

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.02.013

引用格式:郝万明,杨守义.考虑整数比特率及公平性的认知无线电 OFDMA 功率分配算法[J].电讯技术,2014,54(2):183-188. [HAO Wan-ming, YANG Shou-yi. An OFDMA Power Allocation Algorithm Considering Integer Bit Rate and Fairness for Cognitive Radio Networks[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(2):183-188.]

考虑整数比特率及公平性的认知无线电 OFDMA 功率分配算法*

郝万明**,杨守义

(郑州大学 信息工程学院,郑州 450001)

摘要:在基于正交频分多址(OFDMA)的认知无线电系统中,每个认知用户在实际中都是以整数比特进行传输,而以往的速率取整算法只考虑了单认知用户。针对这种情况,提出了一种新的速率取整算法,该算法在原有算法的基础上进行了改进,让每个子载波最多参与一次速率的调整,从而使其在应用于多认知用户时保证了速率取整时的公平性,同时总的传输比特率比原算法有了一定的提高。仿真结果表明,所提算法有效提高了各认知用户在速率取整时的公平性。

关键词:认知无线电;正交频分多址;整数比特;公平性

中图分类号:TN92.53 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)02-0183-06

An OFDMA Power Allocation Algorithm Considering Integer Bit Rate and Fairness for Cognitive Radio Networks

HAO Wan-ming, YANG Shou-yi

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: For orthogonal frequency division multiple access (OFDMA)-based cognitive radio systems, the transmission rate of every cognitive user must be an integer in practice, and the single cognitive user is only considered in previous rate rounding algorithm. According to this situation, a new rate rounding algorithm is proposed in this paper, and it is modified based on the previous algorithm. Every subcarrier rate is adjusted once at most, which ensures the fairness at the rate rounding between cognitive users, and the total bit rate is also improved. The simulation result shows that the fairness among cognitive users is improved effectively by the proposed algorithm.

Key words: cognitive radio; OFDMA; integer bit; fairness

1 引言

随着无线通信的发展,人们对其支持的数据传输速率要求越来越高,根据香农信息理论^[1],这些通信系统对无线频谱的需求也相应增长,从而导致适用于无线通信的频谱资源变得日益紧张。在当前

的频谱分配政策下,授权用户唯一占有所分配的频带,认知用户无权接入。但是,联邦通信委员会研究发现,授权用户对其所分配频带的利用率并不高,大部分的频带利用率集中在 15% ~ 85% 的范围内,这就使得很多无线系统的频谱资源在时间和空间上存

* 收稿日期:2013-10-17;修回日期:2013-12-13 Received date:2013-10-17; Revised data: 2013-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271421)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61271421)

** 通讯作者:wmhao@hotmail.com Corresponding author:wmhao@hotmail.com

在不同程度的闲置。基于此, Mitola^[2]在软件无线电技术的基础上提出认知无线电技术, 在认知无线电技术中, 认知用户可以感知授权用户对某频段的使用状况, 从而以频谱共享接入或机会接入^[3]的方式利用此频段, 有效提高了频谱利用率。

正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 系统将传输宽带划分成一系列正交互不重叠的子载波, 将不同的子载波集分配给不同的用户实现多址。同时, 正交频分多址系统可动态把可用带宽资源分配给所需用户, 很容易实现系统资源的优化利用。而且 OFDM 技术具有抗频率选择性衰落和抗多径干扰能力强的特点, 使得它成为认知无线电中最理想的接入技术之一^[4]。

在基于 OFDMA 的认知无线电中, 资源分配问题已经做了大量的研究, 主要涉及的是子载波的功率分配。文献[5]研究了单认知用户的功率分配问题, 采用改进的注水算法, 实现了认知用户吞吐量的最大化。文献[6]改变了以往用干扰功率限制去保护授权用户, 而是采用了一种对授权用户速率损失限制的新标准去优化系统的频谱资源, 实现了子载波功率的合理分配。文献[7]研究了基于 OFDMA 的认知无线电中多认知用户的载波功率分配问题, 提出了一种在基于不理想频谱感知下的资源优化算法。但这些文献都没有考虑到在实际中载波必须以整数比特传输的情况。文献[8]研究了单认知用户资源优化问题, 同时提出了一种载波速率取整算法, 使得每个载波都以整数比特传输, 但并没有探讨在多认知用户时载波速率取整问题。本文在文献[8]的基础上, 考虑了多认知用户时子载波速率取整情况, 如果应用文献[8]中的速率取整算法, 并不能很好地保证各用户在速率取整时的公平性, 因此对其载波速率取整算法进行了一定的改进, 让每个子载波最多参与一次速率的调整, 从而避免了可能出现的某些子载波连续调整速率的不公平性。仿真结果表明, 改进后的算法有效地保证了各认知用户在速率取整时的公平性, 同时总的吞吐量也有了一定的提高。

2 系统的频谱模型

考虑认知无线电系统下行链路, 系统模型如图 1 所示, 一个基站 (Base Station, BS) 给一个授权用户 (Primary, PU) 和多个认知用户 (Second User, SU) 提供服务。其中, h^{BP} 表示基站到授权用户的信道衰落, h_n^{BL} 表示第 n 个子载波到认知用户的信道衰落。

图 2 为授权用户和认知用户接入的频谱情况, 其中 W_p 为授权用户的频带宽度, 认知用户可用的频带分为 N 个正交子载波, 假设全部位于授权用户的右侧, 平均每个子载波的频带宽度为 W_s , 所有认知用户采用 OFDM 的接入技术, W_p 和 W_s 的单位为 Hz。本文假设有 N 个认知用户, 每个认知用户随机分配一个子载波。授权用户能够承受的最大干扰功率为 I_{th} 。

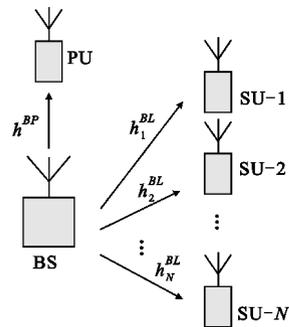


图 1 系统模型
Fig. 1 System model

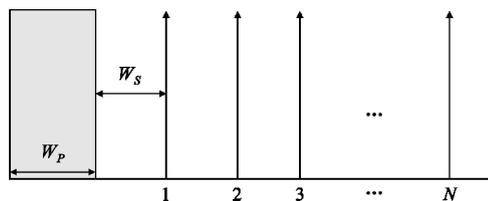


图 2 授权用户和认知用户的频带分布
Fig. 2 The frequency bands distribution of PU and SUs

3 系统的数学模型

认知用户与授权用户位于相邻频带, 两者存在邻道干扰, 其干扰的大小与信号功率、两者频带间的频谱距离和信道衰落情况有关^[9]。

3.1 认知用户对授权用户的干扰

假设每个子载波发射信号为矩形不归零信号, 则第 n 个子载波的功率谱密度为^[10]

$$\varphi_n(f) = P_n T_s \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 \quad (1)$$

式中, P_n 表示 SU 频带中第 n 个子载波所发射的功率, T_s 表示 OFDM 的符号周期, 则 SU 频带中第 n 个子载波的信号对 PU 产生的干扰为

$$I_n(d_n, P_n) = P_n T_s |h^{BU}|^2 \int_{d_n - \frac{W_p}{2}}^{d_n + \frac{W_p}{2}} \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 df = P_n I F_n \quad (2)$$

式中, d_n 表示第 n 个子载波与 PU 频带间最近的频

谱距离, $IF_n = T_s |h^{BU}|^2 \int_{d_n - \frac{W_P}{2}}^{d_n + \frac{W_P}{2}} \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 df$ 表示第 n 个子载波的干扰因子。

3.2 授权用户对认知用户的干扰

PU 信号对 SU 频带中第 n 个子载波产生的干扰为^[11]

$$Q_n(d_n) = \int_{d_n - \frac{W_S}{2}}^{d_n + \frac{W_S}{2}} |h_n^{BL}|^2 E\{\varphi_{PU}(f)\} df \quad (3)$$

式中, $\varphi_{PU}(f)$ 为 PU 信号的功率谱密度, d_n 表示 SU 频带中第 n 个子载波与 PU 频带间最近的频谱距离。

3.3 认知用户的传输容量

假设每个子载波信道的特性已知,且每个子载波已获得相应的信道增益,则第 n 个认知用户传输的比特率为

$$r_n = \text{lb} \left(1 + \frac{P_n |h_n^{BL}|^2}{\Gamma(\delta_n^2 + Q_n)} \right) \quad (4)$$

其中, δ_n^2 表示加性高斯白噪声功率; Γ 为调制编码参数,该参数表示了实际系统容量与理想容量的差距。当每个用户传输整数比特时,其速率为^[8]

$$\hat{r}_n = \lfloor r_n \rfloor = \text{lb} \left(1 + \frac{\hat{P}_n |h_n^{BL}|^2}{\Gamma(\delta_n^2 + Q_n)} \right) \quad (5)$$

4 功率分配优化算法

功率分配的目标是优化各个子载波的功率,使得所有子载波的总功率在规定的范围内,且在授权用户所能承受的干扰容限范围内最大化所有认知用户总的传输速率。在考虑速率取整与否时可分为两种情况,下面分别说明。

(1) 当没有对速率取整时,最优问题可描述为

$$C = \max \sum_{n=1}^N r_n \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{n=1}^N P_n \leq P_{\max} \\ \sum_{n=1}^N I_n(d_n, P_n) \leq I_{\text{th}} \\ P_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N \end{cases}$$

式中, P_{\max} 表示所有子载波发射的最大总功率。

(2) 当对速率加入整数限制时,最优问题可以描述为

$$C = \max \sum_{n=1}^N \hat{r}_n \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{n=1}^N \hat{P}_n \leq P_{\max} \\ \sum_{n=1}^N I_n(d_n, \hat{P}_n) \leq I_{\text{th}} \\ \hat{P}_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N \end{cases}$$

接下来对上述两个问题进行求解。

4.1 没有整数比特限制时的功率分配算法

式(6)的目标函数为凸函数,同时其限制条件都为线性约束,所以是一个标准的凸优化问题。首先应用拉格朗日对偶法^[11]得到此问题的拉格朗日函数

$$\eta(\{P_n\}, \lambda, \mu) = \sum_{n=1}^N r_n - \lambda \left(\sum_{n=1}^N P_n - P_{\max} \right) - \mu \left(\sum_{n=1}^N I_n(d_n, P_n) - I_{\text{th}} \right) \quad (8)$$

其中, (λ, μ) 为拉格朗日约束因子,其取值非负。此时定义 $g(\lambda, \mu)$ 为拉格朗日对偶函数,则可以将对偶函数定义为

$$\max_{P_n \geq 0, \forall n} \eta(\{P_n\}, \lambda, \mu) \quad (9)$$

由文献[11]可知,这个对偶函数为原函数最优解的上界,假设原函数的最优解为 ξ^* ,则对于任何给定非负的 (λ, μ) 有不等式 $\xi^* \leq g(\lambda, \mu)$ 成立,可以表示出对偶函数的最小值

$$\min_{\lambda \geq 0, \mu \geq 0} g(\lambda, \mu) \quad (10)$$

假设当二元变量为 λ^* 和 μ^* 时,式(10)取最小值 v^* ,即有 $v^* = g(\lambda^*, \mu^*)$ 。对于一个有严格可行解的凸优化问题,Slater 条件^[11]必满足,则有 $\xi^* = v^*$,所以可以通过求解式(10)得到原问题的最优解。对于已给定的 λ^* 和 μ^* ,拉格朗日对偶函数为 $g(\lambda, \mu) =$

$$\begin{aligned} & \max \left(\sum_{n=1}^N r_n - \lambda \left(\sum_{n=1}^N P_n - P_{\max} \right) - \mu \left(\sum_{n=1}^N I_n(d_n, P_n) - I_{\text{th}} \right) \right) = \\ & \sum_{n=1}^N \max \left(\text{lb} \left(1 + \frac{P_n |h_n^{BL}|^2}{\Gamma(\delta_n^2 + Q_n)} \right) - \lambda P_n - \mu I_n \right) + \lambda P_{\max} + \mu I_{\text{th}} = \\ & \sum_{n=1}^N g'(P_n) + \lambda P_{\max} + \mu I_{\text{th}} \end{aligned} \quad (11)$$

上述拉格朗日对偶问题可以分解为 N 个独立的子对偶问题之和^[12],通过最大化 $g'(P_n)$ 去求出每个子对偶函数的最优解,进而求出原问题的最优值。根据以上分析,可得

$$\begin{aligned} & \max \text{lb} \left(1 + \frac{P_n |h_n^{BL}|^2}{\Gamma(\delta_n^2 + Q_n)} \right) - \lambda P_n - \mu I_n \quad (12) \\ & \text{s. t. } P_n \geq 0, n = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

对于上述最优化问题,考虑到凸目标函数和线性约束条件,可以引入非负的二元变量 ζ_n 作为对 P_n 的约束,然后应用 KKT 条件去求解上述问题的最优解,即有下式成立:

$$\begin{cases} \frac{h_n^{BL}}{\Gamma(\delta_n^2+Q_n)+P_n|h_n^{BL}|^2}-\lambda-\mu IF_n+\zeta_n^* P_n^*=0, \forall n \\ \zeta_n^* P_n^*=0, \forall n \end{cases} \quad (13)$$

则可以得出方程的最优解为

$$P_n^* = \left(\frac{1}{\lambda+\mu IF_n} - \frac{\Gamma(\delta_n^2+Q_n)}{|h_n^{BL}|^2} \right)^+ \quad (14)$$

式中, $(\cdot)^+$ 代表 $\max(0, \cdot)$,在总功率允许的范围,得出每个用户分配的功率,进而求解出每个认知用户传输的速率。

4.2 有整数比特限制时的功率分配算法

4.1 节中详细分析了各认知用户分配功率的方案,使得所有用户总的传输速率得到最大。但是,在实际情况中,传输的速率必须为整数。所以对 4.1 节中求得的速率进行取整,在对每个载波取整时采用四舍五入,取整后表示为 \hat{r}_n ,即

$$\hat{r}_n = \text{round}[r_n] \quad \forall n \quad (15)$$

则对应取整后的发射功率为

$$\hat{P}_n(\hat{r}_n) = \frac{\Gamma(\delta_n^2+Q_n)}{|h_n^{BL}|^2} (2^{\hat{r}_n}-1) \quad (16)$$

因为在速率取整时采用四舍五入,这就可能造成取整后所有用户发射的总功率超出了所规定的范围,所以此时可以求出每个认知用户每减少一个比特所消耗的功率:

$$\Delta \hat{P}_n = \hat{P}_n(\hat{r}_n) - \hat{P}_n(\hat{r}_n-1) = \frac{\Gamma(\delta_n^2+Q_n)}{|h_n^{BL}|^2} 2^{\hat{r}_n-1} \quad (17)$$

文献[8]中速率取整算法尽管很好,但如果应用在多认知用户的情况下,并没考虑到各认知用户速率取整时的公平性,只是单纯让每减少一个比特所消耗功率最大或对授权用户干扰最大的子载波降低传输速率。尽管这样可以最大限度地减少总发射功率,但可能会只针对某些认知用户进行速率调整,使其速率在取整前后变化比较大,而其他认知用户在取整前后速率并没有太大的改变,这可能会引起各认知用户速率取整时的公平性问题。在不超过所允许发射功率的情况下,尽量兼顾到各认知用户在速率取整时的公平性,对原算法进行了改进,在速率调整过程中,让每个认知用户最多调整一次速率,从而避免了某一个认知用户多次降低速率的不公平性。鉴于此,定义了公平性因子

$$\Delta = \frac{1}{\sum_{n=1}^N \left(b_n - \frac{\sum_{n=1}^N b_n}{N} \right)^2} \quad (18)$$

其中, b_n 为第 n 个认知用户在第一次速率取整后与调整完速率相比减少的比特数, $\sum_{n=1}^N b_n/N$ 表示每个认知用户平均减少的比特数,所以每个认知用户越接近平均减少的比特数说明在取整时越公平,即 $(b_n - \sum_{n=1}^N b_n/N)^2$ 越小。根据公平性因子可知, Δ 的大小体现了各认知用户的公平性好坏, Δ 越大说明各认知用户的公平性越好,相反则越坏。

最后应用改进后的算法对每个认知用户的功率进行再分配,分配策略流程图如图 3 所示。

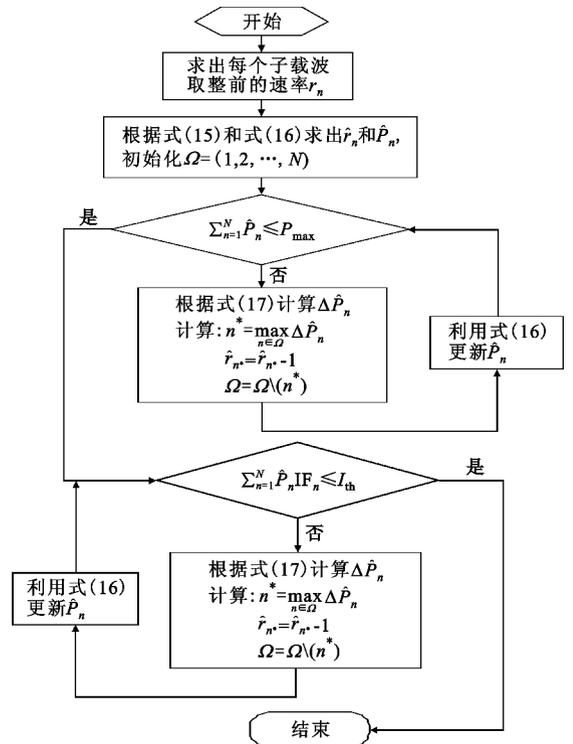


图 3 基于认知用户公平性的速率取整算法流程图
Fig. 3 Flowchart of the rate rounding algorithm based on the SU fairness

5 性能分析与仿真

为验证算法改进后的性能,本文进行了仿真。考虑一般的下行信道场景,参数设置如下:授权用户带宽 $W_p=1$ MHz,子载波带宽 $W_s=0.3125$ MHz,符号周期 $T_s=4 \mu s$,子载波和认知用户数都为 16,每个认知用户随机分配一个子载波,AWGN 功率谱密度 $N_0=10^{-8}$ W/Hz,授权用户信道衰落 h^{BP} 和每个子载波信道衰落 h_n^{BL} 为独立同分布且均值为 1 的瑞利衰落,假设所有认知用户所允许发射的最大总功率为

$P_{\max}=0.5 \text{ W}$, $\Gamma=1$,所有的结果都是通过 1 000 次独立仿真得到的。

图 4 比较了在两种算法下认知用户总速率随授权用户干扰限制的变化情况,同时也给出了没有取整时的最大速率。可以看出,两种取整算法使得认知用户的总速率略有降低,随着对授权用户干扰门限的增大,改进后的取整算法所求得的认识用户总速率比原取整算法略有提高,原因是取整算法改进后使得认知用户总的发射功率比原算法大,但并没有大于所允许发射的总功率 P_{\max} ,从而使得总速率稍有提高。

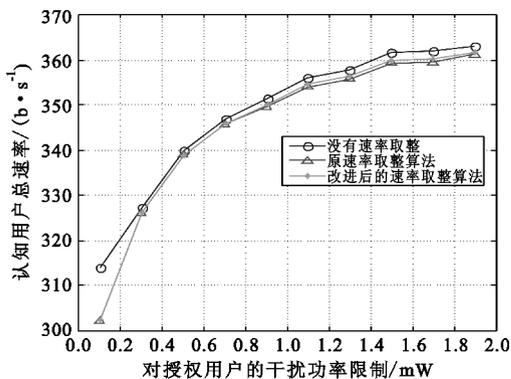


图 4 不同干扰条件下认知用户总速率
Fig. 4 Cognitive users total rate under different interference conditions

图 5 是在不同的干扰门限下两种速率取整算法对认知用户公平性的影响。在改进后的取整算法中,每个认知用户最多参与一次速率的调整,而不会出现原算法中为了单纯减少总发射功率而使某些认知用户连续降低速率,这样就基本保证了每个认知用户在速率取整时的公平性。从图中也可以看出,认知用户的公平性在改进后的取整算法下有了很大的提高。

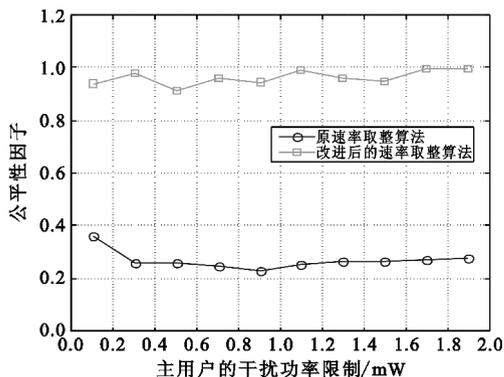


图 5 不同干扰条件下认知用户公平性
Fig. 5 Cognitive users fairness under different interference conditions

图 6 比较了两种算法下认知用户总功率随授权用户干扰限制的变化情况。从图中可以看出,随着对授权用户干扰限制的增大,认知用户的总功率逐渐增加最后趋于稳定,这是因为认知用户的功率不但受授权用户干扰限制的影响,而且也不能超过所规定的最大总功率 P_{\max} 。本文所提算法是兼顾各认知用户在速率取整公平的前提下,同时不超过所规定的最大总功率和满足在授权用户干扰范围内,让认知用户速率最大化。原取整算法是从减少发射功率和对授权用户干扰的影响进行考虑,这样就可能使认知用户总的发射功率在改进后的取整算法下有所增加,但不会超过所规定的 0.5 W。从图 5 中也可以看出这一点,当授权用户的干扰功率限制大于 0.5 μW 时,取整算法改进后认知用户发射的总功率要大于原算法,但其总速率也相应提高,如图 4 所示。

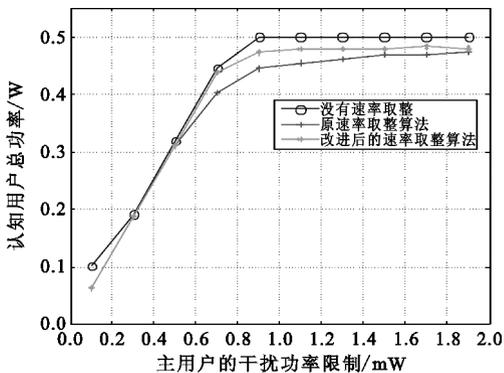


图 6 不同干扰条件认知用户总功率
Fig. 4 Cognitive users total power under different interference conditions

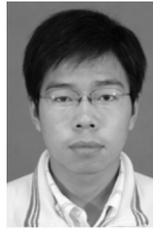
6 结束语

针对在基于 OFDMA 的认知无线电系统出现的多认知用户速率取整时的公平性问题,本文提出了一种新的速率取整算法,该算法在原有算法的基础上进行了改进,综合考虑了总功率、对授权用户干扰限制和认知用户在速率取整时的公平性 3 个因素,实现了认知用户总吞吐量的最大化。为了更好体现改进算法后认知用户的公平性,定义了公平性因子,并和原算法进行了比较。仿真结果表明,改进后算法有效提高认知用户在速率取整时的公平性,同时其总速率也有一定程度的提高。本文是在认知用户数和子载波数相等情况下进行考虑的,并不涉及子载波分配的问题,因此对于子载波大于认知用户的情况和子载波分配问题是下一阶段研究的工作重点。

参考文献:

- [1] Middleton D. An introduction to statistical communication theory [M]. New York: McGraw-Hill, 1960.
- [2] Mitola J. Cognitive radio: making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13 - 18.
- [3] Senthuran S, Anpalagan A, Das O. Throughput analysis of opportunistic access strategies in hybrid underlay-overlay cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(6): 2024-2035.
- [4] Yin H, Alamouti S. OFDMA: A broadband wireless access technology [C]// Proceedings of 2009 IEEE Sarnoff Symposium. Nanjing: IEEE, 2009: 1-4.
- [5] Wang Peng, Zhao Ming, Xiao Li-ming, et al. Power allocation in OFDM-based cognitive radio systems [C]// Proceedings of 2007 Global Telecommunications Conference. Washington, DC: IEEE, 2007: 4061-4065.
- [6] Kang Xin, Garg H, Liang Yingchang, et al. Optimal power allocation for OFDM-based cognitive radio with new primary transmission protection criteria [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(6): 2066-2075.
- [7] Ngo D T, Tellambura C, Nguyen H H. Resource allocation for OFDMA-based cognitive radio multicast networks with primary user activity consideration [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(4): 1668-1679.
- [8] Ma Y, Xu Y, Zang G D. Power allocation for orthogonal frequency division multiplexing-based cognitive radio systems with and without integral bit rate consideration [J]. IET Communications, 2011, 5(5): 575-586.
- [9] Bansal G, Hossain M J, Bhargava V K. Adaptive power loading for OFDM-based cognitive radio systems [C]// Proceedings of 2007 International Conference on Communication. Glasgow: IEEE, 2007: 5137-5142.
- [10] Weiss T, Hillenbrabd J, Krohn A, et al. Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems [C]// Proceedings of 2004 Vehicular Technology Conference. Milan, Italy: IEEE, 2004: 1873-1877.
- [11] Boyd S, Vandenberghe L. Convex optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [12] Zhang Rui, Cui Shuguang, Liang Yingchang. On ergodic sum capacity of fading cognitive multiple-access and broadcast channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(11): 5161-5178.

作者简介:



郝万明(1988—),男,河南安阳人,2012年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为宽带无线通信;

HAO Wan-ming was born in Anyang, Henan Province, in 1988. He received the B. S. degree in 2012. He is now a graduate student.

His research concerns broadband wireless communication.

Email: wmhao@hotmail.com

杨守义(1965—),男,河南民权人,教授、博士生导师,主要研究方向为信源编码、宽带无线通信(OFDM、MIMO)、认知无线电技术。

YANG Shou-yi was born in Minquan, Henan Province, in 1965. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research interests include source coding, broadband wireless communication and cognitive radio technology.