

混合保护准则下基于 NC-OFDM 的认知无线电系统功率分配

冯文江 李明

(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

摘要 针对主用户采用 OFDM 通信体制,认知用户采用 NC-OFDM 通信体制,认知用户共享主用户授权频谱的工作场景,研究了认知无线电系统功率分配策略。提出依据主用户不同工作状态,采用不同的约束准则:对认知用户工作信道,引入功率泄漏干扰因子约束认知用户的发射功率,以限制对主用户工作信道的泄漏功率强度;对主用户工作信道,设置主用户速率损失上限,以确保主用户正常工作。功率分配算法以混合约束准则为基础,最大化认知无线电系统的传输速率。仿真结果表明,与干扰功率约束机制相比较,本算法能显著提升传输速率。

关键词 认知无线电,非连续正交频分复用,功率分配

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A

Power Allocation with Hybrid Protection Criterion for NC-OFDM-based Cognitive Radio System

FENG Wen-jiang LI Ming

(College of Communications Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract This paper investigated power allocation algorithms for NC-OFDM based cognitive radio system, which access the spectrum originally licensed to an OFDM primary system. According to transfer status of primary users, there will be different constraint strategies; A new criterion referred to power leakage interference factor is proposed to constraint leakage power to primary users in the cognitive users' working channels; meanwhile, on the primary users' working channels, primary users are protected by keeping the interference introduced to primary users' rate loss below a threshold. Power allocation algorithm maximizes the rate of the cognitive radio system based on the hybrid constraint strategies. Then the numerical result show that, compared with the conventional interference power constraint, the cognitive system can achieve a significant rate gain under the proposed constraint.

Keywords Cognitive radio, NC-OFDM, Power allocation

认知无线电(Cognitive Radio, CR)通过共享主用户(Primary User, PU)的授权频段,能有效提高频谱利用率。非连续正交频分复用(Non-Contiguous Orthogonal Frequency Division Multiplexing, NC-OFDM)既能动态利用频谱资源,根据子信道特性自适应加载,又能对授权用户频谱占用情况进行快速分析,避免对PU造成干扰,被认为是认知无线电中传输链路自适应实现的一种潜在技术^[1,2]。设计合理的认知用户(Secondary User, SU)功率分配策略是实现传输链路自适应的重要内容之一。基于NC-OFDM的认知无线电系统功率分配算法必须考虑对主用户干扰的控制。文献[3]依据各子载波峰值功率限制,提出一种迭代分块注水(Iterative Partitioned Water-Filling, IPWF)算法;文献[4,5]进一步对IPWF算法进行了改进,提出采用分块更新注水线,避免多次计算以降低计算复杂度;文献[6-8]采用速率约束,通过设置主用户速率损失上限,允许认知用户伺机接入。但上述功率分配算法均未考虑认知用户功率泄漏对主用户造成的影响。

本文针对认知用户采用NC-OFDM通信体制,主用户采用OFDM通信体制,认知用户共享主用户授权频谱工作场景,提出一种混合保护准则下的认知无线电系统功率分配算

法。首先分析子载波功率泄漏对相邻信道的影响以及主用户工作信道的传输速率,在对认知用户进行功率分配时,依据主用户工作状态,采用不同的约束准则,对认知用户工作信道,引入功率泄漏干扰因子约束其发射功率,以限制对主用户工作信道的泄漏功率强度;对主用户工作信道,设置主用户速率损失上限,以确保主用户正常工作。然后根据凸优化理论分析主用户在混合保护准则和总传输功率约束下使认知用户传输速率最大化的子载波功率分配方案,并对其进行性能仿真分析。

1 系统模型

图1所示为共享系统可用频谱构成,假设主用户系统共有 N 个子载波、 M 个主用户。第 m 个主用户的子载波集合为 k_m ,一个子载波分配给一个主用户,即 $k_j \cap k_m = \emptyset, \forall m \neq j$,子载波间隔为 Δf ,背景噪声为高斯加性白噪声,噪声方差为 N_0 。在以下分析中, T_n 表示主用户为子载波 n 分配的传输功率; P_n 表示认知用户为子载波 n 分配的功率,第 m 个信道的第一个子载波序号为 m_i 。认知用户和主用户收发信

到稿日期:2011-04-12 返修日期:2011-07-14 本文受国家自然科学基金项目(60872038)资助。

冯文江(1963-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为宽带无线接入技术、认知无线电、通信信号处理等,E-mail:fwj@ccee.cqu.edu.cn;李明(1986-),男,硕士生,主要研究方向为认知无线电。

机在子载波 n 上的信道增益如图 2 所示。

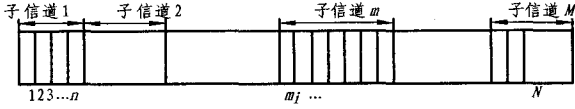


图 1 共享系统的可用频谱构成

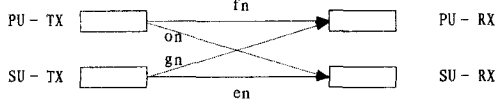


图 2 传输模型

在该共享系统中,认知用户根据主用户对信道的占用状态和业务需要,选择空闲信道接入,基于一定的干扰约束准则,为各子载波分配发射功率。

2 约束准则

依据图 1 所示的共享系统频谱构成,一方面主用户作为优先用户,应抑制认知用户接入,以免对主用户工作信道产生过分干扰;另一方面希望认知无线电系统能尽可能满足用户的业务请求,因此必须设计合理的约束准则。

2.1 认知用户工作信道的约束准则

对于认知用户工作信道 i ,认知用户分配给各子载波的发射功率存在功率泄漏,会对相邻主用户工作信道产生干扰。用 H_m^i 表示子载波 j 对信道 m 的干扰因子,根据文献[9],有

$$H_m^i = \frac{1}{\Delta f} \int_{(m_i-1/2)\Delta f}^{(m_i+1-1/2)\Delta f} \left(\frac{\sin(\pi \frac{f-\Delta f}{\Delta f})}{\pi \frac{f-\Delta f}{\Delta f}} \right)^2 df \quad (1)$$

考虑到功率泄漏的影响范围,选取信道 m 周围 ϵ 个子载波集合 Ω_m 作为干扰源。假设 Ω_m 中各子载波分配的功率分别为 $p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_\epsilon$, 对信道 m 产生的泄漏干扰功率为

$$p_{m,\alpha} = (p_1 p_2 \dots p_i \dots p_\epsilon) \cdot (H_m^1, H_m^2, \dots, H_m^\epsilon)^T \quad (2)$$

用 $P_{m,\max}$ 表示 Ω_m 集合对子信道 m 产生的泄漏功率上限, P_{\max} 表示认知用户总发射功率,由此获得功率约束条件为

$$p_{m,\alpha} \leq P_{m,\max} \quad (3)$$

$$\sum_N p_n \leq P_{\max} \quad (4)$$

2.2 主用户工作信道的约束准则

对于主用户工作信道 m ,认知用户接入前主用户 PU_m 的传输速率为

$$R_m^p = \sum_{n \in K_m} \log_2 \left(1 + \frac{f_n T_n}{N_0} \right) \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (5)$$

设认知用户为子信道 m 中子载波 n 分配的功率为 p_n 。利用空闲信道接入的认知用户会对邻近主用户产生干扰,将式(2)的泄漏干扰功率 $p_{m,\alpha}$ 分解到信道 m 中,各子载波上的泄漏干扰功率为 $p'_{m,\alpha}$ 。此时在认知用户接入后,主用户 PU_m 的传输速率为

$$R_m^s = \sum_{n \in K_m} \log_2 \left(1 + \frac{f_n T_n}{N_0 + g_n p_n + p'_{m,\alpha}} \right) \quad (6)$$

用 ΔR_m 表示 PU_m 可容忍的最大速率损失,由此获得速率损失约束条件为

$$R_m^p - R_m^s \leq \Delta R_m, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (7)$$

令 $R_m \triangleq R_m^p - \Delta R_m, \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}$, 速率损失约束还可表述为

$$R_m^s \geq R_m, \quad \forall m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (8)$$

此时,认知无线电系统容量为

$$r_s = \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{e_n P_n}{o_n T_n + N_0} \right) \quad (9)$$

式中, e_n 为认知用户收发信机在子载波 n 上的信道增益, o_n 为主用户发送端到认知用户接收端的增益。

3 混合保护功率分配算法

设主用户空闲信道集合为 S_I , 主用户工作信道集合为 S_r , 那么 $S_I \cup S_r = \{1, 2, \dots, M\}, S_I \cap S_r = \emptyset$, 建立如下优化模型。

$$\max_{P} \sum_{n=1}^N \log_2 (1 + h_n P_n) \quad (10)$$

$$\text{s. t. } P_n \geq 0$$

$$\sum_N p_n \leq P_{\max}, \quad \forall n \in N \quad (11)$$

$$p_{m,\alpha} \leq p_{m,\max}, \quad \forall m \in S_I \quad (12)$$

$$R_m^s \geq R_m, \quad \forall m \in S_r \quad (13)$$

式中, $h_n \triangleq \frac{e_n}{o_n T_n + N_0}$ 。针对上述优化问题,由于约束条件均为 p_n 的线性约束,采用凸优化分析法构造拉格朗日函数,即

$$L(P, \lambda, \mu, \chi) = \sum_{n=1}^N \log_2 (1 + h_n P_n) - \lambda (\sum_N p_n - P_{\max}) - \sum_{S_r} \mu_m (R_m - R_m^s) - \sum_{S_I} \chi_m (P_{m,\alpha} - P_{m,\max}) \quad (14)$$

式中, λ, μ, χ 为拉格朗日乘子。利用文献[10]的对偶分解法,优化问题可表述为两部分,即

$$P1: \max \sum_{n \in K_m} \log_2 (1 + h_n P_n) - \lambda \sum_{n \in K_m} P_n \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n \in S_r} \log \left(1 + \frac{f_n T_n}{N_0 + p_{m,\alpha} + g_n P_n} \right) \geq R_m, m \in S_r \quad (16)$$

$$P2: \max \sum_{n \in K_m} \log_2 (1 + h_n P_n) - \lambda \sum_{n \in K_m} P_n \quad (17)$$

$$\text{s. t. } p_{m,\alpha} \leq p_{m,\max}, m \in S_I \quad (18)$$

利用文献[7]的结论,可得到问题 P1 的最优功率分配为 $P_n^* = \max\{\eta, 0\}$

式中, η 是 $\eta = \frac{1}{\lambda \ln 2 + \mu_m g_n v_n(\eta)} - \frac{1}{h_n}$ 的正根, $v_n(\eta)$ 是关于 η 的函数,即

$$v_n(\eta) = \frac{f_n T_n}{(N_0 + p'_{m,\alpha} + g_n \eta)(N_0 + p'_{m,\alpha} + g_n \eta + f_n T_n)} \quad (19)$$

对于 P2,构造拉格朗日函数为

$$L(p_n, \lambda, \gamma) = \sum_{n \in K_m} \log_2 (1 + h_n p_n) - \lambda \sum_{n \in K_m} p_n - \gamma (p_{m,\alpha} - p_{m,\max}) \quad (20)$$

根据 KKT 条件,有 $\frac{\partial L(P_n, \lambda, \gamma)}{\partial P_n} = 0$, 由此获得 $n \in S_I$ 时

第 n 个子载波的发射功率为

$$P_n^* = \left(\frac{1}{(\lambda + \gamma)} - \frac{1}{h_n} \right)^+ \quad (21)$$

式中, $(x)^+ = \max\{0, x\}$, 拉格朗日乘子 λ, μ, γ 可根据上述约束条件求得。

至此,得到了不同类别子载波的功率约束。考虑算法的冷启动需求,在初始接入阶段主用户工作状态不确定时,认知用户仍能够在严格的功率约束下接入。算法流程如下:

Step1 初始化,设 $S_r = \{1, 2, \dots, M\}, S_I = \emptyset, \forall i \in S_r$, 使 $R_i^s \geq R_i$, 得到问题 P1 下子载波功率约束到 $P_i^* = \max\{\eta, 0\}, i = i + 1$ 。

Step2 若检测到空闲信道 $K_i, \exists i \in S_I$, 则计算相应的子载波对相邻至多两个主用户工作信道 (j, k) 的功率泄漏干扰

因子: $H_j^i, H_k^i, i \in K_i, i=i+1$ 。

Step3 满足 $\sum_{K_i} p_i H_j^i \leq P_{j,\alpha}$ 且 $\sum_{K_i} p_i H_k^i \leq P_{k,\alpha}$ 时, P2 求得 K_i 中各个子载波的发射功率 P_i 。

Step4 重新计算 K_i 相邻的主用户工作信道分配的功率, 即由新的 $P_{j,\alpha}$ 和 $P_{k,\alpha}$, 根据设置的主用户速率损失上限, 由 P1 重新计算在相邻主用户工作信道 (j, k) 上各子载波的发射功率 $P_i^* = \max\{\eta, 0\}$ 。

Step5 若信道 K_i 有主用户接入, 使得 $\exists i \notin S_r$, 即 $i \in S_r$, 则执行 Step3。

4 仿真结果

为了评价本文提出的混合保护功率分配算法的性能, 构建如下仿真模型: 采用瑞利衰落信道, 子载波数 $N=128$, 有两个主用户 PU1 和 PU2 占用其中的 64 个子载波, 认知用户最大发射功率为 10dBm, 各子载波噪声功率均为 $N_0=0$ dBm。图 3 所示为认知用户接入某空闲信道对主用户工作信道产生的干扰因子。为简化分析, 只考虑认知用户接入信道对相邻至多 2 个主用户工作信道产生的影响, 图中 + 位置表示认知用户接入信道对主用户工作的 27~90 子载波的干扰因子, * 表示对主用户占用的 187~251 子载波的干扰因子。由图可知, 越靠近主用户工作频带, 干扰因子越大; 在相邻多个主用户工作信道的频谱空穴(如子载波 91~186)下, 认知用户接入均会对相邻信道产生功率泄漏。

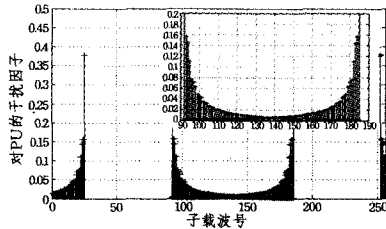


图 3 干扰因子

图 4 给出了主用户在不同速率损失上限时, 认知用户速率随泄漏干扰功率的变化情况。为简单起见, 假设主用户采用平均功率分配, 功率预算为 10dBm, 主用户速率损失容限分别为 10% 和 30%, 认知用户速率随泄漏干扰功率和主用户速率损失上限增大而增加。

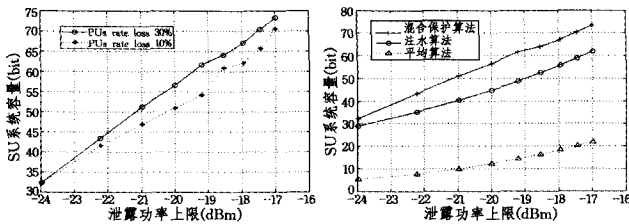


图 4 基于用户的速率损失约束对比

图 5 算法性能比较

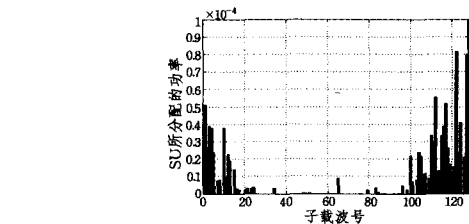


图 6 认知用户功率分配结果

图 5 给出了基于总功率约束的注水算法、平均功率分配

算法和本文提出的混合保护功率分配算法在不同泄漏干扰功率时认知用户的速率。主用户占用 64 个子载波(子载波号为 27~90), 仍采用平均功率分配, 认知用户和认知用户功率预算均为 10dBm, 主用户速率损失容限为 10%。可以看出, 随着对主用户工作信道泄漏功率上限的增加, 3 种算法中认知系统的容量均有增加。但是相对于前两种方案, 采用混合策略的功率分配时认知系统容量更大。图 6 则显示了图 5 中采用混合保护准则时认知用户各子载波的功率分配。

结束语 对于主用户采用 OFDM 通信体制, 基于 NC-OFDM 的认知无线电系统会对主用户产生功率泄漏干扰。在 PU 对工作信道的干扰功率约束较为严格且与 SU 接入信道相邻时, 这一泄漏不能简单忽略。本文采用了一种混合保护准则, 即在严格保证主用户传输的同时, 对于频谱空穴采用子载波功率限制认知用户泄漏功率。在主用户工作信道, 设置主用户速率约束上限。最优功率分配策略是在混合保护主用户和传输功率约束下, 最大化认知无线电系统的速率。仿真结果表明, 相对于干扰功率约束, 混合保护准则取得了较大的速率提升。

参考文献

- [1] Weiss T A, Jondral F K. Spectrum pooling: An innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency[J]. IEEE Commun. Mag., 2004, 42(3): S8-S14
- [2] Berthold U, Jondral J K. Guidelines for designing OFDM overlay systems[C]//Proc. IEEE 1st Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '05). Baltimore, MD, Nov. 2005: 626-629
- [3] Wang Peng, Zhao Ming, Xiao Li-min, et al. Power allocation in OFDM-based cognitive radio systems[C]//Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (Globecom 2007). Washington DC, Nov. 2007: 4061-4065
- [4] Chen C H, Wang C L. An Efficient Power Allocation Algorithm for Multiuser OFDM-based Cognitive Radio Systems [C] // Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Sydney, Australia, April 2010: 1-6
- [5] Chen C H, Wang C L. Joint Subcarrier and Power Allocation in Multiuser OFDM-based Cognitive Radio Systems[C]//International Conference on Communications (ICC). South Africa, May 2010: 1-5
- [6] Kang X, Garg H K, Liang Y C. Optimal Power Allocation for OFDM-based Cognitive Radio with New Primary Transmission Protection Criteria [J]. Wireless Communications, 2010, 9(6): 2066-2075
- [7] Kang X, Garg H K, et al. Power Allocation for OFDM-based Cognitive Radio Systems with Hybrid Protection to Primary Users[C]//GLOBECOM. 2009: 1-6
- [8] Chen C H, Wang C L. Power Allocation for OFDM-based Cognitive Radio Systems under Primary User Activity[C]//Vehicular Technology Conference (VTC). Taipei, May 2010: 1-5
- [9] Weiss T, Hillenbrand J, et al. Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems [C] // Proc IEEE Vehicular Technology Conference Spring. Milan; IEEE Press, 2004: 1873-1877
- [10] Palomar D P, Chiang M. A tutorial on decomposition methods for network utility maximization [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 2006, 24(8): 1439-1451