



Underlay 模式下认知无线电 OFDM 系统多用户资源分配 *

李鑫滨, 石爱武, 宋兴芳

(燕山大学电气工程学院工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

摘要: 为了更有效地求解 Underlay 频谱共享模式下的 OFDM 系统多用户资源分配问题, 提出了一种公平、复杂度低的资源分配方法, 首先利用公平性的子载波分配方法为认知用户分配子载波, 然后利用子载波分配结果, 将复杂的多用户资源分配问题转化为简单的单用户功率分配问题, 并利用一种复杂度较低的线性封顶注水算法对子载波功率的分配进行求解。通过一种 TV 频段 OFDM 系统对算法性能进行了仿真对比分析, 仿真结果验证了本文所提资源分配方法的有效性和优越性。

关键词: Underlay 频谱共享; OFDM; 多用户资源分配; 子载波分配; 线性封顶注水算法

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.04.017

Multi-Users Resource Allocation Problem in OFDM Systems Under the Underlay Spectrum Sharing Mode for Cognitive Radio

Li Xinbin, Shi Aiwu, Song Xingfang

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to solve the multi-users' resource allocation problem of OFDM systems under the underlay spectrum sharing mode conveniently and efficiently, a fair resource allocation algorithm with low complexity was proposed. The fair subcarrier allocation algorithm was applied to allocate subcarrier for cognitive users to turn the complex problem of resource allocations into a simple problem of a single user power allocation. Also a linear capped water-filling algorithm with low complexity was used to solve the subcarrier power allocation problem. Simulation results show that, compared with other methods, the proposed method has very good effectiveness and superiority in application to the TV frequency's OFDM system.

Key words: Underlay spectrum sharing, OFDM, resource allocation for multi-users, subcarrier allocation, linear capped water-filling algorithm

1 引言

认知无线电(cognitive radio, CR)技术^[1]能够有效地缓解当前频谱资源短缺的问题^[2], 因此受到了人们的广泛关注^[3,4]。正交频分复用(orthogonal frequency division

multiplexing, OFDM) 技术作为一种 CR 系统广泛采用的调制技术, 具有可重配的子载波结构, 能够灵活地分配子载波和自适应地调整传输参数。

基于 OFDM 系统的认知无线电频谱共享有 Overlay 和 Underlay 两种模式。其中, Overlay 模式下的频谱共享是指

* 国家自然科学基金资助项目(No.61172095), 河北省自然科学基金资助项目(No. F2012203138)



认知用户检测到频谱空穴后,机会式地接入主用户暂时没有使用的空闲频谱,然后通过子载波间的功率分配,实现系统性能的最优化^[5-8]。随着无线通信技术大面积取代有线技术以及认知用户数量的急剧增长,Overlay 频谱共享模式下的空闲频谱越来越拥挤。因此,针对这一未来将要面临的实际问题,研究认知用户与主用户同时使用相同信道的 Underlay 频谱资源共享问题变得十分必要。在 Underlay 频谱共享模式下,为保障主用户的服务质量(QoS)需求,必须通过功率上限来限制认知用户的子载波功率。参考文献[9]针对认知用户与主用户共享频谱资源的家庭基站单用户功率分配问题,以降低算法复杂度为目的,给出了一种简单的功率分配算法,但该方法分配给认知用户的子载波功率之和远小于其总发射功率,因而会造成一定的系统吞吐量损失。参考文献[10]设计了一种实现简单的快速功率分配算法,但在低总功率和高功率上限的约束条件下,该算法会比较明显地降低系统吞吐量。同时,上述研究只局限于求解 Underlay 模式下的单用户功率分配问题,在现实的 CR 网络中,存在多个认知用户共同分用主用户频谱的情况。此时,考虑用户间的公平性以及同时保障用户的 QoS 性能,是进行子载波资源和功率分配时面临的主要问题。

本文针对 TV 频段多用户资源共享问题,提出了一种公平、低复杂度的多用户资源分配算法。首先定义了子载波质量参数,并据此给出了一种体现用户间公平性的子载波分配方法;子载波分配完成后,本文提出了一种线性封顶注水功率分配算法,实现对认知用户子载波的功率分配;最后,对 TV 频段的认知无线电系统进行了仿真测试与比较。

2 系统模型

本文考虑如图 1 所示的 Underlay 频谱共享系统模型,该系统利用模拟 TV 频段为认知用户提供宽带通信服务,并采用 OFDM 技术将每个 TV 频段划分为 N 个子载波。Underlay 频谱共享模式下,认知用户与主用户(TV)共用同一频谱资源。为了保障主用户的 QoS 需求,需要限制认知用户各子载波的最大发射功率,从而使主用户的信干噪比(SINR)不低于预先设定的门限值 $\tilde{I}_{\text{SINR}}$,即:

$$P_{\text{pu}} - PL(d) - (P_{\text{cu}} - PL(r)) \geq \tilde{I}_{\text{SINR}} \quad (1)$$

其中, P_{pu} 和 P_{cu} 分别为 TV 基站和 CR 基站每个子载波的发射功率; d 、 r 分别为 TV 基站到 TV 用户和 CR 基站

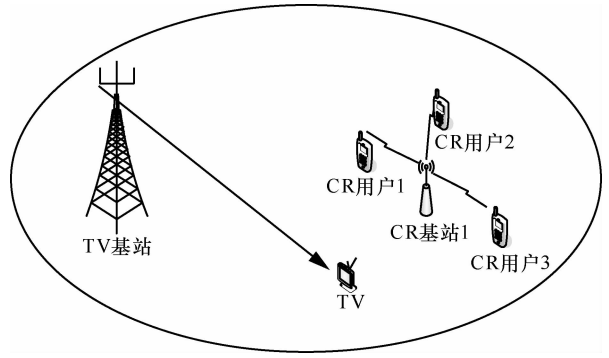


图 1 Underlay 频谱共享系统模型

到 CR 用户的距离; PL 是一定区域内的路径衰落,可由式(2)描述:

$$PL(\cdot) = L_1 + L_2 \lg(\cdot) \quad (2)$$

其中, L_1 、 L_2 是路径衰落因子; $\cdot$ 为基站到用户之间的距离。由式(1)、式(2)可以得到 CR 基站子载波的最大传输功率为:

$$P_{\text{upper}} = P_{\text{pu}} - PL(d) + PL(r) - \tilde{I}_{\text{SINR}} \quad (3)$$

为保障 TV 用户的 QoS 需求,每个 CR 基站子载波的发射功率不能超过其功率上限 P_{upper} 。图 1 所示频谱共享模型下的 OFDM 资源分配问题,是在 CR 用户总功率和子载波功率上限双重约束的条件下,通过确定合理的子载波分配因子及分配给各子载波的功率,最大化系统吞吐量。因此,本文以最大化系统吞吐量为目标函数,构建了 Underlay 频谱共享模式下的多用户资源分配模型。

$$\max_{P_{i,n}} C(P_{i,n}) = \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^N \omega_{i,n} \Delta f \lg(1 + P_{i,n} H_{i,n}), \quad (4)$$

$$\omega_{i,n} \in \{0, 1\}, \quad \sum_{i=1}^M \omega_{i,n} \leq 1$$

$$\sum_{n=1}^N P_{i,n} \leq P_{i,\text{totle}},$$

$$P_{i,n} \geq 0, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

$$P_{i,n} \leq P_{i,n}^{\text{upper}}, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

其中, N 为子载波个数, M 为 CR 用户个数; $\omega_{i,n}$ 定义为子载波分配因子,其约束条件能够保证任一子载波最多只能分配给一个 CR 用户; $p_{i,n}$ 为分配给 CR 用户 i 第 n 个子载波上的功率; $H_{i,n}$ 为 CR 用户 i 第 n 个子载波上的信道增益, $p_{i,\text{totle}}$ 为 CR 用户 i 的总发射功率; $P_{i,n}^{\text{upper}}$ 为 CR 用户 i 的子载波功率上限。求解式(4)所示的多用户资源分配优化问题,其算法的复杂度很高,求解较困难,因此本文采用先进子载波分配,再进行子载波功率分配的两步优化策略。

3 Underley 模式下的多用户资源分配方法

3.1 基于公平性的子载波分配算法

由系统模型式(4)可知,为获得最大化的系统性能,需要将子载波分配给在该子载波上信道增益大且对 TV 用户可能产生的干扰小的 CR 用户。因此本文定义一个既考虑子载波信道增益,又包含 CR 用户对 TV 用户干扰信息的子载波质量参数。

定义子载波质量参数 $u_{i,n}=H_{i,n} \cdot P_{i,n}^{\text{upper}}$, 其中, $H_{i,n}$ 为 CR 用户 i 第 n 个子载波上的信道增益, $P_{i,n}^{\text{upper}}$ 为 CR 用户 i 的子载波功率上限。

由式(1)及式(3)可知, $P_{i,n}^{\text{upper}}$ 越大,表示 CR 用户 i 对 TV 用户可能产生的干扰越小。因此,CR 用户 i 在子载波 n 上的信道增益越大,并且 CR 用户 i 对 TV 用户可能产生的干扰越小,子载波质量参数 $u_{i,n}$ 越大,载波 n 越适合分配给 CR 用户 i 。

本文提出的基于公平性的子载波分配算法流程如下。

(1) 估计 CR 用户 i 所需的子载波个数 $\hat{N}_i$, $\hat{N}_i =$

$\frac{Q_i}{\Delta f \ln(1 + \bar{p}_i \bar{H}_i)}$, 其中, Q_i 为 CR 用户 i 的 QoS 需求, $\bar{p}_i$ 为平均分配给 CR 用户 i 的子载波上的功率, $\bar{H}_i$ 为 CR 用户 i 的子载波平均增益。

(2) 判断 CR 用户所需子载波总数是否超过系统提供的

子载波数 N 。若 $\sum_{i=1}^M \hat{N}_i \geq N$, 执行步骤(3); 否则执行步骤(4)。

(3) 依次将各子载波分配给在该子载波上质量参数最高的 CR 用户, 即 $n' = \arg \max_n \{u_{i,n}\}$, $\omega_{i,n}=1$, 而当某一 CR 用户分配到的子载波数达到其需求的子载波数时, 将该认知用户剔除, 继续为其他 CR 用户分配子载波, 直到将所有 N 个子载波分配完毕后, 跳到步骤(5)。

(4) 首先利用步骤(3)的子载波分配方式将前 $\sum_{i=1}^M \hat{N}_i$ 个子载波分配给各 CR 用户, 满足各 CR 用户的最低子载波需求, 并对余下的 $N - \sum_{i=1}^M \hat{N}_i$ 个子载波按贪婪式算法^[6-8]再分配给各 CR 用户。

(5) 获得子载波分配矩阵 W , 算法结束。

3.2 最优子载波功率分配算法

在子载波分配完成后, 由于子载波分配因子 $w_{i,n}$ 已经

确定, 式(4)所描述的多用户资源分配模型可以简化为如下单用户功率分配模型。

$$\begin{aligned} \max_{P_n} C(P_n) &= \sum_{n=1}^N \Delta f \ln(1 + P_n H_n), \sum_{n=1}^N P_n \leq P_{\text{total}}, \\ P_n &\geq 0, \quad n=1, 2, \dots, N \\ P_n &\leq P_n^{\text{upper}}, \quad n=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

其中, H_n 为简化后的功率分配模型的子载波增益, 可由式(6)决定:

$$H_n = \sum_{i=1}^M \omega_{i,n} H_{i,n} \quad (6)$$

容易验证, $C(P_n)$ 在式(5)的定义域内为凸函数, 则式(5)为标准凸优化问题, 其最优解可通过构造如下 Lagrange 函数求解。

$$G = \sum_{i=1}^N \Delta f \ln(1 + P_n H_n) - \lambda \left(\sum_{i=1}^N P_n - P_{\text{total}} \right) - \beta_n (P_n - P_n^{\text{upper}}) \quad (7)$$

其中, λ, β_n 为 Lagrange 乘子, 其最优解满足 KKT 条件^[9]:

$$\begin{cases} \frac{\Delta f}{\ln 2} \frac{H_n}{1 + P_n H_n} - \lambda - \beta_n = 0 \\ \lambda \left(\sum_{i=1}^N P_n - P_{\text{total}} \right) = 0 \\ \beta_n (P_n - P_n^{\text{upper}}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

由于 λ, β_n 为非负常数, 由式(8)可得最优功率分配结果为:

$$P_n^* = \left[\frac{\Delta f}{(\lambda + \beta_n) \ln 2} - \frac{1}{H_n} \right]^+ \quad (9)$$

其中 $[x]^+ = \max(0, x)$ 。

式(7)所示 Lagrange 函数涉及 $N+1$ 个待定参数, 因此其最优解的求解复杂, 应用内点法或椭圆法求解, 其复杂度为 $O(N^3)$ ^[10]。为了适应实际应用需求, 需要设计一种算法复杂度较低的功率分配算法。

3.3 线性封顶注水功率分配算法

由式(5)和式(9)可知, 当子载波功率不满足封顶限制条件, 即 $P_n > P_n^{\text{upper}}$ 时, 只能给该子载波分配功率 P_n^{upper} , 即 $P_n = P_n^{\text{upper}}$ 。而当子载波功率满足封顶限制条件时, 其功率值的大小与子载波质量有关, 质量好的子载波多分配功率, 质量差的少分甚至不分。如不考虑封顶限制的条件, 即令



式(7)中的 β_n 为0,并求导 $\frac{\partial L}{\partial P_n}$,同时令 $\gamma=\lambda \ln 2$,则有:

$$\gamma = \frac{H_n}{1+H_n P_n} \quad (10)$$

由于 γ 为非负常数,所以由式(10)可以推出:

$$\frac{H_m}{1+H_m P_m} = \frac{H_n}{1+H_n P_n} \quad (11)$$

其中, $m, n=\{1, 2, \dots, N\}$,则有:

$$P_n = P_m + \frac{1}{H_m} - \frac{1}{H_n} \quad (12)$$

当确定任一个子载波的功率后,就能够通过式(12)直接求出其他子载波的功率。并且所有子载波的功率和应满足总功率约束,即:

$$\sum_{i=1}^N P_n = N \left[P_m + \frac{1}{H_m} \right] - \sum_{n=1}^N \frac{1}{H_n} \leq P_{\text{totle}} \quad (14)$$

由式(14)可得:

$$P_m \leq \frac{1}{N} \left[P_{\text{totle}} - \frac{N}{H_m} + \sum_{n=1}^N \frac{1}{H_n} \right] \quad (15)$$

由式(15)可逐一确定各子载波功率,但由此得到的结果不一定满足式(5)中功率非负和功率上限的条件。若求出功率 $P_m < 0$ 时取 $P_m = 0$ 及 $P_m > P_m^{\text{upper}}$ 时令 $P_m = P_m^{\text{upper}}$,同样不能满足式(5)中的总功率约束条件。因此需要复杂的迭代运算,选取最佳的参数 γ 。

为了降低算法复杂度,避免复杂的迭代运算,本文提出一种线性封顶注水功率分配方法。将子载波信道增益按降序排列,即 $H_1 \geq H_2 \geq \dots \geq H_N$,则相应子载波功率的排序为 $P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_N$ 。根据式(15)可得:

$$P_1 = \frac{1}{N} \left[P_{\text{totle}} - \frac{N}{H_1} + \sum_{n=1}^N \frac{1}{H_n} \right] \quad (16)$$

若 $P_1 \geq P_1^{\text{upper}}$,则令其功率值为 P_m^{upper} ,并在总功率中减去 P_m^{upper} ,即 $\tilde{P}_{\text{totle}} = P_{\text{totle}} - P_m^{\text{upper}}$,同时将该子载波的信道增益从 $\sum_{n=1}^N \frac{1}{H_n}$ 中剔除,即由 $\sum_{n=1}^N \frac{1}{H_n} - \frac{1}{H_1}$ 代替。随后,给第二个子载波分配功率:

$$P_2 = \frac{1}{N-1} \left[\tilde{P}_{\text{totle}} - \frac{N-1}{H_2} + \sum_{n=2}^N \frac{1}{H_n} \right] \quad (17)$$

直到找到 $P_m < P_m^{\text{upper}}$,然后根据式(15)计算信道增益最小的子载波的功率,即:

$$P_N = \frac{1}{\tilde{N}} \left[\tilde{P}_{\text{totle}} - \frac{\tilde{N}}{H_N} + \sum_{n=\tilde{N}}^N \frac{1}{H_n} \right] \quad (18)$$

其中, $\tilde{N}$ 为分配完上限功率后剩余的子载波数, $\tilde{P}_{\text{totle}}$ 为剩余的总功率值。若 $P_N \leq 0$,则将该子载波功率置0,并剔除该子载波,给第 $N-1$ 个子载波分配功率,如下:

$$P_{N-1} = \frac{1}{\tilde{N}-1} \left[\tilde{P}_{\text{totle}} - \frac{\tilde{N}-1}{H_{N-1}} + \sum_{n=\tilde{N}}^N \frac{1}{H_n} \right] \quad (19)$$

直到找到 $P_k > 0$,然后根据式(15)依次求出剩余子载波的功率。

上述功率分配方法称为封顶线性注水功率分配算法,该算法与最优功率分配方法相比,很大程度上降低了算法复杂度。其运算量主要由两部分构成,第1部分是子载波增益排序,运算量为 $O(N \cdot \ln N)$;第2部分为确定子载波功率,运算量为 $O(N)$ 。因此封顶线性注水功率分配算法的算法复杂度为 $O(N \cdot \ln N + N)$,当子载波个数 N 较大时,可明显降低算法复杂度。

4 仿真结果与分析

认知无线电 OFDM 系统的多用户资源分配,由于受子载波分配算法和功率分配算法性能的双重影响,因此可以分别用子载波分配结果和系统吞吐量变化来分析对比不同算法的性能。本节针对图1所示的TV频段 Underley 频谱共享系统模型进行仿真。系统参数设置如下:CR用户数 $M=4$,子载波总数 $N=64$,误码率 $BER=10^{-3}$,时延扩展 $\tau=2.5 \mu\text{s}$,子载波带宽 $\Delta f=0.3125 \text{ MHz}$ 。

相同条件下,分别在用户所需子载波总数不超过系统可用子载波总数、用户所需子载波总数超过系统可用子载波总数的两种情况下,利用本文提出的基于公平性的子载波分配算法与目前参考文献广泛采用的贪婪式子载波分配方法^[6-8],计算子载波分配结果,见表1。

表1中 $\hat{N}_i$ 表示第 i 个CR用户所需的子载波个数,其中情况1表示用户所需子载波总数不超过系统可用子载波

表1 两种算法不同用户所获子载波数(个)

		CR 用户 1	CR 用户 2	CR 用户 3	CR 用户 4
情况 1	$\hat{N}_i$	12	6	14	11
	贪婪式	22	16	11	15
	公平式	16	19	15	14
情况 2	$\hat{N}$	15	20	18	14
	贪婪式	22	16	11	15
	公平式	15	20	15	14

总数,即 $\sum_{n=1}^M \hat{N}_i \leq N$, 情况 2 表示用户所需子载波总数超过

系统可用子载波总数,即 $\sum_{n=1}^M \hat{N}_i > N$ 。

由表 1 可以看出,在情况 1 下,贪婪式算法的分配结果中某些用户(如 CR 用户 1)所分配到的子载波个数远超过其所需个数,这就致使在用户所需子载波总数不超过系统可用子载波总数的情况下,仍有用户(如 CR 用户 3)不能获得其所需的子载波数,而本文提出的基于公平性的算法能够满足所有用户需求;在情况 2 下,依据贪婪式算法,CR 用户 1 在满足子载波需求的情况下,仍被分给了过多的子载波,导致用户 2 和用户 3 都不能满足其子载波个数需求,而基于公平性的算法在该情况下能够在满足 CR 用户 1 的子载波需求情况下,最大限度地满足其他多数用户的子载波需求(只有 CR 用户 3 不能满足),因此,两种子载波分配算法相比,基于公平性的算法既充分利用了资源,又保证了用户间的公平性。

在实现认知用户的子载波分配后,还需对其子载波进行功率分配,表 2 给出了封顶线性注水功率分配算法与最优算法、简单算法^[9]及快速算法^[10]复杂度的比较。

表 2 不同算法复杂度比较

名称	复杂度
最优算法	$O(N^3)$
封顶线性注水算法	$O(N \cdot \text{lb } N + N)$
简单算法	$O(N \cdot \text{lb } N + N)$
快速算法	$O(N \cdot \text{lb } N)$

由表 2 可以看出,线性封顶注水功率分配算法与简单算法的算法复杂度相同,但明显低于最优算法,而略高于快速算法。

图 2 给出了最优算法、封顶线性注水算法、简单算法和快速算法获得的系统总吞吐量与系统总功率的关系。可以看出,在任何给定的总功率约束条件下,封顶线性注水算法几乎都能够获得与最优算法所得系统总吞吐量相同的结果。而对于简单算法和快速算法,在认知用户可用总功率较低时,由于分配给绝大多数的子载波功率都达不到其功率上限,因此,快速算法相比简单算法的吞吐量损失要大;随着认知用户可用总功率逐渐提高,

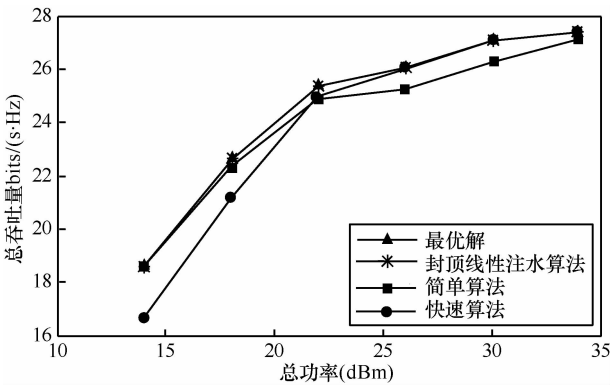


图 2 系统总吞吐量与系统总功率的关系

越来越多的子载波功率达到其功率上限,快速算法所得结果开始逐渐逼近最优解。而简单算法由于直接将超出功率上限的子载波功率设置为其上限功率,不能充分地利用认知用户的可用总功率,因此其所获得的系统吞吐量开始有明显的降低。

图 3 给出了 4 种算法获得的系统总吞吐量与 CR 用户平均功率上限的关系。由图 3 可以看出,对于任何给定平均功率上限值,封顶线性注水算法所获得的系统吞吐量与最优算法所得的吞吐量几乎处处相同。而对于简单算法和快速算法,在平均功率上限较低时,分配给绝大多数子载波的功率都能达到其功率上限,此时,快速算法的系统吞吐量损失相比简单算法的吞吐量损失要小;随着平均功率上限值的不断增长,受功率上限影响的子载波个数逐渐减少,简单算法所得系统吞吐量开始逼近最优解,而对于快速算法来说,有越来越少的用户分配到功率,因此其所获得的系统吞吐量开始呈下降趋势。

综上所述,本文所提的资源分配方法,充分利用了子载波资源,保证了 CR 用户之间的公平性,并且在降低算法复杂度的同时,还能在不同条件下很好地逼近功率分配的最优解,因此算法性能优于其他分配算法。

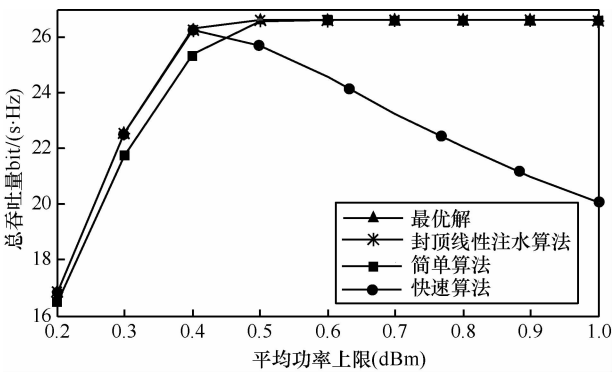


图 3 系统总吞吐量与系统平均功率上限的关系



5 结束语

本文研究 TV 频段多载波系统 Underley 频谱共享模式下的多用户资源分配问题, 基于两步优化策略提出了一种基于公平性的子载波分配方法, 该方法与广泛采用的贪婪式子载波分配方法相比, 既能充分利用子载波资源, 又能保障认知用户间的公平性; 认知用户分配到子载波后, 通过本文所提出的封顶线性注水算法完成子载波功率分配, 该功率分配方法在保证系统总吞吐量与最优算法所得结果几乎相等的同时, 有效地降低了算法复杂度。对 TV 频段 OFDM 系统的仿真分析, 验证了本文所提方法的优越性, 能够有效地应用于实际认知无线电系统的资源分配求解问题。

参考文献

- 1 Mitola J, Maguire G Q. Cognitive radio: making software radios more personal. *Personal Communication*, 1999, 6(4): 13~18
- 2 Federal Communications Commission. Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies: Notice of Proposed Rule Making and Order. FCC Document ET Docket, 2003
- 3 Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(2): 201~220
- 4 滕志军, 韩雪, 杨旭. 认知无线电中基于多次博弈的功率控制算法. *电信科学*, 2011, 27(8): 63~67
- 5 张冬梅, 徐友云, 蔡跃明. OFDMA 系统中线性注水功率分配算法. *电子与信息学报*, 2007, 29(6): 1286~1289
- 6 张然然, 刘思扬, 谢刚等. 认知无线电下行链路中的频谱共享

算法. *电子与信息学报*, 2009, 31(5): 1086~1089

- 7 张然然, 刘元安, 林晓峰等. 认知无线电下行链路中的 OFDM 资源分配算法. *电子学报*, 2010, 38(3): 632~637
- 8 Shaat M, Bader F. Computationally efficient power allocation algorithm in multicarrier-based cognitive radio networks: OFDM and FBMC systems. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010(1): 1~12
- 9 Kim J, Kang H, Yu H, *et al.* Self-optimized power allocation based on interference cognition in femtocell network. *IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communication Symposium*, Hsinchu, Taiwan, China, 2009: 52~55
- 10 Pao W C, Chen Y F, Chan C Y. Power allocation schemes in OFDM-based femtocell networks. *Wireless Personal Communications*, 2012, 69(4): 1054~1060
- 11 Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004: 241~249

[作者简介]



李鑫滨, 男, 博士, 燕山大学电气工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为认知无线网络、智能信息处理及故障诊断方法研究等。

石爱武, 男, 燕山大学电气工程学院硕士研究生, 主要研究方向为认知无线网络技术等。

宋兴芳, 女, 燕山大学电气工程学院硕士研究生, 主要研究方向为家庭基站网络优化等。

(收稿日期: 2013-01-21)

·简讯·

烽火通信入围中国联通 2013 年 IPRAN 集采前三甲

近期, 备受业界关注的中国联通 2013 年 IPRAN 集采结果揭晓, 烽火通信科技股份有限公司 (以下简称烽火通信) 以领先的技术优势和良好的品牌形象位列前三甲, 中标项目覆盖华东、华中、华南、西北等地区的数十个本地网, 再次显示出烽火通信在新一代分组承载网领域较强的综合实力。

2012 年 5 月, 中国联通进行了首轮 IPRAN 设备的集采, 为部分本地网进行基站分组化升级, 经过半年多的建设和运行, 中国联通集团积累了大量的建网经验, 更加明

确了现网需求。此次第二轮集采共涉及 200 多个本地网, 进一步扩大了中国联通 IPRAN 网络建设规模, 为 3G 以及即将来临的 LTE 搭建更优越的网络基础。

此次中国联通 IPRAN 建设最关注分组业务的传送效率, 作为唯一一家同时支持 IP/MPLS 和 MPLS-TP 双栈协议的厂商, 烽火通信可提供端到端 L3、L2 以及 L3+L2 组网方案, 可根据不同业务类型采用最佳的业务组织方式, 既可以满足中国联通现阶段的业务需要, 还能够有效提升业务开通效率, 更好地支撑中国联通快速增长的 3G 业务和未来 LTE 业务发展需求。此外, 烽火 IPRAN 还支持全图形化网管、“一次性”进站开通、“向导式”模板配置等便捷功能, 极大地提升了开通、维护效率。