

文章编号:1671-6833(2010)06-0051-04

基于 OFDM 的认知无线电系统中的功率分配改进

杨守义¹, 薄建华¹, 刘博文², 穆晓敏¹, 齐 林¹

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 北京理工大学 计算机科学与技术学院, 北京 100081)

摘 要: 基于正交频分复用(OFDM)的认知无线电系统中, 次用户子载波功率的泄漏会对主用户产生干扰. 针对这一问题, 提出了一种改进的功率分配方法, 即在主、次用户所在子信道间合理设置保护带条件下, 采用迭代分块注水算法. 仿真结果表明, 改进的算法满足各主用户干扰功率上限的条件下, 也使得次用户信道容量最大化.

关键词: 正交频分复用(OFDM); 认知无线电; 功率分配; 迭代分块注水

中图分类号: TN914

文献标识码: A

0 引言

随着无线通信技术的发展, 无线频谱成了无线通信珍贵的资源之一. 然而频谱的测量结果表明, 很多已经分配的授权频谱并未得到充分利用^[1], 联邦电信委员会(FCC)也报道类似观点^[2]. 当前, 提升频谱利用效率的新观点要求对传统的频谱分配管理策略进行优化. 认知无线电技术在动态环境中能够开发未使用的频谱, 因而被视为能够提高频谱利用效率的有效方法之一^[3]. 同时, 在认知用户之间, OFDM 能更加灵活地动态分配未利用频谱, 并且很容易分析主用户的频谱占用情况^[4]. 这些优点使得 OFDM 被视为认知无线网络中的一种备用的传输技术. 由于传输信号的非正交性, OFDM 调制可能会引起主用户(PU)和认知用户或次用户(SU)之间相互干扰. 如果认知用户和主用户频带并肩相邻, 并且它们接入方式不同, 这就导致它们之间的相互干扰成为系统实施的限制因素. 同时, 认知用户频带的子载波对主用户频带干扰的大小, 由子载波上分配的功率和子载波与主用户频带之间的距离决定. 文献[5-6]研究了能够减少对主用户频带干扰的子载波空闲保护机制. 在认知无线电系统中, 为了保护主用户传输而需要对次用户的传输功率进行限制, 这就使得引入对每个子信道的功率门限约束很重要, 而且需要重新考虑传统的 OFDM

系统的功率分配方法. 文献[7]作者提出了迭代分块注水算法(IPW), 通过将主用户的干扰功率限制转化为各子信道上的发射功率限制, 算法实现相对容易, 但是忽略了各子信道的子载波功率泄漏对其相邻的子信道对应主用户的干扰. 文献[8]分析了子载波功率泄漏对主用户的干扰, 通过求解一个凸优化问题获得理论上最优的功率分配, 但是实现上复杂度较高. 在某种需要考虑子载波功率泄露问题的典型系统中, 直接应用文献[8]中算法显得有些不适合, 针对上面的问题, 笔者提出一种改进的功率分配方法, 并将其与文献[7-8]所得到的方法进行了对比.

1 系统模型

笔者主要考虑并排认知无线电模型, 如图 1 所示, 假设把认知用户机会接入的授权频谱划分为 M 个子信道, 每个对应于一个主用户的授权频谱, 认知用户采用 OFDM 调制方式, 子载波总

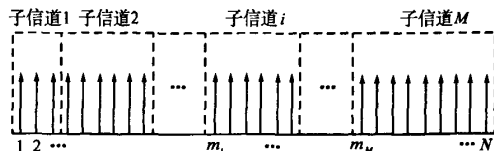


图 1 基于 OFDM 认知无线电系统中次用户的频谱
Fig.1 Spectrum of SU in OFDM-based cognitive radio systems

收稿日期:2010-7-18;修订日期:2010-09-01

基金项目:教育部重点研究项目(208083)

作者简介:杨守义(1965-),男,河南郑州人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要研究方向为宽带无线通信,

E-mail:iesyyang@zzu.edu.cn.

数为 N , 子载波间隔为 Δf , 同时定义 m_i , 第 i 个子信道里面的第一个子载波的标号. 为了便于分析, 进一步假定各个子信道的带宽为整数个子载波间隔.

假设信道经历频率平坦衰落, 信道状态信息对发射机是已知的, 传输的功率在每个次用户的子载波上自适应分配. 假设利用理想的编码方案, 根据容量公式, 第 j 个子载波上的传输率可表示为:

$$R_j(p_j, h_j) = \ln \left[1 + \frac{|h_j|^2 p_j}{N_0} \right] \quad (1)$$

式中: p_j 为第 j 个子载波的传输功率; h_j 为信道衰落增益; N_0 为子载波上的高斯白噪声的噪声功率.

在认知无线电系统中, 次用户的传输必须满足主用户的干扰约束条件, 所以需要引入子信道发射功率. 如图 2 所示, 考虑影响功率控制的基本因素, 并仅考虑次用户的情况. 当次用户发射机只能够检测到与其距离为 d 以内的主用户接收机的存在时, 为保证主用户的传输质量, 第 i 个次用户发射机的传输功率 P_{ti} 要确保与其距离 d 以内的信号功率不大于最大允许干扰门限 η . 仅仅考虑路径损耗因素时, 次用户发射机的传输功率需满足:

$$P_{ti} \leq \eta_i (d_i - r_i)^{\alpha_i} \quad (2)$$

式中: r_i 为主用户的传输范围; α_i 为路径损耗因子. 因此, 每个主用户的干扰功率上限可转化为对次用户在各个子信道上的发射功率的限制. 假设在信道检测中所属 PU_i 的频谱未被占用时, 把公式(2)中不等式的右边部分定义为第 i 个子信道上的发射功率限制 G_i , 可表示为:

$$G_i = \eta_i (d_i - r_i)^{\alpha_i} \quad (3)$$

如果主、次用户发射机的距离很小, 甚至位于主用户的受保护区域之内, 则次用户在对子信道上的发射功率限制将会很严格.

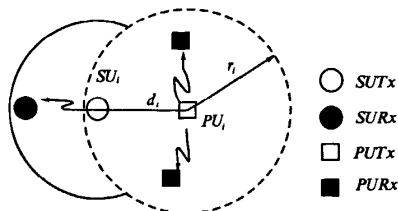


图2 认知无线电系统模型

Fig.2 Cognitive radio system model

在认知无线电系统中, 次用户采用 OFDM 调

制方式时, 由于主、次用户传输信号的非正交性会产生相互干扰. 这样次用户在某个子信道上的传输功率不仅包括分配给该子信道上的子载波的功率, 还有该子信道外的子载波功率泄漏. 对此, 在主、次用户频谱之间灵活合理设置保护子载波带可以明显降低主、次用户之间的功率泄露. 于是, 第 i 个子信道上的发射功率可以表示为:

$$F_i = \sum_{j=m_i}^{m_{i+1}-1} p_j, \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式中: p_j 是第 j 个子载波上所分配的功率, $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_N]^T$. 因此, 为了保护所有主用户的性能, 次用户的功率分配需要同时满足 M 个子信道的发射功率限制条件, 可用公式表示为:

$$\mathbf{F} \leq \mathbf{G} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{F} = [F_1, F_2, \dots, F_M]^T$; $\mathbf{G} = [G_1, G_2, \dots, G_M]^T$.

2 改进的功率分配算法

基于 OFDM 的认知无线电系统中的功率分配目标是次用户链路容量的最大化. 为实现这一目标, 功率分配方案不仅要满足总发射功率的限制, 还要必须满足由公式(5)所描述的子信道发射功率限制条件. 因此, 改进功率分配问题可以建模为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^* &= \operatorname{argmax}_{\mathbf{P}} \sum_{j=1}^N R_j \\ \text{s. t. } \mathbf{P} &\geq \mathbf{0} \\ \sum_{j=1}^N p_j &\leq P_{\text{tot}} \\ \mathbf{F} &\leq \mathbf{G} \end{aligned}$$

$p_k = 0, k \in \{k \mid \text{与 PU 最邻近属于 SU 的 } (1 \sim 2) \text{ 个子载波的序号}\}$.

其中: P_{tot} 表示总发射功率限制. 需要说明的是, 系统中的次用户也会受到主用户的干扰. 而这些干扰被次用户接收机视为是高斯白噪声, 不会影响上述数学模型. 根据建立的模型提出的改进算法如下.

初始化:

$\mathbf{A} = \{i \mid i = 1, 2, \dots, M\}, \mathbf{B} = \emptyset, P_i = P_{\text{tot}}, k = 1$

$\mathbf{C} \in \{j \mid \text{第 } i \text{ 个子信道的第 } j \text{ 个子载波的标号}, j \in \mathbf{A}\}$

开始:

(1) 关闭次用户与主用户所在子信道最相邻近的子载波, 以保护子载波不予分配功率;

(2) 对 \mathbf{C} 中的子载波以功率 $p_k = P_{\text{tot}}$ 进行传统注水, 得到相应子载波分配的功率 $p_j, j \in \mathbf{C}$;

(3) 对于 $i \in A$, 比较 F_i 和 G_i 大小, 得到 $D = \{i | F_i \geq G_i, i \in A\}$;

(4) $A = A/D$, $B = B \cup D$, $P_{k+1} = P_k - \sum_{i \in D} G_i$, 更新 C ;

(5) 如果 $D \neq \emptyset$, $k = k + 1$, 跳转到第 2 步;

(6) 对于第 i 个子信道, $i \in D$, 分别在相应的子载波上以功率 G_i 进行传统注水, 并得到相应子载波分配的功率 $p_j, j \in \bar{C}$.

由于某个子载波泄漏到其他子信道的功率相对于该子载波在其所属子信道上的发射功率是非常小的, 因此, 文献[7]中的近似在一般场景下是合理的. 但在一些特定的场景中, 例如某个子信道的发射功率限制很严格而同时分配到其相邻子信道的功率又比较高时, 子载波的功率泄漏问题就不能简单忽略了. 因此, 在主、次用户所在子信道间合理设置保护带, 这样减小了子载波的功率泄漏. 在此条件下应用 IPW 算法就显得合理了.

3 性能仿真与比较

本方法城市信道模型生成频率选择性衰落信道, 该模型信道设为 6 径, 各径的时延参数为 $[0.00, 0.19, 0.51, 1.60, 2.30, 5.10] \mu s$, 各径功率分配参数为 $[0.188, 0.380, 0.239, 0.096, 0.061, 0.036]$. 次用户所占用频带的带宽为 5 MHz. 并均匀分成 5 个子信道, 每个子信道对应于一个主用户, 子载波总数为 80, 每个子信道包含有 16 个子载波. 总发射功率和噪声功率分别设置为 530 和 10. 各子信道的发射功率约束为 $G = [100, 1.6, 300, 5, 50]$.

通过在主、次用户所在子信道间合理设置保护带条件下应用 IPW 算法得到了如图 3 所示的改进功率分配方案. 为了比较, 笔者也给出了文献[8]所得到的功率分配方案, 见图 4. 在图 3 中, 由于把子信道 2, 4 做为主用户所在信道, 而与其最邻近的子载波被设置为保护子载波而不予分配功率, 而与此同时, 子信道 1, 3, 5 的所属剩余子载波按 IPW 算法分配功率. 此时不仅满足了各子信道上的发射功率约束要求, 也使得了次用户链路信道容量最大化. 对比图 4 可以发现, 两种方案在子信道 5 上的功率分配方案几乎相同, 这表明在各子信道发射功率约束可比拟的场景中, 忽略子载波功率泄漏的影响是合理的, 此时就可以不用设置保护带而直接应用 IPW 算法.

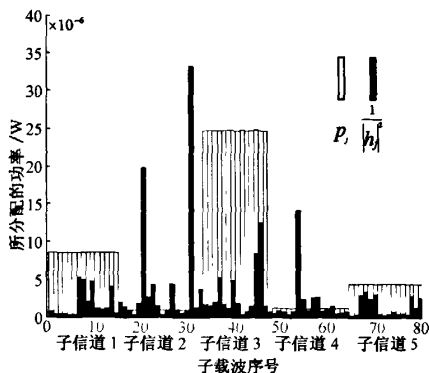


图 3 设置保护子载波时的功率分配结果

Fig.3 Power allocation installing null subcarriers to the primary user band

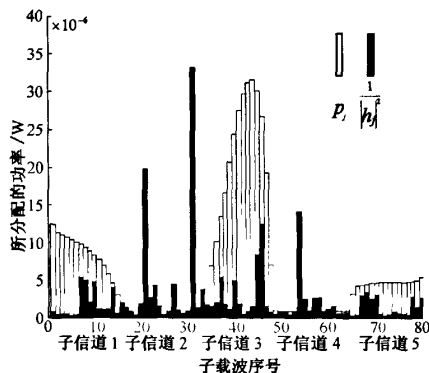


图 4 由文献[8]得到的功率分配结果

Fig.4 power allocation by the scheme of document [8]

同时给出几种方法的系统容量随信噪比变化以及随对 PU 干扰变化的对比情况, 分别如图 5, 图 6 所示. 从中可以看出: 一方面, 不同方案的系统容量随信噪比增大而逐渐增大; 另一方面, 对比文献[7-8], 笔者提出方案的系统容量要比文献[7]中方案的低一些, 这是因为设置了保护子载波牺牲了一定带宽所致, 但是比文献[8]中方案的高一些. 文献[8]考虑各子载波功率泄露的影响, 距 PU 近的子载波分配的功率很少, 距 PU 远的子载波分配的功率较多. 笔者设置子载波保护带可以降低大部分对 PU 功率泄露影响, 可以忽略次用户信道内剩余子载波功率泄露的影响, 同时次用户信道内剩余子载波上分配的功率较多, 这样使得该方案的次用户链路容量比文献[8]中方案的高一些. 另外设置的保护子载波数应尽量合理, 既要保证次用户系统链路容量, 又能使得带宽牺牲较少, 因此设置一个保护子载波的方案是比较合理的.

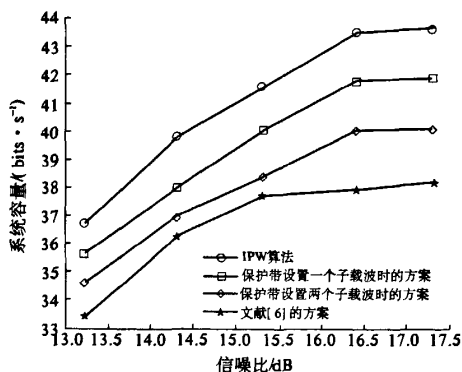


图5 不同方案的系统容量和信噪比的关系图

Fig. 5 Maximum capacity of SU versus SNR by several schemes

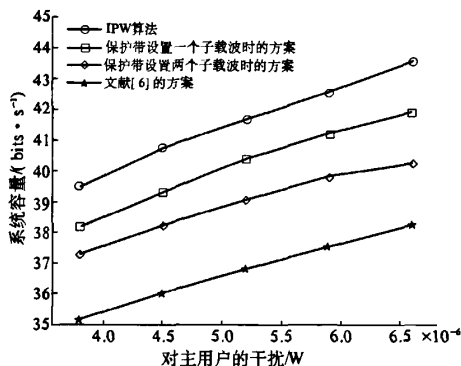


图6 不同方案的系统容量和对PU干扰的关系图

Fig. 6 Maximum capacity of SU versus interference introduced to the PU band by several schemes

4 结论

提出了一种改进的功率分配方法,即在主、次用户所在子信道间合理设置保护带条件下应用

IPW算法.本方法特别考虑了在主、次用户所在子信道间合理设置保护带降低了功率分配中子载波功率泄漏的影响,并应用已有高效的IPW算法,实现上相对容易些,但是也牺牲了一定的带宽.仿真结果表明,笔者所提方案也是一种有效的方法.

参考文献:

- [1] MISHRA S M, CABRIC D, CHANG C, et al. A real time cognitive radio testbed for physical and link layer experiments[C] // Baltimore: IEEE Press DySPAN, 2005: 562 - 567.
- [2] FCC. FCC report of the spectrum efficiency working group[R]. FCC Spectrum Policy Task Force, 2002.
- [3] 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.
- [4] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[C] // Canada: IEEE Press, 2005: 201 - 220.
- [5] WEISS T, JONDRAL F. Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(3): 8 - 14.
- [6] WEISS T, HILLENBRAND J, KROHN A, et al. Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems[C] // Milan: IEEE Press, 2004: 1873 - 1877.
- [7] WANG P, XIAO L. Power allocation in OFDM-based cognitive radio systems[C] // Washington D C: IEEE Press, 2007: 4061 - 4065.
- [8] 王鹏, 钟晓峰, 肖立民, 等. 基于OFDM的认知无线电系统中最优功率分配[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(8): 1144 - 1147.

A Improved Strategy of Power Allocation in OFDM-based Cognitive Radio Systems

YANG Shou - yi¹, BO Jian - hua¹, LIU Bo - wen², Mu Xiao - min¹, Qi Lin¹

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: As the primary user suffers interference from subcarriers' sidelobes of secondary users in based - OFDM cognitive radio system, this paper proposes an improved power allocation strategy. It applies iterative partitioned water - filling algorithm under the conditions of the reasonable nulling mechanism between the subchannels. Simulations show that the proposed scheme maximizes the channel capacity while satisfying the PUs' interference power constraints.

Key words: orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM); cognitive radio; power allocation; iterative partitioned water-filling