率固定为  $R = 24$  bits/(s · Hz) 时,根据式(3)计算得出  $p = 4$  时,即选择  $p = 4$  个子信道进行数据传输,主用户0可以获得 MMSE 性能,同时留下  $d = 2$  个空闲子信道。当存在  $K = 4$  对次用户时,根据式(16)计算得出如果每对次用户传输  $d_k = 1$  个数据流,必须  $K \leq 3$ 。

因此,需要根据式(19)来计算每对次用户在干扰对齐的情况下的数据速率,从而确定将数据速率最小的一对次用户剔除,则其余的次用户利用文献[4]中算法实现干扰对齐。

### 3.3 传统算法

在传统的方案中<sup>[7,9]</sup>,次用户  $k$  的接收信号  $\mathbf{y}_k$  在接收端经过矩阵  $\mathbf{G}_k$  对干扰进行白化:

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{G}_k \mathbf{y}_k = \mathbf{G}_k \mathbf{H}_{kk} \mathbf{F}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{G}_k \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_{ki} \mathbf{F}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{G}_k \mathbf{n}_k = \mathbf{G}_k \mathbf{H}_{kk} \mathbf{F}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{n}_k' \quad (20)$$

其中,  $\mathbf{G}_k$  为白化矩阵  $\mathbf{G}_k = \mathbf{Q}_k^{-\frac{1}{2}}$ ,  $\mathbf{Q}_k$  为次用户  $k$  的干扰协方差矩阵,可以写为:

$$\mathbf{Q}_k = \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_{ki} \mathbf{F}_i \mathbf{F}_i^H \mathbf{H}_{ki}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_N \quad (21)$$

这样,次用户  $k$  接收到的干扰就被白化成了高斯噪声。但是,需要指出的是,当干扰很小时,把干扰当作噪声是可行的。而在上述模型中,干扰是非常强烈的,不能简单地把干扰当作噪声然后忽略它。

## 4 仿真结果及分析

本节对提出算法的性能进行了仿真分析。仿真假设如下:4对用户 MIMO 网络,其中1对主用户,3对次



用户,所有用户的收发端均配备 6 根天线。信道为准静态衰落信道,信道元素是由满足独立同分布且均值为 0、方差为 1 的随机变量组成的。仿真结果数据由多次独立实验得到。

图 2 给出了主用户在不同数据速率下,最优  $p$  的取值情况。

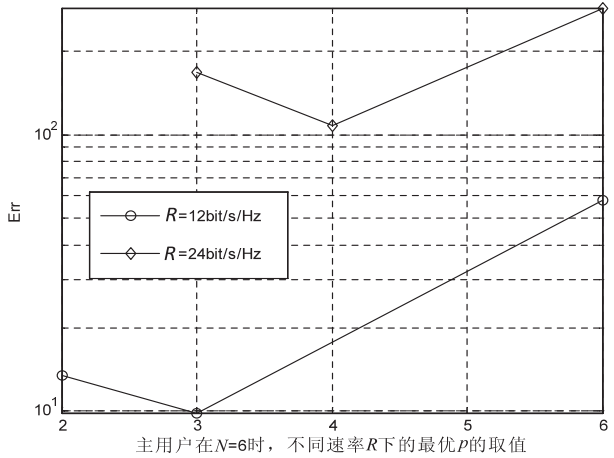


图 2 不同速率  $R$  下最优  $p$  的取值情况 ( $N=6$ )

可以看出,在  $R=24$  bits/s/Hz 的数据速率下,选择  $p=6$ ,16QAM 调制虽然可以获得最高的复用增益,但是选择  $p=4$  个最优的子信道进行数据传输,采用 64QAM 调制,主用户可以获得最优的 MMSE 性能,同时留下  $d=2$  个空闲子信道,这样就为次用户的接入留下了可能。

同理当  $R=12$  bits/s/Hz 时,主用户选择  $p=3$ ,16QAM 调制是 MMSE 性能最优的。

图 3 对比了 MIMO 网络中采用提出的双层预编码干扰对齐算法和传统的算法时,次用户的数据速率情况。

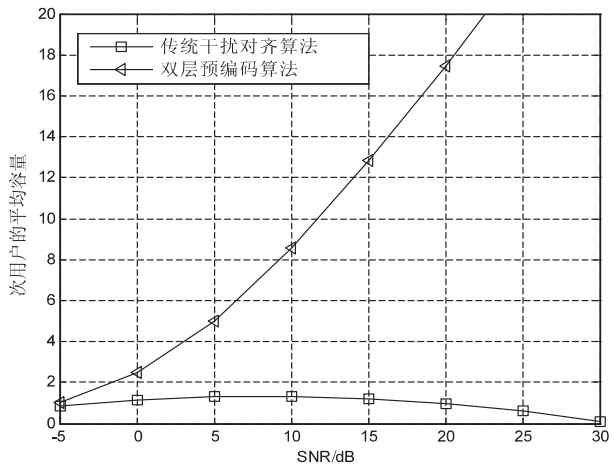


图 3 不同算法下次用户的容量对比

在传统的认知网络干扰对齐算法中,主用户采用注水功率分配算法。也就是说,在低信噪比的情况下,主用户会把发送功率集中在信道增益较高的子信道中,舍弃一些信道增益较差的子信道,这就为次用户的

接入留下了可能。但是,在高信噪比的情况下,主用户所有的子信道都会分配功率,并且最终趋于平均功率分配,从而不会留下空闲子信道,进而限制了次用户的接入。因此,在高信噪比的情况下,次用户的数据速率是下降的。而在文中提出的算法中,得益于次用户的干扰对齐,每个次用户均可以获得  $d_k=1$  个自由度,最重要的是次用户的数据速率是随着信噪比的提高而提高的。

5 结束语

文中研究了在 MIMO 干扰信道中,一种新型的双层预编码干扰对齐算法的应用。结合认知无线电思想,使得主用户在获得 MMSE 性能的同时,接入  $K$  对次用户。第一层预编码保证了次用户不对主用户产生干扰,提高了系统的频谱利用率。第二层预编码使得次用户之间干扰对齐,提高了次用户的数据速率。作为对该文的延伸,后续工作可以研究在  $K$  对主用户和  $K$  对次用户的认知无线网络中实现干扰对齐。

参考文献:

[1] Cadambe V R, Jafar S A. Interference alignment and degrees of freedom for the K-user interference channel [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2008, 54(8): 3425-3441.

[2] Jafar S A, Shamai S. Degrees of freedom region of the MIMO X channel [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2008, 54(1): 151-170.

[3] Maddah-Ali M, Motahari A S, Khandani A K. Communication over MIMO X channels: interference alignment, decomposition, and performance analysis [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2008, 54(8): 3457-3470.

[4] Gomadam K S, Cadambe V R, Jafar S A. Approaching the capacity of wireless networks through distributed interference alignment [C]//Proc of IEEE GLOBECOM. New Orleans, America: IEEE, 2008: 1-6.

[5] Jafar S A. Exploiting channel correlations-simple interference alignment schemes with no CSIT [C]//Proc of IEEE GLOBECOM. Miami, America: IEEE, 2010: 1-5.

[6] Jafar S A. Interference alignment - a new look at signal dimensions in a communication network [M]. [s. l.]: Now Publishers Inc, 2011.

[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 Trans on Sig Pro, 2010, 58(7): 3728-3741.

[8] Tsinos C G, Berberidis K. Blind opportunistic interference alignment in cognitive radio systems [C]//Proc of IEEE ICC. Budapest, Hungary: IEEE, 2013: 4880-4884.

[9] Abdelhamid B, Elsabrouty M, Elramly S. Novel interference

的问题,文中提出了一种基于 OGC 标准的语义标注方法,对 OWS 能力描述文件进行半自动化的标注,对现有基于关键字的 OWS 检索进行改进,解决了语义标注在检索中文时无法获取相应英文服务的问题,即多语言社区问题;解决了基于关键字匹配检索带来的回调率不高的问题,即多词同义的问题。

文中设计开发的语义标注工具可作为现有目录注册中心的中间件,其作用是标注现有的 OWS 能力描述文件,使其具备语义匹配和发现的能力,提高服务发现的准确率,有效解决 OGC 地理信息服务淹没的问题和语义异构的问题,可作为地理信息服务语义检索的一种有益参考。

### 参考文献:

- [1] Gurrin C, He Yulan, Kazai G, et al. Recent developments in information retrieval [C]//Proceeding of 32nd European conference on IR research. [s.l.]:[s.n.], 2010.
- [2] 梁汝鹏,李宏伟,李文娟,等. 空间语义学与地理信息语义服务研究进展[J]. 测绘科学, 2013, 38(6): 19-22.
- [3] Zhao Peisheng, Di Liping, Yu Genong, et al. Semantic Web-based geospatial knowledge transformation[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(4): 798-808.
- [4] Zhang Chuanrong, Zhao Tian, Li Weidong, et al. Towards logic-based geospatial feature discovery and integration using web feature service and geospatial semantic web[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(6): 903-923.
- [5] 梁汝鹏. 基于语义标注的地理信息服务关键技术研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2013.
- [6] 柳佳佳,葛文. 基于本体语义的地理信息服务发现[J]. 测绘工程, 2013, 22(6): 9-13.
- [7] Maue P, Schade S, Duchesne P. Semantic annotations in OGC standards[S/OL]. 2012. [http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact\\_id=34916](http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=34916).
- [8] 陈建军,周成虎,王敬贵. 地理本体的研究进展与分析[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 81-90.
- [9] Masolo C. Wonder Web project: D18 ontology library [EB/OL]. 2003-01-12. <http://wonderweb.man.ac.uk/>.
- [10] 梁汝鹏,李宏伟,李文娟,等. 基于知识标注的地理信息语义服务框架研究[J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 1-6.
- [11] Stanford Center for Biomedical Informatics Research. Protégé [CP/OL]. 2011. <http://protege.stanford.edu/>.
- [12] 胡鹤,刘大有,王生生. Web 本体语言 OWL[J]. 计算机工程, 2004, 30(12): 1-2.
- [13] WMS schema capabilities [EB/OL]. 2014. [http://schemas.opengis.net/wms/1.3.0/capabilities\\_1\\_3\\_0.xsd](http://schemas.opengis.net/wms/1.3.0/capabilities_1_3_0.xsd).
- [14] 苗夺谦,李道国. 粗糙集理论、算法与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- [15] Stoilos G, Stamou G, Pan J Z. Fuzzy extensions of OWL: logical properties and reduction to fuzzy description logics[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2010, 51(6): 656-679.
- [16] 纪滨. 粗糙集理论及进展的研究[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(3): 69-72.
- [17] DWiKi: earth science dictionary [DB/OL]. 2014. <http://www.geology.com.cn/wiki/>.
- [18] Mineral resources spatial data: OGC WMS services [EB/OL]. 2013. <http://mrdata.usgs.gov/wms.html>.
- [19] Apache: Jena ontology api [CP/OL]. 2014. <http://jena.apache.org/documentation/ontology>.
- [20] 谢谏. 基于 Lucene 的 XML 索引与检索[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [21] 何来坤,缪健美,刘礼芳,等. 基于 Ontology 与 Jena 的研究综述[J]. 杭州师范大学学报:自然科学版, 2013, 12(5): 467-473.
- [22] 郑榕增,林世平. 基于 Lucene 的中文倒排索引技术的研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(3): 80-83.
- [23] Su Xiaolu, Meng Xianxue, Hu Haiyan. Research on development and application of OWL ontology search middleware[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3-4): 614-618.

(上接第 107 页)

- alignment in multi-secondary users cognitive radio system [C]//Proc of IEEE ISCC. Cappadocia, Turkey: IEEE, 2012: 785-789.
- [10] Du H, Ratnarajah T. Robust joint signal and interference alignment for MIMO cognitive radio network [C]//Proc of IEEE WCNC. Paris, France: IEEE, 2012: 448-452.
- [11] Mitola J, Maguire G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Pers Comm, 1999, 6(4): 13-18.
- [12] Khaled N, Thoen S, Deneire L. Optimizing the joint transmit

- and receive MMSE design using mode selection [J]. IEEE Trans on Comm, 2005, 53(4): 730-737.
- [13] Sampath H, Stoica P, Paulraj A. Generalized linear precoder and decoder design for MIMO channels using the weighted MMSE criterion [J]. IEEE Trans on Comm, 2001, 49(12): 2198-2206.
- [14] Yetis C M, Gou T, Jafar S A, et al. On feasibility of interference alignment in MIMO interference networks [J]. IEEE Trans on Signal Pro, 2010, 58(9): 4771-4782.

# 一种认知无线电中新型干扰对齐算法


作者:

[王小冲](#), [刘陈](#), [傅友华](#), [WANG Xiao-chong](#), [LIU Chen](#), [FU You-hua](#)

作者单位:

[王小冲, 刘陈, WANG Xiao-chong, LIU Chen\(南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003\)](#), [傅友华, FU You-hua\(南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003; 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096\)](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#)

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

2015(8)

引用本文格式: [王小冲](#). [刘陈](#). [傅友华](#). [WANG Xiao-chong](#). [LIU Chen](#). [FU You-hua](#) 一种认知无线电中新型干扰对齐算法[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2015(8)