

基于 OFDM 的认知无线电系统中功率分配算法

杨守义, 宋延涛, 陈泽先, 陆彦辉

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对基于正交频分复用(OFDM)的认知无线电系统中,子载波功率分配的最优化算法中出现的迭代运算繁琐、不易实现的问题,提出一种基于幂函数分布的次优化功率分配算法.该算法采用线性约束的凸优化数值运算方法,对认知用户频带内子载波的功率按照幂函数的数值特性依次分配,该算法具有运算速度快、易于实现的特点,并且有效地解决了授权用户受到认知用户频带内子载波带外泄漏功率的干扰问题.通过使用 MATLAB 建模仿真,结果表明,提出的算法方案在满足授权用户干扰门限的条件下,使得认知用户频带内信道容量能够达到最大化,并且在同样条件下提高了现有功率分配方案的最大传输速率.

关键词: 正交频分复用;认知无线电;功率分配;凸优化

中图分类号: TN914

文献标志码: A

0 引言

随着无线通信技术的迅速发展,对无线频谱资源提出更高的要求,无线频谱资源贫乏的问题日益严重,已经成为制约无线通信技术未来发展的主要瓶颈之一.美国联邦通信委员会(Federal Communications Commissions:FCC)一份报告表明,许多授权频段在时域和空域都没得到充分的利用^[1].因此,美国联邦通信委员会(FCC)和其他频谱管理机构考虑在已有的授权频谱中引入其他的用户,且不会对授权频带内的用户造成不可接受的干扰,即实现机会频谱接入(Opportunistic Spectrum Access:OSA)技术^[2].

由于大多数无线频谱资源已经被授权分配,目前最大的挑战是如何在不影响授权用户传输的前提下共享频谱资源.MITOLA^[3]在软件无线电技术的基础上提出认知无线电技术.认知无线电技术作为一种新兴的无线通信系统,旨在对空、时、频等各域上的空闲资源(亦称为“频谱空洞”或“白色空间”)进行有效的感知探测和合理的再利用^[4],其主要作用是在不影响授权用户(License User:LU)正常通信的前提下,寻找频谱机会进行认知用户(Cognitive User:CU)间的有效通

信,可以说认知无线电技术是目前解决频谱资源匮乏的最有效方法^[5].

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing:OFDM)技术具有便于自适应调整参数,可重配的子载波结构,其接收端的快速离散变换模块也可同时用于频谱感知.抗多径干扰与频率选择性衰落能力强,频谱利用率高等优点,这些优点使得 OFDM 成为实现认知无线电系统的理想备选技术之一^[6].功率分配不仅是传统 OFDM 系统中的关键技术,而且还是认知无线电技术中频谱分析和判决的重要手段,在认知网络中链路容量最大化的同时也要深化功率分配研究.

笔者在文献[7]的基础上,通过对 CU 频带内子载波功率泄露对 LU 的干扰分析,在满足 LU 干扰约束的前提下,使认知用户频带内子载波分配的功率呈现幂函数分布,最大化 CU 频带内信道容量,并将其与文献[7]提出的方案进行比较.

1 系统频谱模型

考虑认知无线电系统的下行链路,一个基站给 LU 和 CU 同时提供服务,根据文献[8]中提到的 OFDM 调制子载波的 IEEE 802.11a 系统模型,假定提供给 CU 接入的空闲频带与 LU 频带的分

收稿日期:2011-03-22;修订日期:2011-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60702020)

作者简介:杨守义(1965-),男,河南民权人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要研究方向为信源编码、宽带无线通信(OFDM,MIMO)及图像数字水印等,E-mail:iesyyang@zzu.edu.cn.

布情况如图 1 所示。

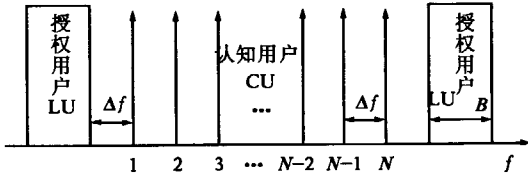


图 1 LU 与 CU 共存的频谱模型

Fig. 1 LU spectrum model of coexistence with the CU

假设 LU 的信道带宽为 B , CU 频带的两侧均被 LU 频带占用,且 CU 频带内每个子载波的间隔,以及 CU 频带与 LU 频带的间隔均为 Δf . 由于 CU 和 LU 均采用 OFDM 调制方式(功率谱密度旁瓣的衰减特性),因此,LU 频带内将受到 CU 的干扰,同时 CU 频带内也将受到 LU 的干扰。

研究的内容是在保证 CU 对 LU 产生的干扰功率在同时满足对左、右两边 LU 频带的干扰功率约束的条件下,对 CU 频带内的子载波进行最优功率分配,以实现 CU 频带的信道容量最大化。

2 系统数学模型

CU 对 LU 的干扰大小取决于 CU 频带内各个子载波上所需的发射功率,以及 CU 频带内各个子载波与 LU 频带间的最近频谱距离^[8]。

2.1 CU 对 LU 的干扰

假设 CU 频带中的第 i 个子载波上信号的功率谱密度为

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

式中: P_i 表示 CU 频带中第 i 个子载波上的发射功率; T_s 表示 OFDM 的符号周期;则 CU 频带中第 i 个子载波上的信号对 LU 产生的干扰功率为

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

式中: d_i 表示 CU 频带中第 i 个子载波与 LU 频带间的最近频谱距离。

2.2 LU 对 CU 的干扰

LU 信号对 CU 频带中第 i 个子载波的干扰功率为

$$I_{LU}(d_i, P_{LU}) = \int_{d_i - \Delta f/2}^{d_i + \Delta f/2} \phi_{LU}(f) df \quad (3)$$

式中: $\phi_{LU}(f)$ 表示 LU 信号的功率谱密度; P_{LU} 表示 LU 信号的功率。

2.3 CU 的传输速率分析^[7]

假设所有子载波信道特性均服从瑞利衰落,且 CU 的每个子载波已获得相应的信道增益。CU

频带中第 i 个子载波的传输速率 R_i 可表示为

$$R_i(P_i, h_i) = \ln \left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma^2 + I_{LU}} \right) \quad (4)$$

式中: h_i 表示 CU 频带中第 i 个子载波上的信道增益; σ^2 表示信道噪声方差。

3 功率分配算法

3.1 最优功率分配方案

最优化目标是 CU 频带中第 i 个子载波的信号对 LU 产生的干扰功率总和,在不超过左、右两边 LU 的干扰门限条件下,使 CU 频带中的传输速率最大化,即得到 CU 的信道容量^[7]。

$$C = \max \sum_{i=1}^N R_i(P_i, h_i) \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^N I_i^l(d_i, P_i) \leq I_{th}^l \\ \sum_{i=1}^N I_i^2(d_i, P_i) \leq I_{th}^2 \\ P_i \geq 0 \end{cases}$$

式中: I_{th}^l 表示 CU 频带左右两侧 LU 的干扰门限值,其中, $l = 1, 2$; 这里假设左右两侧 LU 的干扰门限值相等,即: $I_{th}^1 = I_{th}^2 = I$ 。

此时,最优化问题便演变成一个线性约束的凸优化问题,这一问题可以通过常用的数值方法来求解,利用 Lagrange 乘子法得

$$L(P_i, \lambda_1, \lambda_2) = \sum_{i=1}^N R_i(P_i, h_i) - \lambda_1 \left(\sum_{i=1}^N I_i^1(d_i, P_i) - I_{th}^1 \right) - \lambda_2 \left(\sum_{i=1}^N I_i^2(d_i, P_i) - I_{th}^2 \right) \quad (6)$$

式中: λ_1, λ_2 表示 Lagrange 乘子。

对式(6)求导可得

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{1}{\frac{\sigma_i^2}{|h_i|^2} + P_i} - \lambda_1 \frac{\partial I_i^1}{\partial P_i} - \lambda_2 \frac{\partial I_i^2}{\partial P_i} \quad (7)$$

式中: $\sigma_i^2 = \sigma^2 + I_{LU}$; $K_i^l = \frac{\partial I_i^l}{\partial P_i} = T_s \int_{d_i - B/2}^{d_i + B/2} \left(\frac{\sin \pi f T_s}{\pi f T_s} \right)^2 df$ 表示 CU 频带中第 i 个子载波信号对 LU 的干扰因子,其中 $l = 1, 2$. 由于我们假设左右两侧 LU 的频带宽度相同,故两个干扰因子在数值分布上完全相同。

将式(7)右边等于零,即得到 P_i 的最优解:

$$P_i^* = \left(\frac{1}{\lambda_1 K_i^1 + \lambda_2 K_i^2} - \frac{\sigma_i^2}{|h_i|^2} \right)^+ \quad (8)$$

式中: $(x)^+ = \max\{0, x\}$, 而 λ_1, λ_2 可由式(9)得

到:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N I_i^1(d_i, P_i^*) = I_{th} \\ \sum_{i=1}^N I_i^2(d_i, P_i^*) = I_{th} \end{cases} \quad (9)$$

由(8)式可知, CU 频带中第 i 个子载波被分配的功率, 有可能出现小于零的情况, 因此这里采取迭代分块注水(IPW)算法进行分析处理, 经过多次迭代运算, 直至 CU 频带中每个子载波所分配的功率是非负值为止^[9].

3.2 次优功率分配方案

在次优功率分配方案中, 需要将 CU 频带内的子载波序号进行调整, 自左向右序号依次为 1, 2, 3, ..., $\frac{N}{2}$, $\frac{N}{2}$, ..., 3, 2, 1, 这里取 N 为偶数; 当 N 取奇数时, 也有类似表述. 鉴于文献[7]提出的次优化方案 A 和方案 B, 笔者提出了基于幂函数分布的方案 C 和方案 D.

3.2.1 方案 C(幂函数分布 1)

该方案考虑 CU 频带内子载波所分配的功率, 随着 CU 频带中子载波与 LU 频段之间频谱距离的增加, 呈幂函数幅值特性阶梯状分布, 我们假设第 i 个子载波分配的功率为

$$P_i^c = P \times i^{1.6} \quad (10)$$

结合式(9)可得

$$P_i^{c*} = \frac{i^{1.6} \times I_{th}}{\sum_{i=1}^N i^{1.6} \times K_i}$$

3.2.2 方案 D(幂函数分布 2)

该方案考虑功率分配类似方案 C, 我们假设第 i 个子载波分配的功率为

$$P_i^d = P \times i^{2.2} \quad (11)$$

结合式(9)可得

$$P_i^{d*} = \frac{i^{2.2} \times I_{th}}{\sum_{i=1}^N i^{2.2} \times K_i}$$

4 性能仿真与分析

在仿真与分析过程中, 将最优化功率分配方案和各种次优化功率分配方案进行比较. 利用文献[7]中给出的参数进行性能的仿真与分析, CU 频带内的子载波总数 $N = 10$, $T_s = 4 \mu s$, $B = 0.3125 \text{ MHz}$, $\Delta f = 0.3125 \text{ MHz}$, $\sigma_i^2 = 1 \mu W$, h_i 依次为 1.235 2, 0.257 2, 0.799 2, 0.602 9, 0.744 5, 1.301 7, 1.549 0, 1.422 8, 0.499 5, 0.829 0 dB.

图 2 给出了干扰门限值为 $2.4 \mu W$ 时各种方案的功率分布柱状图, 在最优方案中, CU 频带内各个子载波上分配的功率呈现阶梯状分布, 且是从两侧向中心依次递增, 这是由于 LU 分别位于 CU 频带的两侧造成的结果. 在其他方案中, CU 频带内各个子载波上分配的功率均呈现左右对称分布, 这是由于两边 LU 的干扰门限值相同导致的, 同时也验证了笔者所提出的次优方案是合理的.

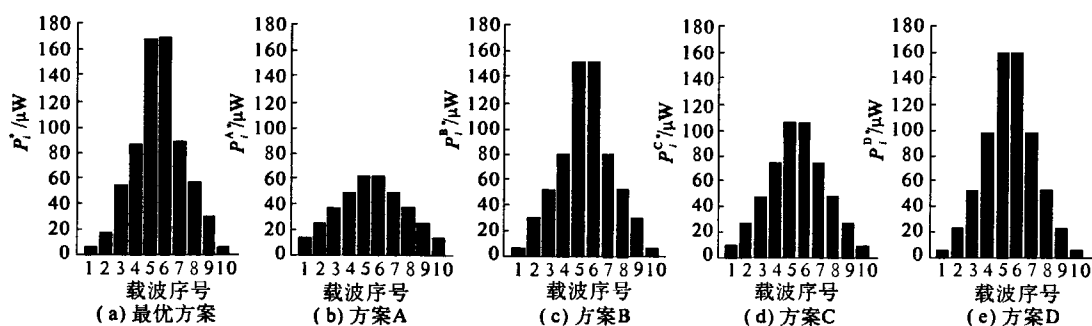


图 2 不同方案的功率分布柱状图

Fig. 2 The power distribution histogram of different options scheme

表 1 不同方案的功率值

Tab. 1 The power values of different options scheme

方案	载波序号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
最优方案	4.80	16.61	54.12	85.18	166.70	168.38	87.47	55.12	27.72	4.01
方案 A	11.90	23.79	35.69	47.58	59.48	59.48	47.58	35.69	23.79	11.90
方案 B	4.88	28.32	49.67	78.45	150.56	150.56	78.45	49.67	28.32	4.88
方案 C	7.90	23.93	45.79	72.56	103.69	103.69	72.56	45.79	23.93	7.90
方案 D	4.58	21.05	51.37	96.73	158.03	158.03	96.73	51.37	21.05	4.58

表1给出图2中所分配功率的具体数据,从各种次优方案的子载波功率分布数据情况可知,方案D的分布最接近最优方案,方案B、C次之,方案A最差。

图3给出了不同干扰门限下CU的最大传输速率(其中小图为局部放大图)。可以看出,其中方案D最接近最优方案,方案B、C次之,方案A最差。随着LU的干扰门限值的逐渐增加,方案D的最大传输速率向最优方案逐渐逼近。

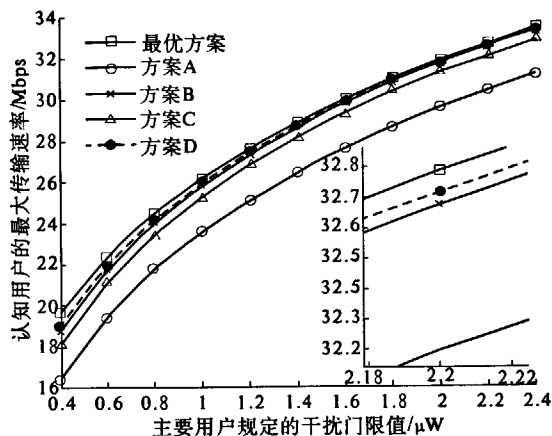


图3 不同干扰门限下CU的最大传输速率

Fig. 3 Under different interference threshold of the maximum transmission rate of CU

图4给出了不同干扰门限下CU的最大发射功率。其中,在各种次优方案下,CU所得到的最大发射总功率中,方案D最接近最优方案,方案B、C次之,方案A最差。随着LU的干扰门限值的增加,方案D的最大发射总功率向最优方案逐渐逼近。

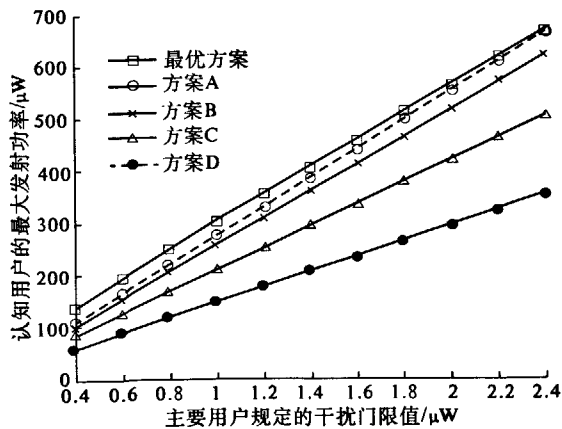


图4 不同干扰门限下CU的最大发射功率

Fig. 4 CU under different interference threshold of the maximum transmit power

在上述同样参数设置条件下,按照CU频带

内子载波的功率分配呈现幂函数分布的方案,来比较不同幂指数条件下的最大传输速率。幂指数依次为:1.0,1.4,1.8,2.2,2.6,3.0。

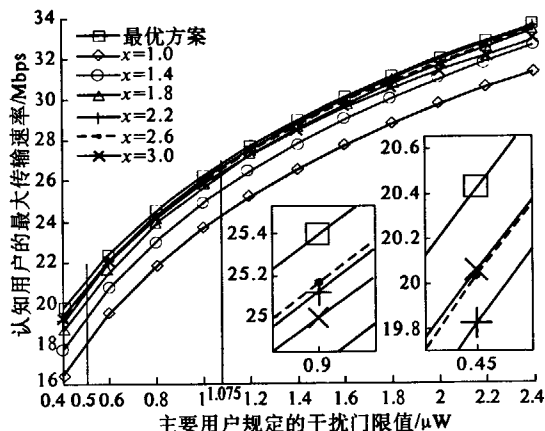


图5 不同幂指数方案下的最大传输速率

Fig. 5 A power scheme under different maximum transmission rate

图5给出了不同幂指数方案下的最大传输速率(其中两个小图为局部放大图)。当LU的干扰门限值 $I_{th} > 1.075$ 时,指数为2.2的次优方案最大传输速率最接近最优方案;当LU的干扰门限值 $0.5 \leq I_{th} \leq 1.075$ 时,指数为2.6的次优方案最大传输速率最接近最优方案,并且非常接近D方案;当LU的干扰门限值 $I_{th} < 0.5$ 时,指数为3.0的次优方案最大传输速率最接近最优方案,并且非常接近D方案。

由此可以看出,在整个干扰门限值区间上,指数为2.2时的幂函数功率分布方案是一种折中的方案,验证了我们设计的次优方案D的合理性。

5 结论

笔者研究了基于OFDM的认知无线电系统中功率分配问题,指出在满足LU干扰门限的前提下,最大化CU频带内信道容量的次优化功率分配方案,可以通过求解一个凸优化问题获得。笔者对不同方案的功率柱状分布图,最大传输速率和发射功率这两性能指标,以及不同幂指数条件下最大传输速率进行了比较,结果表明笔者提出的次优化方案D是优于文献[7]提出的次优化功率分配方案。未来可进一步考虑在LU和CU频带间设置保护频带条件下,利用笔者提出的次优化方案来进一步研究。

参考文献:

- [1] FCC. Federal Communications Commission Spectrum

- Policy Task Force [R]. New York; FCC Report of the Spectrum Efficiency Working Group, November, 2002.
- [2] ZHAO Q, SADLER B. A survey of dynamic spectrum access; signal processing, networking, and regulatory policy [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 55 (5): 2294 - 2309.
- [3] MITOLA J. Cognitive radio; making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13 - 18.
- [4] SVENSSON C. Software Defined Radio-Vision or Reality [C]//24th Norchip Conference, 2006: 149 - 149.
- [5] AKYILDIZ I F, LEE W, VURAN M C, et al. Next generation, dynamic spectrum access, cognitive radio wireless networks, a survey [J]. Computer Networks, 2006, 4(8): 2127 - 2159.
- [6] WEISS T, JONDRAL F. Spectrum pooling: An innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42 (3): S8 - S14.
- [7] BANSAL G, HOSSAIN M J, BHARGAVA V K. Adaptive power loading for OFDM-based cognitive radio systems [C]//Proc IEEE ICC, Washington DC: IEEE Press, 2007: 5137 - 5142.
- [8] WEISS T, HILLENBRAND J, KROHN A, et al. Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems [C]//Proc IEEE Vehicular Technology Conference Spring, IEEE Press, 2004: 1873 - 1877.
- [9] WANG P, ZHAO M, XIAO L, et al. Power allocation in OFDM - based cognitive radio systems [C]//Proc IEEE Global Communication Conference, Washington DC: IEEE Press, 2007: 4061 - 4065.

Power allocation algorithm in OFDM-based cognitive radio systems

YANG Shou-yi, SONG Yan-tao, LU Yan-hui, CHEN Ze-xian

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

Abstract: In cognitive radio system based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), the optimized algorithms for sub-carrier power allocation share the problems of complex iterative calculation and difficult realization. In this case, a sub-optimal power allocation algorithm based on power function distribution is proposed, to allocate power of in-band subcarrier of cognitive user according to the numerical characteristics of the power function by using a convex optimization numerical method under linear constraint. This algorithm has the advantages of fast calculation speed and easy for realization, and reduces the interference for the authorized user brought by the power leakage of the in-band subcarrier of cognitive user appears in the out-of-band. MATLAB simulation results show that the proposed scheme maximized the in-band channel capacity of the cognitive user under the interference threshold of authorized user; meanwhile, the maximum transmission rate of the existing power allocation scheme is increased within the same condition.

Key words: orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM); cognitive radio; power allocation; convex optimization