

认知无线网络基于 F 范数的频谱共享

荣 玫,朱世华,李 锋

(西安交通大学电子与信息工程学院,陕西西安 710049)

摘 要: 针对多用户多输入多输出认知无线网络的频谱共享问题,提出一种在保证授权用户服务质量要求的前提下,以认知网络容量最大化为目标的基于 F 范数的频谱共享方法.该方法利用信道矩阵的 F 范数选择认知用户以获得认知网络的多用户分集增益,并采用两次选择的方式降低算法的复杂度,通过将认知用户的发射信号投射到干扰信道的零空间来避免认知用户对授权用户的干扰,对认知用户的信道矩阵采用奇异值分解方法使其转化为并行独立信道,并使用注水功率分配方法增大系统容量.相对于已有的认知无线网络频谱共享策略,该方法能够使认知网络获得更大的各态历经容量,降低授权用户的中断概率.仿真结果表明,当认知系统总发射功率为 100w 时,采用本文方法与文献中已有算法相比,认知网络具有约 13% 的各态历经容量增益.

关键词: 认知无线电;多输入多输出;频谱共享;F 范数;零空间映射

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 01-0095-06

Spectrum Sharing Based on Frobenius Norm in Cognitive Radio Networks

RONG Mei, ZHU Shi-hua, LI Feng

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: Aiming at the problem of spectrum sharing in multiuser multi-input multi-output cognitive radio networks, a spectrum sharing method based on Frobenius norm is proposed, which is designed to maximize the throughput of cognitive radio (CR) users as well as guarantee the quality of service of primary (PR) users. Multiuser diversity of the cognitive radio network is obtained by user selection, which is according to the Frobenius norm of channel matrices, while twice selection is adopted to reduce the complexity of our method, and then the interference from CR users to PR users is canceled by null-space projection. At last, the singular value decomposition method is employed to derive the parallel spatial sub-channels for each user while the waterfilling power allocation method is used to enhance system capacity. Compared with the existing spectrum sharing strategies, the proposed method can acquire larger ergodic capacity of CR system and reduce the outage probability of PR users. Simulation results show that when the total transmitting power of the CR system is 100w, the proposed method has 13% ergodic capacity gain of the cognitive network over the existing methods.

Key words: cognitive radio; multi-input multi-output; spectrum sharing; Frobenius norm; null-space projection

1 引言

认知无线电技术可以显著提高无线通信系统的频谱效率,解决频谱资源稀缺和频谱利用率低之间的矛盾^[1],成为近年来的一个研究热点.现存的频谱注册网络对所分配频谱在时间和空间上使用的不连续性^[2],使得大部分授权频段在时间和空间上没有得到充分的利用.因此,认知无线网络通过机会共享的方式,实现动态频谱接入,就可以不改变原有授权系统的协议,在不影响授权用户正常通信的前提下,与授权系统共享频谱^[3].频谱共享主要分为两种方式,即针对某一频段,认知系统在授权系统不通信时才使用该频段的覆盖式频谱共享^[3]和二者可以同时使用该频段,但认知系统对授

权用户的干扰要限定在干扰温度之下的下衬式频谱共享^[4].下衬式频谱共享以其较高的频谱效率和可实现性成为了一种具有吸引力的共享方式,被美国联邦通信委员会作为认知无线电系统的主要频谱共享方式^[5].为了与覆盖式频谱共享方式相区别,学者们将覆盖式认知无线电系统称为经典认知无线电,将下衬式认知无线电系统称为广义认知无线电^[6].多天线技术为无线通信系统增加了空间自由度,是认知无线网络中用于消除干扰和提高频谱效率的有效工具^[7].

目前,针对多天线认知无线网络中频谱共享方法的研究主要集中在三个方面:(1)如何有效避免认知网络对授权用户的干扰^[8,9];(2)在避免对授权用户干扰的前提下,如何将认知网络性能最优化目标与授权用户

的干扰限制条件相结合,获得满足干扰限制条件情况下的性能最优解^[10~12]; (3)在获得较优性能的情况下,保证算法的复杂度适于在实际系统中采用^[13]. 文献[8~12]研究了多天线认知无线网络中的下衬式频谱共享方法,指出这些方法可以有效地提高系统频谱效率,但是他们都未能同时解决以上三方面的问题. 文献[13]综合考虑了避免干扰和降低算法复杂度两个方面的问题,给出了仅存在一个单天线授权用户,并且认知用户信道为 MISO 时的信道分配和发射信号相关矩阵的闭式解;对于认知用户为 MIMO 的情况给出了直接奇异值分解(Direct-channel Singular Value Decomposition, D-SVD)、映射奇异值分解(Projected-channel Singular Value Decomposition, P-SVD)和混合奇异值分解(Hybrid D-SVD/P-SVD, H-SVD)三种次优算法. 之后,还将这些结果扩展到了网络中有多个单天线授权用户的情况. 但是,文章并没有对网络中存在多个认知用户这一更为普遍的情况进行讨论,未能获得认知网络的多用户分集,给认知网络容量造成了一定损失.

本文综合考虑以上三个方面的要求,在文献[13]的基础上,提出一种针对多天线多用户认知无线网络场景,在保证授权用户服务质量要求的前提下,以认知用户总吞吐量最大化为目标的基于 F 范数的频谱共享方法. 该方法利用信道矩阵的 F 范数选择认知用户以获得认知网络的多用户分集增益,并采用两次选择的方式降低算法的复杂度,通过将认知用户的发射信号投射到干扰信道的零空间来避免认知用户对授权用户的干扰,对认知用户的信道矩阵采用奇异值分解方法使其转化为并行独立信道,并使用注水功率分配方法增大系统容量. 与已有算法相比较,本文算法利用了认知网络的多用户分集增益,并且对用户选择方法进行简化,在计算复杂度可接受的情况下提高了系统性能.

2 系统描述

2.1 系统模型

在本文中,我们假设所有认知(Cognitive Radio, CR)用户均为合作用户,即用户自愿地以网络性能最优为目标,并且尽可能减少对其他用户的影响. 一个单小区多用户的授权系统中,授权(Primary, PR)用户个数为 K_p ,每个用户有 N_p 根天线. CR 用户个数为 K_c ,每个用户有 N_c 根天线,基站(Base Station, BS)天线数为 M . 本文中假设 $N_c \geq N_p + 1$. 假设某一时刻某一频段上只有一个 PR 用户接入,多个 PR 用户接入的情况可以由此进行扩展. 设授权系统是由 BS 统一控制的集中式网络,而认知系统具有点对点通信的自组织网络结构. 网络结构如图 1 所示. 假设此时刻接入的是第 l 个 PR 用户, G_l 和 $G_{l,k}$ 分别是第 l 个 PR 用户和第 k 个 CR 用户对中

的接收端与 BS 之间的信道矩阵, $H_{l,k}$ 和 $H_{c,k}$ 分别是第 k 个 CR 用户对中的发射端与第 l 个 PR 用户之间的信道矩阵和第 k 对 CR 用户之间的信道矩阵.

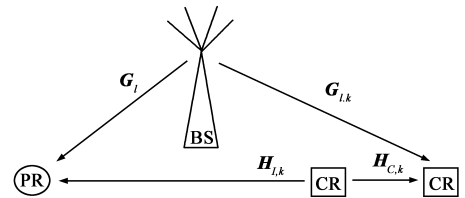


图1 认知无线网络

如果认知网络希望使用 PR 用户 l 所在频段进行通信,设第 k 个 CR 用户对发射端发送的信号为 x_k . 设此时 BS 向第 l 个 PR 用户发射的信号为 s_l ,则该 PR 用户接收到的信号为

$$r_l = G_l s_l + H_{l,k} x_k + n_l \quad (1)$$

第 k 个 CR 用户对接收端收到的信号为

$$y_k = H_{c,k} x_k + G_{l,k} s_l + z_k \quad (2)$$

其中, n_l 和 z_k 分别表示第 l 个 PR 用户和第 k 个 CR 用户接收到的加性高斯白噪声. 最优化问题的目标及数学模型将在下一小节讨论.

2.2 频谱共享问题的数学模型

频谱共享优化问题的目标: 认知网络吞吐量最大化. 条件: CR 用户总功率满足限制; CR 用户对 PR 用户的干扰满足限制. 设第 k 对 CR 用户发射信号的自相关矩阵为 $R_k = E[x_k x_k^H]$, 则频谱共享算法的目的就是选择最优的 k 并设计适当的 R_k , 使系统性能最优. 值得注意的是, 式(1)(2)右边第二项均为干扰项. 消除式(1)和(2)右边的第二项是频谱共享算法的一个重要部分. 频谱共享问题的数学模型为

$$\begin{aligned} \max(C) &= \sum_k \max_{R_k} \log_2 \left| I + \frac{H_{c,k} R_k H_{c,k}^H}{I + G_{l,k} S G_{l,k}^H} \right| \\ \text{s. t. } & \text{Tr}(R_k) \leq P \\ & \text{Tr}(H_{l,k} R_k H_{l,k}^H) \leq \Gamma_k, \quad k = 1, \dots, K_c \\ & R_k \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 S 是 BS 发射信号的自相关矩阵. 由于在实际系统中, CR 用户难以得到 BS 的发射信号信息, 因此本文将干扰项 $G_{l,k} S G_{l,k}^H$ 作为噪声处理. 对式(3)中的凸优化问题可以利用内点法进行求解, 但是这种方法计算量很大^[13], 难以在实际系统中使用, 因此目前大多数文献都将焦点集中在设计简便可行的次优化算法上. 为了便于对 R_k 进行设计, 对其进行奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD), 得到 $R_k = v_k p_k v_k^H$, 将问题转化为设计 v_k 和 p_k ^[13].

3 基于 F 范数的频谱共享方法

在本文中,我们假设每个 CR 用户都能够感知到他

与所有 PR 用户的信道状态信息 (CSI), 即 $\mathbf{H}_{l,k}$, 与文献 [13] 中的假设一致. 本文中采用文献 [13] 中的零空间映射方法来避免 CR 用户对 PR 用户的干扰, 但是, 由于文献 [13] 并没有考虑网络中存在多个 CR 用户对这一更为普遍的情况, 所以本文加入了 CR 用户选择, 希望选择等效信道 SVD 后, 各个奇异值的平方和 (也就是通过该信道信号的功率增益) 最大的 CR 用户对进行通信, 从而获得比文献 [13] 中更大的认知网络吞吐量. 这也类似于传统多用户系统中的“多用户分集”^[14] 增益.

由于对每一个 CR 用户对映射后的等效信道进行 SVD 会带来高计算复杂度, 因此, 我们希望对其进行简化. 利用矩阵奇异值性质: $\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_r^2 = \|\mathbf{A}\|_F^2$, 即矩阵 \mathbf{A} 所有奇异值的平方和等于 \mathbf{A} 的 F 范数的平方, 可以得到, 计算每对认知用户等效信道矩阵的 F 范数, 按照范数值进行选择, 就能够获得相同的多用户分集增益.

为了选择 CR 用户对, 在计算等效信道时, 需对所有干扰信道 $\mathbf{H}_{l,k}$, $k = 1, 2, \dots, K_c$ 进行 SVD, 在 CR 用户数较多时也会导致高计算复杂度, 因此希望进一步简化. 第 k 对 CR 用户的等效信道矩阵为 $\mathbf{H}_{eq,k} = \mathbf{H}_{C,k}\mathbf{v}_{0,k}$, 其中 $\mathbf{v}_{0,k}$ 是 $\mathbf{H}_{l,k}$ 的零空间. 由于 $\mathbf{v}_{0,k}$ 是酉阵的一部分, 可以看出, $\|\mathbf{H}_{eq,k}\|_F^2 = \|\mathbf{H}_{C,k}\mathbf{v}_{0,k}\|_F^2$ 的大小主要由 $\|\mathbf{H}_{C,k}\|_F^2$ 决定. 因此, 我们将用户选择分为两步, 首先选出 K_{opt} 个 $\|\mathbf{H}_{C,k}\|_F^2$ 最大的 CR 用户对, 然后在其中选出等效信道 F 范数最大的用户对. 这样就有效地降低了计算复杂度.

本文给出的频谱共享算法如下:

第一步, 选出 K_{opt} 个 $\|\mathbf{H}_{C,k}\|_F^2$ 最大的 CR 用户对, 设选中的用户对序号集合为 \mathcal{A} .

第二步, 将选出的 CR 用户的信道矩阵映射到干扰信道的零空间, 得到等效信道. 首先求出 $\mathbf{H}_{l,k}$ 的零空间 $\mathbf{v}_{0,k}$, 对 $\mathbf{H}_{l,k}$ 进行奇异值分解, 得到

$$\text{svd}(\mathbf{H}_{l,k}) = \mathbf{u}\mathbf{\Sigma}\mathbf{v}^H = \mathbf{u}_{l,k}[\mathbf{\Sigma}_{l,k} \quad \mathbf{0}]\mathbf{v}_{l,k}^H \quad (4)$$

将矩阵 $\mathbf{\Sigma}$ 中元素全部为 0 的列所对应的 $\mathbf{v}_{l,k}^H$ 中的行矢量 $\mathbf{v}_{0,k}$ 取出, 就构成了 $\mathbf{H}_{l,k}$ 的零空间. 接下来进行映射, 令 $\mathbf{v}_{0,k}$ 为 \mathbf{x}_k 的预编码向量, 可以在接收端将信号分离, 消除 CR 用户对 PR 用户的干扰.

第三步, 在选出的 K_{opt} 个 CR 用户对中选择映射后的等效信道 $\mathbf{H}_{C,k}\mathbf{v}_{0,k}$ 的 F 范数最大的 CR 用户对进行接入, 即 $k^* = \arg \max_{k \in \mathcal{A}} \|\mathbf{H}_{C,k}\mathbf{v}_{0,k}\|$.

第四步, 对选中接入的 CR 用户的发射信号进行预编码, 将其信道转化为独立并行子信道. 对等效信道 $\mathbf{H}_{C,k^*}\mathbf{v}_{0,k^*}$ 进行 SVD, 得到

$$\text{svd}(\mathbf{H}_{C,k^*}\mathbf{v}_{0,k^*}) = \mathbf{u}_{ek^*}\mathbf{\Sigma}_{ek^*}\mathbf{v}_{ek^*}^H \quad (5)$$

为该 CR 用户的信号进行预编码, 即乘以预编码向量

\mathbf{v}_{ek^*} , 在 CR 接收端也采用线性滤波器 $\mathbf{u}_{ek^*}^H$, 得到等效信道为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{H}}_{eq,C,k^*} &= \mathbf{u}_{ek^*}^H \mathbf{H}_{C,k^*} \mathbf{v}_{0,k^*} \mathbf{v}_{ek^*}^H \\ &= \mathbf{u}_{ek^*}^H (\mathbf{u}_{ek^*} \mathbf{\Sigma}_{ek^*} \mathbf{v}_{ek^*}^H) \mathbf{v}_{ek^*}^H = \mathbf{\Sigma}_{ek^*} \end{aligned} \quad (6)$$

$\mathbf{\Sigma}_{ek^*}$ 是一个对角阵, 于是将 CR 用户的信道矩阵转化成了一系列并行信道, 并消除了 CR 用户对 PR 用户的干扰.

至此, 我们令 $\mathbf{v}_k = \mathbf{v}_{0,k^*} \mathbf{v}_{ek^*}$, CR 接收端也采用线性滤波器 $\mathbf{u}_{ek^*}^H$, 于是将优化问题转化为并行独立信道下的功率分配问题, 即

$$\begin{aligned} \max(C) &= \max \sum_i \left(1 + \frac{P_{i,k^*} \zeta_{i,ek^*}}{\sigma^2}\right) \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{i,k^*} P_{i,k^*} \leq P \end{aligned} \quad (7)$$

第五步, 应用注水原理, 第 k^* 个 CR 用户的第 i 个子信道上的功率为

$$P_{i,k^*} = \mu - \frac{1}{\zeta_{i,ek^*}} = \frac{1}{N_e} \left(P + \sum_{i=1}^{N_e} \frac{1}{\zeta_{i,ek^*}} \right) - \frac{1}{\zeta_{i,ek^*}} \quad (8)$$

注水线为

$$\mu = \frac{1}{N_e} \left(P + \sum_{i=1}^{N_e} \frac{1}{\zeta_{i,ek^*}} \right) \quad (9)$$

其中 ζ_{i,ek^*} 为 $\mathbf{\Sigma}_{ek^*}$ 对角线上的第 i 个元素, N_e 为等效子信道总数.

4 性能分析

4.1 各态历经容量性能分析

系统容量是各激活用户容量之和. 本文中, 每个时隙只选择一对 CR 用户接入, 在经过用户间干扰消除和用户内部信道矩阵对角化操作后, 系统容量就等于该接入用户对各个子信道容量之和, 即

$$\begin{aligned} C &= \sum_{i=1}^{N_e} \log_2 \left(1 + \frac{P_{i,k^*} \zeta_{i,ek^*}}{\sigma^2} \right) \\ &= \sum_{i=1}^{N_e} \log_2 \left(1 + \frac{\left(\frac{1}{N_e} \left(P + \sum_{i=1}^{N_e} \frac{1}{\zeta_{i,ek^*}} \right) - \frac{1}{\zeta_{i,ek^*}} \right) \zeta_{i,ek^*}}{\sigma^2} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $P_{i,k^*} = \mu - \frac{1}{\zeta_{i,ek^*}} = \frac{1}{N_e} \left(P + \sum_{i=1}^{N_e} \frac{1}{\zeta_{i,ek^*}} \right) - \frac{1}{\zeta_{i,ek^*}}$,

注水线 $\mu = \frac{1}{N_e} \left(P + \sum_{i=1}^{N_e} \frac{1}{\zeta_{i,ek^*}} \right)$, N_e 为等效子信道总数.

由上式可以看出, 算法的系统容量与信道衰落系数、噪声系数等参数有很大关系. 我们将在第 5 节中, 以各态历经容量为性能指标, 确定典型参数 (热噪声系数等), 然后在大量随机信道衰落条件下通过统计的方式

比较各算法的平均性能.

4.2 复杂度分析

本文算法分为五个部分,选择 CR 用户、寻找干扰信道零空间、二次选择 CR 用户,CR 用户等效信道奇异值分解及注水功率分配.设一次加法或一次乘法运算所需时间为一个单位时间,一个 $m \times n$ 的矩阵进行奇异值分解所需的时间为 $O(n^2m)$.选择 CR 用户的过程也就是计算各 CR 用户对信道矩阵的 F 范数的过程,需要的时间为 $O(N_c^2K_c)$;寻找干扰信道零空间需要的时间为 $O(N_c^2N_pK_{opt})$;二次选择 CR 用户所需的时间为 $O(N_c^2K_{opt})$;CR 用户等效信道奇异值分解所需时间为 $O(N_c^3)$;注水功率分配所需时间为 $O(N_c)$.因此,本文算法所需的时间为 $O(N_c^2K_c) + O(N_c^2N_pK_{opt}) + O(N_c^2K_{opt}) + O(N_c^3) + O(N_c)$,即 $\max(O(N_c^2K_c), O(N_c^2N_pK_{opt}))$.表 1 中给出了四种频谱共享方法的复杂度.

表 1 四种频谱共享方法的复杂度

	本文算法	H-SVD	D-SVD	P-SVD
选择	$O(N_c^2K_c)$	-	-	-
投影	$O(N_c^2N_pK_{opt})$	$O(N_c^2N_p)$	-	$O(N_c^2N_p)$
选择	$O(N_c^2K_{opt})$	-	-	-
SVD	$O(N_c^3)$	$O(N_c^3)$	$O(N_c^3)$	$O(N_c^3)$
注水	$O(N_c)$	$O(N_c)$	$O(N_c)$	$O(N_c)$
合计	$\max\left(O(N_c^2K_c), O(N_c^2N_pK_{opt})\right)$	$O(N_c^3)$	$O(N_c^3)$	$O(N_c^3)$

由表 1 可以看出,为认知用户对数 K_c 和 K_{opt} 选择适当的值,就可以在计算复杂度可接受的情况下得到比其它三种方法更好的性能.对 K_c 和 K_{opt} 的选择主要考虑系统性能与算法复杂度之间的折衷.根据表 1,由于本文算法的复杂度为 $\max(O(N_c^2K_c), O(N_c^2N_pK_{opt}))$,因此可以根据具体情况,通过计算选择可以承受的最大复杂度情况下的 K_c 和 K_{opt} 值.

5 仿真结果及分析

在仿真中,为了简化,我们参照文献[11]中的场景和信道衰落模型,假设 BS 与 PR 用户、BS 与 CR 用户接收端、PR 用户与 CR 用户发射端以及 CR 用户对之间的距离均相等,且其大尺度衰落服从相同的统计特性,因此,可以设 $\mathbf{H}_{C,k}$ 、 $\mathbf{H}_{I,k}$ 和 \mathbf{G}_l 中的元素均为均值为 0,方差为 1 的独立同分布复高斯随机变量,在一次数据发送过程中保持不变,各数据块之间相互独立.噪声的相关矩阵为单位阵.设 BS 天线数为 4,PR 用户天线数为 2,CR 用户天线数为 4.系统中共有 10 对 CR 用户.图 2 和图 3 分别给出了采用各种频谱共享方法时认知网络各态历经容量和 PR 用户的中断概率.图 2 的横坐标为认知发射端的总发射功率,从 1w(0dBw)到 100w(20dBw)

进行变化,此时 BS 的总发射功率固定为 50w;图 3 的横坐标为 BS 的总发射功率,从 1w(0dBw)到 100w(20dBw)进行变化,此时认知发射端的发射功率固定为 50w.

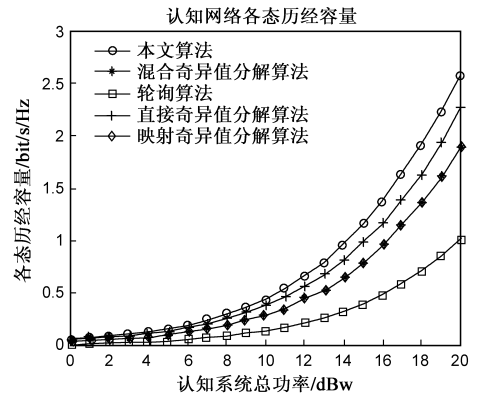


图 2 认知网络各态历经容量

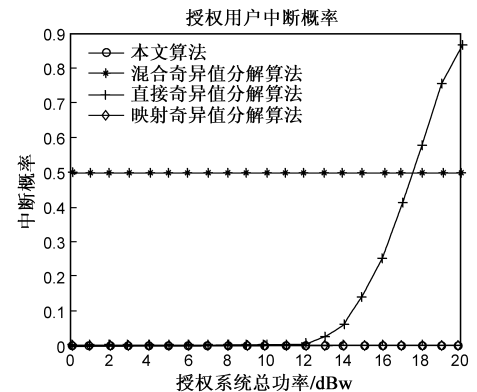


图 3 授权用户中断概率

由图 2 和图 3 可以看出,采用本文算法获得了多用户分集增益,利用了 $N_c - N_p$ 个空间子信道,所得到的认知网络各态历经容量性能随总发射功率增大而优于 D-SVD^[13]等算法,并且保持了非常小的授权用户中断概率.本文算法与 D-SVD 算法的差异在于本文方法将 CR 用户信号映射在干扰信道的零空间上,在一定程度上避免了 CR 用户信号对 PR 用户的干扰,因而降低了 PR 用户的中断概率;但是这种映射会造成 CR 用户信号功率的损失,正如 P-SVD 与 D-SVD 相比,性能下降.针对这一问题,本文算法增加了 CR 用户对选择的操作,获得了多用户分集增益,在复杂度可接受的情况下得到了比 D-SVD 方法更大的认知网络容量. H-SVD 方法也利用零空间映射的方法进行干扰消除,但是只消除了一部分空间子信道上的干扰^[13],因此 PR 用户的中断概率比本文算法及 P-SVD 算法大.轮询方法在每个时隙轮流选择用户进行发送,未利用多用户分集以及功率分配方法,因此系统容量较小.

图 4 给出了选取不同的 K_{opt} 时认知网络各态历经容量,图中的横坐标为认知发射端的总发射功率,从 1w(0dBw)到 100w(20dBw)进行变化,此时 BS 的总发射

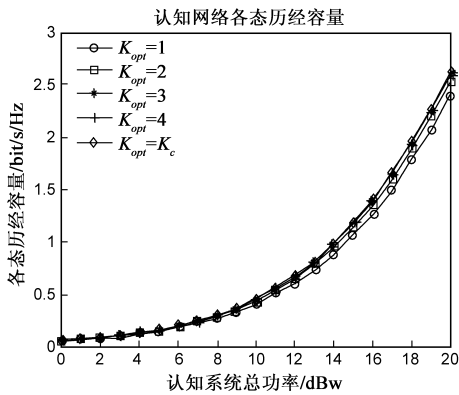


图4 选取不同的 K_{opt} 时的认知网络各态历经容量

功率固定为 50w. 由图 4 可以看出, 当 $K_{opt} = 3$ 时, 所得到的性能与 $K_{opt} = K_c$ 时所得性能基本相同. 以本文仿真为例, 选取 $K_{opt} = 3$ 时, 本文算法计算复杂度为 $O(N_c^2 K_c)$, H-SVD、D-SVD 和 P-SVD 算法计算复杂度均为 $O(N_c^3)$, 只要选择 CR 用户对数 K_c 与 CR 用户天线数 N_c 的数量级一致, 本文算法与已有算法的复杂度就可以保持在同一数量级. 因此, 与已有方法相比, 本文方法可以在得到更优性能的同时, 保证可接受的计算复杂度.

在实际系统中, 一个 CR 用户获得所有 CR 用户对的信道矩阵存在困难. 我们可以采用一些方法来辅助信道信息的获得. 文献[15]中提出, 在多个 CR 对共存的认知系统中, 可以利用频谱管理器来进行协作感知, 即将各个 CR 感知到的信道状态信息通过一个无差错的报告信道发送到频谱管理器, 由频谱管理器进行判决后将结果广播给各个 CR. 因此, 可以借助频谱管理器进行认知用户对间信道状态信息的交换, 将各个 CR 对之间的信道状态信息发送给频谱管理器, 再由频谱管理器进行广播, 使得网络中的 CR 用户知道其他 CR 用户对的信道状态信息.

尽管如此, 由于信道状态信息数据量大, 只能周期性地广播, 因此会产生误差. 图 5-8 用于描述存在信道信息误差时的算法性能. 由仿真结果可以看出, 本

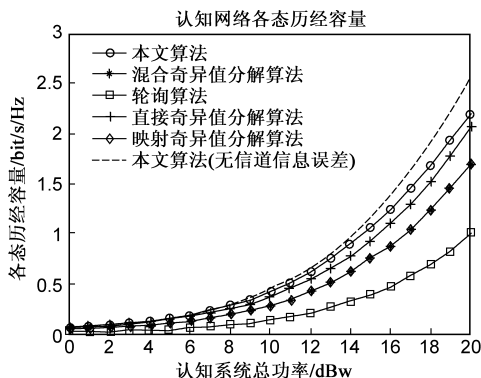


图5 信道信息误差方差为0.1时的认知网络各态历经容量

文算法在这些情况下性能下降, 但是仍然优于其他几种算法的性能.

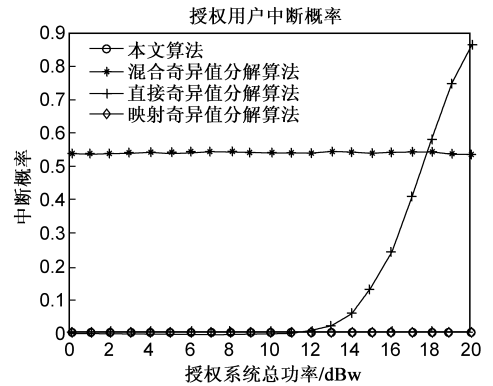


图6 信道信息误差方差为0.1时的授权用户中断概率

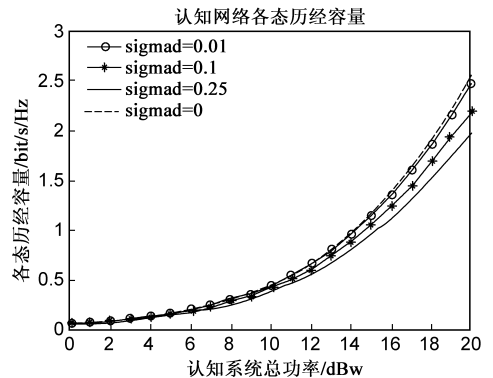


图7 信道信息误差方差变化时的认知网络各态历经容量

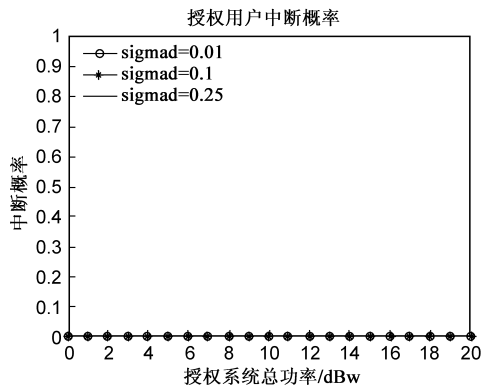


图8 信道信息误差方差变化时的授权用户中断概率

另一方面, 在一些理论分析及仿真中, 研究者采用假设信道信息已知的方法来获得实际传输情况的性能上限, 具有参考价值^[13].

6 结论

本文提出了一种在保证授权用户服务质量要求的前提下, 以认知用户总吞吐量最大化为目标的基于 F 范数的频谱共享方法. 与已有的认知无线网络频谱共享策略相比较, 该方法利用信道矩阵的 F 范数选择认知用户以获得认知网络的多用户分集增益, 并采用

两次选择的方式降低算法的复杂度,能够在保证复杂度可接受的情况下使认知网络获得更大的各态历经容量,降低授权用户的中断概率,对于实际认知无线网络频谱共享方法的设计,具有一定的参考价值.本文结论可以扩展到某一频段上存在多个授权用户同时进行通信的情况.为了更加符合实际系统的要求,应当进一步考虑信道状态信息的获取方法和不完全信道状态信息情况下的算法修正.

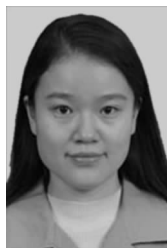
参考文献:

- [1] J MITOLA. Cognitive Radio: an Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio [D]. PhD Dissertation, KTH, Stockholm, Sweden, Dec. 2000.
- [2] 刘琪, 苏伟, 李承恕. 基于跳频的自适应频谱共享方案 [J]. 电子学报, 2010, 34(1): 105 - 110.
Liu Qi, Su Wei, Li Cheng-shu. Adaptive spectrum sharing scheme based on FH communications [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 34(1): 105 - 110. (in Chinese)
- [3] 马志 ■, 曹志刚. 认知无线网络用户合作机会接入方案的研究 [J]. 电子学报, 2009, 37(4): 678 - 683.
Ma Zhi-yao, Cao Zhi-gang. Secondary user cooperative opportunistic access scheme in cognitive radio networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 678 - 683. (in Chinese)
- [4] 张然然, 刘元安, 等. 认知无线电下行链路中的 OFDMA 资源分配算法 [J]. 电子学报, 2010, 38(3): 632 - 637.
Zhang Ran-ran, Liu Yuan-an, et al. OFDMA-based resource allocation for downlink cognitive radio systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 632 - 637. (in Chinese)
- [5] Federal Communications Commission, Spectrum Policy Task Force, ET Docket no. 02-135 Memorandum opinion and order [OL]. http://fjallfoss.fcc.gov/edocs-public/attach_match/FCC-02-135A1.pdf, 2002.
- [6] N PRASAD, X D WANG. Rate allocation in multiuser cognitive radio systems with successive group decoding [A]. Proceedings of the 2008 Information Theory and Applications Workshop [C]. USA, 2008. 438 - 443.
- [7] 陈东, 李建东, 李维英, 马静. 认知无线电环境下 MIMO-OFDM 系统的无线资源管理 [J]. 电子学报, 2007, 35(6A): 60 - 63.
Chen Dong, Li Jian-dong, Li Wei-ying, Ma Jing. Radio resource management for MIMO-OFDM system in cognitive radio context [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6A): 60 - 63. (in Chinese)
- [8] K HAMDI, W ZHANG, K B LETAIEF. Joint beamforming and scheduling in cognitive radio networks [A]. Proceedings of the 2007 Global Telecommunications Conference [C]. USA, 2007. 2977 - 2981.
- [9] K HAMDI, W ZHANG, K B LETAIEF. Low-complexity an-

tenna selection and user scheduling in cognitive MIMO broadcast systems [A]. Proceedings of the International Conference on Communications [C]. China, 2008. 4038 - 4042.

- [10] R SOUNDARARAJAN, S VISHWANATH. Adaptive sum power iterative waterfilling for MIMO cognitive radio channels [A]. Proceedings of the 2008 International Conference on Communications [C]. China, 2008. 1060 - 1064.
- [11] L ZHANG, Y XIN, Y C LIANG. Weighted sum rate optimization for cognitive radio MIMO broadcast channels [A]. Proceedings of the International Conference on Communications [C]. China, 2008. 3679 - 3683.
- [12] L ZHANG, Y C LIANG, Y XIN. Joint beamforming and power allocation for multiple access channels in cognitive radio networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1): 38 - 51.
- [13] R ZHANG, Y C LIANG. Exploiting multi-antennas for opportunistic spectrum sharing in cognitive radio networks [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008, 2(1): 88 - 101.
- [14] 唐冬, 杨亮, 张广驰等. 空间相关对发射分集系统的多用户分集性能的影响 [J]. 电子学报, 2006, 34(4): 761 - 764.
Tang Dong, Yang Liang, Zhang Guang-chi, et al. Impact of spatial correlation on the combination of transmit diversity and multiuser diversity [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(4): 761 - 764. (in Chinese)
- [15] M D RENZO, F GRAZIOSI, F SANTUCCI. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks over correlated log-normal shadowing [A]. IEEE 69th Vehicular Technology Conference [C]. Spain, 2009. 1 - 5.

作者简介:



荣 玫 女. 1981 年 9 月出生于陕西西安. 2003 年在西安交通大学获得信息与通信工程专业学士学位. 现为西安交通大学信息与通信工程专业博士研究生, 主要研究方向为认知无线电频谱共享策略.

E-mail: rongmei@mail.xjtu.edu.cn



朱世华 男. 1950 年出生于浙江义乌. 西安交通大学教授、博士生导师, 长期从事数字传输、移动通信及宽带通信网的研究.