

文章编号:1000-582X(2010)08-017-06

认知无线网络基于正交频分复用的 子载波和功率分配策略

唐 伦^{1,2}, 曾孝平¹, 陈前斌², 王 欢²

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室, 重庆 400065)

摘 要:为满足认知用户对主用户的干扰约束,建立了在主用户接收端干扰受限条件下最大化认知用户容量的数学优化问题;进一步提出了当主用户信噪比不断变化时,认知用户可根据干扰控制因子自适应地调整发射功率,最大化认知系统容量;利用拉格朗日乘数法,得到了该数学问题的最优解;最后,在多用户情况下提出了一种公平性和容量性能折衷的子载波和功率分配方案。仿真结果表明,在主用户可容忍的干扰约束下,该方案能有效地保证认知用户间的公平性且系统容量性能趋于最优。

关键词:认知无线电;OFDM;资源分配;凸优化;公平性

中图分类号: TP929.5

文献标志码: A

Novel strategy for subcarrier and power allocation in OFDM-based cognitive radio networks

TANG Lun^{1, 2}, ZENG Xiao-ping¹, CHEN Qian-bin², WANG Huan²

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China)

Abstract: In order to limit the interference caused by cognitive user within the range that primary users can tolerate. The mathematical optimization problem is formulated maximizing cognitive user's capacity under the interference constraint at the primary receiver. When the signal-to-noise ratio of primary user changes according to the communication environment, the cognitive user can adaptively adjust its transmission power according to the interference control factor η . The optimal solution to the problem is obtained by utilizing the Lagrange method. A subcarrier and power allocation scheme are proposed among multiple cognitive users, which is the performance tradeoff between fairness and system capacity. Simulation results show that the proposed scheme can efficiently guarantee the fairness of cognitive users and the capacity performance is close to the optimum.

Key words: cognitive radio; orthogonal frequency division multiplexing; resource allocation; convex optimization; fairness

在认知无线网络中,认知用户(secondary user, SU)可择机地接入主用户(primary user, PU)的空闲

频段以提高授权频谱的利用率,但认知用户对主用户频段内的干扰必须满足干扰限制要求,因此传统的功

收稿日期:2010-02-08

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2008ZX03003-005);重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ090501)

作者简介:唐伦(1973-),男,重庆大学博士研究生,主要从事移动通信方向研究,(Tel)023-62469222;

(E-mail)tangl@cqupt.edu.cn.

率分配方案(如注水算法等)不再适用^[1]。

由于 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 调制技术具有较高的频谱效率以及支持灵活地动态频谱分配,被认为是认知系统中潜在的调制方案。在文献[1]中,作者研究了认知用户和主用户都采用 OFDM 调制技术情况下,认知用户和主用户传输信号间由于非正交性而造成的互干扰。文献[2]基于凸优化理论研究了认知无线网络中基于 OFDM 的资源分配方案。根据经典的功率分配方案(如注水算法),信道质量越好的子载波应分配更多的功率。然而,认知用户对主用户的干扰与二者所占频段间的距离有关,因此从最小化干扰的角度来看,距离主用户频段越远的子载波应分配更多的功率。此外,文献[3-8]对认知 OFDM 无线网络中资源分配进行了大量地研究。文献[9-10]研究了在满足主用户干扰温度约束和认知用户 QoS 约束下的资源分配问题。对于获取主用户的信道状态信息,认知用户可监听主用户链路上接收端到发射端的反馈信息^[11],或通过与主用户相邻的协作认知用户反馈给当前的认知发信机^[12]。

由于主用户的信噪比随通信环境不断地变化,主用户可容忍的干扰极限也是随之变化的。因此,研究了认知 OFDM 系统的子载波及功率分配策略。为满足认知用户对主用户的干扰约束,建立了在主用户接收端干扰受限下最大化认知用户容量的数学优化问题;进一步提出了当主用户信噪比不断变化时,认知用户可根据干扰控制因子 η 自适应地调整发射功率,最大化认知用户容量;利用拉格朗日乘数法,得到了该数学问题的最优解;最后,在多用户情况下提出了一种公平性和容量性能折衷的子载波和功率分配方案。

1 系统模型

考虑图 1 所示的认知无线电接入模型,其中主用户和认知用户使用相邻的频段。这里考虑主用户发信机以功率 P_p 进行发射,传输容量为常数 R_p ,该场景与 IEEE 802.22 无线区域网(WRAN)相兼容,其中授权系统为 TV 广播电视系统,主发信机为基站。此外,假设主用户的信道带宽为 B ,认知用户所占频段的两侧均被主用户占用,且每个子载波的带宽为 Δf 。由于认知用户采用 OFDM 调制方式(功率谱密度旁瓣的衰减特性^[1]),因此认知用户将干扰主用户通信。主要研究目标是在保证对主用户干扰限制要求下,以最大化认知用户的传输容量为目标,对认知用户可用的子载波进行最优功率分配。

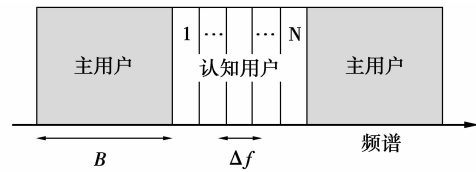


图 1 认知无线电接入模型

假设认知用户在所有子载波上都服从瑞利衰落,且认知用户已获得在每个子载波上的信道状态信息。第 i 个子载波的传输容量 R_i 可表示为

$$R_i = \log_2 \left(1 + \frac{h_i p_i}{\Gamma \sigma_i^2} \right), \quad (1)$$

其中 p_i 为第 i 个子载波的发射功率, h_i 为相应的信道增益, σ_i^2 为子载波带宽内的噪声功率,包括带内加性高斯白噪声以及主用户对认知用户信号的干扰。 Γ 与误码率需求的关系为

$$\Gamma = -\frac{\ln(5\text{BER}_{\text{req}})}{1.5}, \quad (2)$$

由于认知用户采用 OFDM 调制技术,因此第 i 个子载波的功率谱密度为

$$\varphi_i(f) = p_i T_s \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2, \quad (3)$$

则第 i 个子载波对主用户的干扰可表示为

$$I_i(d_i, p_i) = p_i g_i^l T_s \int_{d_i - B/2}^{d_i + B/2} \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 df. \quad (4)$$

其中 T_s 为 OFDM 符号持续时间, d_i 为第 i 个子载波与主用户频段间的距离, g_i^l ($l=1$ 或 2) 为在第 i 个子载上认知用户发信机到左边或右边相邻频段上主用户接收机的信道增益。

令 $k_i^l = T_s \int_{d_i - B/2}^{d_i + B/2} \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 df$, 则 $I_i(d_i, p_i) = p_i g_i^l k_i^l$, 这里称 k_i^l 为第 i 个子载波对左边或右边主用户的干扰因子。由此可见,与主用户频段越近的载波对主用户产生的干扰越大,因此在进行功率分配时,应根据干扰因子给每个子载波分配不同的功率,在满足干扰和功率约束条件下最大化认知用户的传输容量。

2 问题描述

在文献[2]中,作者研究了主用户所占频段的左右两边都被认知用户占用的场景,则考虑认知用户频段位于 2 个主用户频段中间的场景,如图 1 所示,此时认知用户的发射功率需要满足对左边和右边频段上主用户的干扰约束。文献[13]中,作者根据主用户信噪比对认知用户的最大发射功率进行了限制,则采用干扰控制因子 η 对主用户可容忍的干扰

极限进行调整,然后在满足对主用户干扰约束条件下进行功率分配。因此,为最大化认知用户的传输容量,可将问题建模为

$$\begin{aligned} \max C = & \sum_{i=1}^N R_i \\ \text{s. t} \quad & \sum_{i=1}^N p_i g_i^1 k_i^1 \leq \eta I_{th}^1 \\ & \sum_{i=1}^N p_i g_i^2 k_i^2 \leq \eta I_{th}^2, \\ & p_i \geq 0, \\ & 0 \leq \eta \leq 1, \end{aligned} \quad (5)$$

其中: C 表示认知用户的传输容量; N 表示总的子载波数; I_{th} 表示主用户可忍受的最大干扰极限; k_i^l 为第*i*个子载波对相邻主用户($l=1,2$)的干扰因子; η 为干扰控制因子。根据主链路的信道状态,功率控制方案包括下述 3 种情况。

情况 1:当主用户因信道条件较差而中断通信时,认知用户则不受主用户的干扰约束,即 $\eta=1$ 。此时认知用户能以最大功率发射,因此 I_{th} 与认知用户的最大发射功率以及认知用户与主用户间的干扰链路增益有关。

情况 2:当主用户处于正常通信状态时,认知用户必须根据主用户可容忍的干扰极限控制最大发射功率,此时 $\eta < 1$ 。

情况 3:当主链路信噪比足够大时,即使认知用户以最大功率发射也不会导致主用户中断通信,此时 $\eta=1$,此时认知用户能以最大功率发射。

为避免中断主用户的正常通信,在进行功率分配时需根据主用户的信道状态信息确定 η 值。首先定义主用户的信噪比(SNR)

$$\gamma_p = \frac{h_p P_p}{\sigma_p^2}, \quad (6)$$

相应地,主用户的信干扰噪声比(SINR)定义为

$$\gamma_{pc} = \frac{h_p P_p}{\eta I_{th} + \sigma_p^2}, \quad (7)$$

其中 h_p 为主链路信道增益, σ_p^2 为主用户频段内的加性高斯白噪声功率。当主用户处于正常通信状态时,认知用户需要根据 η 进行严格的功率控制。假设主用户链路处于正常通信状态(即传输容量为 R_p),则主链路的 SINR 需满足下述条件

$$\gamma_{pc}(\eta) = \frac{h_p P_p}{\eta I_{th} + \sigma_p^2} \geq 2^{R_p} - 1. \quad (8)$$

因此, η 必须满足

$$\eta \leq \frac{1}{I_{th}} \left(\frac{h_p P_p}{2^{R_p} - 1} - \sigma_p^2 \right), \quad (9)$$

于是, η 可表示为

$$\eta = \begin{cases} 1, & 0 \leq \frac{b}{a} \leq \gamma_p; \\ a\gamma_p - b, & \frac{b}{a} \leq \gamma_p \leq \frac{1+b}{a}; \\ 1, & \frac{1+b}{a} \leq \gamma_p \leq \infty. \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} a = \frac{\sigma_p^2}{I_{th}(2^{R_p} - 1)}; \\ b = \frac{\sigma_p^2}{I_{th}}, \end{cases} \quad (11)$$

图 2 显示了干扰控制参数 η 值随着主用户 SNR 的变化情况,其中干扰控制曲线的转折点(b/a 和 $(1+b)/a$)取决于 R_p 。因此,固定主链路传输容量 R_p ,干扰控制曲线也随之固定,则可方便的根据 γ_p 确定 η 值。

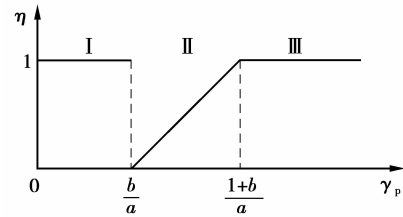


图 2 干扰控制参数 η

3 最优功率分配

对于上述优化问题,目标函数为凹函数,且约束条件都为线性约束,因此该优化问题是一个凸优化问题,于是可采用凸优化的方法来分析在干扰约束条件下的最优功率分配方案。首先,构造拉格朗日函数

$$\begin{aligned} L(p_i, \lambda_1, \lambda_2) = & \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{p_i h_i}{\Gamma \sigma_i^2} \right) - \\ & \lambda_1 \left(\sum_{i=1}^N p_i g_i^1 k_i^1 - \eta I_{th}^1 \right) - \lambda_2 \left(\sum_{i=1}^N p_i g_i^2 k_i^2 - \eta I_{th}^2 \right), \quad (12) \\ & \lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0. \end{aligned}$$

根据 KKT 条件,有

$$\frac{\partial L(p_i, \lambda_1, \lambda_2)}{\partial p_i} = 0. \quad (13)$$

因此第*i*个子载波的发射功率为

$$p_i^* = \left(\frac{1}{\lambda_1 g_i^1 k_i^1 + \lambda_2 g_i^2 k_i^2} - \frac{\sigma_i^2}{h_i} \right)^+, \quad (14)$$

其中 $(x)^+ = \max(0, x)$,且拉格朗日乘子 λ_1 和 λ_2 可根据上述约束条件求得。

4 多用户资源分配方案

在无线通信系统中,由于无线资源的有限性,保

证用户间的公平性尤为重要。提出了多个认知用户情况下一种公平性和容量性能折衷的子载波和功率分配方案。

假设有 M 个 SU, N 个可用的子载波。令 $\rho_{nm} = \frac{(h_{nm})^\alpha}{(R_m)^\beta}$, 其中 R_m 表示 SU m 的传输容量, h_{nm} 为 SU m 在子载波 n 上的信道增益。于是将最大 ρ_{nm} 所对应的子载波 n 分配给用户 m 值, 用 b_{nm} 表示子载波的分配指示函数, 当 $b_{nm}=1$ 时, 表示第 i 个子载波分配给用户 m , $b_{nm}=0$ 则表示第 n 个子载波未分配给用户 m 。由 ρ_{nm} 可知, 当 $\alpha=1, \beta=0$ 时, 该算法以最大化传输容量为目标, 但用户间的公平性较差; 当 $\alpha=0, \beta=1$ 时, 该算法以容量的降低来保证用户间的公平性, 即轮询方案; 当 $\alpha=\beta=1$ 时, 该算法则是公平性和容量性能的折中。为评估该方案的公平性, 用户的公平性指标可定义为

$$\text{Fairness} = \left(\sum_{m=1}^M R_m \right)^2 / M \sum_{m=1}^M R_m^2. \quad (17)$$

算法描述如下

1) 初始化

$$\rho_{nm}=0, p_{nm}=0, b_{nm}=0, \alpha \text{ and } \beta, \\ (m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N);$$

2) 迭代 $n=1 \rightarrow N$ 。

①子载波分配

$$m = \arg \max \rho_{nm} = \frac{(h_{nm})^\alpha}{(R_m)^\beta}; \\ b_{nm} = 1.$$

②功率分配

$$p_{nm} = \left(\frac{1}{\lambda_1 g_n^1 k_n^1 + \lambda_2 g_n^2 k_n^2} - \frac{\sigma_n^2}{h_{nm}} \right)^+.$$

③更新变量 R_m

$$R_m = \sum_{i=n}^N b_{mi} \log_2 \left(1 + \frac{h_{mi} p_{mi}}{\Gamma \sigma_n^2} \right) R_{mi}.$$

3) 结束。

5 仿真分析

在仿真过程中, 将最优功率分配方案和 3 个次优方案进行比较。假设 T_s 、 Δf 和 B 分别为 4 us、0.312 5 MHz、0.312 5 MHz, 且认知用户所占用的频段包括 5 个子载波, $I_{th}^1 = I_{th}^2 = I_{th} = 10^{-3} \omega$, 每个子载波内的噪声功率在 (1, 10) mw 内随机选择, 主用户频段内的高斯噪声功率为 10^{-6} w , 各子载波的信道增益服从平均信道增益为 1 瑞利衰落, 认知用户发信机到主用户接收机的信道增益为 1。此外, 认知用户的误码率设置为 10^{-3} , 于是 Γ 为 5 dB。

为评估最优功率分配方案的性能, 研究与 3 种次优方案进行比较

1) 方案 A。该方案考虑梯状的功率分配, 即随着与主用户频段之间距离的增加, 子载波分配的功率为 $p, 2p, 3p \dots$, 即

$$p_i = \begin{cases} p \cdot i, & i = 1, 2, \dots, \frac{N+1}{2}; \\ p(N+1-i), & i = \frac{N+1}{2} + 1, \dots, N. \end{cases} \quad (18)$$

其中 p 为常数。将 p 代入干扰约束条件可得

$$p = \frac{\eta I_{th}^l}{\sum_{i=1}^{(N+1)/2} i g_i^l k_i^l + \sum_{i=(1+N)/2+1}^N (N+1-i) g_i^l k_i^l}, \\ l = 1 \text{ or } 2. \quad (19)$$

2) 方案 B。该方案考虑在满足干扰约束的条件下, 每个子载波都分配相同的功率, 即等功率分配, $p_1 = p_2 = \dots = p_N = p$, 将 p 代入上述约束条件得

$$p = \frac{\eta I_{th}^l}{\sum_{i=1}^N g_i^l k_i^l}, l = 1 \text{ or } 2. \quad (20)$$

3) 方案 C。在该方案下, 分配给子载波 i 的功率 p_i 与认知用户的信道增益 h_i 成正比, 即 $p_i = c h_i$, 其中 c 为常数, 代入干扰约束条件可得

$$c = \frac{\eta I_{th}^l}{\sum_{i=1}^N h_i g_i^l k_i^l}, l = 1 \text{ or } 2. \quad (21)$$

图 3 显示了随着主用户可容忍的干扰极限 ηI_{th} 的变化时, 系统在各种功率分配方案下所获得的容量, 其中 η 与主用户信噪比 γ_p 和容量需求 R_p 有关, 这里假设 $\eta=1$ 。由图可知, 认知系统容量随着干扰门限的增加而增大。此外, 基于凸优化的最优功率分配方案所获得的系统容量也高于 3 种次优方案,

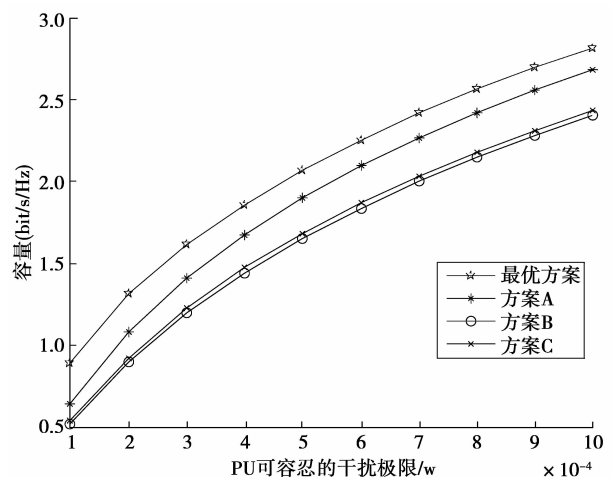


图 3 不同干扰极限下认知用户的容量

但方案 A 具有较低的复杂度,且性能接近于最优功率方案,具有一定的实用价值。

图 4 显示了认知用户在不同功率分配方案下总发射功率随着干扰极限的变化。由于最优方案能根据干扰极限自适应地调整发射功率,因此最优功率分配方案下的总发射功率高于其他方案。

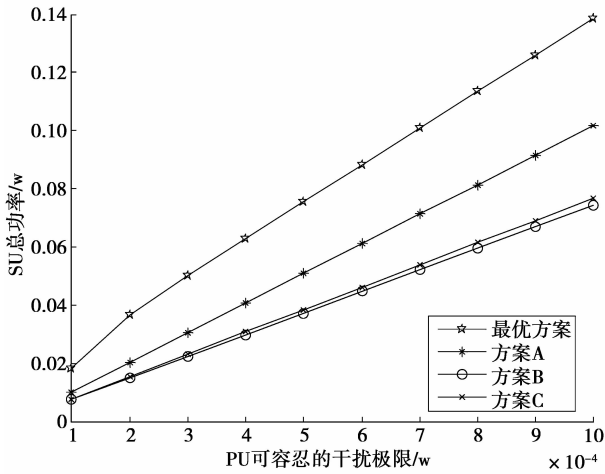


图 4 不同干扰极限下认知用户的总发射功率

图 5 显示了当主用户瞬时信噪比为 20 dB 时, R_p 对认知用户容量的影响,由图可知,认知用户的

容量随着 R_p 的增加而降低,这是由于当主用户的 SNR 一定时, R_p 增大,则认知用户对主用户的干扰必须降低,因此认知用户在每个子载波上的发射功率也随之降低,以满足对主用户的干扰约束。当主用户对容量需求较小时,即 R_p 较小时(如小于 1 bit/s/Hz),认知用户能以最大发射功率进行发射,此时认知用户对主用户的干扰达到最大值 I_{th} ,即 $\eta=1$ 。类似,当 R_p 大于 6.7 bit/s/Hz 时,主用户的信噪比达不到正常传输需求,此时主用户将处于通信中断状态,认知用户以最大功率发射,且容量达到最大值(图 6 为所举例子)。

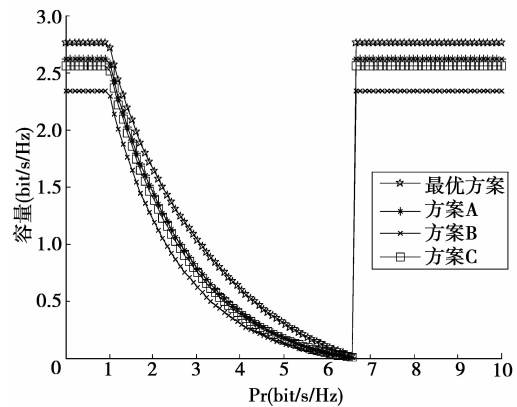
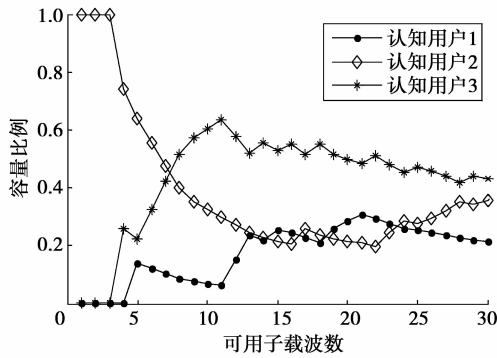
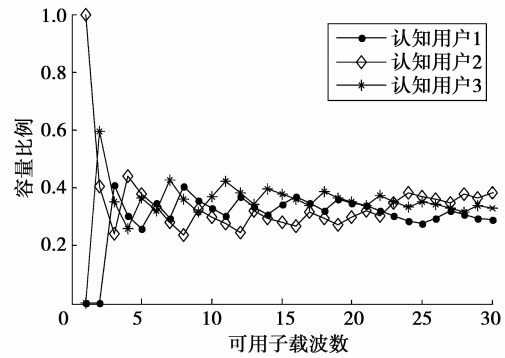


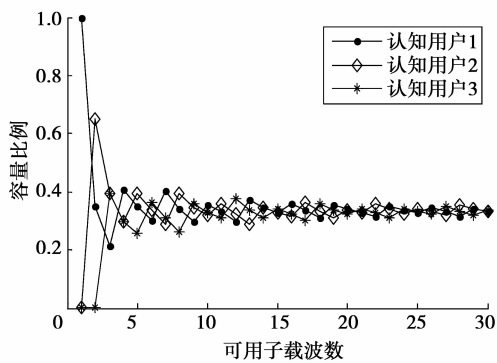
图 5 R_p 对认知用户传输容量的影响



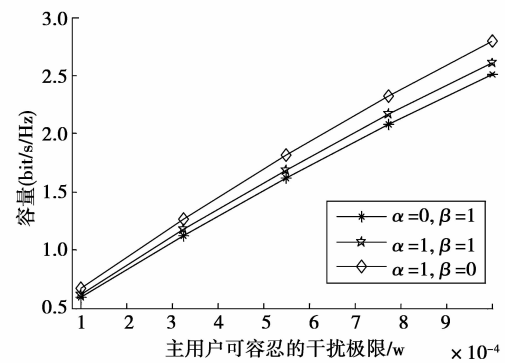
(a) $\alpha=1, \beta=0$



(b) $\alpha=1, \beta=1$



(c) $\alpha=0, \beta=1$



(d) 认知用户在不同 α 和 β 时的容量

图 6 子载波分配方案性能比较

在进行多用户的子载波分配时,假设认知网络有 3 个认知用户。图 6 中的图(a)、图(b)、图(c)分别显示了在 $\alpha=1, \beta=0$ 、 $\alpha=\beta=1$ 和 $\alpha=0, \beta=1$ 3 种情况下 3 个认知用户的容量比例。图(a)显示了以最大化系统容量为目标的子载波分配方案,但用户间的公平性则比较差。由图(b)可知随着子载波数的增加,每个认知用户都具有近似相等的容量,即具有较好的公平性,该方案是系统容量和用户公平性性能的折中。图(c)显示了轮询的子载波分配方案,具有很好的公平性,但系统容量则低于前两种分配方案。

图(d)则显示了 α 和 β 在不同情况下的系统容量。由图可知,当 $\alpha=1, \beta=0$ 时系统容量最大; $\alpha=0, \beta=1$ 时,系统容量最低; $\alpha=\beta=1$ 时,该算法则是公平性和容量性能的折中。

图 7 比较了多用户情况下子载波分配方案的公平性。由图可知,轮询方案(即 $\alpha=0, \beta=1$)下的公平性最优; $\alpha=\beta=1$ 时的子载波分配方案是系统容量和公平性性能的折中;而在以最大化容量为目标的分配方案(即 $\alpha=1, \beta=0$)下,公平性性能则最差。此外,由图还可看出,随着子载波数量的增加,用户间的公平性越好,当子载波数量增加到一定值时,公平性则趋于稳定。

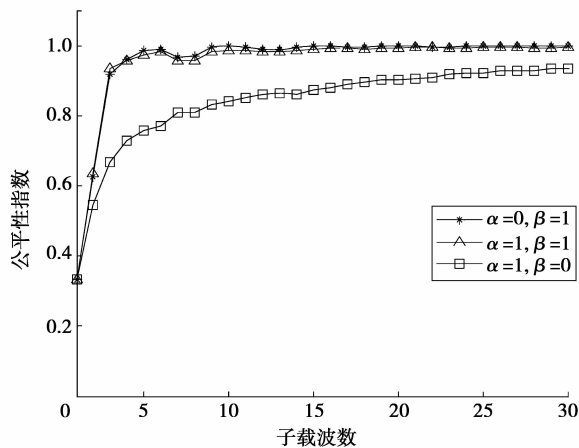


图 7 用户公平性对比

6 总 结

在主用户信噪比不断变化的情况下,提出了一种新的功率控制算法,并基于凸优化理论分析了在主用户干扰约束条件下,以最大化认知用户容量为目标的最优功率分配方案。然后在多用户情况下,提出了一种公平性和容量性能折衷的子载波和功率分配方案。仿真结果表明,在主用户的干扰约束下,所提方案能有效地保证认知用户间的公平性且系统

容量性能趋于最优。

参考文献:

- [1] WEISS T, HILLENBRAND J, KROHN A, et al. Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems[J]. IEEE, 2004;1873-1877.
- [2] BANSAL G, HOSSAIN M J, BHARGAVA V K. Optimal and suboptimal power allocation schemes for OFDM-based cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on. Wireless Commun, 2006(17);4710-4718.
- [3] QIN T, LEUNG C. Fair adaptive resource allocation for multiuser OFDM cognitive radio systems [J]. Proceedings of IEEE Chinacom, 2007;115-119.
- [4] ATTAR A, O. HOLLAND M R. NAKHAI AGHVAMI A H. Interference-limited resource allocation for cognitive radio in orthogonal frequency-division multiplexing networks [J]. IET Commun, 2008, 2; 806-814.
- [5] ZHANG Y H, LEUNG C. Subcarrier, bit and power allocation for multiuser OFDM-based multi-cell cognitive radio systems[J]. In Proceedings of IEEE VTC, 2008;1-5.
- [6] ZHANG Y H. Resource allocation for OFDM-based cognitive radio system [D]. British: University of British Columbia, 2008.
- [7] DUY T. Resource allocation for OFDM-based cognitive multicast networks[J]. Proceedings of IEEE WCNC, 2009;1-6.
- [8] HASHMI Z H. Dynamic resource allocation for cognitive radio systems [D]. British: University of British Columbia, 2008.
- [9] LONG B, LE E H. Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Commmun, 2008, 7 (12): 5306-5315.
- [10] YANG B, FENG G, SHEN Y, et al. Channel aware access for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Veh Technol, Digital Object Identifier, 2009; 201-958.
- [11] ESWARAN K, GASTPAR M, RAMCHANDRAN K. Bits through ARQs: spectrum sharing with a primary packet system[J]. Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), 2007; 2171-2175.
- [12] GANESAN G, LI Y. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE DySPAN, 2005; 137-143.
- [13] CHEN Y, ZHAO Y. On cognitive radio networks with opportunistic power control strategies in fading channels [J]. IEEE Transactions on wireless conmmun, 2008; 7;2752-2761.

(编辑 侯 湘)