

# 认知无线网络中兼顾效用与公平的联合带宽和功率分配算法

闫继垒, 李建东, 赵林靖, 董全

(西安电子科技大学 综合业务网理论和关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 对不同类型的业务采用了统一的效用函数形式, 并在此基础上构造了基于网络效用最大化模型的优化问题。采用拉格朗日对偶方法对问题进行了求解, 提出了一种分布式的联合带宽和功率分配算法。仿真结果表明, 本算法能够有效地为不同类型认知用户分配合理的带宽和功率资源, 在最大化所有认知用户总效用的同时保证用户之间的效用公平性。

**关键词:** 认知无线网络; 效用函数; 资源分配; 公平性

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)10-0056-09

## Joint bandwidth and power allocation algorithm in cognitive radio network with consideration of utility and fairness

YAN Ji-lei, LI Jian-dong, ZHAO Lin-jing, DONG Quan

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A unified utility function was designed to adapt to different types of services and an optimization problem was formulated based on the network utility maximization model. By applying the Lagrange duality method, a distributed joint bandwidth and power allocation algorithm was proposed. Simulation results show that this algorithm can effectively allocate proper resources to various types of secondary users. It can not only maximize the total utility of all secondary users but also maintain the utility fairness among them.

**Key words:** cognitive radio network; utility function; resource allocation; fairness

### 1 引言

无线通信行业的快速发展导致无线频谱资源紧缺的状况日益凸显, 而传统的频谱分配方案又只能获得很低的频谱利用率, 认知无线电技术就在这种情况下应运而生。认知无线电<sup>[1]</sup>是一种智能无线通信系统, 它能够提高无线频谱资源的使用效率和改善无线通信的可靠性。在认知无线网络中, 在不影响主用户(PU, primary user)正常通信的前提下, 认知用户(SU, secondary user)可以接入

到分配给 PU 的授权频段进行通信。SU 接入授权频段的频谱共享方式主要有 3 类: 叠加(overlay)、衬底(underlay)和交织(interweave)<sup>[2]</sup>。Overlay 是指 SU 首先进行频谱感知, 在获得频谱空洞后进行接入<sup>[3,4]</sup>; Underlay 是指 SU 和 PU 可以同时进行传输, 前提是 PU 接收到来自所有 SU 的功率干扰低于一定的门限值; Interweave 是 Overlay 和 Underlay 的结合, 即当没有 PU 进行通信时, SU 采用 Overlay 接入, 当 PU 存在时, SU 转而采用 Underlay 方式接入。

收稿日期: 2012-08-29; 修回日期: 2013-01-25

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(61231008); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB320404); 国家自然科学基金资助项目(60902032); 国家科技重大专项基金资助项目(2010ZX03005-003); 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT0852); 高等学校创新引智计划基金资助项目(B08038)

**Foundation Items:** The Key Project of National Natural Science Foundation of China (61231008); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB320404); The National Natural Science Foundation of China (60902032); The National Science and Technology Major Specific Project of China (2010ZX03005-003); PCSIRT(IRT0852); The Program of Introducing Talents of Discipline to Universities (B08038)

很多文献都对认知无线网络中 Underlay 频谱共享方式下的资源分配问题进行了研究。文献[5]分析了存在主用户中断概率约束和认知用户发送功率约束时,如何进行功率控制以达到认知用户各态历经容量最大化的问题,但文中假设 SU 能够获得 PU 收发信机之间的信道状态信息并不合理。文献[6]针对不同的无线信道衰落环境,研究了认知用户的最优功率分配以实现各态历经容量的最大化。然而,文献[5]和文献[6]都只是研究了单个 PU 和单个 SU 场景中的认知用户功率控制,并没有考虑到存在多个 SU 时如何进行带宽与功率的联合分配。文献[7]对存在多个 SU 的场景,研究了在不同的功率和干扰约束条件组合下,通过自适应地分配带宽和功率资源实现所有认知用户的总各态历经容量最大,然而并没有考虑到不同 SU 之间的公平性。文献[8]研究了在认知无线网络环境中,存在认知用户传输速率约束和主用户接收干扰功率约束的条件下,如何通过速率和功率分配保证所有认知用户获得比例公平的传输速率。然而这些文献在资源分配的过程中都没有考虑到如何保证具有不同业务类型的认知用户在获得服务质量(QoS, quality of service)满意度上的公平性。

在有线网络流量控制问题中,文献[9]针对用户具有不同的业务类型和 QoS 要求,构造了统一的效用函数形式,使得不同业务类型的用户能够在统一的优化问题模型下进行速率分配。在此基础上,文献[10]又针对不同的效用公平性准则,提出了统一的速率控制方法。本文对认知无线网络中 Underlay 频谱共享方式下的认知用户带宽和功率分配问题进行了研究。首先针对不同类型的业务具有不同的效用函数形式和凹凸性质,根据文献[9]中采用统一的伪效用函数定义。在认知用户终端平均发射功率约束和主用户接收干扰功率峰值约束的条件下,考虑到无线信道存在瑞利衰落的情况,构造了最大化所有认知用户总效用平均值的优化问题。采用拉格朗日对偶方法进行优化问题的求解,并给出了兼顾效用与公平的联合带宽和功率分配的分布式算法。仿真结果表明,本文提出的联合资源分配算法能够实现为不同业务类型的认知用户统一合理地分配带宽和功率资源,在最大化所有认知用户总平均效用的同时,有效地保证不同业务类型用户之间在 QoS 满意度上具有较好的公平性。

## 2 系统模型

### 2.1 效用函数

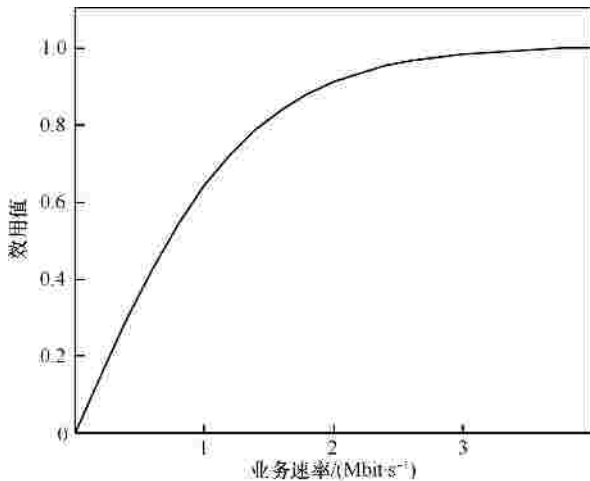
服务质量是用户衡量网络提供服务满意度的重要指标,它通常与用户获得的带宽、功率、时延和分组丢失率等参数有关。在网络流量控制和资源分配中,用户业务的 QoS 通常构造为一个与用户获得的传输速率直接相关的函数,称为效用函数。通信网络中的业务可以根据其对传输速率和时延的敏感程度分为 2 类:弹性业务和非弹性业务<sup>[11]</sup>。弹性业务是指如文件传输、E-mail 等的传统数据业务,它们能够容忍较低的传输速率和较大的时延,这类业务的效用函数一般定义为一个严格凹的单调增函数,如图 1(a)所示。非弹性业务,如语音视频传输和电视电话会议等,对传输速率和时延都有一定的要求,这类业务的效用函数往往采用类似阶梯函数的形式:在传输速率低于业务要求时为凸函数,在传输速率高于业务要求时为凹函数,如图 1(b)所示。由于弹性业务和非弹性业务具有不同的效用函数形式和凹凸性质,很难在统一的架构下同时为 2 种业务进行资源分配。此外,即便是同种业务类型,不同的应用也会有不同的 QoS 要求,如语音信号传输只需要很低的传输速率,而视频信号传输则要求很高。因而,在认知无线网络资源分配中,人们需要根据不同类型业务的 QoS 要求,合理地分配带宽和功率等资源,同时还要保证不同用户之间在 QoS 满意度上的公平性。

对于认知用户  $s$ , 设其业务的效用函数为  $Q_s(r_s)$ ,  $r_s \in [0, M_s]$  为用户  $s$  获得的传输速率,  $M_s$  为用户  $s$  能够获得的最大传输速率。在区间  $[0, M_s]$  上,  $Q_s(r_s)$  是一个连续的严格单调递增函数。为了便于比较不同用户获得效用值的大小,可以进行归一化处理,即令  $0 \leq Q_s(r_s) \leq 1$ , 当  $r_s = 0$  时,  $Q_s(r_s) = 0$ , 当  $r_s = M_s$  时,  $Q_s(r_s) = 1$ 。由于不同类型业务的效用函数具有不同的凹凸性质,为此,笔者再定义一个统一的伪效用函数  $U_s(r_s)$ <sup>[9]</sup>为

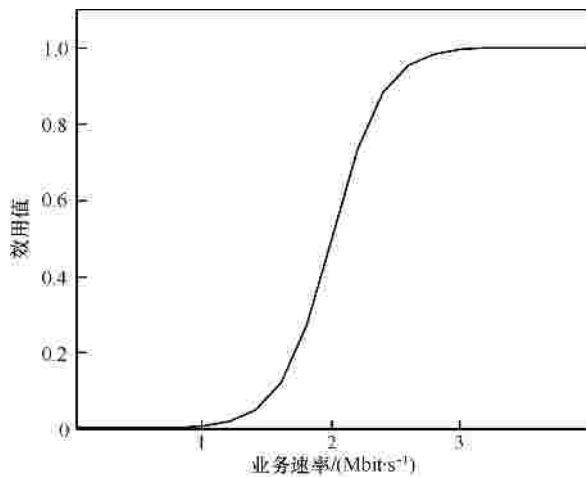
$$U_s(r_s) = \int_0^{r_s} \frac{1}{Q_s(x)} dx, \quad 0 \leq r_s \leq M_s, \forall s \quad (1)$$

对伪效用函数  $U_s(r_s)$  进行求导, 得到  $U'_s(r_s) = \frac{1}{Q_s(r_s)}$ ,  $0 < r_s \leq M_s$ 。由于  $Q_s(r_s)$  在  $(0, M_s]$  内恒大于 0, 得到  $U'_s(r_s) > 0$  恒成立, 说明  $U_s(r_s)$  是一个

严格单调递增函数；又由于  $Q_s(r_s)$  在该区间是严格单调递增的，则说明  $U'_s(r_s)$  是一个严格单调递减函数，即  $U''_s(r_s) < 0$ 。故而，无论认知用户  $s$  具有何种类型的业务，其伪效用函数  $U_s(r_s)$  都是一个恒正的、单调递增的严格凹函数。



(a) 弹性业务



(b) 非弹性业务

图 1 不同类型业务的效用函数对比

### 2.2 问题建模

在如图 2 所示的蜂窝无线网络中，存在一个主用户占用授权频带  $B$ ，通过上行链路与主系统基站 (PBS, primary base station) 进行通信。同时在该区域内存在  $S$  个认知用户，通过 Underlay 的方式共享授权频带  $B$ ，并以 FDMA 的方式避免不同 SU 之间的干扰。设第  $s$  个 SU 的收发信机之间的信道功率增益为  $g_{ss}$ ；第  $s$  个 SU 的发射机与 PBS 之间的信道功率增益为  $g_{sp}$ ；PU 发射机对于 SU 接收机的干扰可以看作是具有单位功率谱密度的加性高斯白噪声。由于只考

虑主系统的上行链路，对于任意的认知用户  $s$ ，可以通过接收来自 PBS 的广播信号获得 PBS 到该 SU 的信道状态，然后再利用信道的互易性得到  $g_{sp}$ ；而 SU 收发信机之间的信道状态  $g_{ss}$  则可以通过信道估计很容易获得。假设认知系统中存在一个认知控制中心，每个 SU 都要周期性地向该控制中心汇报干扰信道状态 ( $g_{sp}$ )、带宽和功率等信息，进而认知控制中心可以获得所有 SU 发射机对主用户接收机 PBS 造成的干扰大小，最终控制各个 SU 获得的带宽资源及发射功率。

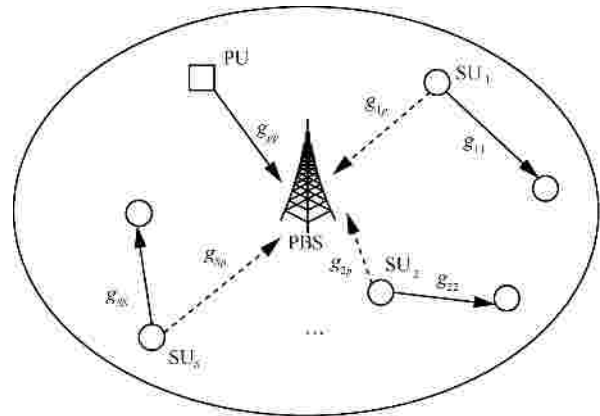


图 2 系统模型

令  $\mathbf{g} = [g_{11}, g_{22}, \dots, g_{SS}; g_{1p}, g_{2p}, \dots, g_{Sp}]$ 。由于无线信道具有衰落特性，瞬时信道功率增益  $\mathbf{g}$  是一组随机变量，设其联合概率密度函数为  $G$ 。设在瞬时信道功率增益为  $\mathbf{g}$  时，第  $s$  个认知用户的发射功率为  $p_s(\mathbf{g})$ ，获得的带宽为  $b_s(\mathbf{g})$ 。在进行联合带宽和功率分配中，所有 SU 获得的带宽之和不能超过 PU 的授权频带宽度  $B$ ，即

$$\sum_{s=1}^S b_s(\mathbf{g}) \leq B, \quad \forall \mathbf{g} \quad (2)$$

同时主用户接收机 PBS 受到来自所有 SU 的功率干扰要小于固定的门限值  $I_p^{\max}$ ，即

$$\sum_{s=1}^S p_s(\mathbf{g}) g_{sp} \leq I_p^{\max}, \quad \forall \mathbf{g} \quad (3)$$

此外，由于认知用户携带的往往都是无线终端，其电池电量有限，为了保证认知用户的服务和待机时间，要求其终端的平均发射功率低于一个门限值  $P_s^{\text{av}}$ ，所以可得

$$E_{\mathbf{g}} [p_s(\mathbf{g})] \leq P_s^{\text{av}}, \quad \forall s = 1, 2, \dots, S \quad (4)$$

在上述约束条件式(2)~式(4)的基础上，为了实

现在瑞利衰落信道下所有认知用户总效用平均值的最大化，同时保证不同业务类型用户之间的效用公平性，笔者构造了基于网络效用最大化模型的联合带宽和功率分配优化问题。

$$\begin{aligned} & \max_{p(\mathbf{g}), b(\mathbf{g})} E_{\mathbf{g}} \left\{ \sum_{s=1}^S U_s [r_s(b_s(\mathbf{g}), p_s(\mathbf{g}))] \right\} \\ \text{s.t. } & r_s(b_s(\mathbf{g}), p_s(\mathbf{g})) = b_s(\mathbf{g}) \log \left( 1 + \frac{p_s(\mathbf{g}) g_{ss}}{b_s(\mathbf{g})} \right), \\ & \forall s = 1, 2, \dots, S, \forall \mathbf{g} \\ & \sum_{s=1}^S b_s(\mathbf{g}) \leq B, \quad \forall \mathbf{g} \\ & \sum_{s=1}^S p_s(\mathbf{g}) g_{sp} \leq I_p^{\max}, \quad \forall \mathbf{g} \\ & E_{\mathbf{g}} [p_s(\mathbf{g})] \leq P_s^{\text{av}}, \quad \forall s = 1, 2, \dots, S \\ & p_s(\mathbf{g}), b_s(\mathbf{g}) \geq 0, \quad \forall s = 1, 2, \dots, S, \forall \mathbf{g} \end{aligned} \quad (5)$$

其中，每个 SU 获得的传输速率  $r_s$  可以根据香农公式确定。由于伪效用函数  $U_s(r_s)$  是严格凹函数，即优化问题的目标函数是一个严格凹函数，同时所有的约束条件又都是线性约束，所以式(5)是一个严格的凸优化问题<sup>[12]</sup>。

### 3 最优带宽和功率分配

#### 3.1 问题求解

由于式(5)是一个严格凸问题，可以采用标准的拉格朗日对偶方法进行求解。首先对于约束条件式(4)引入拉格朗日乘子  $\lambda = [h_1, h_2, \dots, h_S]$ ，得到原优化问题式(5)对偶问题的目标函数为

$$D(\lambda) = E_{\mathbf{g}} \{ U^T(\mathbf{g}) \} + \sum_{s=1}^S h_s P_s^{\text{av}} \quad (6)$$

同时，得到原优化问题式(5)的对偶问题为

$$\begin{aligned} \min_{\lambda \geq 0} D(\lambda) &= E_{\mathbf{g}} \{ U^T(\mathbf{g}) \} + \sum_{s=1}^S h_s P_s^{\text{av}} \\ \text{s.t. } & h_s \geq 0, \quad \forall s = 1, 2, \dots, S \end{aligned} \quad (7)$$

其中， $U^T(\mathbf{g})$  是在给定信道功率增益为  $\mathbf{g}$  时，如下子优化问题的最优值。

$$\begin{aligned} U^T(\mathbf{g}) &= \max_{p(\mathbf{g}), b(\mathbf{g})} \sum_{s=1}^S \{ U_s [r_s(b_s(\mathbf{g}), p_s(\mathbf{g}))] - h_s p_s(\mathbf{g}) \} \\ \text{s.t. } & r_s(b_s(\mathbf{g}), p_s(\mathbf{g})) = b_s(\mathbf{g}) \log \left( 1 + \frac{p_s(\mathbf{g}) g_{ss}}{b_s(\mathbf{g})} \right), \\ & \forall s = 1, 2, \dots, S, \forall \mathbf{g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{s=1}^S b_s(\mathbf{g}) \leq B, \quad \forall \mathbf{g} \\ & \sum_{s=1}^S p_s(\mathbf{g}) g_{sp} \leq I_p^{\max}, \quad \forall \mathbf{g} \\ & p_s(\mathbf{g}), b_s(\mathbf{g}) \geq 0, \quad \forall s = 1, 2, \dots, S, \forall \mathbf{g} \end{aligned} \quad (8)$$

在进行最优带宽和功率分配的求解时，笔者首先在给定信道功率增益  $\mathbf{g}$  的条件下求解子优化问题式(8)。为了简便，本文在下面的求解推导过程中省略  $\mathbf{g}$ 。子优化问题式(8)的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(\mathbf{b}, \mathbf{p}, l, m) &= \sum_{s=1}^S \{ U_s [r_s(b_s, p_s)] - h_s p_s \} + \\ & l \left( B - \sum_{s=1}^S b_s \right) + m \left( I_p^{\max} - \sum_{s=1}^S p_s g_{sp} \right) \\ &= \sum_{s=1}^S \{ U_s [r_s(b_s, p_s)] - h_s p_s - l b_s - m p_s g_{sp} \} + \\ & l B + m I_p^{\max} \end{aligned} \quad (9)$$

其中， $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, \dots, b_S\}$ ； $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_S\}$ ； $l$  和  $m$  分别为约束条件式(2)、式(3)对应的拉格朗日乘子。

所以子优化问题式(8)对偶问题的目标函数为

$$\begin{aligned} D^T(l, m) &= \max_{l, m \geq 0} L(\mathbf{b}, \mathbf{p}, l, m) \\ &= \sum_{s=1}^S D_s^T(l, m) + l B + m I_p^{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

其中， $D_s^T(l, m)$  为认知用户  $s$  对应的子问题，如下所示。

$$\begin{aligned} D_s^T(l, m) &= \max_{l, m \geq 0} \{ U_s [r_s(b_s, p_s)] - \\ & h_s p_s - l b_s - m p_s g_{sp} \} \end{aligned} \quad (11)$$

最终得到子优化问题式(8)的对偶问题为

$$\begin{aligned} \min_{l, m \geq 0} D^T(l, m) \\ \text{s.t. } & l, m \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

由于子优化问题式(8)的目标函数是一个严格凹函数，所以其对偶问题的目标函数是处处可微的。从而得到  $D^T(l, m)$  对  $l$  和  $m$  的偏导数分别为

$$\frac{\partial D^T}{\partial l} = B - \sum_{s=1}^S b_s \quad (13)$$

$$\frac{\partial D^T}{\partial m} = I_p^{\max} - \sum_{s=1}^S p_s g_{sp} \quad (14)$$

笔者采用梯度下降法求解对偶问题式(12)，得

到对应拉格朗日乘子  $l$  和  $m$  的迭代公式分别为

$$l(k+1) = \left[ l(k) - a \left( B - \sum_{s=1}^S b_s \right) \right]^+ \quad (15)$$

$$m(k+1) = \left[ m(k) - a \left( I_p^{\max} - \sum_{s=1}^S p_s g_{sp} \right) \right]^+ \quad (16)$$

其中,  $a$  为迭代的步长因子, 通常取一个很小的正数,  $k$  表示迭代次数。

为了得到对应于  $l(k+1)$  和  $m(k+1)$  的带宽和功率分配, 每个认知用户都需要独立地求解子问题式(11)。然而由于很难获得式(11)的闭式解, 笔者仍采用梯度下降法迭代求解。令

$$f_s(\mathbf{b}, \mathbf{p}) = U_s[r_s(b_s, p_s)] - h_s p_s - l b_s - m p_s g_{sp} \quad (17)$$

则有

$$\frac{\partial f_s}{\partial b_s} = \frac{1}{Q_s(r_s(b_s, p_s))} \left[ \log \left( 1 + \frac{p_s g_{ss}}{b_s} \right) - \frac{p_s g_{ss}}{b_s + p_s g_{ss}} \right] - l \quad (18)$$

$$\frac{\partial f_s}{\partial p_s} = \frac{1}{Q_s(r_s(b_s, p_s))} \left[ \frac{b_s g_{ss}}{b_s + p_s g_{ss}} \right] - h_s - m g_{sp} \quad (19)$$

所以得到带宽和功率的迭代公式分别为

$$b_s(k+1) = \left[ b_s(k) + a \frac{\partial f_s}{\partial b_s} \right]^+ \quad (20)$$

$$p_s(k+1) = \left[ p_s(k) + a \frac{\partial f_s}{\partial p_s} \right]^+ \quad (21)$$

根据文献[13]可知, 在进行拉格朗日乘子  $l$  和  $m$  的迭代时, 无需带宽和功率迭代收敛到最优, 即拉格朗日乘子迭代式(15)、式(16)与带宽功率迭代式(20)、式(21)可以同时进行。

在给定信道功率增益  $g$  时, 得到子优化问题式(8)的最优带宽  $b_s^*(g)$  和最优功率  $p_s^*(g)$  分配之后, 笔者再通过对偶问题式(7)来求解原问题式(5)。令  $D(?)$  对  $h_s$  求偏导, 可得

$$\frac{\partial D}{\partial h_s} = P_s^{\text{av}} - E_g [p_s^*(g)] \quad (22)$$

从而得到拉格朗日乘子  $h_s$  的迭代公式为

$$h_s(m+1) = \left[ h_s(m) - b \left( P_s^{\text{av}} - E_g [p_s^*(g)] \right) \right]^+ \quad (23)$$

其中,  $b$  为迭代的步长因子, 通常取一个很小的正数,  $m$  为迭代次数。

根据式(18)和式(19)可知, 当某个认知用户  $s$  的效用( $Q_s(r_s)$ )较低时,  $\frac{\partial f_s}{\partial b_s}$  和  $\frac{\partial f_s}{\partial p_s}$  会增大。再由式(20)

和式(21)知, 在接下来的带宽和功率迭代分配中, 该认知用户会获得更多的带宽和更高的功率, 从而提高其效用值。所以, 上述联合带宽和功率分配算法在最大化所有认知用户总平均效用的同时, 能够在一定程度上保证不同类型用户之间的效用公平性。此外, 由于优化问题式(5)是一个严格凸问题, 所以一定存在唯一的全局最优解, 而且当迭代步长因子  $a$  和  $b$  为足够小的正数时, 该算法一定能够收敛到全局最优解<sup>[12]</sup>。

### 3.2 分布式算法实现

上文推导和分析了认知无线网络下兼顾效用与公平的联合带宽和功率分配算法。算法采用内、外两层迭代的方法实现: 内层迭代求解问题式(8), 即在给定拉格朗日乘子  $l$  和瞬时信道增益  $g$  下求解认知用户的最优带宽和功率分配; 外层迭代求解问题式(7), 保证认知用户终端的平均发射功率低于门限值  $P_s^{\text{av}}$ 。图 3 给出了分布式算法的伪代码实现, 其中,  $k$  和  $m$  分别表示内层和外层的迭代次数,  $d$  和  $s$  分别是判断内层和外层迭代是否收敛的门限值。

假设已知无线信道衰落的联合概率密度函数为  $G$ , 则可以产生足够多的信道功率增益随机变量  $g$ , 再通过 offline 模式根据式(23)迭代计算拉格朗日乘子  $h_s$ , 保证终端的平均发射功率低于门限值  $P_s^{\text{av}}$ 。即图 3 中算法的外层迭代部分可以在 offline 模式下完成。算法的分布式实现过程主要包含 3 步: 每个 SU 周期性地向认知控制中心汇报自己的干扰信道状态( $g_{sp}$ )、带宽( $b_s(g)$ )和功率( $p_s(g)$ )信息; 认知控制中心在收集到所有 SU 汇报的信息后, 分别根据式(15)和式(16)确定带宽的价格因子  $l$  和 SU 终端发射功率的价格因子  $m$ , 然后将二者广播给所有的 SU; 每个 SU 在接收到  $l$  和  $m$  后, 结合自身业务的效用函数形式, 根据式(20)和式(21)调整占用的带宽和终端发射功率。最终, 通过迭代完成认知用户的联合带宽和功率分配。由于外层迭代通过 offline 模式实现, 在衡量算法计算复杂度时只需要考虑内层迭代过程。每次内层迭代中, 认知控制中心需要计算价格因子  $l$  和  $m$ , 每个 SU 需要计算各自的带宽

和功率。假设内层迭代需要  $K$  次收敛，所以算法的计算复杂度为  $O(K(2+2S))$ ， $S$  为认知用户数。

```

1) 随机产生  $N$  组信道功率增益  $\{g_1, g_2, \dots, g_N\}$ ，初始化  $m=0$ ， $h_s(m)=0$  ( $\forall s=1,2,\dots,S$ )
2) While  $m=0$  or  $\max_{s=1,\dots,S} |h_s(m)-h_s(m-1)| > \epsilon$  (外层迭代)
3) For  $n=1:N$ 
4) 令  $\mathbf{g}=\mathbf{g}_n$ ， $k=0$ ，初始化  $l(k)=1$  和  $m(k)=1$ ， $b_s(k)=0$  和  $p_s(k)=0$  ( $\forall s=1,2,\dots,S$ )
5) While  $k=0$  or  $\max_{s=1,\dots,S} |p_s(k)-p_s(k-1)| > \delta$  or  $\max_{s=1,\dots,S} |b_s(k)-b_s(k-1)| > \delta$  (内层迭代)
6) 每个 SU 分别向认知控制中心汇报带宽  $b_s(k)$  和功率  $p_s(k)$  信息，以及干扰信道状态  $g_{sp}$ 
7) 认知控制中心在获得全部 SU 的汇报信息后，根据式(15)和式(16)分别计算：
 $l(k+1)=\left[l(k)-a\left(B-\sum_{s=1}^S b_s\right)\right]^+$  和
 $m(k+1)=\left[m(k)-a\left(I_p^{\max}-\sum_{s=1}^S p_s g_{sp}\right)\right]^+$ ，然后将  $l(k+1)$  和  $m(k+1)$  广播至所有的 SU
8) 每个 SU 收到  $l(k+1)$  和  $m(k+1)$  之后，根据式(20)和式(21)分别计算带宽和功率的迭代值：
 $b_s(k+1)=\left[b_s(k)+a\frac{\partial f_s}{\partial b_s}\right]^+$  和  $p_s(k+1)=\left[p_s(k)+a\frac{\partial f_s}{\partial p_s}\right]^+$ 
9) 令  $k=k+1$ 
10) end
11) 令  $b_s^*(\mathbf{g}_n)=b_s(k)$  和  $p_s^*(\mathbf{g}_n)=p_s(k)$ 
12) end
13) 根据式(23)，每个 SU 分别计算： $h_s(m+1)=\left[h_s(m)-b\left(P_s^{\text{av}}-E_s\left[p_s^*(\mathbf{g})\right]\right)\right]^+$  ( $\forall s=1,2,\dots,S$ )
14) 令  $m=m+1$ 
15) end

```

图 3 认知无线网络中兼顾效用与公平的联合带宽和功率分配分布式算法伪代码

## 4 性能仿真

本文采用 MATLAB 软件进行算法的性能仿真，仿真场景如图 2 所示。假设在该小区内存在一个主用户与主系统基站进行上行通信，同时假设在该小区内存在 4 个认知用户：2 个弹性业务用户和 2 个非弹性业务用户。弹性业务采用的效用函数形式均为  $Q_s(r_s)=\frac{2}{1+e^{-3r_s}}-1$ ，而非弹性业务的效用函数形式采用 Sigmoid 函数： $Q_s(r_s)=\frac{1}{1+e^{-10(r_s-r_0)}}$ ，其中  $r_s$  为认知用户  $s$  的速率， $r_0$  为非弹性业务的参考速

率（仿真中取  $r_0=0.5$ ）。假设所有的无线信道都服从瑞利衰落，信道功率增益的方差为 1。加性高斯白噪声具有单位功率谱密度。每次仿真都随机产生 1000 组信道功率增益  $\mathbf{g}$ ，即  $N=1000$ 。设算法收敛门限为  $d=\epsilon=10^{-4}$ ，迭代步长分别固定为： $a=0.01$  和  $b=0.1$ 。

为了衡量本文提出算法 JAUF(joint bandwidth and power allocation with consideration of utility and fairness)的性能，笔者对比了以下 2 种资源分配算法：单用户接入(SUA, single user access)算法，即主用户的授权频段  $B$  全部分配给信道条件最好的认知用户，其余认知用户不再竞争带宽资源；等带宽等功率(EE, equal bandwidth equal power)分配算法，即所有认知用户均获得相等的带宽和功率分配。笔者主要从以下几方面衡量算法的性能：认知用户的总效用  $\sum_{s=1}^S Q_s(r_s)$ 、认知用户的总速率  $\sum_{s=1}^S r_s$ 、不同用户之间的效用公平性和速率公平性。公平性指标的定义参考文献[14]，用户之间的效用公平性指标为

$$FI_Q = \frac{\left(\sum_{s=1}^S Q_s(r_s)\right)^2}{S \sum_{s=1}^S [Q_s(r_s)]^2}$$

其中， $S$  表示认知用户数， $Q_s(\cdot)$  为认知用户  $s$  获得的效用值， $r_s$  为认知用户  $s$  获得的传输速率。同样，用户之间的速率公平性指

$$FI_R = \frac{\left(\sum_{s=1}^S r_s\right)^2}{S \sum_{s=1}^S (r_s)^2}$$

在固定  $I_p^{\max}=15$  dBm、 $P_s^{\text{av}}=15$  dBm ( $\forall s$ )，授权频带宽度  $B$  变化时，图 4 和图 5 分别给出了不同算法获得的认知用户总效用和总速率对比。从图 4 中可以看到，由于只有一个用户占用所有的授权频带，即便  $B$  增大，SUA 算法也只能保持该用户获得最大的效用值 1，表明此算法会造成一定程度的无线频谱资源浪费。EE 算法虽然能够获得较高的总效用值，但该算法并没有考虑到不同类型业务在效用函数形式上的差异，因而不能保证不同用户之间在效用上的公平性。而本文提出的 JAUF 算法，虽然损失了一定的总效用，但是能够有效地保证不同类型用户之间的效用公平性，使不同业务类型用户能够获得几近相当的 QoS 满意度。同时也说明本文算法必须在资源充足的条件下使用，否则

就可能会导致非弹性业务占用很多资源却只得到很低的效用。当存在资源不足时,可以在引入接纳控制策略的基础上再应用本文提出的算法。从图 5 中可以看到,随着授权频带宽度  $B$  的增大,认知用户的总速率也一直增大。由于 SUA 算法将所有的带宽资源分配给信道条件最好的单个认知用户,所以该用户能够获得最高的传输速率。而 EE 算法没有考虑到信道状况对资源分配的影响,获得的总速率最低。相比之下,本文提出的 JAUF 算法能够获得较高的总速率。

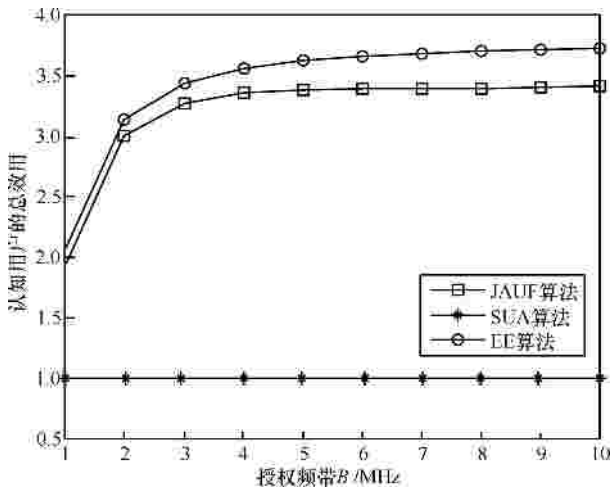


图 4 不同算法获得的总效用对比

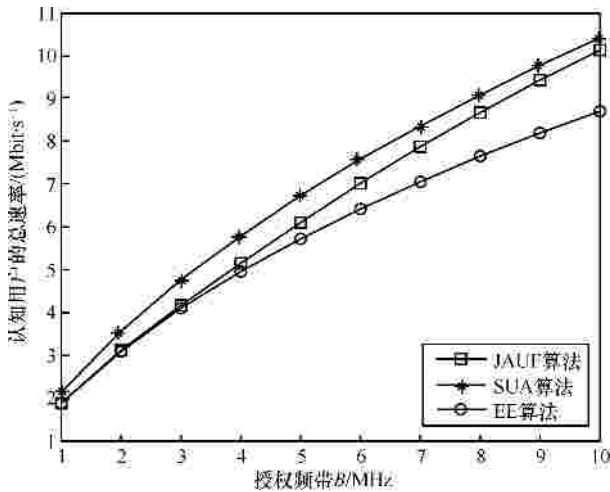


图 5 不同算法获得的总速率对比

表 1 给出了不同算法下认知用户的效用公平性和速率公平性对比。由于 SUA 算法每次只能为一个认知用户提供服务,根据公平性指标的定义,认知用户的效用和速率公平性指标均为 0.25。EE 算法为每个认知用户分配相等的带宽和功率,故而能够获得很高的速率公平性;但是由于不同业务类型

用户的效用函数形式不一样,所以 EE 算法只能达到 0.64 的效用公平性。本文提出的 JAUF 算法考虑到用户效用函数的差异,为不同业务用户分配合理的资源,能够达到 0.83 的效用公平性,也就说明本文算法能够在一定程度上保证不同业务类型用户在获得服务满意度上的公平性。

表 1 不同算法下认知用户的效用公平性和速率公平性

公平性指标	JAUF 算法	SUA 算法	EE 算法
$FI_Q$	0.83	0.25	0.64
$FI_R$	0.71	0.25	0.93

固定授权频带宽度为  $B = 10$  MHz,图 6 和图 7 分别给出了本文提出的 JAUF 算法在不同  $I_p^{max}$  和  $P_s^{av}$  组合情况下获得的认知用户总效用和总速率。可以看到,当认知用户终端的发射功率约束  $P_s^{av}$  固定时,所获得的总效用和总速率会随着 PBS 干扰约束门限  $I_p^{max}$  的增大而增大;但是当  $I_p^{max}$  增大到一定程度之后(如  $P_s^{av} = 6$  dBm,  $I_p^{max} = 7$  dBm),认知用户的总效用和总速率逐渐开始饱和,此时  $P_s^{av}$  已经成为限制系统性能进一步提升的制约因素,即原始优化问题的约束条件式(4)是有效约束,而式(3)为非有效约束。同样,当  $I_p^{max}$  固定,认知用户所获得的总效用和总速率会随着  $P_s^{av}$  的增大而增大。当  $P_s^{av}$  增大到一定程度之后(如  $I_p^{max} = 5$  dBm,  $P_s^{av} = 5$  dBm),认知用户的总效用和总速率开始饱和,此时  $I_p^{max}$  又成为限制系统性能进一步提升的制约因素,即原始优化问题的约束条件式(3)变为有效约束,而式(4)成为非有效约束。

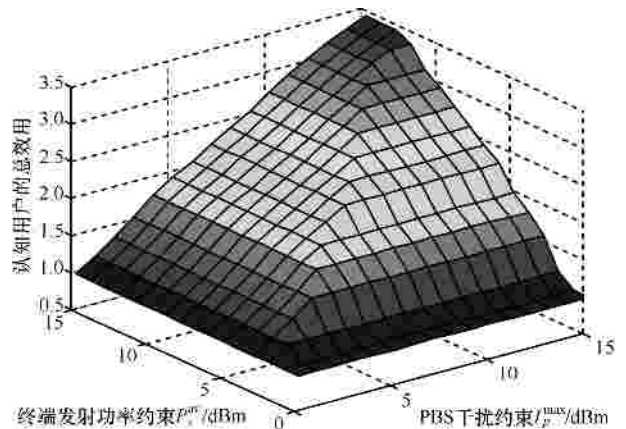


图 6 JAUF 算法在不同约束组合下的总速率对比

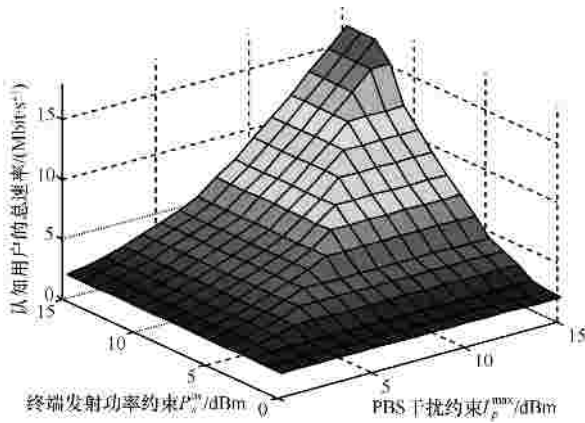


图 7 JAUF 算法在不同约束组合下的总速率对比

为了衡量 JAUF 算法的收敛速度性能，在  $B = 10 \text{ MHz}$ 、 $P_s^{av} = 6 \text{ dBm}$ 、 $I_p^{\text{max}} = 7 \text{ dBm}$  时，笔者给出了内、外层迭代拉格朗日乘子的迭代曲线。图 8 是内层迭代拉格朗日乘子  $l$  和  $m$  的迭代曲线，可以看到内层迭代需要 1 000 次左右即可收敛，获得

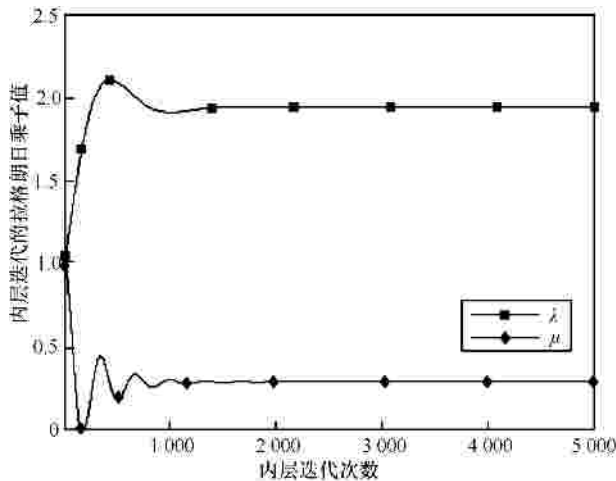


图 8 内层迭代的拉格朗日乘子迭代曲线

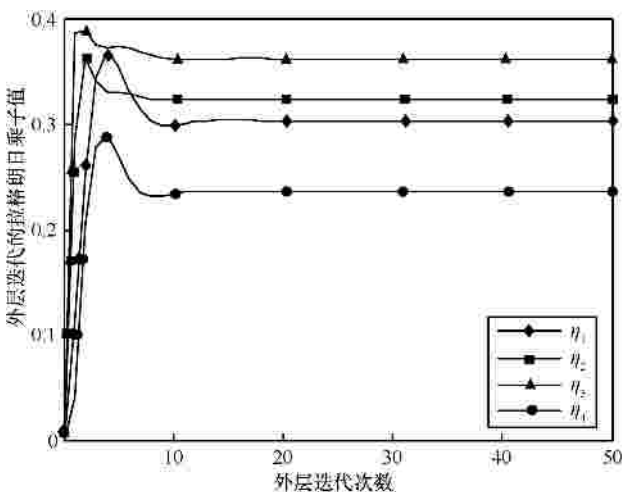


图 9 外层迭代的拉格朗日乘子迭代曲线

在给定拉格朗日乘子  $\eta$  和瞬时信道增益  $g$  下认知用户的最优带宽和功率分配。图 9 给出了外层迭代拉格朗日乘子  $\eta$  的迭代曲线，可以看到外层迭代只需要 15 次左右就能收敛，实现保证认知用户终端的平均发射功率低于门限值  $P_s^{av}$ 。

### 5 结束语

分析了认知无线网络中的联合带宽和功率分配问题，针对不同类型业务具有不同的 QoS 要求，给出了统一的效用函数形式。在瑞利衰落信道中，考虑到认知用户终端存在平均发射功率约束和主用户接收机存在峰值干扰功率约束，构造了最大化所有认知用户总效用平均值的优化问题。采用拉格朗日对偶方法的分析和求解，提出了一种兼顾效用与公平的联合带宽和功率分配的分布式算法。仿真结果表明，本文提出的联合资源分配算法能够实现为不同业务类型的认知用户统一合理地分配带宽和功率资源，在最大化所有认知用户总平均效用的同时，能够有效地保证不同业务类型用户之间具有较好的服务满意度公平性。然而，当系统资源匮乏时，本算法为了保证用户之间的公平性，可能会导致所有用户都不能获得满足其业务最低要求的服务。此时就需要先引入接纳控制策略，然后再应用本文算法进行联合资源分配，这也是未来研究的方向之一。

### 参考文献：

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201-220.
- [2] BERLEMANN L, DIMITRAKOPOULOS G, MOESSNER K. Cognitive Radio and Management of Spectrum and Radio Resources in Reconfigurable Networks[R]. Wireless World Research Forum, 2005.
- [3] CHEN Y, ZHAO Q, ANANTHARM S. Joint design and separation principle for opportunistic spectrum access in the presence of sensing errors[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(5):2 3-2071.
- [4] CHANG N B, LIU M. Optimal channel probing and transmission scheduling for opportunistic access[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(6):1805-1818.
- [5] LIU Y, XU D, FENG Z Y, et al. Capacity of cognitive radio under outage constraint with partial channel knowledge[A]. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)[C]. Nanjing, China, 2011. 1-5.
- [6] GHASEMI A, SOUSA E S. Fundamental limits of spectrum sensing in fading environments[J]. IEEE Transactions on Wireless communications, 2007, 6(2):649-658.
- [7] GONG X W, VOROBYOV S A, TELLAMBURA C. Optimal bandwidth and power allocation for sum ergodic capacity under fading channels in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(4):1814-1826.
- [8] KIM D I, LE L B, HOSSAIN E. Joint rate and power allocation for cognitive radios in dynamic spectrum access environment[J]. IEEE

Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12):5517-5527.

[9] WANG W H, PALANISWAMI M, LOW S H. Application-oriented flow control: fundamentals, algorithms and fairness[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(6):1282-1291.

[10] JIN J, LAW Y W, PALANISWAMI M, *et al.* A unified flow control approach for QoS balance in differentiated services[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Cape Town, 2010. 1-6.

[11] CHEN L, WANG B, CHEN X H, *et al.* Utility-based resource allocation for mixed traffic in wireless networks[A]. IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)[C]. Shanghai, China, 2011. 91-96.

[12] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. Cambridge, UK: Cambridge Univ Press, 2004.

[13] LIN X J, SHROFF N B. Utility maximization for communication networks with multipath routing[J]. IEEE Transactions Automatic Control, 2006, 51(5):766-781.

[14] JAIN R, CHIU D, HAWKINS W. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems[R]. DEC Research Report TR-301, 1984.



李建东 (1962-), 男, 江苏阜宁人, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信、认知无线电和网络、自组织网络、宽带无线 IP 技术等。



赵林靖 (1976-), 女, 陕西西安人, 西安电子科技大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为软件无线电、认知无线电、认知网络、宽带无线传输等。

作者简介:



闫继垒 (1986-), 男, 河北承德人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为认知无线网络和异构无线网络中的资源管理。



董全 (1986-), 男, 安徽蚌埠人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为无线资源分配及接纳控制。

(上接第 56 页)

[9] BREZO F, SANTOS I, BRINGAS P G, *et al.* Challenges and limitations in current botnet detection[A]. Proceedings of the 22nd International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA)[C]. Toulouse, 2011. 95-101.

[10] HUA J, SAKURAI K. Botnet command & control based on sh message service and human mobility[J]. Computer Networks, 2012(57):579-597.

[11] AKIYAMA M, KAWAMOTO T, SHIMAMURA M, *et al.* A proposal of metrics for Botnet detection based on its cooperative behavior[A]. Proceedings of Applications and the Internet Workshops[C]. Hiroshima, Japan, 2007. 82.

[12] 王爽. 基于流量特征的 IRC 僵尸网络检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

WANG S. Research of IRC Botnet Detection Technology Based on Traffic Flow Characteristics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

[13] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究[J]. 软件学报, 2008, 19(1): 48-61.

SUN J G, LIU J, ZHAO L Y. Clustering algorithms research[J]. Journal of Software, 2008, 19(1):48-61.

[14] HANSEN P, NGAI E, CHEUNG B K, *et al.* Analysis of global  $k$ -means, an incremental heuristic for minimum sum-of-squares clustering[J]. Journal of Classification, 2005, 22(2):287-310.

[15] 陈德军, 罗金成, 张兵. 基于改进的  $k$ -means 聚类算法的分类评价方法[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(1):32-35.

CHEN D J, LUO J C, ZHANG B. Classification and evaluation on

reviewers based on improved  $k$ -means clustering algorithm[J]. Journal of WUT(Information & Management Engineering), 2011, 33(1): 32-35.

作者简介:



闫健恩 (1977-), 男, 山东烟台人, 哈尔滨工业大学博士生、讲师, 主要研究方向为网络信息安全、僵尸网络等。

袁春阳[通信作者] (1979-), 男, 山东济宁人, 博士, 国家计算机网络应急技术处理协调中心工程师, 主要研究方向为系统软件与网络信息安全。E-mail: jiren191@sina.com。

许海燕 (1978-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 哈尔滨工业大学讲师, 主要研究方向为网络信息安全、DNS 安全等。

张兆心 (1979-), 男, 满族, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨工业大学副教授, 主要研究方向为网络与信息安全、网络模拟、域名体系安全等。