

MIMO 认知无线电分布式波形自适应算法

魏 飞* 杨 震

(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室 南京 210003)

摘 要: 该文研究在主用户干扰温度约束下多个竞争的 MIMO 认知无线电最大化自身信息速率的波形自适应问题。该文使用非协作博弈论将其表述为 Nash 均衡问题, 给出了 Nash 均衡解存在唯一的条件, 并提出了一种求解 Nash 均衡的带惩罚价格的分布式迭代注水算法, 通过对干扰进行价格惩罚使得 MIMO 认知无线电在达到 Nash 均衡时满足干扰温度约束。仿真结果表明相对于不考虑干扰温度约束的经典迭代注水算法, 该文算法能够满足干扰温度约束, 适用于认知无线网络。

关键词: 认知无线电; 多入多出; 波形自适应; Nash 均衡; 迭代注水算法

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1356-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01074

Decentralized Waveform Adaptation Algorithm for MIMO Cognitive Radio

Wei Fei Yang Zhen

(Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education,
Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper addresses the waveform adaptation issue of multiple competitive Multiple-In Multiple-Out Cognitive Radios (MIMO-CR) respectively maximizing their information rates under the interference-temperature constraint of primary users. This issue is formulated as a Nash equilibrium issue from a non-cooperative game theoretic viewpoint, conditions for the existence and uniqueness of the Nash equilibrium are provided and a decentralized Iterative Water-Filling Algorithm (IWFA) with a punishing price is proposed to solve the above Nash equilibrium issue, the punishing price is imposed on the interference generated by MIMO-CRs in order to make the interference-temperature constraint satisfied while MIMO-CRs achieve the Nash equilibrium. Simulation results show, when compared to the classical IWFA which does not consider the interference-temperature constraint, the proposed algorithm satisfies the interference-temperature constraint and hence is applicable to cognitive radio networks

Key words: Cognitive Radio (CR); Multiple-In Multiple-Out (MIMO); Waveform adaptation; Nash equilibrium; Iterative Water-Filling Algorithm (IWFA)

1 引言

认知无线电^[1]技术通过认知无线电(Cognitive Radio, CR)用户或次用户(Secondary User, SU)与主用户(Primary User, PU)共享频谱资源的方式来最大化频谱利用率¹⁾, 作为一种解决频谱资源短缺困境的有效技术手段正受到广泛的研究。在认知无线场景中, CR 用户通常可采用干扰温度约束的方式, 即使得所有 CR 用户对 PU 接收端的叠加干扰限制在 PU 的干扰门限内, 在保证 PU 正常通信的

前提下与 PU 共享频谱。

本文考虑的 CR 用户装备有多根天线, 使用多入多出(Multiple-In Multiple-Out, MIMO)技术, 简称为 MIMO-CR。文献[2,3]研究了单个 MIMO-CR 在给定 PU 干扰门限下如何设计发送协方差矩阵以获取最大信息速率。对 PU 采用多天线的情况, 文献[4-6]提出 MIMO-CR 使用干扰放置或认知波束形成的方法与 PU 共享频谱。上述研究从单个 MIMO-CR 用户的角度研究了如何与 PU 共享频谱资源的问题。

与上述研究不同的是, 本文关注的是多个 MIMO-CR 与 PU 共享频谱的问题。对于这样的 CR 系统, 通常可用全局优化最大化系统效用, 但这会遇到以下两个难题: 一是需要中心节点采集所有 MIMO-CR 用户的信道状态信息以及互信道状态信息同时还需包括 MIMO-CR 与 PU 之间的信道状态

2010-10-09 收到, 2011-03-04 改回

国家 863 计划项目(2009AA012241)和国家自然科学基金(61001077)资助课题

*通信作者: 魏飞 feiwei.nupt@gmail.com

¹⁾目前已开放的 PU 频段主要是 TV 频段, 但随着频谱需求的增加, 可以预期的是更多的 PU 频段会被开放。

信息, 实现时需巨大的信令开销; 二是由于系统效用函数的非凸性^[7], 即使可以获取所需的信道状态信息, 通常无法设计出用于求解的通用算法。

为解决上述难题, 本文通过每个 SU 分别选择发送波形, 优化各自的效用来代替对整体效用的优化, 其结果即 Nash 均衡(Nash Equilibrium, NE)^[8]。在普通无线通信场景中, 多个 MIMO 用户可使用经典的 MIMO 迭代注水算法(Iterative Water-Filling Algorithm, IWFA)分布式实现各自效用的最大化, 达到 Nash 均衡^[7,9,10]。但经典 MIMO IWFA 无法控制所有发送节点对 PU 的叠加干扰大小, 不能确保满足 PU 干扰温度约束, 因而不适用于 CR 系统。本文的工作正是针对经典 MIMO IWFA 在 CR 场景中的不足展开的, 其主要内容与创新点可概括如下: 使用了博弈论来建模多个 MIMO-CR 在发送功率以及 PU 干扰温度约束下通过波形自适应最大化信息速率, 将其表示为 NE 问题; 通过将 NE 问题转换为等价的变分不等式(Variational Inequality, VI)问题^[11]; 提出了一种分布式迭代注水算法: MIMO-CR IWFA, 用以解决上述 NE 问题; 通过价格机制的运用, 使得 MIMO-CR 在满足 PU 的干扰温度约束时最大化各自信息速率, 达到 NE; 同时给出了 MIMO-CR IWFA 算法收敛到唯一 NE 的条件。

最后使用 MATLAB 仿真验证 MIMO-CR IWFA 的收敛性并比较了 MIMO-CR IWFA 与不考虑干扰温度约束的经典 MIMO IWFA 的性能, 仿真结果表明: MIMO-CR IWFA 能够很好地满足干扰温度约束且具有快速收敛性; 虽然受到 PU 的干扰温度约束限制, 随着 MIMO-CR 链路之间的同信道干扰的增大, MIMO-CR IWFA 的性能能够逐渐接近不考虑干扰温度约束的经典 MIMO IWFA。

2 系统模型与问题表述

2.1 系统模型

本文考虑的认知无线电场景包含有共享频谱资源的 N 条 MIMO-CR 链路和 M 条 PU 链路, 如图 1 所示。其中 PU 使用单天线, 任一 MIMO-CR 链路 l 含有 n_l 根发射天线与接收天线, 则 MIMO-CR 链路 l 接收端接收到的信号向量可表示为

$$\mathbf{y}_l = \mathbf{H}_l \mathbf{x}_l + \sum_{k=1, k \neq l}^N \mathbf{H}_{lk} \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_l \quad (1)$$

其中 $\mathbf{x}_l \in \mathcal{C}^{n_l \times 1}$ 表示 MIMO-CR l 发送的信号向量; $\mathbf{H}_{lk} \in \mathcal{C}^{n_l \times n_k}$ 表示 MIMO-CR k 的发送端到 MIMO-CR l 的接收端之间的复高斯信道矩阵, 且假定其为慢衰落的; $\mathbf{n}_l \in \mathcal{C}^{n_l \times 1}$ 是 0 均值、方差 \mathbf{R}_{n_l} (非奇异) 循环对称复高斯的噪声向量, 包含 MIMO-CR l 接收机的热噪声以及 PU 对其产生的干扰。

在每个 MIMO-CR 接收端, 其他 MIMO-CR 的

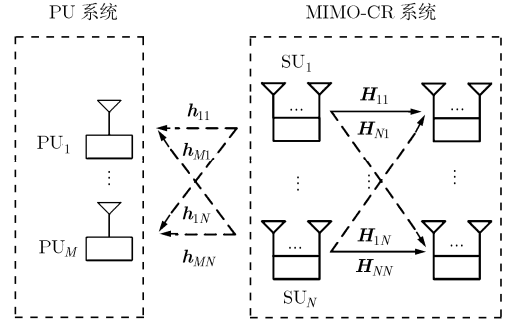


图 1 MIMO-CR 系统与 PU 系统共享频谱场景框图

干扰被看作有色噪声。假定任一 MIMO-CR 链路 l 的收发两端都可获知自己的信道状态信息 \mathbf{H}_l 且信道矩阵 \mathbf{H}_l 是非奇异的, MIMO-CR l 的接收端可以准确测量到的其他 MIMO-CR 对自己的干扰以及接收机热噪声之和的协方差 $\mathbf{R}_{-l}(\mathbf{Q}_{-l})$ 为

$$\mathbf{R}_{-l}(\mathbf{Q}_{-l}) \triangleq \mathbf{R}_{n_l} + \sum_{k=1, k \neq l}^N \mathbf{H}_{lk} \mathbf{Q}_k \mathbf{H}_{lk}^H \quad (2)$$

其中 $\mathbf{Q}_l \triangleq E\{\mathbf{x}_l \mathbf{x}_l^H\}$ 表示发送信号向量 \mathbf{x}_l 的协方差矩阵, 简称为发送协方差矩阵。 $\mathbf{Q}_{-l} \triangleq (\mathbf{Q}_k)_{k=1, k \neq l}^N$ 表示除 l 外的所有其他 MIMO-CR 的发送协方差矩阵。

基于上述假设, 给定所有 MIMO-CR 的发送协方差矩阵 \mathbf{Q}_l , $l = 1, 2, \dots, N$, 则 MIMO-CR l 的信息速率可表示为

$$R_l(\mathbf{Q}_l, \mathbf{Q}_{-l}) = \lg \det(\mathbf{I} + \mathbf{H}_l^H \mathbf{R}_{-l}^{-1}(\mathbf{Q}_{-l}) \mathbf{H}_l \mathbf{Q}_l) \quad (3)$$

2.2 问题表述

2.2.1 发送功率约束 每个 MIMO-CR 发送信号时受到自身发送功率约束, 第 l 个 MIMO-CR 发送信号向量的协方差矩阵 \mathbf{Q}_l 构成的集合 \mathcal{Q}_l 可表示为

$$\mathcal{Q}_l \triangleq \{\mathbf{Q}_l \in \mathcal{C}^{n_l \times n_l} : \mathbf{Q}_l \succeq 0, \text{Tr}\{\mathbf{Q}_l\} \leq P_s^{\max}\} \quad (4)$$

其中 P_s^{\max} 表示 MIMO-CR 的最大发送功率, \succeq 表示半正定, $\text{Tr}\{\cdot\}$ 表示矩阵的主对角元素之和。

2.2.2 干扰温度约束 CR 用户在调整发送信号参数时还需考虑干扰温度约束, 即所有 MIMO-CR 的发送信号对 PU 接收端产生的叠加干扰功率不得超过给定的门限。对于本文的 MIMO-CR 系统, PU 干扰温度约束可表示为

$$\sum_{l=1}^N \mathbf{h}_{ql}^H \mathbf{Q}_l \mathbf{h}_{ql} \leq P_{it}, \quad \forall q = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

其中 $\mathbf{h}_{ql} \in \mathcal{C}^{n_l \times 1}$ 为 MIMO-CR l 发送端到 PU q 接收端的信道向量, P_{it} 为 PU 的干扰门限值, 不失一般性, 本文假设所有 PU 的干扰门限值相等。

2.2.3 Nash 均衡问题表述 本文研究的 MIMO-CR 波形自适应问题是 MIMO-CR 如何在满足式(4)和式(5)的条件下独立优化发送协方差矩阵, 最大化各自信息速率。为满足 PU 的干扰温度约束, 本文引

入惩罚价格对 MIMO-CR 的效用函数加以惩罚, 从而本文的波形自适应问题可表述为如下 NE 问题

$$\left. \begin{aligned} \max_{\mathbf{Q}_l} U_l(\mathbf{Q}_l, \mathbf{Q}_{-l}) \\ \text{s.t. } \mathbf{Q}_l \in \mathcal{Q}, \forall l = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 $U_l(\mathbf{Q}_l, \mathbf{Q}_{-l}) \triangleq R_l(\mathbf{Q}_l, \mathbf{Q}_{-l}) - \sum_{q=1}^M c_q \mathbf{h}_{ql}^H \mathbf{Q}_l \mathbf{h}_{ql}$ 为 MIMO-CR l 的效用, $c_q \geq 0$ 表示 PU q 对 MIMO-CR 对其产生的单位干扰所施加的惩罚价格。引入惩罚价格 $\mathbf{c} = (c_q)_{q=1}^M$ 的目的是使所有 MIMO-CR 产生的叠加干扰满足干扰温度约束式(5), 即使得下面的互补条件成立

$$0 \leq c_q \perp \left[P_{it} - \sum_{l=1}^N \mathbf{h}_{ql}^H \mathbf{Q}_l \mathbf{h}_{ql} \right] \geq 0, \forall q = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

其中 $0 \leq a \perp b \geq 0$ 表示 $a \geq 0, b \geq 0$, 且 $a \cdot b = 0$ 。

NE 问题式(6)的解被称为 Nash 均衡, 本文的余下问题为如何分布式求解合适的价格使得在此价格惩罚下的 Nash 均衡满足 PU 干扰温度约束。为叙述方便, 在后文中用符号 $\mathcal{NE}(\mathbf{c})$ 表示式(6)中带有惩罚价格 \mathbf{c} 的 NE 问题, \mathcal{NE} 表示在式(7)中互补条件约束下的 $\mathcal{NE}(\mathbf{c})$ 。

3 变分不等式与 Nash 均衡

本节通过将 NE 问题转换为等价的 VI 问题, 给出了 Nash 均衡存在与唯一的充分条件。

3.1 变分不等式

为将 \mathcal{NE} 转换为相应的 VI 问题, 首先定义集合 $\hat{\mathcal{Q}}$ 为

$$\hat{\mathcal{Q}} \triangleq \mathcal{Q} \cap \left\{ \mathbf{Q} : \sum_{l=1}^N \mathbf{h}_{ql}^H \mathbf{Q}_l \mathbf{h}_{ql} \leq P_{it}, \forall q = 1, 2, \dots, M \right\} \quad (8)$$

其中 $\mathcal{Q} \triangleq \prod_{l=1}^N \mathcal{Q}_l$ 表示 $\mathcal{Q}_l, l = 1, 2, \dots, N$ 的笛卡尔乘积; 以及定义 $\hat{\mathcal{Q}}$ 上的映射 $\mathbf{F} \triangleq (\mathbf{F}_1(\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_{-1})^T, \mathbf{F}_2(\mathbf{Q}_2, \mathbf{Q}_{-2})^T, \dots, \mathbf{F}_N(\mathbf{Q}_N, \mathbf{Q}_{-N})^T)^T$, 其中 $\mathbf{F}_l(\mathbf{Q}_l, \mathbf{Q}_{-l})$ 表示 $R_l(\mathbf{Q}_l, \mathbf{Q}_{-l})$ 关于 \mathbf{Q}_l 的负梯度且有

$$\mathbf{F}_l(\mathbf{Q}_l, \mathbf{Q}_{-l}) \triangleq -2\mathbf{H}_l^H (\mathbf{R}_{-l}(\mathbf{Q}_{-l}) + \mathbf{H}_l \mathbf{Q}_l \mathbf{H}_l^H)^{-1} \mathbf{H}_l \quad (9)$$

(\cdot)^T, (\cdot)^H 分别表示转置以及共轭转置。

基于上述的集合 $\hat{\mathcal{Q}}$ 与映射 \mathbf{F} , VI 问题^[11] $\mathcal{VI}(\hat{\mathcal{Q}}, \mathbf{F})$ 可表述为求解 $\mathbf{Q}^* \in \hat{\mathcal{Q}}$, 使得

$$\langle (\mathbf{Q} - \mathbf{Q}^*), \mathbf{F}(\mathbf{Q}^*) \rangle \geq 0, \forall \mathbf{Q} \in \hat{\mathcal{Q}} \quad (10)$$

其中 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积, 对复矩阵 \mathbf{A}, \mathbf{B} 有 $\langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle = \text{Tr}\{\mathbf{A}^H \mathbf{B}\}$ 。

命题 1 \mathcal{NE} 等价于 $\mathcal{VI}(\hat{\mathcal{Q}}, \mathbf{F})$ 。

证明 $\mathcal{VI}(\hat{\mathcal{Q}}, \mathbf{F})$ 的等价 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)系统可表示为

$$\left(\mathbf{H}_l^{-1} \mathbf{R}_{-l}(\mathbf{Q}_{-l}) \mathbf{H}_l^{-H} + \mathbf{Q}_l \right)^{-1} - \sum_{q=1}^M \eta_q \mathbf{h}_{ql}^H \mathbf{h}_{ql} - \mu_l \mathbf{I} = \mathbf{0}, \forall l = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$0 \leq \mu_l \perp (P_s^{\max} - \text{Tr}\{\mathbf{Q}_l\}) \geq 0, \forall l = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

$$0 \leq \eta_q \perp \left(P_{it} - \sum_{l=1}^N \mathbf{h}_{ql}^H \mathbf{Q}_l \mathbf{h}_{ql} \right) \geq 0, \forall q = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

其中 $\eta_q, \mu_l, l = 1, 2, \dots, N$ 分别对应相应约束的 Lagrange 乘数。显然上述 $\mathcal{VI}(\hat{\mathcal{Q}}, \mathbf{F})$ 的 KKT 系统中的式(11), 式(12)等于 $\mathcal{NE}(\mathbf{c})$ 的 KKT 系统, 而式(13)等于互补条件式(7)(令 $\eta_q = c_q$), 因此 \mathcal{NE} 等价于 $\mathcal{VI}(\hat{\mathcal{Q}}, \mathbf{F})$ 。证毕

3.2 Nash 均衡的存在性与唯一性

定理 1 对任意给定的 PU 干扰门限, \mathcal{NE} 的 Nash 均衡存在。

证明 对任意给定的 PU 干扰门限, 集合 $\hat{\mathcal{Q}}$ 都是紧闭凸集, 且函数 \mathbf{F} 是连续的, 所以变分不等式 $\mathcal{VI}(\hat{\mathcal{Q}}, \mathbf{F})$ 的解存在^[11], 再由命题 1 易知 Nash 均衡存在。

由于 VI 解的唯一性由其强单调性决定^[11], 通过 $\mathcal{VI}(\hat{\mathcal{Q}}, \mathbf{F})$ 的强单调性容易推导出其存在唯一解, 即 \mathcal{NE} 存在唯一 Nash 均衡的充分条件如下:

定理 2 定义

$$\begin{aligned} z_l^{\min} &\triangleq \lambda_{\min} \left(\mathbf{H}_l^H (\mathbf{R}_{n_l} + P_s^{\max} \sum_{k=1}^N \mathbf{H}_{lk} \mathbf{H}_{lk}^H)^{-1} \mathbf{H}_l \right), \\ z_l^{\max} &\triangleq \lambda_{\max} (\mathbf{H}_l^H \mathbf{R}_{n_l}^{-1} \mathbf{H}_l), \text{ 矩阵 } \mathbf{Y} \text{ 如下:} \\ [\mathbf{Y}]_{lk} &\triangleq \begin{cases} (z_l^{\min})^2, & k = l \\ -(z_l^{\max})^2 \lambda_{\max} (\mathbf{H}_{lk}^H \mathbf{H}_l^{-H} \mathbf{H}_l^{-1} \mathbf{H}_{lk}), & k \neq l \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

如满足 $\mathbf{Y} + \mathbf{Y}^T \succ \mathbf{0}$, 则 \mathcal{NE} 存在唯一的 Nash 均衡。其中 $\lambda_{\min}(\cdot), \lambda_{\max}(\cdot)$ 分别表示最小、最大特征值, $[\mathbf{Y}]_{lk}$ 表示矩阵 \mathbf{Y} 的第 l 行 k 列的元素, \succ 表示正定。

4 分布式 MIMO-CR IWFA

本节首先研究在给定任意惩罚价格 $\mathbf{c} \in \mathbb{R}_+^M$ 时如何求解 $\mathcal{NE}(\mathbf{c})$, 在此基础上进一步研究求解 \mathcal{NE} 的算法。

4.1 固定惩罚价格下的 IWFA

对于任意给定的 $\mathbf{c} \in \mathbb{R}_+^M$, 由 KKT 条件易知 $\mathcal{NE}(\mathbf{c})$ 中的任意 MIMO-CR l 在给定其他用户的 \mathbf{Q}_{-l} 的条件下, 可通过下面的 MIMO 注水映射 $\mathcal{WF}_l(\mathbf{Q}_{-l}; \mathbf{c}) : \mathcal{Q}_{-l} \ni \mathbf{Q}_{-l} \rightarrow \mathbf{Q}_l \in \mathcal{Q}_l$ 来计算最优 \mathbf{Q}_l 。

$$\mathbf{Q}_l = \mathcal{WF}_l(\mathbf{Q}_{-l}; \mathbf{c}) = \mathbf{W}_l \left[\frac{1}{\mu_l + \sum_{q=1}^M c_q \|\mathbf{h}_{ql}\|^2} \mathbf{I} - \mathbf{D}_l^{-1} \right]^+ \mathbf{W}_l^H \quad (15)$$

其中 $\mathbf{W}_l \mathbf{D}_l \mathbf{W}_l^H = \mathbf{H}_l^H \mathbf{R}_{-l}^{-1}(\mathbf{Q}_{-l}) \mathbf{H}_l$ 表示 MIMO-CR l 在获取 \mathbf{H}_l 与 $\mathbf{R}_{-l}(\mathbf{Q}_{-l})$ 的值之后, 所进行的特征值分解, 其中 \mathbf{D}_l 为特征值组成的对角矩阵, $\mathbf{W}_l \in$

$\mathcal{C}^{n_l \times n_l}$ 为相应的特征向量矩阵。其中 $[x]^+ \triangleq \max(0, x)$, μ_l 的取值需满足

$$\text{Tr} \left\{ \left[\mathbf{I} / \left(\mu_l + \sum_{q=1}^M c_q \| \mathbf{h}_{ql} \|^2 \right) - \mathbf{D}_l^{-1} \right]^+ \right\} = P_s^{\max}$$

由于 $\mathcal{NE}(\mathbf{c})$ 的 Nash 均衡可视为式(15)中注水映射的动态系统的固定点, 因而可以通过 Jacobi 迭代分布式计算, 如算法 1 所示。

算法 1 固定惩罚价格下的 IWFA

步骤 1 选择任意 $\mathbf{Q}^0(\mathbf{c}) \in \mathcal{Q}$, 初始化迭代指数 $k = 0$;

步骤 2 若 $\mathbf{Q}^k(\mathbf{c})$ 满足停止条件, 停止, 输出 $\mathbf{Q}^*(\mathbf{c}) = \mathbf{Q}^k(\mathbf{c})$;

步骤 3 所有 MIMO-CR 由式(15)同步更新 $\mathbf{Q}^{k+1}(\mathbf{c})$;

步骤 4 设置 $k \leftarrow k + 1$, 返回步骤 2。

利用固定点收敛性定理^[9]以及式(15)中注水映射的相应矩阵投影, 使用文献[9]中证明定理 5 的类似办法可得算法收敛到唯一 Nash 均衡的条件如下:

定理 3 定义矩阵 $\hat{\mathbf{Y}}$ 如下:

$$[\hat{\mathbf{Y}}]_{lk} \triangleq \begin{cases} 0, & k = l \\ \lambda_{\max}(\mathbf{H}_{lk}^H \mathbf{H}_{ll}^{-H} \mathbf{H}_{ll}^{-1} \mathbf{H}_{lk}), & k \neq l \end{cases} \quad (16)$$

当满足 $\|\hat{\mathbf{Y}}\|_F < 1$ 时, 算法 1 收敛到唯一 Nash 均衡。其中 $\|\cdot\|_F$ 表示 Frobenius 范数。

4.2 价格更新

对于 \mathcal{NE} , 需要解决的问题是求解合适的惩罚价格 \mathbf{c}^* 使得相应 $\mathcal{NE}(\mathbf{c}^*)$ 的均衡解满足干扰温度约束, 当这样的惩罚价格 \mathbf{c}^* 被确定时, 其对应的 $\mathcal{NE}(\mathbf{c}^*)$ 的均衡解即为 \mathcal{NE} 的均衡解。因此求解 \mathcal{NE} 的 Nash 均衡等价于求解 $\mathbf{c}^* = (c_p^*)_{p=1}^M \in \mathbb{R}_+^M$, 使得下式成立:

$$0 \leq c_p^* \perp P_{it} - \sum_{l=1}^N \mathbf{h}_{pl}^H \mathbf{Q}_l^*(\mathbf{c}^*) \mathbf{h}_{pl} \geq 0, \quad \forall p = 1, 2, \dots, M \quad (17)$$

定义映射 $\Phi(\mathbf{c}): \mathbf{c} \in \mathbb{R}_+^M \mapsto \mathbb{R}^M$ 如下:

$$\Phi: \mathbf{c} = (c_p)_{p=1}^M \mapsto \left(P_{it} - \sum_{l=1}^N \mathbf{h}_{pl}^H \mathbf{Q}_l^*(\mathbf{c}) \mathbf{h}_{pl} \right)_{p=1}^M \quad (18)$$

则求解最优惩罚价格 $\mathbf{c}^* \in \mathbb{R}_+^M$ 可被表示为非线性互补问题^[11](Nonlinear Complementary Problem, NCP)如下:

$$\text{NCP}(\Phi), \quad \mathbf{0} \leq \mathbf{c} \perp \Phi(\mathbf{c}) \geq \mathbf{0} \quad (19)$$

基于求解 NCP 的可变步长投影算法^[11]本文给出求解惩罚价格 \mathbf{c}^* 以及 \mathcal{NE} 的 Nash 均衡 \mathbf{Q}^* 的 MIMO-CR 迭代注水算法(MIMO-CR IWFA), 如算法 2 所示。

算法 2 MIMO-CR IWFA

步骤 1 选择 $\mathbf{c}^0 \geq \mathbf{0}$, 初始化迭代指数 $k = 0$;

步骤 2 由算法 1 计算给定 \mathbf{c}^k 时的 Nash 均衡 $\mathbf{Q}^*(\mathbf{c}^k)$;

步骤 3 若 \mathbf{c}^k 满足停止条件, 停止, 输出 $\mathbf{c}^* = \mathbf{c}^k$, $\mathbf{Q}^* = \mathbf{Q}^*(\mathbf{c}^k)$;

步骤 4 选择步长 $\tau_k > 0$ 更新价格 \mathbf{c} 如下:

$$\mathbf{c}^{k+1} = \left[\mathbf{c}^k - \tau_k \Phi(\mathbf{c}^k) \right]^+ \quad (20)$$

步骤 5 设置 $k \leftarrow k + 1$, 返回步骤 2。

5 仿真结果

本节中使用 MATLAB 仿真验证 MIMO-CR IWFA 的收敛性并比较本文的 MIMO-CR IWFA 以及经典 MIMO IWFA 的性能。仿真所使用的无线场景中的 PU 系统包含 M 个正在工作的单天线 PU 接收节点, CR 系统包含 N 个竞争频谱的 MIMO-CR 链路, 每条链路发送节点与接收节点分别装备有 $n_T = n_R$ 根天线。为简单起见, 设定所有 MIMO-CR 接收节点接收到的噪声与 PU 干扰之和的协方差相等为 σ_n^2 且归一化为 1; 同时设定所有 MIMO-CR 链路中收发节点的距离相等为 d_s 且归一化为 1, 且所有 MIMO-CR 发送节点与任一 PU 接收节点间的距离相等且 $d_{sp} = 2$; 路径损耗系数 γ 设定为 2.5。

图 2 中所示的分别是使用 MIMO-CR IWFA 时 8 条 MIMO-CR 链路各自所获取的信息速率, 所有 MIMO-CR 对 PU1 与 PU2 的叠加干扰以及相应的惩罚价格随着迭代系数的更新过程, 其中图 2(a)中的曲线分别为 8 个 MIMO-CR 用户的信息速率。仿真中使用了强同信道干扰的恶劣场景, 对任一 MIMO-CR 接收节点, 设定所有其他 MIMO-CR 链路的发送节点与它之间的距离都为 $d_{ss} = 1$, $P_s^{\max} / \sigma_n^2 = 10$ dB, PU 的干扰门限²⁾ P_{it} 为 2。信道系数为独立同分布的 0 均值单位方差高斯随机变量。设置开始时的发送协方差矩阵 $\mathbf{Q}^{(0)} = \mathbf{0}$, 惩罚价格 $\mathbf{c}^{(0)} = \mathbf{0}$, 从图中看出经过总数 60 次左右的迭代后, 惩罚价格很快收敛到最优解, 使得所有 MIMO-CR 对 PU 的叠加干扰满足干扰温度约束, 同时发送协方差矩阵收敛到唯一的 Nash 均衡(表现在信息速率趋于稳定状态)。通过计算得 $\lambda_{\min}(\mathbf{Y} + \mathbf{Y}^T) = 0.9892 > 0$, 从而验证了定理中 Nash 均衡唯一存在的充分条件成立, 对其他的随机信道系数以及其他数目的 PU 所做的仿真同样表明 $\lambda_{\min}(\mathbf{Y} + \mathbf{Y}^T) > 0$ 时算法能够收敛到唯一 Nash 均衡。需要指出的是, 由于开始惩罚价格为 0, 从而 MIMO-CR IWFA 在迭代开始时等价于经典 MIMO IWFA, 从而从图 2(b)迭代开始处可知经典 MIMO IWFA 对 PU 的叠加干扰远超出干扰门限。

²⁾ 设定干扰门限为 2 倍 σ_n^2 。

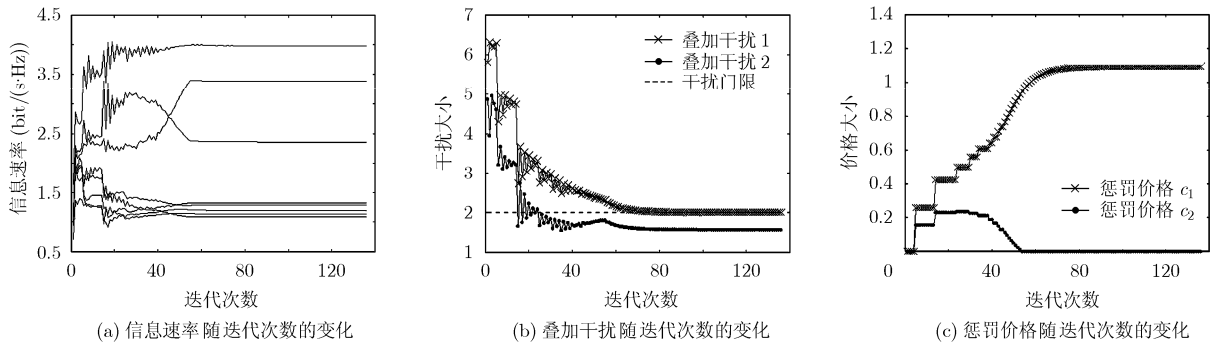


图2 MIMO-CR IWFA 的收敛性 ($M=2$, $N=8$, $n_T=n_R=4$, $d_s=1$, $d_{ss}=1$, $d_{sp}=2$, $P_s^{\max}/\sigma_n^2=10$ dB, $P_{it}=2$, $\gamma=2.5$)

图3 中所示的是不同干扰门限下的 MIMO-CR IWFA 的收敛过程(使用了与图2 仿真相同的信道条件), 从图中可以看到本文算法的收敛速度随着干扰门限的增大而加快, 其原因在于: 随着干扰门限的增大, 求解最优惩罚价格的价格更新(即算法2 中步骤4)次数降低, 从而使得所需的总体迭代注水次数减小。同时可以看出, 由于受干扰门限对 MIMO-CR 发送功率的限制, 本文算法取得的系统信息速率略低于不考虑干扰温度约束的经典 MIMO IWFA, 两者间的性能差距随着干扰门限的增大而减小, 当干扰门限增大到一定程度时, 如图中 $P_{it}=6$, 此时干扰温度约束冗余, 所以 $\mathbf{c}=\mathbf{0}$, 本文算法等价于经典算法, 因而两者取得相等的系统信息速率。

6 结束语

本文从非合作博弈角度研究了认知无线环境中在干扰温度约束下的多个 MIMO-CR 的波形自适应问题, 提出了一种带惩罚价格的分布式迭代注水算法——MIMO-CR IWFA, 用以解决干扰温度约束下的多 MIMO-CR 波形自适应问题。与无法控制对 PU 干扰大小的经典 MIMO IWFA 不同, 本文算法能很好地满足 PU 干扰温度约束, 从而能在有效保护 PU QoS 的前提下与 PU 共享频谱, 适用于认知无线环境。

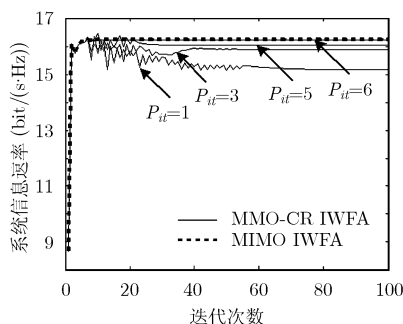


图3 不同 PU 干扰门限下的系统信息速率比较 ($M=2$, $N=8$, $n_T=n_R=4$, $d_s=1$, $d_{ss}=1$, $d_{sp}=2$, $P_s^{\max}/\sigma_n^2=10$ dB, $\gamma=2.5$)

参考文献

- [1] Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications [J]. *IEEE Journals on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] Zhang R and Liang Y C. Exploiting multi-antennas for opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, 2(1): 88-102.
- [3] Al-Khasib T, Shenouda M, and Lampe L. Single and multiple carrier designs for cognitive radio systems [C]. 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC), South Africa, 2010: 1-6.
- [4] Zhang R, Gao F F, and Liang Y C. Cognitive beamforming made practical: effective interference channel and learning-throughput tradeoff [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(2): 706-718.
- [5] Gao F F, Zhang R, and Liang Y C, et al. Design of learning based MIMO cognitive radio [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(4): 1707-1720.
- [6] Perlaza S M, Fawaz N, and 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.
- [7] Ye S G and Blum R S. Optimized signaling for MIMO interference systems with feedback [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(11): 2839-2848.
- [8] Basar T and Olsder G J. Dynamic noncooperative game theory [M]. 2nd Ed., Academic Press, New York: 1995, Chapter 1.
- [9] Scutari G, Palomar D P, and Barbarossa S. Competitive design of multiuser MIMO systems based on game theory: a unified view [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(7): 1089-1103.
- [10] Scutari G, Palomar D P, and Barbarossa S. The MIMO iterative waterfilling algorithm [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(5): 1917-1935.
- [11] Facchinei F and Pang J S. Finite-dimensional variational inequalities and complementarity problem [M]. New York: Springer-Verlag: 2003, Chapter 1, 2 and 11.

魏 飞: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为无线通信与网络信号处理。

杨 震: 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信与网络信号处理、语音信号处理。