

基于合作博弈的多信道认知无线网络中的频谱共享算法

王正强, 蒋铃鸽, 何晨

(上海交通大学 电子工程系, 上海 200240)

摘要: 采用合作博弈对多信道认知无线网络中的频谱共享问题进行了建模分析, 提出了次用户在各信道上的信干噪比乘积作为合作博弈的效用函数。次用户在各信道上保证对主用户的干扰小于一定门限的要求下, 通过最大化各自效用函数的乘积来进行功率分配。由于最大化次用户效用函数的乘积问题是非凸的, 通过变量替换将其转化为了一个等价的凸优化问题, 利用该凸优化问题的对偶分解, 提出了一种次用户间的频谱共享算法。仿真结果表明, 所提算法在次用户和速率与公平性之间进行了有效折中。

关键词: 认知无线网络; 频谱共享; 功率分配; 合作博弈

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)02-0070-06

Spectrum sharing algorithm in multi-channel cognitive radio network based on cooperative game theoretic

WANG Zheng-qiang, JIANG Ling-ge, HE Chen

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Spectrum sharing problem in multi-channel cognitive radio networks was modeled as a cooperative game. A utility function based on the product of the signal to interference plus noise ratio (SINR) was proposed. The power allocation of secondary users was determined by maximizing the product of the utility function to ensure that the interference power to the primary user is under a certain threshold in each channel. As the problem of maximization the product of the utility function of secondary users was non-convex, it was transformed into an equivalent convex optimization problem by variable alternation. A spectrum sharing algorithm was proposed based on the dual decomposition of the convex optimization problem. Simulation results show that the proposed algorithm achieves an effective compromise between the sum rate and the fairness among the secondary users.

Key words: cognitive radio network; spectrum sharing; power allocation; cooperative game

1 引言

随着各种无线业务需求的不断发展, 现有的频谱资源变得越来越稀缺, 已经不能满足通信业务需求。同时, 美国联邦通信委员会(FCC, federal communications commission)发现在大部分时候现有的频谱资源的利用率很低^[1]。因此, 需要一种更有效的方式来管理现有的频谱资源。为此, 人们提出了认知无线电^[2]技术来改进现有固定的频谱资源分配方式

的不足, 提高频谱的利用效率。认知无线网络是一个能够感知周围频谱环境的智能无线通信系统, 它能够根据环境的变化自适应地调整发射功率、载波频率、编码策略等参数以提高自身网络性能和避免与降低对主用户网络的干扰^[3]。

在保证次用户网络对于主用户网络的干扰低于一定门限的情况下, 次用户可以通过频谱潜伏 (underlay) 模式^[4]与主用户网络共存使用。在频谱潜伏模式下, 有效的频谱共享算法不但可以降低次用

收稿日期: 2012-07-31; 修回日期: 2013-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60832009,61172067,61371086); 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX03003-001-03, 2010ZX03003-002-03)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(60832009,61172067,61371086); The Important National Science & Technology Specific Projects (2011ZX03003-001-03, 2010ZX03003-002-03)

户对于主用户的干扰，同时可以降低次用户间的干扰。Long-Bao Le 等在文献[5]中考虑了在保证主用户干扰约束和次用户服务质量 (QoS) 的情况下，基于最优化理论研究了单信道的认知网络中的资源分配问题。

博弈论^[6]是数学的一个重要分支。近年来，它被广泛应用到了经济学、计算机科学、通信学等众多学科领域。基于博弈论对认知网络频谱共享问题进行建模和分析已经有了一些研究成果^[7-9]。Yong Xiao 等在文献[7]中基于非合作博弈研究了多跳中继认知网络中的最优功率分配问题。Chun-Gang Yang 等在文献[8]中研究了在干扰门限约束条件下，基于合作博弈的认知网络中的功率控制算法。Dusit Niyato 等在文献[9]中基于动态博弈研究了认知网络中的频谱共享问题。其中，文献[7,8]的研究都是对于单信道的认知网络进行最优功率分配算法设计，而文献[9]中的研究是基于多信道频谱共享模型，但主要是从经济学角度考虑，并没有考虑物理层功率控制对于认知网络性能的影响。

考虑多信道认知网络中的频谱共享问题，本文首先建立了认知无线网络频谱共享的系统模型。该频谱共享模型考虑了次用户在各信道对主用户的干扰约束，当次用户在某一给定的信道上对于主用户的干扰小于一定的门限，那么次用户可以接入该信道。基于合作博弈理论来建模和分析次用户间的频谱共享。在合作博弈中，各次用户的效用函数为自己在各个信道上的信干扰噪声比 (SINR) 的乘积，次用户之间通过最大化各自效用函数乘积来实现频谱共享。由于次用户之间的效用函数乘积最大化问题本身是非凸的，通过变量替换将其转化为等价的凸优化问题，提出了基于对偶分解的功率分配算法来实现次用户之间的频谱共享。通过仿真，所提算法在次用户和速率与公平性间获得了有效的折中。

2 认知无线网络系统模型

考虑如图 1 所示的认知网络：其中包含有 K 个主用户和 N 个次用户。 N 个次用户可以在保证主用户服务质量的情况下接入主用户之间正交的 M 个信道。记主用户 k 占用的信道集合为 Ω_k ， $\{1, \dots, M\} = \bigcup_{i=1}^K \Omega_i$ ，次用户 n 在第 m 个信道的发射功率为 p_n^m ，次用户 i 到主用户 j 和次用户 j 在信道 n 上的链路增益分别为： l_{ij}^n 和 h_{ij}^n 。

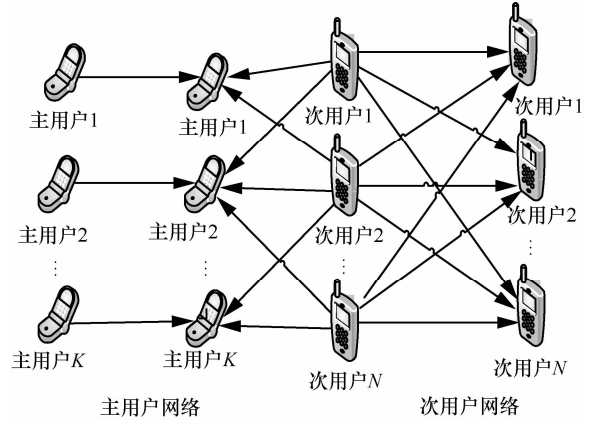


图 1 频谱共享模型

假设在各信道保证主用户服务质量的前提下，所有次用户可以共享主用户的信道。为了保证信道 i 上主用户的服务质量，所有共享信道 i 的次用户对使用信道 i 的主用户的总干扰需要小于一定门限。记 $P_n = (p_n^1, \dots, p_n^M)$ 为次用户 n 在 M 个信道的功率分配向量，那么次用户 n 在信道 m 上的信噪比为

$$\gamma_n^m = \frac{h_{nn}^m p_n^m}{\sum_{j \neq n} h_{jn}^m p_j^m + \sigma_{mn}^2} \quad (1)$$

其中， p_n^m 是第 n 个次用户在信道 m 上的发射功率， σ_{mn}^2 为次用户 n 在信道 m 上的背景噪声和使用信道 m 的主用户的干扰功率之和。

设第 m 个信道上主用户接收到来自次用户网络的总干扰功率限制为 $\Gamma_m (m=1, 2, \dots, M)$ ，即有如下 M 个不等式约束

$$\sum_{i=1}^N p_i^m l_{ik}^m \leq \Gamma_m \quad (m=1, 2, \dots, M, m \in \Omega_k)$$

其中， $m \in \Omega_k$ 表示信道 m 被主用户 k 使用。

次用户 i 的发射总功率约束

$$0 \leq \sum_{j=1}^M p_i^j \leq P_i^{\max} \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

其中， P_i^{\max} 为次用户 i 的最大发射功率。

3 基于合作博弈的频谱共享

基于合作博弈将 N 个次用户间的频谱共享问题建模为博弈问题 G 。设 N 为参与博弈的次用户， Ω_i 为次用户 i 可能采取的策略集合， U_i 为次用户 i 在某种策略组合所获得的效用，那么该合作博弈问题可以表示成 $G = \{N, \{\Omega_i\}_{i \in N}, \{U_i\}\}$ 。

带干扰门限约束的多信道认知无线网络的频谱共享问题可以建模成如下博弈问题。

参与者: $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, N 个次用户;

策略集合: 设第 i 个次用户的功率调整范围为 $S_i = [0, P_i^{\max}]$; $S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_N$; N 个次用户的干扰约束集合为

$$\Omega = S \cap \{(P_1, \dots, P_n) \mid \sum_{i=1}^N p_i^m l_{ik}^m \leq \Gamma_m, m=1, 2, \dots, M\}$$

效用函数 U_i : 表征了次用户 i 对某种策略的偏好。采用如下效用函数

$$U_i(P_i, P_{-i}) = \prod_{m=1}^M \gamma_i^m \quad (2)$$

其中, P_i 表示次用户 i 的功率分配向量, P_{-i} 表示除去次用户 i 之外的其余次用户的功率分配向量。效用函数由次用户在各信道的信干扰噪声比的乘积组成。令 $\Omega(P_{-i})$ 为次用户 i 的策略空间, 利用合作博弈的纳什谈判解^[10]的性质, 多信道认知网络中的频谱共享问题可以转化为如下优化问题

$$\begin{aligned} & \max_{P_i \in \Omega_i(P_{-i})} \prod_{i=1}^M U_i(P_i, P_{-i}) \\ & \text{s.t.} \sum_{i=1}^N p_i^m l_{ik}^m \leq \Gamma_m, m=1, 2, \dots, M \\ & 0 \leq \sum_{j=1}^M p_i^j \leq P_i^{\max}, i=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

4 多信道频谱共享算法

对于优化问题(式(3))先转化为等价的新优化问题, 然后通过变量替换将该新优化问题转化为等价的凸优化问题进行求解, 从而提出基于对偶分解的频谱共享算法。

利用对数函数的单调性, 优化问题(式(3))的目标函数取对数后获得的新优化问题的最优解与式(3)保持不变, 又因为 $\log \prod_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \log x_i$, 所以式(3)等价于如下优化问题

$$\begin{aligned} & \max : \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log \left(\frac{h_{nm}^m p_n^m}{\sum_{j \neq n} h_{jn}^m p_j^m + \sigma_{mn}^2} \right) \\ & \text{s.t.} \sum_{i=1}^N p_i^m l_{ik}^m \leq \Gamma_m, m=1, 2, \dots, M \\ & 0 \leq \sum_{j=1}^M p_i^j \leq P_i^{\max}, i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

令 $p_n^m = e^{s_n^m}$, 式(4)等价于如下问题

$$\begin{aligned} & \max : \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log \left(\frac{h_{nm}^m e^{s_n^m}}{\sum_{j \neq n} h_{jn}^m e^{s_j^m} + \sigma_{mn}^2} \right) \\ & \text{s.t.} \sum_{i=1}^N e^{s_i^m} l_{ik}^m \leq \Gamma_m, m=1, 2, \dots, M \\ & 0 \leq \sum_{j=1}^M e^{s_i^j} \leq P_i^{\max}, i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)进一步等价于如下问题

$$\begin{aligned} & \min : \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log \left(\frac{\sum_{j \neq n} h_{jn}^m e^{s_j^m} + \sigma_{mn}^2}{h_{nm}^m e^{s_n^m}} \right) \\ & \text{s.t.} \sum_{i=1}^N e^{s_i^m} l_{ik}^m \leq \Gamma_m, m=1, 2, \dots, M \\ & 0 \leq \sum_{j=1}^M e^{s_i^j} \leq P_i^{\max}, i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中的目标函数可以看成多个形式为 $\log \sum_{i=1}^m \exp g_i(x)$ 的函数的和, 又因为当 $g_i(x)$ 为凸函数时, $\log \sum_{i=1}^m \exp g_i(x)$ 是凸函数^[11], 所以式(6)中的目标函数是凸函数; 同时由于式(6)中的约束是凸约束, 因此式(6)是凸优化问题。问题(式(6))的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} & L(S_1, \dots, S_N, \lambda_1, \dots, \lambda_M, \mu_1, \dots, \mu_N) \\ & = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log \left(\frac{\sum_{j \neq n} h_{jn}^m e^{s_j^m} + \sigma_{mn}^2}{h_{nm}^m e^{s_n^m}} \right) - \sum_{m=1}^M \lambda_m \left(\Gamma_m - \sum_{n=1}^N e^{s_n^m} l_{nk}^m \right) - \\ & \quad \sum_{n=1}^N \mu_n \left(P_n^{\max} - \sum_{m=1}^M e^{s_n^m} \right) \\ & = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \log \left(\frac{\sum_{j \neq n} h_{jn}^m e^{s_j^m} + \sigma_{mn}^2}{h_{nm}^m e^{s_n^m}} \right) + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \lambda_m l_{nk}^m e^{s_n^m} - \\ & \quad \sum_{m=1}^M \lambda_m \Gamma_m + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \mu_n e^{s_n^m} - \sum_{n=1}^N \mu_n P_n^{\max} \\ & = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left(\log \left(\frac{\sum_{j \neq n} h_{jn}^m e^{s_j^m} + \sigma_{mn}^2}{h_{nm}^m e^{s_n^m}} \right) + \lambda_m l_{nk}^m e^{s_n^m} + \mu_n e^{s_n^m} \right) - \\ & \quad \sum_{m=1}^M \lambda_m \Gamma_m - \sum_{n=1}^N \mu_n P_n^{\max} \end{aligned}$$

令 $S_i = (s_i^1, \dots, s_i^M)$, 对偶函数可以表示为

$g(\lambda_1, \dots, \lambda_M, \mu_1, \dots, \mu_N) = \min_S L(S_1, \dots, S_N, \lambda_1, \dots, \lambda_M, \mu_1, \dots, \mu_N)$ 对偶优化问题为

$$\begin{aligned} & \max_{\lambda_1, \dots, \lambda_M, \mu_1, \dots, \mu_N} g(\lambda_1, \dots, \lambda_M, \mu_1, \dots, \mu_N) \\ & \text{s.t. } \lambda_i \geq 0, \mu_j \geq 0, 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N \quad (7) \end{aligned}$$

基于对偶优化问题(式(7)), 提出如下多信道频谱共享算法。

1) $t=0$ 时刻, 各次用户 $i=1, \dots, N$ 分别初始化为各个信道的发射功率 $P_i(t)$, 乘子 $\lambda_m(t)$ 和 $\mu_n(t)$ [12] 如下

$$P_i(t) = (p_i^1(t), \dots, p_i^M(t)) = \left(\frac{P_i^{\max}}{M}, \dots, \frac{P_i^{\max}}{M} \right)$$

$$s_i^m(t) = \log p_i^m(t), i \in \{1, 2, \dots, N\}, m \in \{1, \dots, M\}$$

$$\lambda_m(t) = \frac{1}{\sum_{n=1}^N e^{s_n^m(t)} I_{nk}^m}, m \in \{1, \dots, M\}$$

$$\mu_n(t) = \frac{1}{\sum_{m=1}^M e^{s_n^m(t)}}, n \in \{1, \dots, N\}$$

2) 次用户 $n(n=1, \dots, N)$ 分别在信道 $m=1, \dots, M$ 上更新自身的发射功率, 其更新准则为 $p_n^m = e^{s_n^m}$, 其中 $s_n^m(m=1, \dots, M)$ 为如下优化问题

$$\min_{s_n^1, \dots, s_n^M} \sum_{m=1}^M \left(\log \left(\frac{\sum_{j \neq n}^N h_{jn}^m e^{s_j^m} + \sigma_{mm}^2}{h_{nn}^m e^{s_n^m}} \right) + \lambda_m(t) I_{nk}^m e^{s_n^m} + \mu_n(t) e^{s_n^m} \right)$$

的解。

3) 第 $m(m=1, \dots, M)$ 个主用户更新乘子

$$\lambda_m(t+1) = \lambda_m(t) + \alpha(t) \left(\sum_{n=1}^N e^{s_n^m} I_{nk}^m - \Gamma_m \right)$$

并广播给各个次用户。

第 n 个次用户更新乘子

$$\mu_n(t+1) = \mu_n(t) + \alpha(t) \left(\sum_{m=1}^M e^{s_n^m} - P_n^{\max} \right)$$

其中, $\alpha(t)$ 为更新步长, 取 $\alpha(t) = \frac{1}{t}$ 。

4) 如果 $\|\lambda(t+1) - \lambda(t)\| + \|\mu(t+1) - \mu(t)\| \leq \varepsilon$, 算法结束, 其中 ε 为预先给定的收敛精度; 否则回

到步骤 2), 直到算法收敛。

从算法流程可以看出, 所提算法的执行是由各次用户分布式进行。各次用户在测量了其余次用户的干扰和背景噪声的基础上, 通过分布式迭代来更新各自的功率, 直到最后算法收敛。算法中步骤 3) 中的乘子更新起到了对主用户的保护作用。如果某一时次用户对主用户的干扰大于干扰门限, 那么主用户会增加乘子 λ , 从而使次用户在下一轮步骤 2) 中关于功率分配的优化中减少发射功率来保证主用户的服务质量要求。各次用户发送端通过步骤 2) 调整自身的发射功率 $p_n^m = e^{s_n^m}$, 这样各次用户的接收端就能通过测量自身的有用信号 $h_{nn}^m e^{s_n^m}$ 和通过测量干扰项: $\sum_{j \neq n}^N h_{jn}^m e^{s_j^m} + \sigma_{mm}^2$ 来估计出自身的信噪比: $h_{nn}^m e^{s_n^m} / \left(\sum_{j \neq n}^N h_{jn}^m e^{s_j^m} + \sigma_{mm}^2 \right)$ 。

整个算法的信息交互是在次用户与主用户之间进行的, 次用户通过步骤 3) 来侦听主用户反馈的干扰因子, 从而调整自己的乘子, 为下一轮步骤 2) 中次用户之间依次进行功率更新做准备。在步骤 2) 中, 各个次用户只需要通过自身接收端反馈回来的干扰来更新功率。

5 算法仿真

考虑认知网络中次用户随机分布在 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的区域内; 且次用户的发送端距离接收端的距离在 $[100, 150] \text{ m}$ 内均匀分布; 各个次用户的最大发射功率均为 1 W , 可以利用的主用户信道数目为 6 个; 各个信道上主用户可容忍的干扰门限为 10^{-10} W ; 各信道上背景噪声均为 $\sigma^2 = 10^{-11} \text{ W}$; 各个用户间的路径增益均为 $h = K(d/d_0)^{-4}$, $K = 10^{-8}$, $d_0 = 100$ 。用户在各信道上满足方差为 1 的独立瑞利分布, 仿真结果为随机仿真 10^4 次进行平均。将所提算法与基于最大化最小^[13]次用户速率的算法、基于最大化整个认知网络和速率^[14]的算法进行比较。

图 2 给出了随着次用户数目增加, 3 种算法次用户的和速率变化情况。从图 2 可见, 随着用户数目的增加, 3 种算法的和速率都增加, 其中所提算法次用户的和速率介于最大化最小算法和最大化和速率算法之间; 当用户数目大于 7 个时, 3 种算法的和速率趋向于饱和, 这是由于用户数目过多, 此时用户之间的干扰增加导致系统成为一个干扰受限系统, 从而使得系统和速率趋向饱和。所提基

于合作博弈的频谱共享算法使得整个认知网络获得的和速率至少达到了最大和速率算法 82% 的性能；而最大最小算法的和速率受到用户数目变化影响较小，这是由于该算法性能主要受到最差信道次用户的影响，在用户数目等于 10 的时候，其获得的和速率只有基于合作博弈的 12%。

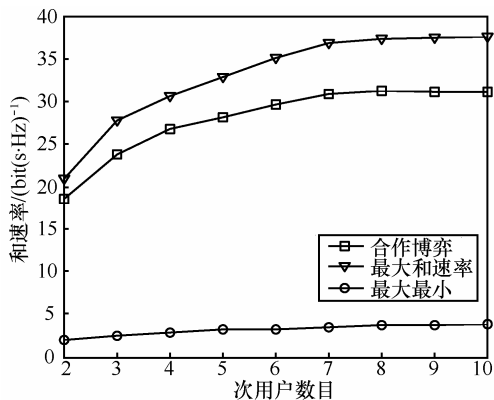


图 2 不同次用户数目下的和速率曲线

图 3 给出了不同次用户数目下，次用户间的公平性曲线的变化情况。采用 Jain's 公平性^[15]指标 $(\sum_{i=1}^K R_i)^2 / (K \sum_{i=1}^K R_i^2)$ ，其中 R_i 为次用户 i 的速率。从图 3 可见，3 种算法的公平性都随着次用户数目的增加而减少，这是由于次用户越多，它们之间可能存在的干扰冲突越大。所提算法获得的公平性介于最大化和速率算法和最大最小算法之间。结合图 2 和图 3 可知，所提算法在次用户的公平性和系统和速率之间进行了一个有效折中。

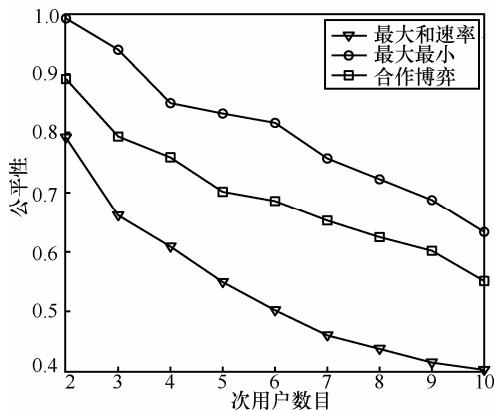


图 3 不同次用户数目下的公平性曲线

图 4 给出了所提算法与次用户随机选择信道接入电视频段的性能仿真比较。系统参数为：电视发射塔高度为 200 m，发射功率为 30 kW，中心频率为

755 MHz，电视接收机距离发射端 20 km，接收天线高度为 3 m，信道带宽为 6 MHz，噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz，电视的链路模型为郊区环境的 Okumura-Hata 模型^[16]。次用户个数为 10 个，它们随机分布在以电视接收机为中心 2 000 m×2 000 m 的区域内，次用户发射端距接收端范围为 500 m，最大发射功率为 100 mW，路径损耗因子为 4，次用户的子信道带宽为 200 kHz，即次用户可以利用的信道数为 30 个。从图 4 看见，随着主用户信噪比需求的增加，基于合作博弈的方法和随机选择算法所获得的次用户的和速率都在减小。这是由于随着主用户信噪比门限的增加，其容许的次用户的干扰就越小，从而限制次用户的发射功率。同时，基于合作博弈的方法优于随机选择的方法。当主用的信噪比需求为数字电视所要求的 23 dB^[17]时候，基于合作方法比随机选择方法所获得的和速率高出了约 2 倍。

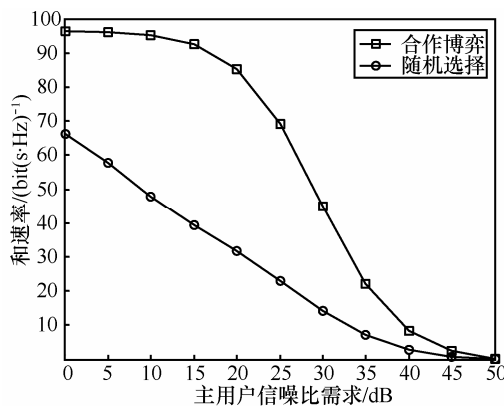


图 4 不同主用户信噪比需求下的和速率曲线

6 结束语

本文考虑次用户在各信道上对于主用户的干扰门限约束，采用合作博弈研究了多信道认知网络中频谱共享问题。通过变量替换将次用户的非凸效用函数最大化问题转化为了等价的凸优化问题，通过等价的凸优化问题的对偶分解，提出了多信道认知网络中的频谱共享算法。仿真表明所提算法在次用户的和速率与公平性之间达到有效的折中。

参考文献：

[1] Federal Comm Commission, Spectrum Policy Task Force[R]. Report ET Docket No 02-135, 2002.
 [2] LIANG Y C, CHEN K C, LI G Y, et al. Cognitive radio networking and communications: an overview[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011,60(7): 3386-3407.

- [3] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [4] ZHAO Q, SADLE B M. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [5] LE L B, EKRAM H. Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12):5306-5315.
- [6] HAN Z, NIYATO D, WALID S, *et al.* Game Theory in Wireless and Communication Networks: Theory, Models, and Application[M]. Cambridge University Press, 2012.
- [7] XIAO Y, BI G A, NIYATO D. Game theoretic analysis for spectrum sharing with multi-hop relaying[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(5):1527-1537.
- [8] YANG C G, LI J D, TIAN Z. Optimal power control for cognitive radio networks under coupled interference constraints: a cooperative game-theoretic perspective[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4):1696-1706.
- [9] NIYATO D, HOSSAIN E. Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(7):2651-2660.
- [10] NASH J. Two-person cooperative games[J]. Econometrica, 1953, 21(1): 128-140.
- [11] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. Cambridge, U K: Cambridge Univ Press, 2004.
- [12] NEDIC A, OZDAGLAR A. Distributed subgradient methods for Multi-Agent Optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(1): 48-61.
- [13] TASSIULAS L, SARKAR S. Maxmin fair scheduling in wireless ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(1): 163- 173.
- [14] BHASKARAN S R, HANLY S V, BADRUDDIN N, *et al.* Maximizing the sum rate in symmetric networks of interfering links[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010,56(9): 4471-4487.
- [15] LAN T, KAO D, CHIANG M, *et al.* An axiomatic theory of fairness for resource allocation[A]. Proceedings of IEEE INFOCOM[C]. San Diego, CA, USA, 2010.1-9.
- [16] MOLISCH A F. Wireless Communications[M]. John Wiley & Sons Ltd, UK, 2011.
- [17] Federal Comm Commission Notice of Proposed Rule Making[R]. ET Docket No 04-113, 2004.

作者简介:



王正强 (1983-), 男, 四川成都人, 上海交通大学博士生, 主要研究方向为认知网络中的资源分配技术。



蒋铃鸽 (1959-), 女, 江苏南京人, 博士, 上海交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为新一代无线通信系统理论与关键技术、无线传感网络的关键技术与应用、通信中的智能信息处理以及自适应信号处理等。



何晨 (1952-), 男, 江苏苏州人, 博士, 上海交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为新一代无线通信系统与信号处理理论、无线传感器网络的理论与关键技术、信息与编码理论等。