

窃听信道下认知多小区中的协同波束成形算法

陈东华¹, 张秀秀¹, 谢维波²

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 小区之间优化变量耦合使多小区联合优化问题为非线性非凸问题, 通过约束泄露干扰提出了基于半正定松弛的中心式协同波束成形算法, 在此基础上, 采用部分对偶分解方法将中心式联合优化问题分解为一组单小区优化问题, 提出了一种分布式迭代求解算法。结果表明, 所提算法在保证系统安全速率需求和认知干扰约束的条件下实现了系统功耗的降低, 此外, 分布式算法不仅能降低实现复杂度, 而且能达到中心式算法的性能。

关键词: 物理层安全; 认知无线网络; 多小区; 波束成形; 分布式

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)11-0089-07

Coordinated beamforming for cognitive multi-cell networks with wiretap channels

CHEN Dong-hua¹, ZHANG Xiu-xiu¹, XIE Wei-bo²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Owing to the coupling among the vectors to be optimized, the problem becomes non-convex and non-linear. Accordingly, a centralized coordinated beamforming design method was proposed by constraining the leakage interference and using the semi-definite relaxation, and on the base of it, a decentralized algorithm was also proposed by decomposing the centralized design problem into a group of sub-problems on each cell's base by using dual decomposition. Simulation results show that the proposed schemes make effective reduction in power consumption while guarantee the legal users' secrecy rate requirement and the cognitive interference constraint. Moreover, the proposed decentralized method not only reduces the computational complexity, but also has the same performance as the centralized algorithm.

Key words: physical layer security; cognitive radio networks; multi-cell; beamforming; distributed

1 引言

随着无线网络通信及无线多媒体业务的迅猛发展, 无线频谱资源的供需矛盾日益凸显。为了缓解这一矛盾, 密集蜂窝小区和认知无线技术受到广泛关注^[1]。密集蜂窝小区通过缩小小区的覆盖来提高频率的复用, 而认知无线电通过机会或频谱叠加方式提高频率的利用率, 两者结合能有效缓解上述矛盾, 目前, 多小区认知无线网络技术已被多种无线标准如 IEEE 802.16h、IEEE 802.22 所采纳。信息传输的安全问题是通信系统面临的另一挑战, 传统上, 信息安全是在应用层对信息加密来实现的, 然

而在无线通信系统中, 无线传输具有广播特性, 传统加密方式中的密钥管理与分发很难实现^[2]。由于认知系统的信息传输在授权系统用户的接收频带范围内, 使认知系统的信息传输更易被窃听, 从而导致认知无线网络的信息传输安全问题更为突出。为了克服传统加密方式在无线信息安全传输中存在的问题, 物理层安全技术成为这一领域的研究热点。

物理层安全大多基于“安全容量”的概念^[3], 安全容量定义为合法用户取得的信道容量与窃听者非法获得的信道容量之差, 系统设计应该保证合法用户的安全容量。物理层安全的实现方式主要有

收稿日期: 2014-08-16; 修回日期: 2014-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61271383)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61271383)

两类，一类是通过人工噪声的方式实现^[4]，发射机在向合法用户发送信息的同时发送部分人为噪声，以实现窃听用户的干扰。目前，人工噪声方式通常针对被动窃听者，对被动窃听者而言，发射机与其之间的传输信道响应是未知的^[5]。另一类通过波束成形提供的空间自由度来抑制窃听者的信息接收^[5]。从安全容量概念出发，物理层安全的研究范围涵盖了 MIMO 系统^[6-8]、中继系统^[9,10]、干扰信道^[11,12]。近来，对于物理层安全的研究已经拓展至认知系统^[13]，文献[13]从用户调度的角度研究了认知无线网络中的物理层安全传输问题，然而，结合认知和多小区二者优点的多小区认知无线网络中的物理层安全传输问题还未得到有效解决。

为解决上述问题，从安全容量概念出发研究了多小区认知无线网络中的物理层安全问题。为了在认知场景中保证实时通信业务(如多媒体视频点播)的服务质量(QoS, quality of service)，以用户安全速率为约束，以系统功耗最小化为目标，同时考虑认知系统对授权系统的干扰约束来构造优化模型。由于小区间干扰，多小区认知无线网络优化模型为非凸优化，为了求解非凸优化模型，引入干扰泄露约束和半正定松弛将其转化为凸优化问题；此外，为了分布式求解这一问题，采用对偶分解将其转换为以每小区为单位的子问题，从而避免了中心式处理，降低了实现复杂度。

符号说明：(·)^{*}和(·)^H分别表示共轭和共轭转置操作，|·|和||·||分别表示取绝对值和 Frobenius 范数，R(A)为矩阵 A 的秩，A ≥ 0 表示矩阵 A 为半正定，max 代表取最大值，[x, 0]⁺表示 max{0, x}。

2 问题建模

如图 1 所示，认知无线网络包含 K 个认知多小区，每个小区包含一个位于小区中心的认知基站(SBS, secondary base station)，第 k 个基站的发射天线数为 N_k；假设所有小区在考虑的时频资源上各服务于一个认知用户(SU, secondary user)，当前服务用户可由调度算法来确定；除 SU 外，假设每个小区各包含一个窃听用户(EU, eavesdropping user)，由于无线传输的广播特性，窃听用户在当前频率资源上可以接收来自所有小区的发射信号；为简化起见，假设系统包含单个授权用户(PU, primary user)，多个 PU 时的情况可由单个时的情况直接推广得到。

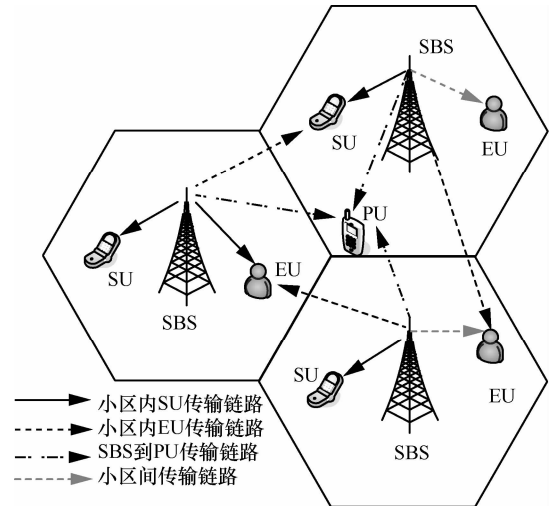


图 1 系统模型

考虑下行链路传输，假设所有用户均为单天线配置，令 s_k 为 SBS k 的发射信号且满足 $E[s_k s_k^*] = 1$ ，即发射信号功率归一化为 1，定义 w_k 为 $N_k \times 1$ 的波束成形矢量，波束成形后的发送信号 $w_k s_k$ 送入无线信道传输，SU k 和 EU k 的接收信号分别表示为

$$y_k = h_{kk}^H w_k s_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K h_{jk}^H w_j s_j + n_k \quad (1)$$

$$z_k = g_{kk}^H w_k s_k + \sum_{j=1, j \neq k}^K g_{jk}^H w_j s_j + v_k \quad (2)$$

其中， h_{jk} 和 g_{jk} 为 SBS j 分别到 SU k 和 EU k 的信道响应矢量，SBS k 到 EU k 的信道定义为 MISO 窃听信道； n_k 和 v_k 为相应的零均值加性高斯白噪声(AWGN, additive white Gaussian noise)，方差分别为 σ_n^2 和 σ_v^2 。需要说明的是，在认知无线电场景，授权系统发送的随机信息对认知系统而言是未知的，SU 很难得到来自授权基站的干扰，因此近似授权系统对 SU 和 EU 的干扰为 AWGN，即 n_k 和 v_k 既包含了信道引入的噪声也包括了来自授权系统的干扰。在 EU 存在的情况下，SU k 获得的安全速率为^[5]

$$R_k = \text{lb} \left(1 + \frac{|h_{kk}^H w_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |h_{jk}^H w_j|^2 + \sigma_n^2} \right) - \text{lb} \left(1 + \frac{|g_{kk}^H w_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |g_{jk}^H w_j|^2 + \sigma_v^2} \right) \quad (3)$$

式(3)中第 1、2 项分别表示 SU k 和 EU k 的仙农容量。为了保证 SU 业务的实时 QoS，以用户安全速率为约束，以系统功耗最小化为目标，同时考虑认知系统对授权系统的干扰约束来构造如下优化模型(P1, problem 1)

$$\min_{\{\mathbf{w}_k\}_{k=1}^K} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 \quad (4a)$$

$$\text{s.t. } \|\mathbf{w}_k\|^2 \leq P_k, \forall k \quad (4b)$$

$$R_k \geq \bar{R}_k, \forall k \quad (4c)$$

$$\sum_{k=1}^K |\mathbf{f}_k^H \mathbf{w}_k|^2 \leq I_{\text{th}} \quad (4d)$$

其中, P_k 为 SBS k 允许的最大发射功率, \bar{R}_k 为 SU k 需要保障的最小安全速率, I_{th} 为 PU 的最大容许干扰门限, \mathbf{f}_k 表示 SBS k 到 PU 的信道响应矢量。

3 安全波束成形问题求解

由安全速率的定义式(3)不难看出, 速率约束(4c)为非凸约束, 从而导致优化问题 P1 为非凸优化问题, 带来求解上的困难。在优化问题具备可行性的前提下, 通过引入干扰泄露约束和半正定松弛将 P1 转化为凸半正定规划(SDP, semi-definite programming)问题。在多小区协同波束成形设计中, 直接求解 SDP 问题需要专门的计算单元来完成波束成形矢量的计算, 这种方法通常被称为中心式(centralized)算法^[14], 中心式算法需要收集各小区的信道状态信息, 而且需要专门的计算中心, 实现较为复杂。针对这一问题, 多小区协同波束成形设计通常采用以小区为单位的分布式(decentralized/distributed)求解算法^[14-16], 从而避免中心式算法的缺点。首先, 提出一种中心式算法求解安全波束成形矢量, 然后, 基于对偶分解框架提出一种分布式算法。

3.1 中心式算法

观察式(3)不难发现, 如果 SBS j 泄露到 SU k 的功率 $|\mathbf{h}_{jk}^H \mathbf{w}_j|^2$ 越小, SU k 取得的安全速率越大, 同样, 如果 SBS j 泄露到 EU k 的功率 $|\mathbf{g}_{jk}^H \mathbf{w}_j|^2$ 变大, 也能使 SU k 的安全速率增加, 基于上述事实并为了克服问题的非凸性, 引入干扰泄露门限^[17,18] ζ_{jk} 和 η_{jk} 使

$$|\mathbf{h}_{jk}^H \mathbf{w}_j|^2 \leq \zeta_{jk} \quad (5)$$

$$|\mathbf{g}_{jk}^H \mathbf{w}_j|^2 \geq \eta_{jk} \quad (6)$$

式(5)表示约束 SBS j 泄露到 SU k 的最大功率为 ζ_{jk} , 式(6)则表示约束 SBS j 泄露到 EU k 的最小功率为 η_{jk} 。定义了泄露干扰约束后, 安全速率约束变

化为

$$\text{lb} \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_{kk}^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K \zeta_{jk} + \sigma_n^2} \right) - \text{lb} \left(1 + \frac{|\mathbf{g}_{kk}^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K \eta_{jk} + \sigma_v^2} \right) \geq \bar{R}_k, \forall k \quad (7)$$

式(7)左边为 2 个凹函数的差值, 通常称为 DC (difference of concave)函数, DC 函数仍是非凸函数, 利用对数函数的性质把式(7)转换为

$$\frac{|\mathbf{g}_{kk}^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K \eta_{jk} + \sigma_v^2} - \frac{|\mathbf{h}_{kk}^H \mathbf{w}_k|^2}{2^{\bar{R}_k} \left(\sum_{j=1, j \neq k}^K \zeta_{jk} + \sigma_n^2 \right)} \leq 2^{-\bar{R}_k} - 1, \forall k \quad (8)$$

将速率约束写成式(8)后, P1 变成如下次优问题(P2)

$$\min_{\{\mathbf{w}_k\}_{k=1}^K} \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 \quad (9a)$$

$$\text{s.t. } \|\mathbf{w}_k\|^2 \leq P_k, \forall k \quad (9b)$$

$$\frac{|\mathbf{g}_{kk}^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K \eta_{jk} + \sigma_v^2} - \frac{|\mathbf{h}_{kk}^H \mathbf{w}_k|^2}{2^{\bar{R}_k} \left(\sum_{j=1, j \neq k}^K \zeta_{jk} + \sigma_n^2 \right)} \leq 2^{-\bar{R}_k} - 1, \forall k \quad (9c)$$

$$\sum_{k=1}^K |\mathbf{f}_k^H \mathbf{w}_k|^2 \leq I_{\text{th}} \quad (9d)$$

$$|\mathbf{h}_{jk}^H \mathbf{w}_j|^2 \leq \zeta_{jk}, \forall j, k \quad (9e)$$

$$|\mathbf{g}_{jk}^H \mathbf{w}_j|^2 \geq \eta_{jk}, \forall j, k \quad (9f)$$

由于式(9c)和式(9f)为非凸约束, P2 仍为非凸优化问题, 下面利用半正定松弛将其转换为半正定规划。定义半正定矩阵 $\mathbf{W}_k = \mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^H$, 则 P2 变为 P3

$$\min_{\{\mathbf{W}_k\}_{k=1}^K} \sum_{k=1}^K \text{tr}(\mathbf{W}_k) \quad (10a)$$

$$\text{s.t. } \text{tr}(\mathbf{W}_k) \leq P_k, \forall k \quad (10b)$$

$$\frac{\mathbf{g}_{kk}^H \mathbf{W}_k \mathbf{g}_{kk}}{\sum_{j=1, j \neq k}^K \eta_{jk} + \sigma_v^2} - \frac{\mathbf{h}_{kk}^H \mathbf{W}_k \mathbf{h}_{kk}}{2^{\bar{R}_k} \left(\sum_{j=1, j \neq k}^K \zeta_{jk} + \sigma_n^2 \right)} \leq 2^{-\bar{R}_k} - 1, \forall k \quad (10c)$$

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{f}_k^H \mathbf{W}_k \mathbf{f}_k \leq I_{\text{th}} \quad (10d)$$

$$\mathbf{h}_{kj}^H \mathbf{W}_k \mathbf{h}_{kj} \leq \zeta_{kj}, \forall k, j \quad (10e)$$

$$\mathbf{g}_{kj}^H \mathbf{W}_k \mathbf{g}_{kj} \geq \eta_{kj}, \forall k, j \quad (10f)$$

$$W_k \succeq \theta, \forall k \quad (10g)$$

$$R(W_k) = 1, \forall k \quad (10h)$$

不难看出, 非凸秩 1 约束(10h)带来求解上的困难, 松弛秩 1 约束后则将 P3 变为 SDP, 从而可用内点法^[19]或凸优化软件^[20]求解。得到半定矩阵 W_k 之后, 再从中提取出秩 1 解即可得到波束成形矢量 w_k 。

虽然直接求解 SDP 可以得到波束成形矢量, 但是中心式求解各小区波束成形矢量需要专门的计算单元, 要求所有 SBS 将其信道响应及其他参数通过回程链路(backhaul)发送至计算中心, 计算中心完成计算后再把结果通过回程链路回传给各个 SBS, 从而造成大量的信令及信息交换, 不仅如此, 中心式算法对回程链路的可靠性也提出了严格的要求。

3.2 分布式算法

观察优化问题 P3 的约束条件不难发现, 除了认知干扰约束(10d)把各 SBS 的波束成形矢量耦合在一起以外, 其他条件均为各个 SBS 独立约束, 因此符合对偶分解^[21]的框架。接下来, 利用对偶分解将秩 1 松弛后的优化问题 P3 分解为一系列子问题(sub-problem)和一个主问题(primal problem), 子问题在各 SBS 处分别求解, SBS 之间的信令交换通过主问题来协调。

构造优化问题(10a)~(10g)的部分拉格朗日函数

$$\min_{\{W_k\}_{k=1}^K} \sum_{k=1}^K tr(W_k) + \lambda \left(\sum_{k=1}^K f_k^H W_k f_k - I_{th} \right)$$

s.t. 式(10b), 式(10c), 式(10e), 式(10f), 式(10g) (11)

其中, λ 为对应于认知干扰约束(10d)的对偶变量。经对偶分解之后, 不同 SBS 波束成形矢量之间的约束耦合都被解除, 原始优化问题进而分解为 K 个子对偶问题, 第 k 个子问题为

$$\min_{W_k} tr(W_k) + \lambda f_k^H W_k f_k$$

s.t. 式(10b), 式(10c), 式(10e), 式(10f), 式(10g) (12)

给定 λ 时, 子问题(12)为凸优化问题, 因此可采用内点法或凸优化软件求解。对应子问题(12)的主对偶问题为

$$\begin{aligned} \max_{\lambda} \quad & \sum_{k=1}^K G_k(\lambda) - \lambda I_{th} \\ \text{s.t.} \quad & \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $G_k(\lambda)$ 为给定 λ 时求解第 k 个子问题(12)所得

到的对偶函数

$$G_k(\lambda) = \min_{W_k} tr(W_k) + \lambda f_k^H W_k f_k$$

s.t. 式(10b), 式(10c), 式(10e), 式(10f), 式(10g) (14)

主对偶问题通过更新对偶变量 λ 来协调 K 个子问题的求解, 如果对偶函数 $G_k(\lambda)$ ($k=1, 2, \dots, K$) 一阶可导, 主问题(13)可由梯度法求解, 当 $G_k(\lambda)$ 不可导时, 可采用次梯度法求解主问题。 λ 的次梯度更新为

$$\lambda(t+1) = \left[\lambda(t) + \alpha \left(\sum_{k=1}^K f_k^H W_k^*(t) f_k - I_{th} \right), 0 \right]^+ \quad (15)$$

其中, t 为迭代序号, $\alpha > 0$ 为迭代步长, α 越大收敛越快, 但迭代精度变小; 反之, α 越小迭代精度越大, 但收敛变慢, $W_k^*(t)$ 为给定 $\lambda(t)$ 时子问题(12)的最优解。

由于秩 1 松弛后的优化问题 P3 为凸问题, 满足拉格朗日强对偶性, 因此分布式算法得到的最优波束成形矢量和中心式算法得到的结果是相同的; 同时, 由于原问题(秩 1 松弛后的 P3)为凸问题, 分布式算法存在唯一解且经迭代后收敛于该解。完整的分布式安全波束成形算法的步骤如下。

- 1) 令迭代序号 $t=0$, 初始化迭代步长 α 和次梯度 $\lambda(0)$ 。
- 2) 各个 SBS k ($k=1, 2, \dots, K$) 独立求解子问题(12)得到各自的优化解 $W_k^*(t)$ 。
- 3) 利用乘子更新方程(15)更新对偶变量 $\lambda(t)$ 。
- 4) 若满足收敛条件 $|\lambda(t) - \lambda(t-1)| < \varepsilon$ (ε 为充分小的正数), 转至步骤 5), 否则令 $t=t+1$ 并返回步骤 2)。
- 5) 由 $\{W_k^*(t)\}_{k=1}^K$ 提取波束成形矢量 $\{w_k^*\}_{k=1}^K$ 。

实现复杂度及有效性分析: 如前所述, 中心式算法首先需要基站把各自的信道状态信息通过回程链路发送至计算中心, 计算中心完成计算以后再通过回程链路把波束成形矢量回传给各个基站, 基站和计算中心之间需要传送大量的信道矢量及波束成形矢量, 实现较为复杂。由分布式安全波束成形算法步骤可知, 各个小区均独立(分布式)完成相应子对偶问题的计算, 从而得到相应的安全波束成形矢量, 需要中心式求解的仅有对偶变量 λ , 由式(15)不难发现, 各小区只需利用迭代过程中得到的 $W_k^*(t)$ 计算并交换参数 $f_k^H W_k^*(t) f_k$, 而该参数为标量值, 因此小区之间仅需交换很少

量的信息。本质上，分布式算法把计算量分布到各 SBS，从而避免了中心式算法的缺点。另一方面，由于原问题和对偶问题满足强对偶性，两者在性能上是相同的。

4 仿真分析

仿真参数：认知网络包含 $K=2$ 个小区，所有小区 SBS 的收发天线数均为 4，小区内 SU 和 EU 的噪声功率相同且为 σ^2 ，各小区的最大功率约束门限均相同， $P_k = P, \forall k$ ，特别说明，令功率约束门限 $P=1$ ，从而可以定义接收信噪比(SNR)为 $1/\sigma^2$ ，此外，小区间的干扰泄露门限和速率门限均相等，即满足 $\zeta_{jk} = \zeta, \forall j, k$ ， $\eta_{jk} = \eta, \forall j, k$ ， $\bar{R}_k = \bar{R}, \forall k$ ；特别说明认知干扰门限 $I_{th} = -10$ dB，安全速率约束 $\bar{R} = 0.2 \text{ bit}(\text{s}\cdot\text{Hz})^{-1}$ ；SBS 到 SU、EU 和 PU 的信道响应服从瑞利衰落，小区内传输信道的大尺度衰落因子为单位值 1，小区间传输信道及各 SBS 到 PU 的传输信道的大尺度衰落因子为 $1/\sqrt{3}$ 。

在 SNR 为 30 dB、干扰泄露门限为 $\zeta = \sigma^2$ 和 $\eta = 10\sigma^2$ 的情况下，图 2 给出了系统平均消耗功率随速率约束门限 \bar{R} 变化的性能关系曲线，作为比较，图中同时给出了分布式和中心式 2 种算法的结果。由图可见，在安全速率约束较低区域时，系统消耗功率随着约束速率门限的增大而增加缓慢，当约束速率门限大于 $4 \text{ bit}(\text{s}\cdot\text{Hz})^{-1}$ 时，系统功耗的增加较为显著；同时 2 种功率约束下的系统消耗功率均满足功率约束，在功率约束分别为 1 W 和 2 W 的时候，所考虑的安全约束速率范围内系统消耗的平均功率分别为 0.122 W 和 0.236 W 左右，远低于给定的约束门限；对比分布式算法和中心式算法得到的结果不难发现，两者对应的曲线完全重合，这一结果说明，中心式算法和分布式算法在性能上是相同的，同时这一结果也验证了对偶分解的最优性。

在默认仿真参数和图 2 相同的情况下，图 3 仿真了每小区实际取得的安全速率与速率约束门限 \bar{R} 之间的性能关系曲线。图中结果表明，安全速率随着 \bar{R} 的增加而增加，在低 \bar{R} 区域增加功率约束门限时，实际取得的安全速率相对于给定的速率约束门限有较大的增加，而随着约束门限 \bar{R} 的增大，速率约束越发严格，导致实际取得的安全速率的增加量也在减小，当约束门限高

于 $4 \text{ bit}(\text{s}\cdot\text{Hz})^{-1}$ 时，增加功率约束门限只会增加系统功耗，不会提高系统安全速率，这是由于当速率约束门限 \bar{R} 较高时，实际速率接近甚至达到了速率约束门限 \bar{R} 。比较不同认知干扰门限的曲线可知，认知干扰门限越小，安全速率也越小，这是由于认知干扰门限越小，约束越严格，从而限制了安全速率的增加。

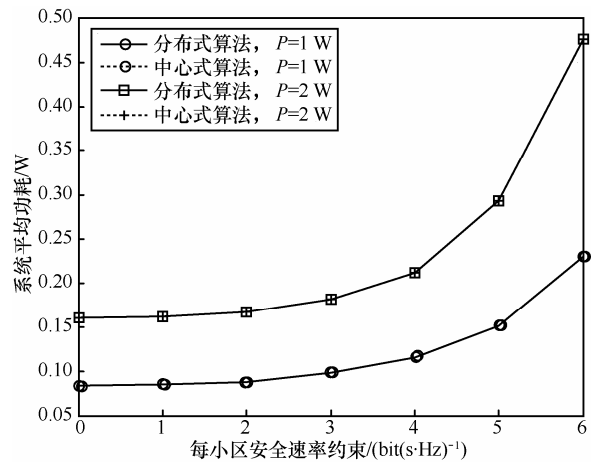


图 2 平均功耗与约束速率之间的性能关系

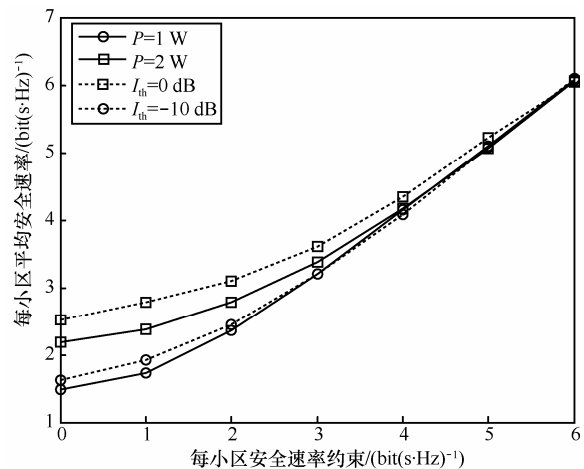


图 3 每小区实际安全速率与安全速率约束之间的性能关系

为了衡量泄露干扰门限对系统安全速率的影响，图 4 给出了 4 组泄露干扰门限下的安全速率性能，仿真中 $I_{th} = 0$ dB。由仿真结果可见，泄露到合法用户 SU 和泄露到非法用户 EU 的干扰门限大小对系统的影响完全相反，具体来说，泄露到合法用户 SU 的干扰门限 ζ 越小，小区安全速率越大，泄露到非法用户 EU 的干扰门限 η 越大，小区安全速率也越大。由式(7)可见，安全速率与 ζ 和 η 分别成反比和正比关系，从而导致了上述结果。

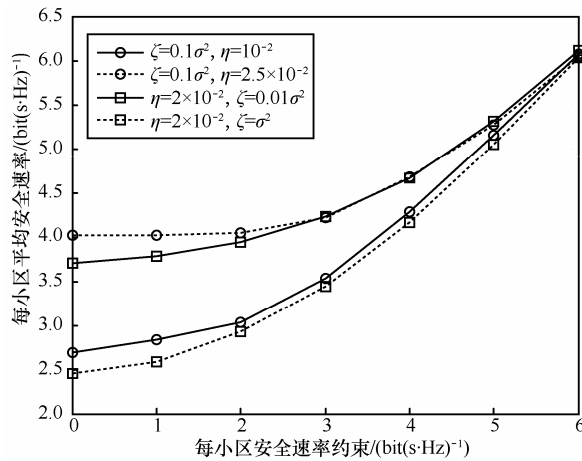


图 4 泄露干扰门限对安全速率的影响

为了衡量分布式算法的收敛性，图 5 给出了归一化次优性随迭代次数变化的性能关系曲线，归一化次优性定义为 $S(t)=(P_{\text{decentr}}(t)-P_{\text{centr}})/P_{\text{centr}}$ ，其中， $P_{\text{decentr}}(t)$ 为 t 次迭代后的系统功耗， P_{centr} 为中心式算法得到的最优系统功耗。图中结果显示，在不同认知干扰门限下，算法均收敛，即随着迭代次数的增加，分布式算法求得的最优解无限接近中心式算法得到的最优解。由图 5 可知，当 $I_{\text{th}}=0$ dB 时，归一化次优性在 20 次迭代后即下降为 10^{-6} 以下，这说明算法具有较快的收敛性能，另一方面，随着认知干扰门限的降低，干扰约束更加严格，算法所需收敛次数也在增加。

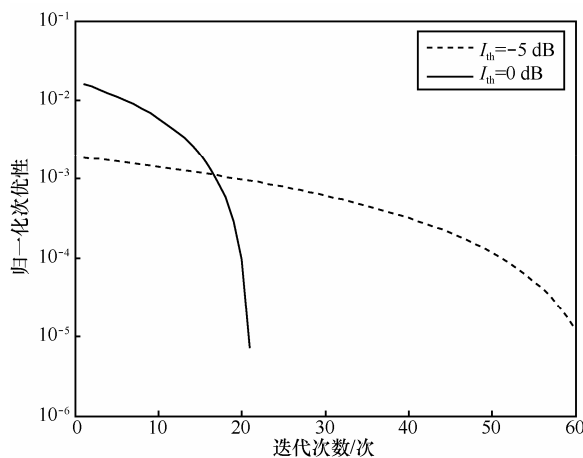


图 5 分布式算法收敛性能

5 结束语

在多小区认知无线网络场景下，提出了一种基于对偶分解的分布式安全波束成形优化算法，优化算法模型以安全速率及认知干扰为约束，以消耗功

率最小化为目标，通过小区间干扰协作以分布方式设计安全波束成形矢量。所提分布式迭代算法把计算量分布到各 SBS，迭代过程中各小区只需交换单个标量干扰值，避免了中心式算法中大量矢量信道信息及波束成形矢量的回程传输。仿真结果表明，该算法不仅取得了安全速率增益，实现了功耗的降低，而且达到了中心式算法的性能。

参考文献:

- [1] XIANG J, ZHANG Y, SKEIE T, *et al.* Downlink spectrum sharing for cognitive radio femtocell networks[J]. IEEE System Journal, 2010, 4(4):524-534.
- [2] LIN C H, TSAI S H, LIN Y P. Secure transmission using MIMO precoding[J]. IEEE Trans Information Forensics and Security, 2014, 9(5):801-813.
- [3] WYNER A. The wire-tap channel[J]. Bell System Technical Journal, 1975, 54(8):1355-1387.
- [4] HONG Y W, LAN P C, KUO C C. Enhancing physical-layer secrecy in multiantenna wireless systems: an overview of signal processing approaches[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(5):29-40.
- [5] LIAO W C, CHANG T H, MA W K, *et al.* QoS-based transmit beamforming in the presence of eavesdroppers: an optimized artificial-noise-aided approach[J]. IEEE Tans Signal Processing, 2011, 59(3):1202-1216.
- [6] ZHOU Y K, XIANG Z Z, ZHU Y, *et al.* Application of full-duplex wireless technique into secure MIMO communication: achievable secrecy rate based optimization[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(7):804-808.
- [7] TSAI S H, POOR H V. Power allocation for artificial-noise secure MIMO precoding systems[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2014, 62(13):3479-3493.
- [8] LI N, TAO X F, XU J. Ergodic secrecy sum-rate for downlink multi-user MIMO systems with limited CSI feedback[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(6): 969-972.
- [9] WANG H M, LIU F, XIA X G. Joint source-relay precoding and power allocation for secure amplify-and-forward MIMO relay networks[J]. IEEE Trans Information Forensics and Security, 2014, 9(8): 1240-1250.
- [10] YANG Y C, SUN C, ZHAO H, *et al.* Algorithms for secrecy guarantee with null space beamforming in two-way relay networks[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2014, 62(8):2111-2126.
- [11] LIU R, MARIC I, SPASOJEVIC P, *et al.* Discrete memoryless interference and broadcast channels with confidential messages: secrecy rate regions[J]. IEEE Trans Information Theory, 2008, 54(6):2493-

- 2507.
- [12] NI J Q, FEI Z S, WONG K K, *et al.* Robust coordinated beamforming for secure MISO interference channels with bounded ellipsoidal uncertainties[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2013, 2(4): 407-410.
- [13] ZOU Y L, WANG X B, SHEN W M. Physical-layer security with multiuser scheduling in cognitive radio networks[J]. *IEEE Trans Communications*, 2013, 61(12): 5103-5113.
- [14] PENNANEN P, TOLLI A, LATVA-AHO M. Multi-cell beamforming with decentralized coordination in cognitive and cellular networks[J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 2014, 62(2):295-308.
- [15] SHEN S, LOK T M. Asynchronous distributed downlink beamforming and power control in multi-cell networks[J]. *IEEE Trans Wireless Communications*, 2014, 13(7):3892-3902.
- [16] XU W, WANG X. Pricing-based distributed downlink beamforming in multi-cell OFDMA networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(9):1605-1613.
- [17] ZHANG R, CUI S G. Cooperative interference management with MISO beamforming[J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 2010, 58(10):5450-5458.
- [18] KIM Y J, SONG M G, CHO Y S, *et al.* Decentralized beamformer design with limited multi-cell cooperation for interference channel of cognitive radio networks[J]. *IEEE Trans Wireless Communications*, 2013, 12(8):4142-4152.
- [19] BOYD S, VANDENBERGHE L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [20] GRANT M, BOYD S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 1.21[EB/OL]. <http://cvxr.com/cvx/>, 2010.
- [21] PALOMAR D, CHIANG M. A tutorial on decomposition methods for network utility maximization[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(8):1439-1451.

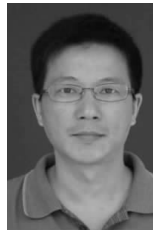
作者简介:



陈东华 (1977-), 男, 安徽濉溪人, 华侨大学副教授, 主要研究方向为宽带无线通信、无线网络资源管理。



张秀秀 (1988-), 女, 河南濮阳人, 华侨大学硕士生, 主要研究方向为协作多点传输技术。



谢维波 (1964-), 男, 福建泉州人, 华侨大学教授, 主要研究方向为智能信息与信号处理、图像处理、无线移动自组织网络等。