

# 联合网络容量与认知用户满意度的 资源分配优化方案

李静叶<sup>1,2</sup>, 罗 涛<sup>1</sup>, 乐光新<sup>1</sup>

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 机会频谱接入技术是提高频谱利用率的一种有效方法, 论文综合考虑信道的时变性、子信道空闲的检测可信度、认知网络与主网络间的互干扰等因素, 建立了一种最大化认知网络有效容量和认知用户满意度的多目标优化模型, 提出了一种联合资源分配和用户调度的 PAUS 算法. 仿真结果表明, 在主用户分布密度较低的环境中, 该模型较最大化网络有效容量模型具有更高的用户满意度; 较最大化认知用户满意度模型可获得更高的网络有效容量.

**关键词:** 容量; 用户满意度; 资源分配; 用户调度; 认知无线电

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2012) 07-1315-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.07.005

## A Resource Allocation Scheme Jointly Considering Network Capacity and User Satisfaction in Cognitive Radio Networks

LI Jing-ye<sup>1,2</sup>, LUO Tao<sup>1</sup>, YUE Guang-xin<sup>1</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. The State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Opportunistic spectrum access is an effective method to improve the spectrum utilization. In this paper, a multi-objective optimization model is proposed to take the time-variance characteristic of wireless channel, confidence level of sub-channel detection and the mutual interference between the primary networks and the cognitive radio networks into consideration, in which the effective capacity and user satisfaction are jointly optimized. Then, we also present a resource allocation scheme for power allocation and user scheduling (PAUS). The simulation results show that in lower density environment for the primary user, the proposed optimization model can achieve better performance in user satisfaction than that of the model to maximize the system capacity, and it can obtain higher network capacity than that of the optimization model to maximize the user satisfaction.

**Key words:** capacity; user satisfaction; resource allocation; user scheduling; cognitive radio

## 1 引言

认知无线电 (CR: Cognitive Radio) 技术作为能够提高频谱使用效率的有力工具受到学术界和产业界的广泛关注<sup>[1]</sup>. 认知网络能否实现, 其推动力就是参与者能否获得利益. 从宏观网络的角度而言, 最大化网络容量是其追逐的目标; 从微观的认知用户的立场而言, 可靠的业务体验是其关注的焦点. 因此, 如何同时满足网络运营商和认知用户的需求, 资源分配起着举足轻重的作用.

认知无线电网络中, 资源分配的合理性主要取决于认知子信道空闲的检测可信度、无线信道质量和网络间

干扰等因素. 目前的研究主要集中于单因素对网络性能的影响. 其中, 在理想的频谱检测条件下, 文献[2]首先分析了 OFDM 认知网络中, 由于主网络与认知网络发送信号之间的非正交性所引起的互干扰性能. 基于该干扰模型, 文献[3~5]提出了最大化认知网络容量的各种子载波、功率分配算法. 然而, 在机会频谱共享方式中, 主用户会随时占用认知用户子信道而影响认知链路的连通性. 文献[6]虽考虑了主用户的活动性, 提出了基于 Portfolio 理论的 risk-return 功率分配算法, 而实际中却很难获得精确的主用户活动特性, 只能通过无线环境映射 (REM: Radio Environment Map) 数据库<sup>[7]</sup>查询频段以往被

占用的概率,这就对认知用户的频谱检测提出了更高的要求.联合主用户的活动性以及认知用户的频谱检测概率,文献[8~10]分析了频谱检测准确性对认知网络容量的影响,指出基于频谱检测精度的资源分配方案,较之于不考虑频谱检测精度的资源分配方案,可以获得更好的系统性能.进一步地,文献[11]提出的资源分配算法联合分析了频谱检测准确度和网络间干扰对系统性能的影响.但是,上述资源分配方案均以最大化认知网络容量为目标,而对认知用户的通信需求(诸如速率、时延、链路连通性<sup>[12]</sup>等)未引起足够重视.文献[13,14]虽提出可通过冗余编码和干扰消除技术来提高认知用户的通信可靠性,但都属于资源分配之后的抗干扰技术,能不能在资源分配的过程中就考虑到认知用户的需求呢?文献[15]利用博弈论理论实现了保障用户业务质量的最优价格约束资源分配方案,但该算法是以保障主用户的业务质量为最终目标的.

综上,目前的研究工作主要集中于单目标资源分配问题,而认知网络是一个具有多个参与者、多个目标的综合体系.因此(1)只有综合考虑所有的影响因素,才有可能获得更加合理的资源分配方案;(2)只有考虑了认知用户的需求,才有可能构建一个可持续发展的更优网络.

论文基于 OFDM 认知网络下行链路,首先给出了认知网络的有效容量、认知用户满意度及子信道空闲的检测可信度等概念;接下来,在分析网络间干扰的基础上研究了综合考虑上述参数的数学模型的构建;然后,在分析了单目标优化模型之后,提出了联合系统容量和用户满意度的多目标优化模型;最后,提出了一种联合资源分配和用户调度的算法(PAUS)以实现功率与用户调度的联合分配.仿真结果表明,多目标优化模型实现了最佳的用户满意度,同时还具有次优的系统容量性能.

## 2 网络模型

认知网络和主网络共存的系统模型如图 1 所示,认知用户和主用户分别服从参数为  $\rho_C$  和  $\rho_P$  的均匀分布.如图 1,主网络包括一个基站(BS: Base Station)和  $M$  ( $M = \lfloor 3.14r^2\rho_P \rfloor$ )个主用户.为了保护主用户的服务质量,除了传统的基站功能之外,不妨假设该基站还应具有投诉仲裁的功能:即当主用户受到的干扰超过其设定的干扰阈值时,主用户会向该基站进行投诉,由基站裁决认知网络的业务是否可以持续进行.认知网络中有一个 CR 接入点(AP: Access Point)和  $N$  ( $N = \lfloor 3.14r^2\rho_C \rfloor$ )个认知用户(CU: Cognitive User),AP 的覆盖区域半径为  $r$ ,认知用户以机会接入的方式占用当前空闲的授权子信道,并通过 OFDMA 方式实现多址接入,且当主用户需要占用某子信道时,认知用户必须及时退让.

在该无线接入模型中,子信道带宽小于信道的相干带宽,即无线信道在一个数据传输时间内不变,用  $h_{pq}$  ( $p, q \in \{A, B, C_k, P_i\}, k = 1, \dots, N, i = 1, \dots, M$ )表示从节点  $p$  到节点  $q$  的信道衰减因子,服从循环对称复高斯分布  $h_{pq} \sim CN(0, \sigma_{pq}^2)$ ,则信道增益  $|h_{pq}|^2$  服从参数为  $\sigma_{pq}^2$  的负指数分布.AP 可以获得所有认知用户的信道状态信息,并可以通过查询 REM 数据库获得所有认知用户和主用户的位置信息以及该区域内频谱的历史被占用情况.

基于图 1 的共存网络模型,给出如下定义:

**定义 1** 认知网络的中断事件:当基站接收到的主用户投诉量超过设定阈值时,基站通知 AP 中断其一切通信业务.

**定义 2** 公平性:具有相同业务需求的认知用户可以实现相同的数据速率.

**定义 3** 子信道空闲的检测可信度:频谱被检测为空闲的后验概率,即当频谱的检测结果为空闲时,其确实也为空闲的概率,反映了频谱检测的准确性.

论文中用到的主要数学符号描述为:  $\|\cdot\|_1$  表示 1 范数;  $\|\cdot\|_2$  表示 2 范数;  $E(\cdot)$  表示数学期望;  $[\cdot]^T$  表示矩阵转置;  $[x]^+ = \max\{0, x\}$ ;  $\text{diag}(\mathbf{x})$  表示对角函数,即若  $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ , 则  $\text{diag}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_1 & 0 \\ 0 & x_2 \end{bmatrix}$ ;  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整.

## 3 网络间干扰分析

基于非连续正交频分复用(Non-Contiguous Orthogonal Frequency Division Multiplexing, NC-OFDM)的共存网络中,主网络与认知网络之间发送信号的非正交性会引起网络间干扰(Mutual Interference)<sup>[2]</sup>.用  $\mathbf{P}_{AC} = [P_{AC_1}, \dots, P_{AC_N}]^T$  和  $\mathbf{P}_P = [P_{P_1}, \dots, P_{P_M}]^T$  分别表示认知用户和主用户在每一个子信道上的发射功率,认知用户和主用户占用的子信道带宽分别表示为  $\Delta f_C$  和  $\Delta f_P$ .

这里存在着两种形式的干扰,首先分析认知用户对主用户的干扰,与文献[2]中的干扰模型一致,认知用户的发射信号采用矩形不归零码,第  $k$  个子信道上发射信号的功率谱密度函数为

$$\Phi_{C_k}(f) = P_{AC_k} T_s \left( \frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 \quad (1)$$

其中  $T_s$  为 OFDM 符号周期(不包括保护间隔),设  $l_{ki}$  表示第  $k$  个认知子信道与第  $i$  个主用户子信道中心频率

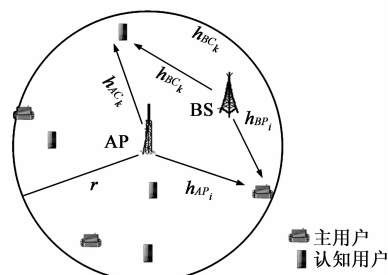


图1 通信场景

之间的频率间隔,则第  $k$  个认知子信道上的单位功率对第  $i$  个主用户造成的干扰为

$$I_{CP_i} = \frac{|h_{C_k P_i}|^2}{P_{AC_k}} \int_{l_{ik}-\Delta f_{\nu}/2}^{l_{ik}+\Delta f_{\nu}/2} \Phi_{C_k}(f) df, \forall k, i \quad (2)$$

用  $\mathbf{I}_{CP_i} = [I_{C_1 P_i}, \dots, I_{C_M P_i}]^T$  表示所有的认知用户对同一个主用户带来的干扰矢量,则主用户  $i$  受到的总干扰为  $I_{P_i} = \|\mathbf{I}_{CP_i}\|_1$ , 认知用户对主用户的干扰矩阵为  $\mathbf{I}_{CP} = [\mathbf{I}_{CP_1}, \dots, \mathbf{I}_{CP_M}]^T$ .

另一种干扰体现为主用户对认知用户的干扰,主用户在第  $i$  个子信道上发射信号的概率密度函数为椭圆滤波器白噪声过程

$$\Phi_{P_i}(f) = [1 + \phi_i^2 g_n^2(f_i)]^{-1} \quad (3)$$

其中,  $\phi$  表示滤波器带通衰减参数,  $g_n^2(f_i)$  表示  $n$  阶雅克比椭圆函数,该信号以干扰的形式叠加在认知用户的接收信号上.

认知用户  $k$  接收到的干扰随有用信号一起经过  $Q$  点 FFT 变换后,其时域形式描述为

$$I_{PC_k} = \sum_{i=1}^M \int_{l_{ik}-\Delta f_c/2}^{l_{ik}+\Delta f_c/2} \frac{|h_{P_i C_k}|^2}{Q} \int_{-\pi}^{\pi} G(\varphi, f) d\varphi df \quad (4)$$

其中  $G(f, \varphi) = \Phi_{P_i}(e^{j\varphi}) \left( \frac{\sin(f - \varphi)Q/2}{\sin(f - \varphi)/2} \right)^2$ .

## 4 网络评价标准构建

### 4.1 认知网络的有效容量

由于认知网络随时面临被中断事件,因此这里用长期的平均成功传输容量作为认知网络容量的评价标准.

用  $\kappa$  表示单位时间内基站接收到的投诉量,  $I_{com}$  表示主网络可以容忍的投诉量上限,当  $\kappa > I_{com}$  时,通过基站 BS 仲裁,认知网络被迫中断,则认知网络的中断概率表示为

$$P_{out}^m = \Pr(\kappa > I_{com}) \quad (5)$$

不妨定义认知网络的有效容量为

$$R_{eff}^m \triangleq R_{sum}^m (1 - P_{out}^m) \quad (6)$$

其中  $R_{sum}^m = \|\mathbf{R}\|_1$ ,  $\mathbf{R} = [R_1, R_2, \dots, R_N]$  表示  $N$  个认知用户的香农容量矢量.

### 4.2 认知用户的满意度

认知用户的满意度指的是认知网络正常运营时认知用户之间的公平性.满意度越高,公平接入认知网络的认知用户数越多;反之,接入的用户数越少.

认知用户的满意度  $\eta$  的数学表达式定义为

$$\eta_{my} \triangleq (1 - P_{out}^m) \cdot \epsilon \quad (7)$$

其中认知用户之间的公平性  $\epsilon$  使用 Jain's 公平系数<sup>[16]</sup>描述为

$$\epsilon = \frac{\|\mathbf{R}\|_1^2}{N \|\mathbf{R}\|_2^2} \quad (8)$$

## 5 资源分配优化模型构建

### 5.1 联合子信道空闲检测可信度的加权功率控制

不失一般性,用二进制符号  $H_k$  和  $\hat{H}_k$  分别表示子信道  $k$  的占用情况和认知网络 AP 对子信道  $k$  占用情况的检测结果.

$$H_k(\hat{H}_k) = \begin{cases} 1, & \text{主用户占用子信道 } k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

AP 可以通过无线环境映射数据库获得子信道  $k$  的被占用概率为  $\Pr(H_k = 1) = \alpha_k$ . 则根据 Bayes 公式<sup>[17]</sup>可以获得子信道  $k$  为空闲的频谱检测可信度为

$$\begin{aligned} \pi_k &= \Pr(H_k = 0 | \hat{H}_k = 0) \\ &= \frac{(1 - \alpha_k) \Pr(\hat{H}_k = 0 | H_k = 0)}{(1 - \alpha_k) \Pr(\hat{H}_k = 0 | H_k = 0) + \alpha_k \Pr(\hat{H}_k = 0 | H_k = 1)} \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $P_f = \Pr(\hat{H}_k = 1 | H_k = 0)$ ,  $P_a = \Pr(\hat{H}_k = 0 | H_k = 1)$  分别表示虚警概率和漏检概率,则式(10)可以简化为

$$\pi_k = \frac{(1 - \alpha_k)(1 - P_f)}{(1 - \alpha_k)(1 - P_f) + \alpha_k P_a} \quad (11)$$

其中  $P_f$  与频谱的利用率有关,  $P_a$  与网络间干扰有关. 为充分提高信道的使用效率,同时尽可能地降低干扰风险,不妨假设子信道  $k$  的实际发射功率为其总功率减去干扰风险之后的功率值:  $\hat{P}_{AC_k} = P_{AC_k} - (1 - \pi_k) P_{AC_k} = \pi_k P_{AC_k}$ ,即使用子信道空闲的检测可信度作为加权因子的功率控制方案.这样,在检测可信度高时发送功率高,可信度低时发送功率低,甚至不发送,其结果如图 2 所示.图 2 中,  $z$  坐标表示的是可信度(或  $\hat{P}_{AC_k}/P_{AC_k}$ ),式(11)表明只要  $P_f = 1$ ,  $\pi_k = 0$ ,此时主用户与认知用户都不会占用该子信道,与传统的方案一致.但是在传统的未加权方案中当  $P_a = 0$  时,不管主用户出现概率如何,认知用户都会占用该子信道.而实际中,主用户出现概率为 90% 的子信道会被放弃使用.考虑可信度加权时,由图 2 知,此时该子信道的可信度仅约为 50%;(1)如果分配该子信道给认知用户,分配的功率也只有原来功率的 50%,降低了产生干扰的概率;(2)在子载波分配的过程当中可以设置合理的阈值以减小与主用户的

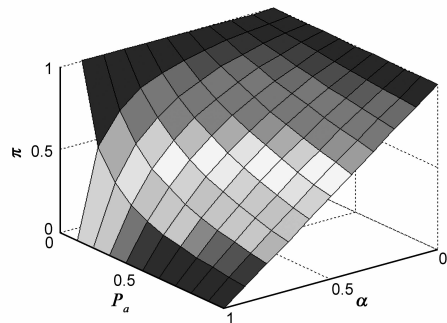


图2 子信道空闲的检测可信度  $\pi$

碰撞概率,论文中选择只有子信道空闲的检测可信度大于 60% 时的子信道才可以进行资源分配.

据此可得认知网络的和容量为

$$R_{sum}^{cm} = \sum_{k=1}^N \Delta f_C \log_2 \left( 1 + \frac{|h_{AC_k}|^2 \hat{P}_{AC_k}}{\Delta f_C N_0 + I_{PC_k}} \beta \right) \quad (12)$$

其中  $\beta = -1.5/\ln(5BER)$  表示 SNR gap<sup>[18]</sup>;  $N_0$  表示单边高斯白噪声功率谱密度,服从均值为 0,方差为  $\sigma_n^2$  的标准正态分布.

## 5.2 网络性能优化模型

根据 5.1 节中的分析,首先为每一个认知用户分配一个子信道空闲检测可信度大于 60% 的子信道,然后根据每一个子信道的信道参数进行功率分配和用户调度.

从网络的角度分析,综合考虑信道的时变性,网络间干扰和子信道空闲的检测可信度,建立传统的最大化网络有效容量的优化模型  $P_1$ :

$$\max R_{effi}^{cm} \quad (13a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{I}_{CP} \mathbf{P}_{AC} \leq \mathbf{I}_{th} \quad (13b)$$

$$\|\boldsymbol{\pi}^T \mathbf{P}_{AC}\|_1 \leq P_{totle} \quad (13c)$$

$$P_{AC_k} \geq 0 \quad \forall k \quad (13d)$$

模型  $P_1$  在保障主用户干扰受限式(13b)和认知网络的功率受限式(13c),式(13d)条件下最大化认知系统的网络有效容量式(13a).采用拉格朗日对偶算法<sup>[19]</sup>求得该优化模型的最佳功率分配为动态水平面的注水形式为

$$P_{AC_k}^* = \left[ \frac{\Delta f_C}{\ln 2 (\boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{I}_P + v \pi_k)} - \frac{1}{B_k} \right]^+ \quad (14)$$

其中  $B_k = \frac{|h_{AC_k}|^2 \pi_k \beta}{\Delta f_C N_0 + I_{PC_k}}$ ,  $\boldsymbol{\lambda}$  和  $v$  为非负拉格朗日乘子,满足  $\boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{I}_{CP} \mathbf{P}_{AC} - \mathbf{I}_{th}) = 0$ ,  $v (\|\boldsymbol{\pi}^T \mathbf{P}_{AC}\|_1 - P_{totle}) = 0$ . 当某子信道  $k'$  的信道条件远远优于其他信道(即水底  $1/B_k \rightarrow 0$ ),且  $I_{ki}$  足够大时(即水面近似为  $\Delta f_C / \ln 2 / v \pi_k$ ),问题  $P_1$  转化为 DARA 算法<sup>[10]</sup>,整个功率都可能集中在子信道  $k'$  上,式(14)化简为

$$P_{AC_k}^* = \begin{cases} (P_{totle} - o(\cdot)) / \pi_k, & k = k' \\ o(\cdot), & k \neq k' \end{cases}$$

此时,占用第  $k \neq k'$  个子信道的用户的实际接收功率将不足以正确译码,认知用户的业务可靠性得不到满足,由此可知该时隙实际只调度了一个用户,用户之间的公平性得不到保障.

从认知用户的需求分析,建立最大化认知用户满意度的优化模型  $P_2$

$$\max \eta_{my} \quad (15)$$

$$\text{s.t. } \text{与 } P_1 \text{ 相同}$$

综合考虑认知网络和认知用户的需求,根据多目标优化融合理论,联立  $P_1, P_2$ ,建立多目标优化模型  $P_3$

$$\max R_{effi}^{cm} + \eta_{my} \quad (16a)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{I}_{CP} \mathbf{P}_{AC} \leq \mathbf{I}_{th} \quad (16b)$$

$$\|\boldsymbol{\pi}^T \mathbf{P}_{AC}\|_1 \leq P_{totle} \quad (16c)$$

$$P_{AC_k} \geq 0, \forall k \quad (16d)$$

$P_3$  中目标函数的第一项为网络有效容量,是对数函数,后一项用户满意度为不可约多项式,为了简化计算,进一步统一目标函数的数学形式以降低计算复杂度.

在理想情况下,式(16b)可以保障认知网络的中断概率为 0,因此认知用户满意度简化为认知用户之间的公平性.在总功率约束条件下,认知用户之间的公平性指数越高,各用户之间的数据速率方差越小,因此最大化认知用户满意度的模型可以转化为实现数据速率之间最小方差的过程:  $\max \eta_{my} \approx \min \text{var}(\mathbf{R})$ . 目标函数(16a)更新为

$$\max R_{effi}^{cm} - \text{var}(\mathbf{R}) \quad (16e)$$

认知用户之间数据速率的方差越小,其接收功率越趋于平均值,不会出现无穷小量的功率分配情况,也可以在一定程度上改善认知用户业务的中断概率,目标函数(16e)还可以提高在一个时隙内调度的用户数.

## 5.3 功率分配与用户调度 (PAUS) 算法

非线性优化模型  $P_3$  中,不等式约束为凹函数,等式约束为线性函数,目标函数为凹函数(证明见附录命题 1,2)满足时间共享条件<sup>[20]</sup>,可以根据强对偶定理把原问题转化为无约束拉格朗日对偶优化问题.而实际上,对于具有多个不等式约束的问题,lagrange 对偶优化算法很难在多项式时间内求得零对偶间隔最优解,因此论文中采用 lagrange 启发式算法<sup>[19]</sup>实现功率和用户调度的联合分配,该算法可适用于上述三种优化模型.

优化模型  $P_3$  中,存在  $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \dots, \lambda_M]^T \geq 0, v \geq 0$ ,满足 KKT 条件:

$$\frac{\partial R_{effi}^{cm}}{\partial P_{AC_k}} - \frac{\partial \text{var}(\mathbf{R})}{\partial P_{AC_k}} - \sum_{i=1}^m \lambda_i I_{P_i} + v \pi_k = 0 \quad (17a)$$

$$\boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{I}_{CP} \mathbf{P}_{AC} - \mathbf{I}_{th}) = 0 \quad (17b)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = [\boldsymbol{\lambda}]^+ \quad (17c)$$

$$v = [v]^+ \quad (17d)$$

因此,建立广义 lagrange 函数为

$$L(\mathbf{P}_{AC}, \boldsymbol{\lambda}, v) = R_{effi}^{cm} - \text{var}(\mathbf{R}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{I}_{th} - \mathbf{I}_{CP} \mathbf{P}_{AC}) + v (P_{totle} - \|\boldsymbol{\pi}^T \mathbf{P}_{AC}\|_1) \quad (18)$$

式(18)的对偶问题为

$$\min d^*(\boldsymbol{\lambda}, v) = \max_{\mathbf{P}_{AC}} L(\mathbf{P}_{AC}, \boldsymbol{\lambda}, v) \quad (19)$$

$$\text{s.t. } \boldsymbol{\lambda} \geq 0, v \geq 0$$

通过式(17)~(19)可得到 $\lambda^*, v^*, P_{AC}^*$ , 然后根据 $P_{AC}^*$ 决定即将被调度的用户.

PAUS 算法流程图如图 3 所示, 详述如下:

**Step 1 (子信道分配)** AP 通过查找无线环境映射数据库获得每一个子信道的被占用概率, 并融合所有认知用户的上报结果, 得到子信道为空闲的检测可信度, 并为每一个认知用户选择一个子信道, 满足 $\pi_k > 60\%$ .

**Step 2 (功率分配)** (1) 初始化 $\lambda, v$ , 并根据式(17a)计算分配给第 $k$ 个子信道的最佳发射功率, 其一阶泰勒近似表达式(见附录命题 3)为

$$P_{AC_k}^* = \left[ \frac{N\Delta f C B_k \ln 2 - CN(\ln 2)^2}{CN(\ln 2)^2 B_k + 2B_k^2(\Delta f C)^2} \right]^+ \quad (20)$$

其中 $C = \lambda^T I_P + v\pi_k$ .

(2) 根据对偶函数(19)计算 $\lambda, v$ 的最佳值

$$(\lambda^*, v^*) = \arg \inf_{P_{AC}^*} d^*(\lambda, v) \quad (21)$$

方程式(21)可以采用牛顿法、内点法或者椭球算法等求解<sup>[17]</sup>, 论文中采用次梯度算法, 该算法的参数更新过程描述为

$$\begin{aligned} \lambda_{t+1} &= (\lambda_t + \mu_t \nabla \lambda / \|\lambda_t, v_t\|_2)^+ \\ v_{t+1} &= (v_t + \delta_t \nabla v / \|\lambda_t, v_t\|_2)^+ \end{aligned} \quad (22)$$

其中 $\nabla \lambda = I_{CP} P_{AC} - I_{th}$ ,  $\nabla v = \|\pi^T P_{AC}\|_1 - P_{totle}$ ,  $\mu_t = [\mu_{t1}, \dots, \mu_{tM}]$ 和 $\delta_t$ 表示步长因子. 迭代步骤(1)(2), 当 $\nabla \lambda = 0, \nabla v = 0$  或者 $|d^t - d^{t-1}| \leq \epsilon$  时, 终止迭代; 否则, 采用启发式因子更新已分配值.

**Step 3 (用户调度)** 根据子信道 $k$ 上分配的功率决定是否调度该子信道上的用户, 满足

$$k = \begin{cases} \text{调度} & P_{AC_k}^* > 0 \\ \text{不调度} & P_{AC_k}^* = 0 \end{cases} \quad (23)$$

6 仿真结果与分析

仿真场景如图 1 所示, 主用户占用任何一个子信道的概率密度函数为均匀分布, 主用户的发射功率为 70mW, 接收信干比阈值为 7mW, 由于主用户分布密度比较高的时候, 频谱利用率再次被开发的潜力已经很

小, 因此这里主要分析主用户分布密度比较低的情况, 仿真参数如表 1 所示

表 1 仿真参数设置	
参数	数值
$r$	200m
$\rho_C$	300users/km <sup>2</sup>
$\rho_P$	100users/km <sup>2</sup>
$P_{totle}$	1W
$\beta$	-7dB
$P_{th}^k$	23dBm
信道增益	$\sigma_{AC_k}^2 = \sigma_{AP_i}^2 = \sigma_{PC_k}^2 = \sigma_{PP_i}^2 = \sigma_n^2 = \sigma^2$

图 4 描述了子信道空闲可信度变化时, 网络有效容量与信道质量之间的关系. 当子信道空闲的检测可信度一定时, 有效容量随着信道增益的增加而增加. 信道增益相同时, 子信道空闲可信度越高, 在相应的子信道上分配的功率也越高, 因此可以实现更高的系统容量.

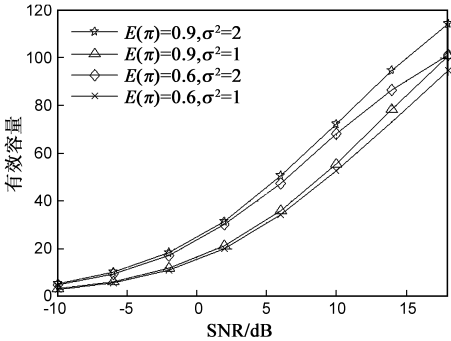


图4 有效容量vs信道质量, 子信道空闲可信度

当单位时间内接收到的主用户投诉量超过认知网络覆盖区域内主用户总数的 10% 时, 认知网络中断. 图 5 比较了 $E(\pi_k) = 0.9$  时不同算法之间的有效容量曲线, 其中“等功率分配”和“等功率分配\*”分别表示和容量曲线与有效容量曲线, 比较两条曲线可知等功率分配没有考虑到主用户的干扰受限使得其中断概率约为 50%; 而优化算法在干扰约束条件的保护下没有产生中断的事件. 优化模型 $P_2$ 的性能最差, 提出的多目标优化模型 $P_3$ 在低信噪比时, 性能与 $P_1$  相同, 在高信噪比时, 介于算法 $P_1$  和 $P_2$  之间, 实现了有效容量与认知用户满

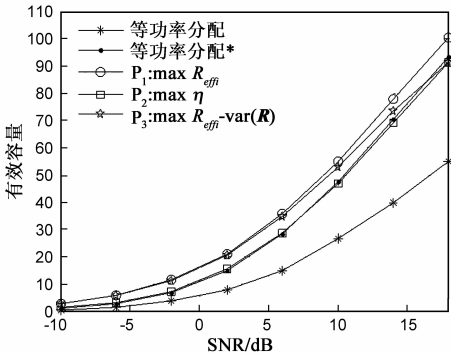


图5 不同算法的有效容量比较

意度之间的折中。

图 6 分析了不同优化模型可以达到的用户满意度, 显然,  $P_2P_3$  获得的用户满意度都优于  $P_1$ 。综合图 5 来看, 虽然  $P_3$  在高信噪比时得到的有效容量比  $P_1$  低, 但是用户满意度比较高, 这就有利于网络的良性循环和持续性发展; 结合图 7 可以看出优化模型  $P_2$  调度的用户数大于总数的 90%, 即每一个用户被调度的概率大于 90%, 而所有的被调度用户之间的功率分配是基于最小化用户之间的数据速率方差来实现的, 因此具有较好的用户满意度性能。但是, 由于其功率分配结果亦是注入水的形式出现, 这种算法在高信噪比的时候对系统性能改善不大, 因此  $P_2$  在高信噪比时的用户满意度增量较之于  $P_3$  有所下降。而  $P_3$  中调度的用户数随着信道质量的变好而逐渐增加, 在信噪比大于 10dB 的时候, 其可以调度的用户数接近于  $P_2$  调度的数目; 从信息论的角度分析, 在信噪比较高的时候, 用户之间接收功率相等时可以获得最大的网络容量。因此, 在高信噪比时  $P_3$  的优化目标相当于对用户满意度的双重优化, 用户满意度在三种模型中最佳。综合图 5, 图 6, 图 7, 比较网络容量, 用户满意度与调度的用户数目性能曲线,  $P_3$  不失为网络资源分配的有效选择。

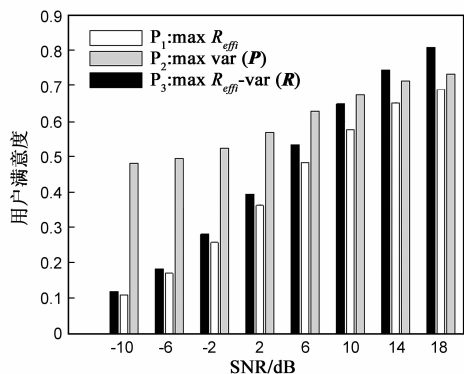


图6 不同算法之间的用户满意度比较

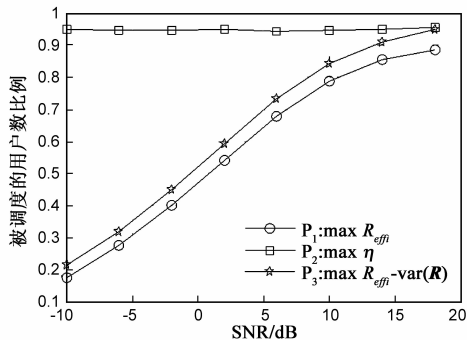


图7 单位时间内平均调度的用户数比较

## 7 总结

论文综合分析了机会频谱接入认知网络中的物理层参数: 子信道空闲的检测可信度, 网络之间的互干扰

等, 建立了最大化有效容量和认知用户满意度的多目标优化模型, 并提出了适用于低密度主用户分布环境的, 基于拉格朗日启发式算法的资源分配和用户调度的 PAUS 算法, 该模型较之最大化网络容量的算法, 在不降低总容量的前提下增加了用户满意度和调度的用户数, 较之最大化认知用户满意度的算法, 在不降低用户满意度的条件下提高了总的网络容量, 该方法可以扩展到拥塞控制及自动控制等领域。

## 附录

### 命题 1 优化模型 $P_1$ 中目标函数的凹性

**证明** 因为  $\min -f \Leftrightarrow \max f$ , 所以需要证明  $f_2 = -R_{eff}$  具有凸性。优化模型  $P_1$  的目标函数的一阶微分方程和二阶海森矩阵分别表示为

$$\frac{\partial(f_2)}{\partial P_{AC_k}} = \frac{-\Delta f_{CB_k}}{\ln 2(1+B_k P_{AC_k})} \quad (A1)$$

$$H_{hes} = \frac{\Delta f_C}{\ln 2} \begin{vmatrix} \frac{B_1^2}{(1+B_1 P_{AC_1})^2} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B_N^2}{(1+B_N P_{AC_N})^2} \end{vmatrix} \geq 0 \quad (A2)$$

根据凸函数判定定理,  $f_2$  具有凸性, 因此  $P_1$  的目标函数为凹函数。

### 命题 2 优化模型 $P_3$ 中目标函数的凹性

**证明** 同命题 2 中一致, 只需要证明  $f_3 = -R_{eff} + \text{var}(\mathbf{R})$  具有凸性即可。  $\text{var}(\mathbf{R})$  的一阶微分方程和二阶微分方程分别为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{var}(\mathbf{R})}{\partial P_{AC_k}} &= \frac{2}{N} \left( R_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R_k \right) \frac{dR_k}{dP_{AC_k}} \\ &+ \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1, i \neq k}^N (R_i - \bar{R}) \frac{dR_k}{dP_{AC_k}} \end{aligned} \quad (A3)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \text{var}(\mathbf{R})}{\partial P_{AC_k} \partial P_{AC_i}} \right|_{i \neq k} = 0 \quad (A4)$$

$$\frac{\partial^2 f_3}{\partial P_{AC_k} \partial P_{AC_i}} = 0 \quad (A5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 f_3}{\partial P_{AC_k}^2} &= \frac{2-N}{N} \frac{\partial^2 R_{eff}}{\partial P_{AC_k}^2} + \frac{2}{N(N-1)} \\ &\cdot \log_2 \left( \frac{1+B_k P_{AC_k}}{\prod_{k=1}^N (1+B_k P_{AC_k})^{1/N}} \frac{\prod_{i=1, i \neq k}^N (1+B_i P_{AC_i})}{\prod_{k=1}^N (1+B_k P_{AC_k})^{1/N}} \right) \frac{\partial^2 R_{eff}}{\partial P_{AC_k}^2} \\ &\approx \left[ \frac{2-N}{N} + \frac{2(N-2)}{N^2(N-1)} \log_2 \left( \prod_{k=1}^N (1+B_k P_{AC_k}) \right) \right] \frac{\partial^2 R_{eff}}{\partial P_{AC_k}^2} \end{aligned} \quad (A6)$$

因为

$$\frac{\partial^2 f_3}{\partial P_{AC_k}^2} = \begin{cases} > 0, & N = 1 \\ = 0, & N = 2 \\ > 0, & N > \frac{1}{2} + \sqrt{1/4 + 2\log_2\left(\prod_{k=1}^N (1 + B_k P_{AC_k})\right)} \geq 2 \end{cases}$$

所以海森矩阵具有非负性,  $f_3$  具有凸性, 原命题得证.

### 命题 3 求解优化模型 $P_3$ 的最优解

解 一阶微分方程(A3)化简为

$$\begin{aligned} \frac{d \text{var}(\mathbf{R})}{d P_{AC_k}} &= \frac{2}{N} \left( R_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R_k \right) \frac{d R_k}{d P_{AC_k}} \\ &+ \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1, i \neq k}^N (R_i - \bar{R}) \frac{d R_k}{d P_{AC_k}} \\ &= \frac{2}{N} \Delta f \log_2 \left( \frac{1 + B P_k}{\prod_{k=1}^N (1 + B P_k)^{1/N}} \right) \frac{d R_k}{d P_{AC_k}} \\ &+ \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1, i \neq k}^N \Delta f \log_2 \left( \frac{1 + B P_i}{\prod_{k=1}^N (1 + B P_k)^{1/N}} \right) \\ &\cdot \frac{d R_k}{d P_{AC_k}} \quad (A7) \end{aligned}$$

当  $x \rightarrow 0, p \rightarrow 0$  时,  $(1+x)^p \approx 1$ , 式(A7)简化为

$$\begin{aligned} \frac{d \text{var}(\mathbf{R})}{d P_{AC_k}} &= \frac{2}{N} \Delta f \log_2(1 + B P_k) \frac{d R_k}{d P_{AC_k}} + \frac{2}{N(N-1)} \\ &\cdot \sum_{i=1, i \neq k}^N \Delta f \log_2(1 + B P_i) \frac{d R_k}{d P_{AC_k}} \end{aligned}$$

其中第二项中  $\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1, i \neq k}^N \log_2(1 + B P_i) = o(\cdot)$ ,  $o(\cdot)$  表示高阶无穷小量, 可以忽略不计, 因为  $\log_2(1 + B P_i)$  是  $P_i$  的连续函数, 且在定义域内可导, 利用对数函数的一阶泰勒展开得到

$$\begin{aligned} \frac{d \text{var}(\mathbf{R})}{d P_{AC_k}} &= \frac{2(\Delta f)^2 B}{N(\ln 2)^2 (1 + B P_k)} \left( B P_k - \frac{(B P_k)^2}{2} + \frac{(B P_k)^3}{6} + o(\cdot) \right) \end{aligned}$$

不失一般性, 为了建立功率的线性函数, 这里取一阶近似, 根据 KKT 条件

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(\mathbf{P}_{AC}, \boldsymbol{\lambda}, v)}{\partial P_{AC_k}} &= \frac{\Delta f_C B}{\ln 2 (1 + B P_k)} - \frac{2(\Delta f)^2 B^2 P_k}{N(\ln 2)^2 (1 + B P_k)} - C \\ &= 0 \end{aligned}$$

即可得到式(20)中的最优化功率分配.

### 参考文献

[1] Q Zhao, B Sadler. A survey of dynamic spectrum access: signal processing, networking, and regulatory policy[J]. IEEE Signal Process Magazine, 2007, 24(3): 79 – 89.

[2] T Weiss, J Hillenbrand, A Krohn, et al. Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems[A]. Proceedings of the 59th IEEE Vehicular Technology Conference[C]. USA: IEEE Press, 2004. 1873 – 1877.

[3] Y H Zhang, C Leung. Resource allocation in an OFDM-Based cognitive radio system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 50(7): 1928 – 1931.

[4] G Bansal, MJHossain, VKBhargava. Adaptive power loading for OFDM-based cognitive radio systems[A]. Proceedings of IEEE Conference on Communications[C]. USA: IEEE Press, 2007. 5137 – 5142.

[5] 张然然, 刘元安, 林晓峰, 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.

R R Zhang, Y A Liu, X F Xiao, et al. OFDMA-based resource allocation for downlink cognitive radio systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 632 – 637. (in Chinese)

[6] T Wysock, A Jamalipour. Mean-variance based QoS management in cognitive radio[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(10): 3281 – 3289.

[7] Y Zhao, MLG Joseph, et al. Applying radio environment maps to cognitive wireless regional area networks[A]. Proceedings of IEEE Dynamic Spectrum Access Networks[C]. Dublin, 2007. 115 – 118.

[8] H J Lim, D YSeol, G H Im. Resource allocation for mitigating the effect of sensing errors in cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(12): 1119 – 1121.

[9] X G Zhou, G Y Li, D D Li, et al. Probabilistic resource allocation for opportunistic spectrum access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(9): 2870 – 2879.

[10] E Pei, S Wang, Z Z Zhang. Capacity and optimal power allocation for spectrum-sharing with primary transmission consideration in fading channels[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(4): 389 – 391.

[11] Y M GE, Y SUN, S LU, Eryk Dutkiewicz. A distributed decision making method in cognitive radio networks for spectrum management[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(2): 195 – 200.

[12] 韩小博, 罗涛. Ad Hoc 认知无线网络中基于博弈论的公共信道建立算法[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1169 – 1704.

X B Han, T Luo. Common channel establishing algorithms based on game theory in ad hoc cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1169 – 1704. (in Chinese)

[13] D Willkomm, J Gross, A Wolisz. Reliable link maintenance in cognitive radio systems[A]. IEEE Proceedings of New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. USA: IEEE Press, 2005. 371 – 378.

- [14] Y P Xing, Chetan N Mathur, M A Haleem, et al. Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(4): 423 – 433.
- [15] 罗丽平, 邱焕新, 张广驰, 等. 具有约束条件的认知无线网络最优频谱价格函数[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 562 – 566.  
L P Luo, H X Qiu, G C Zhang, et al. Optimal pricing function with spectrum constraint in cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 562 – 566. (in Chinese)
- [16] S Vatsikas, S Armour, M De Vos, et al. A distributed algorithm for wireless resource allocation using coalitions and the nash bargaining solution[A]. Proceedings of IEEE Conference on Vehicular Technology Conference[C]. USA: IEEE Press, 2011. 1 – 5.
- [17] R Wang, Vincent K N Lau. Joint cross-layer scheduling and spectrum sensing for OFDMA cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(5): 2410 – 2416.
- [18] A J Goldsmith, S G Chua. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 1997, 45(10): 1218 – 1230.
- [19] S Boyd, L Vandenberghe. Convex Optimization[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [20] W Yu, R Lui. Dual methods for nonconvex spectrum optimization of multicarrier systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(7): 1310 – 1322.

## 作者简介



**李静叶** 女, 1984 年 4 月出生, 河北石家庄人. 北京邮电大学博士研究生. 研究方向为移动通信, 认知无线网络.

E-mail: lijingye@bupt.edu.cn



**罗 涛** 男, 1971 年 9 月出生, 陕西凤翔县人. 北京邮电大学教授、博士生导师、中国电子学会会员、IEEE 会员. 现主要从事宽带移动通信、认知无线电和车辆通信 WAVE 等方面的研究工作.



**乐光新** 男, 1937 年 1 月出生, 贵州省贵阳市人. 北京邮电大学教授, 博士生导师, 长期从事通信系统理论和数字通信系统的教学和科研工作. 曾担任北京邮电大学电信工程系主任, 校教学特别顾问和校学术委员会主任等职务, 1992 年起享受国务院特殊津贴, 主要研究方向是数字通信系统与信息处理、宽带无线通信与网络等.