

一种基于 OFDM 认知无线网络的次优动态资源分配算法

韩杰 宋晓勤 董莉 金慧

(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 211106)

摘要 研究了采用正交频分复用的认知无线网络中的多用户资源分配问题,包括子载波分配和功率分配。在认知无线电系统中,除了考虑主用户与次用户之间的相互干扰,还要求将主用户对次用户的干扰控制在预设门限之下,因此,系统模型更为复杂。整数约束条件,使得寻求最优解的算法复杂度高,无法用于对实时性要求高的系统。因此,提出了一种寻求次优解的分步式资源分配算法,以降低算法的复杂度。首先采用一种综合考虑了功率限制和对主用户的干扰限制的新型子载波分配方案,然后提出改进的线性注水算法进行功率分配。仿真结果表明,相比于最优分配算法,所提出的算法可以在获得较好的系统容量的同时,有效地降低系统的复杂度,适用于对实时性要求高的系统。

关键词 认知无线网络,正交频分复用,资源分配,线性注水算法

中图分类号 TN925

文献标识码 A

DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.05.009

Suboptimal Dynamic Resource Allocation Algorithm in OFDM Based Cognitive Radio Network

HAN Jie SONG Xiao-qin DONG Li JIN hui

(College of Electrical Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract This paper investigated the multi-user resource allocation in OFDM-based cognitive radio(CR-OFDM) including subcarrier allocation and power allocation. In CR system, not only the interference between primary users(PUs) and second users(SUs) is considered, but also the interference caused by SUs need to be controlled under the threshold. Thus the system model is more complicated. Because of the integer constraints, the complexity of the algorithm which can obtain optimal solution is too high to suit for real-time systems. Therefore, this paper proposed a distributed algorithm to obtain the suboptimal solution with low complexity. First, a subcarrier allocation algorithm considering power constraint and interference constraint was proposed and then a modified linear water-filling algorithm was put forward to allocate power. Simulation results show that the proposed algorithm can obtain the satisfactory system capacity and reduce the complexity in comparison with the optimal Lagrange dual method, which is more suitable for real-time systems.

Keywords Cognitive radio network, OFDM, Resource allocation, Linear water-filling algorithm

1 引言

随着无线通信技术的飞速发展,频谱资源短缺和部分频谱资源利用不足的矛盾越来越受到人们的关注。认知无线电(CR)技术的出现有效地改善了频谱资源的利用率^[1]。认知无线电通过智能感知频谱的瞬时状态,在确保不影响主用户(PUs)的前提下,根据周围环境确定次用户(SUs)的传输特性,进而在授权频段上进行主从用户的同步传输。这种伺机接入机制可以充分利用频谱资源,因此如何充分发挥资源分配效率成为当前研究的重点。

正交频分复用技术(OFDM)凭借其够灵活的动态分配频谱,已经被广泛应用于CR系统的空接入,成为处于底层的技术^[2]。但在实际系统中,由于并不能确保主用户也采用

OFDM调制,因此主用户与次用户因传输信号的非正交性产生了干扰。文献[3]指出,次用户所占用的子载波对主用户造成的干扰取决于分配在此子信道上的功率和子载波到主用户之间的频谱距离,用户间的相互干扰已经成为限制系统性能的重要因素。

从宏观角度来讲,CR-OFDM系统中的资源分配问题包括两方面:1)根据不同OFDM子载波的信道特性,对无线频谱进行合理的利用和分配,此过程称作子载波分配;2)对次用户占用的子载波进行合理的功率分配,同时控制对主用户的干扰,实现资源的高效利用,此过程称为功率分配。文献[4]提出了一个有效的功率分配算法,其可以获得最优解,但是只考虑了单用户的情况,限制了算法的应用;文献[5]提出了最优和次优算法以最大化CR-OFDM系统总容量,但是未考虑

到稿日期:2016-04-16 返修日期:2016-06-21 本文受国家自然科学基金(61301103)资助。

韩杰(1991-),男,硕士生,主要研究方向为认知无线电、无线资源管理,E-mail:hanjie@nuaa.edu.cn;宋晓勤(1973-),博士,副教授,主要研究方向为无线网络与通信、认知无线网络;董莉(1992-),女,硕士生,主要研究方向为认知无线电、频谱感知;金慧(1993-),女,硕士生,主要研究方向为通信抗干扰。

传输功率限制;文献[6]基于公平性原则,提出了一种联合子载波和功率的分配算法;文献[7]通过人工免疫算法联合分配子载波和功率,但是智能优化算法由于具有一定的随机性,且算法初始化时需要预设参数,因此会对系统的稳定性造成一定影响;文献[8]提出了一种线性注水算法,除去了传统注水算法的迭代过程;文献[9]提出了一种以最大信干噪比为准则的子载波算法,但是在CR-OFDM系统中,较高信噪比的子载波会对主用户造成更多的干扰;文献[10]提出了使用拉格朗日对偶法求解功率分配,可以获得最优解,但复杂度较高,对实时系统的硬件要求造成了较大压力。

本文考虑多用户CR-OFDM系统资源分配问题,提出了一种分步算法,基于最大允许传输速率给次用户分配子载波,再根据干扰约束和功率约束条件,采用基于改进线性注水算法的功率分配机制来最大化系统的总容量。通过仿真可知,本文所提算法可以在获得较好系统容量的同时,有效地降低系统的复杂度,适用于对实时性要求高的系统。

本文第2节描述了系统模型;第3节首先提出了本文的目标优化函数,然后介绍了子载波分配算法和改进的线性注水算法;第4节对所提算法进行了仿真,并对结果进行了分析;最后总结全文。

2 系统建模

本文采用OVERLAY频谱共享模型^[11]。在此模型下,主用户享受授权频谱优先使用权,而次用户则对授权频谱进行频谱感知,寻找未被主用户占用的频谱带,称作“频谱空洞”,伺机接入并使用。相对于UNDERLAY模型,OVERLAY模型可以很好地抑制对主用户的干扰。

考虑多用户的CR-OFDM系统的下行链路。其中认知网络中有 K 个次用户,其索引为 $\mathcal{K}=\{1,2,\dots,K\}$,同时主系统中有 L 个主用户,其索引为 $\mathcal{L}=\{1,2,\dots,L\}$ 。总的授权带宽设为 W ,被等分成 N 个OFDM子载波,其中第 n 个子载波的带宽范围为 $f_0+(n-1)B$ 到 f_0+nB , f_0 为起始频率, $B=W/N$ 为每个子载波的带宽。在实际系统中,由于并不能保证主用户也采用OFDM调制,因此主用户 l 的带宽范围为 f_l , f_l+nB_l , f_l 为主用户 l 的起始带宽, B_l 为第 l 个主用户占用的带宽。经过频谱感知,系统获得授权频带的占用信息,记未被主用户占用的子载波集合为 \mathcal{N} 。假设各信道状态信息(CSI)都可以被精确获取^[12-13]。

各OFDM子载波的基带功率谱密度(PSD)可表示为:

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

其中, T_s 为符号持续时间。

由占用在子载波 n 上的次用户对主用户 l 造成的干扰因子可以表示为:

$$F_{l,n}^{\text{SP}} = \int_{f_l-f_0-(n-0.5)B}^{f_l+B_l-f_0-(n-0.5)B} |g_{l,n}^{\text{SP}}|^2 \Phi(f) df \quad (2)$$

其中, $g_{l,n}^{\text{SP}}$ 表示从基站到主用户 l 接收机在子载波 n 上的功率增益。

类似地,主用户 l 在第 n 个子载波上对次用户 k 造成的干扰因子可以表示为:

$$F_{k,n,l}^{\text{PS}} = \int_{f_0+(n-1)B-f_l-B_l/2}^{f_0+nB-f_l-B_l/2} |g_{k,n}^{\text{PS}}|^2 \Phi_l(f) df \quad (3)$$

其中, $g_{k,n}^{\text{PS}}$ 表示从基站到次用户 k 接收机在子载波 n 上的功率增益; $\Phi_l(f)$ 表示主用户 l 信号的功率谱密度,例如若其通过椭圆滤波器,则 $\Phi_l(f)=[1+\epsilon_l^2 R_n^2(\xi_l, f/f_{0,l})]^{-1}$ ^[14],其中 n , ϵ_l , $f_{0,l}$ 为滤波器系数, $R_n(\cdot)$ 为 n 阶椭圆滤波器有理函数。

由香农公式可得,次用户 k 在子载波 n 上的最大传输速率为:

$$r_{k,n} = \log_2 \left(1 + \frac{p_{k,n} |g_{k,n}^{\text{BS}}|^2}{\Gamma(N_0 B + \sum_{l=1}^L F_{k,l,n}^{\text{PS}})} \right) \quad (4)$$

其中, $p_{k,n}$ 表示次用户 k 在占用子载波 n 上分配的功率; N_0 表示加性高斯白噪声的功率谱密度; Γ 表示信噪比差额,对于未编码的MQAM调制, $\Gamma = -\ln(5\text{BER})/1.5$ ^[15]。子载波 n 上收到主用户总的干扰被表示为 $\sum_{l=1}^L F_{k,l,n}^{\text{PS}}$,即被作为次用户 k 接收机所测量到的噪声。简便起见,将次用户 k 在子载波 n 上的信噪比(SNR)表示为:

$$H_{k,n} = \frac{|g_{k,n}^{\text{BS}}|^2}{\Gamma(N_0 B + \sum_{l=1}^L F_{k,l,n}^{\text{PS}})} \quad (5)$$

则次用户 k 的传输速率为:

$$R_k = \sum_{n \in \mathcal{N}} \rho_{k,n} \log_2 (1 + p_{k,n} H_{k,n}) \quad (6)$$

其中, $\rho_{k,n}$ 取值 $\{0,1\}$, $\rho_{k,n}=1$ 表示次用户 k 占用子载波 n , $\rho_{k,n}=0$ 则表示未占用,每个子载波只能被一个次用户所占用。

第 k 个次用户的传输功率为:

$$P_k = \sum_{n \in \mathcal{N}} \rho_{k,n} p_{k,n} \quad (7)$$

3 目标函数和分步式算法

本文的优化目标为,在传输功率额定值和主用户的抗干扰阈值约束下,最大化CR-OFDM的系统容量。因此,目标函数为:

$$\begin{aligned} \max_{\rho_{k,n}, p_{k,n}} & B \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \mathcal{N}} \rho_{k,n} r_{k,n} \\ \text{s. t. } & \text{C1: } p_{k,n} \geq 0, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{C2: } \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \mathcal{N}} p_{k,n} \leq P_T$$

$$\text{C3: } \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \mathcal{N}} \rho_{k,n} p_{k,n} F_{k,n}^{\text{SP}} \leq I_{th,l}, \forall l \in \mathcal{L}$$

$$\text{C4: } \rho_{k,n} \in \{0,1\}, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N}$$

$$\text{C5: } \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} = 1, \forall n \in \mathcal{N}$$

其中, P_T 为传输功率限额, $I_{th,l}$ 为第 l 个主用户的抗干扰阈值。C1和C2表示功率条件约束,C3表示主用户的干扰条件约束,C4和C5表示每个子载波只能被一个从用户占用。

式(8)给出的目标函数同时包含连续性变量 $p_{k,n}$ 和整数型变量 $\rho_{k,n}$,因此这是一个含约束条件的混合整数型优化难题,求解这类问题将会非常复杂。本文提出了一种二分步算法,即先进行子载波分配,当子载波分配完成后,再进行功率分配,这样可以显著地降低求解复杂度。

3.1 子载波分配

显然,子载波分配可以通过遍历搜索求得,但是实际CR-OFDM系统中子载波数量一般比较大,使用遍历搜索算法将是不切实际的。文献[9]提出了一种子载波算法,即在额定功

率下以最大信噪比为准则依次分配子载波给用户,以获得最大的传输速率。但是在基于 OFDM 的认知无线电系统中,拥有较高信噪比的子载波在获得较高速率的同时也会不可避免地为主用户造成干扰,这明显是不合理的。因此,本文联合考虑了额定传输功率约束和主用户抗干扰阈值约束,提出了一种子载波分配方法。

假设经过频谱感知,获得未被主用户占用的子载波集合 \mathcal{N} ,在额定功率约束和主用户抗干扰约束下,次用户 k 在子载波 n 上的最大分配功率为:

$$p_{k,n}^{\text{MAX}} = \min(P_T, \min_{l \in \mathcal{L}} \left(\frac{I_{th_l}}{F_{l,n}^{\text{SP}}} \right)), n \in \mathcal{N} \quad (9)$$

式(9)表明子载波 n 上所能分配的最大功率是受到系统额定功率 P_T 和主用户干扰共同约束的。因此,次用户 k 在子载波 n 上的最大传输速率为:

$$r_{k,n}^{\text{MAX}} = \log_2(1 + p_{k,n}^{\text{MAX}} H_{k,n}), n \in \mathcal{N} \quad (10)$$

本文提出的子载波分配算法遵循公平原则,尽可能满足次用户间相对平均的传输速度。首先,从未被主用户占用的子载波中找出最大可能传输速率的 K 个子载波,将其依次分配给次用户 k 。然后基于公平原则,在 K 个次用户中获得最差可能传输速率的次用户,将给予其优先权并选择剩下的最大可能传输速率的子载波。依次类推,直到所有未被主用户占用的子载波都分配完毕为止。此子载波分配方案相对公平,在功率分配算法完成后,可以尽可能增大系统的总容量。

3.2 功率分配

当子载波分配完成之后,系统的优化目标函数简化为:

$$\max_{p_{k,n}} B \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} r_{k,n} \quad (11)$$

$$\text{s. t. C1: } p_{k,n} \geq 0, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N}$$

$$\text{C2: } \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \mathcal{N}} p_{k,n} \leq P_T$$

$$\text{C3: } \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \mathcal{N}} p_{k,n} F_{k,n}^{\text{SP}} \leq I_{th_l}, \forall l \in \mathcal{L}$$

其中, Ω_k 为次用户 k 所分配到的子载波集合。注意到, $r_{k,n}$ 是 $p_{k,n}$ 的单变量函数,式(11)本质上是一个最优功率分配问题。为解决该问题,文献[10]提出了使用拉格朗日对偶法来求出最优解,但其复杂度为 $O(N^2 \log_2 N)$,相对较高。CR-OFDM 系统的功率分配问题与传统的 OFDM 系统功率分配问题在某种程度上是相似的。文献[8]提出了一种线性注水算法来解决 OFDM 系统功率分配问题,相对传统迭代注水算法,其可以有效降低运算复杂度,但是由于传统 OFDM 系统中没有主从用户关系,不需要考虑主从用户的相互干扰,因此 CR-OFDM 的功率分配变得更为复杂。本文从文献[8]中得到启发,提出了一种改进的线性注水算法。

将文献[8]中的基于额定功率约束的线性注水算法称为 PLWF 算法。下面推导基于主用户抗干扰阈值的线性注水算法,称其为 ILWF 算法。为简化计算,假设 $L=1$,令:

$$H_{k,n}^{\Delta} = \frac{|g_{k,n}^{\text{RS}}|^2}{\Gamma(N_0 B + \sum_{l=1}^L F_{k,l,n}^{\text{PS}})} \cdot \frac{1}{F_{k,n}^{\text{SP}}} \quad (12)$$

则基于干扰约束的优化目标函数转化为:

$$\max_{p_{k,n}} B \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \log_2(1 + H_{k,n}^{\Delta} \cdot I_{k,n}) \quad (13)$$

$$\text{s. t. C1: } p_{k,n} \geq 0, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N}$$

$$\text{C2: } \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \mathcal{N}} I_{k,n} \leq I_{th}$$

其中, $I_{k,n} = p_{k,n} \cdot F_{k,n}^{\text{SP}}$ 。利用拉格朗日算法,构造拉格朗日函数:

$$L = B \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \log_2(1 + H_{k,n}^{\Delta} \cdot I_{k,n}) - \lambda \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} I_{k,n} - I_{th} \right) \quad (14)$$

$$\text{令 } \frac{\partial L}{\partial I_{k,n}} = 0, \text{ 则有:}$$

$$\frac{\lambda \ln 2}{B} = \frac{H_{k,n}^{\Delta}}{1 + H_{k,n}^{\Delta} I_{k,n}} \quad (15)$$

由式(15)可以推出 $\frac{H_{k,n}^{\Delta}}{1 + H_{k,n}^{\Delta} I_{k,n}} = \frac{H_{k',n'}^{\Delta}}{1 + H_{k',n'}^{\Delta} I_{k',n'}}$,其中 $k, k' \in \{1, 2, \dots, K\}, n, n' \in \{1, 2, \dots, N\}$,则有:

$$I_{k,n} = I_{k',n'} + \frac{1}{H_{k',n'}^{\Delta}} - \frac{1}{H_{k,n}^{\Delta}} \quad (16)$$

由式(16)可以看出,只需任意 $I_{k',n'}$ 确定,所有的 $I_{k,n}$ 便可确定。此时所有子载波对主用户的干扰为:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} I_{k,n} = \mathcal{N} \left(I_{k',n'} + \frac{1}{H_{k',n'}^{\Delta}} \right) - \sum_{n \in \mathcal{N}} \frac{1}{H_{k,n}^{\Delta}} \quad (17)$$

由约束条件 C2 得:

$$I_{k',n'} \leq \frac{1}{\mathcal{N}} \left(I_{th} - \frac{\mathcal{N}}{H_{k',n'}^{\Delta}} + \sum_{n \in \mathcal{N}} \frac{1}{H_{k,n}^{\Delta}} \right) \quad (18)$$

由式(18)可以得到各子载波上可产生的最大干扰,但是此时的干扰值不一定满足约束条件 C1,即干扰必须大于 0。

如果 $I_{k',n'} \leq 0$,则取 $I_{k',n'} = 0$,并将此子载波的 H^{Δ} 从 $\sum_{n \in \mathcal{N}} \frac{1}{H_{k,n}^{\Delta}}$

中剔除,用 $\sum_{n \in \mathcal{N}} \frac{1}{H_{k,n}^{\Delta}} - \frac{1}{H_{k',n'}^{\Delta}}$ 代替。为了简化,假设 $H_{k',1}^{\Delta} \leq H_{k',2}^{\Delta} \leq \dots \leq H_{k',N}^{\Delta}$,则 $I_{k',1} \leq I_{k',2} \leq \dots \leq I_{k',N}$ 。根据式(18)则有:

$$I_{k',1} = \frac{1}{\mathcal{N}} \left(I_{th} - \frac{\mathcal{N}}{H_{k',1}^{\Delta}} + \sum_{n \in \mathcal{N}} \frac{1}{H_{k,n}^{\Delta}} \right) \quad (19)$$

如果 $I_{k',1} \leq 0$,则令 $I_{k',1} = 0$,并将其子载波序号从 \mathcal{N} 中剔除。依次计算各子载波对主用户的干扰,直到第一个 $I_{k,n} \geq 0$,根据式(19)依次计算出其他各子载波对主用户造成的干扰值。然后通过公式 $p_{k,n} = I_{k,n} / F_{k,n}$ 便可求得分配在子载波 k 上的功率值。

在 ILWF 算法和 PLWF 算法的基础上,本文提出了两种联合求解功率分配的方案,如表 1 所列,令系统容量相对较大的一组功率分配方案作为最终的 $P_{k,n}^{\text{opt}}$ 。

结合方案 1 和方案 2,CR-OFDM 系统的最大系统容量为:

$$R^{\text{MAX}} = \max \left(\max_{P_1^{\text{MAX}}} B \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} r_{k,n}, \max_{P_2^{\text{MAX}}} B \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} r_{k,n} \right) \quad (20)$$

方案 1 的思想是通过不断的迭代,使次用户功率在达到额定功率门限的同时,保证干扰阈值约束下尽可能地分配,从而最大化系统的容量。方案 2 则相反,次用户在达到干扰阈值门限的同时,保证功率在额定功率下得到尽可能的分配,从而最大化系统的容量。结合方案 1 和方案 2,此算法可以不考虑干扰约束和功率约束条件的强弱,最大程度地增大系统容量。

表 1 两种联合求解功率分配方案

方案 1	方案 2
1. 用 PLWF 算法求出 $P_{k,n}^{PLWF}$	1. 用 ILWF 算法求出 $P_{k,n}^{ILWF}$
2. 令 $P_1^{MAX} = P_{k,n}^{PLWF}$	2. 令 $P_2^{MAX} = P_{k,n}^{ILWF}$
3. if ($\sum P_1^{MAX} F_{k,n}^{SP} \leq I_{th}$), return P_1^{MAX}	3. if ($\sum P_2^{MAX} \leq P_T$), return P_2^{MAX}
4. else 用 ILWF 算法求出 $P_{k,n}^{ILWF}$	4. else 用 PLWF 算法求出 $P_{k,n}^{PLWF}$
5. Find $A \subset \mathcal{N}$, 使 $P_{k,n}^{PLWF} > P_1^{MAX}, n \in A$	5. Find $B \subset \mathcal{N}$, 使 $P_{k,n}^{PLWF} > P_2^{MAX}, n \in B$
6. 令 $P_{k,n}^{ILWF} = P_1^{MAX}, n \in A$	6. 令 $P_{k,n}^{PLWF} = P_2^{MAX}, n \in B$
7. $P_{left} = P_T - \sum P_{k,n}^{ILWF}$	7. $I_{left} = I_{th} - \sum P_{k,n}^{PLWF} \cdot F_{k,n}^{SP}$
8. end if	8. end if
9. if ($P_{left} = 0$ 或 $A = \emptyset$), return P_1^{MAX}	9. if ($I_{left} = 0$ 或 $B = \emptyset$), return P_2^{MAX}
10 else 更新 A 中的子载波功率分配	10 else 更新 B 中的子载波功率分配
11. $P_T^\Delta = P_{left} + \sum P_{k,n}^{ILWF}$	11. $I_{th}^\Delta = I_{left} + \sum P_{k,n}^{PLWF} \cdot F_{k,n}^{SP}$
12. 利用 PLWF 算法求出在 P_T^Δ 约束下的功率分配	12. 利用 ILWF 算法求出在 I_{th}^Δ 约束下的功率分配
13. 更新 P_1^{MAX} , 转步骤 2	13. 更新 P_2^{MAX} , 转步骤 2
14. end if	14. end if

4 仿真分析

本节通过仿真对比系统总容量的变化来评估各类资源分配算法的性能。考虑一个 CR-OFDM 系统,其中主用户数 $L=1$,次用户数 $K=4$,总的授权带宽 $W=10\text{MHz}$,且被划分成的 OFDM 子载波数 $N=32$,其中主用户占用的带宽 $B_l=1.2\text{MHz}$,主用户的抗干扰阈值 $I_{th_l}=5 \times 10^{-5}\text{W}$,噪声功率 $N_0=10^{-6}\text{W}$,符号持续时间 $T_s=10^{-6}\text{s}$ 。假设信道为瑞利衰落,并伴随着对数方差为 10dB 的阴影衰落。由于在不同环境下信道增益是不同的,因此本文的系统容量取值于 1000 次独立仿真下的平均值。

在图 1 中,系统容量作为子载波数 N 的函数,对比了子载波分配算法的优劣,其中子载波分配算法分别采用了文献[9]中的基于信干噪比优先准则和本文提出的基于最大允许传输速率准则,功率分配都采用本文所提出的分配算法。此时总的授权带宽仍为 $W=10\text{MHz}$,额定传输功率设置为 $P_T=0.1\text{W}$,子载波数 N 以 8,16,32,64,128 依次变化。从图 1 中可以看出,随着子载波数 N 的增加,系统总容量增大,这是由于无线通信系统中的信道多样化效应所致,即子载波数越多,次用户可能被分到更多信道状态较好的子载波中,从而使最大系统容量得到提升。从图 1 中可以看出,本文提出的子载波分配算法明显优于文献[9]中提出的算法。

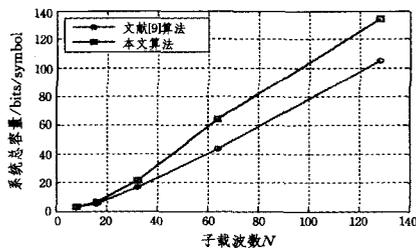


图 1 系统总容量 vs. 子载波数

图 2 和图 3 对比了功率分配算法的优劣,其中子载波分配采用本文所提出的算法。从图 2 中可以看出,CR-OFDM 系统可获得的总容量以额定传输功率为变量来描绘。可以注意到,在一个给定的传输总功率约束下,文献[10]中的拉格朗

日对偶算法可以获得最高的系统容量,本文提出的算法略低于拉格朗日算法,但是高于文献[16]中提出的通用平均分配功率算法。这是因为,在拉格朗日对偶算法中,功率分配可以同时确保功率约束和干扰约束被分配完成,而本文所提算法只能担保功率约束或者干扰约束其中一个在其阈值之下,因此性能会稍有降低,但是复杂度却因此得到降低。文献[16]提出的通用平均分配功率算法虽然可以保证最大化的干扰阈值,但是获得平均功率分配的次用户却不能获得额定功率下尽可能多的功率,因此平均分配功率算法表现得相对最差。

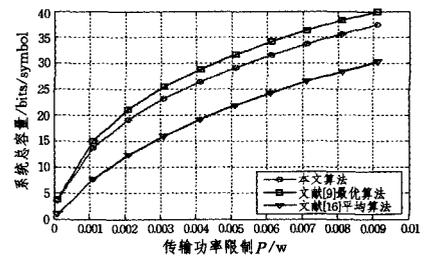


图 2 系统总容量 vs. 传输功率

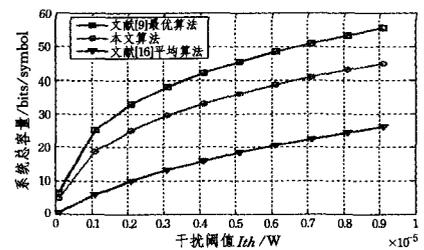


图 3 系统总容量 vs. 干扰阈值

图 3 描绘了系统总容量关于干扰阈值的函数,额定传输功率设置为 $P_T=0.1\text{W}$,与图 2 中得出的结论相对应,本文所提算法所获得的系统容量略低于文献[10]中的拉格朗日对偶算法,但高于通用算法。

与传统迭代注水算法不同,文献[8]中提出的线性注水算法的复杂度为 $O(N)$;本文基于文献[8]提出的改进算法的计算复杂度为 $O(kN)$, k 为算法迭代次数,在实际运算中, $k \in N$ 。因此,相比于拉格朗日对偶法的复杂度 $O(N^2 \log_2 N)$,此算法更适用于对实时性要求高的系统。

结束语 本文研究了CR-OFDM的认知无线电资源分配问题,采用先分配子载波再分配子载波功率的分步式方式。为降低算法的复杂度,通过对已有的线性注水算法进行研究,提出了改进的线性注水算法来求解功率和干扰双重约束问题。仿真结果表明,本文提出的算法可以逼近最优功率分配算法,大于传统功率分配算法所能获得的系统容量,并且算法复杂度小,可作为CR-OFDM资源分配中的一种次优算法。

参考文献

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio; brain-empowered wireless communications[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun, 2005, 23(2): 201-220.
- [2] WEISS T, JONDRAL F K. Spectrum pooling; an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency[J]. IEEE Commun. Mag, 2004, 43(3): S8-S14.
- [3] WEISS T, HILLENBRAND J, KROHN A, et al. Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems[J]. Proc. IEEE Vehicular Technol. Conf. (VTC'04 Spring), 2004, 4(4): 1873-1877.
- [4] WANG S, HUANG F, et al. Fast power allocation algorithm for cognitive radio networks[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(8): 845-847.
- [5] BANSAL G, HOSSAIN M, BHARGAVA V. Optimal and sub-optimal power allocation schemes for OFDM-based cognitive radio systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(11): 4710-4718.
- [6] TANG L, WANG H, CHEN Q, et al. Subcarrier and power allocation for OFDM-based cognitive radio networks[C]//IEEE International Conference on Communication and Technology and Applications. IEEE, 2009: 457-461.
- [7] XU L, LV T M, LI Q M, et al. Proportional Fair Resource Allocation Based on Chance-Constrained Programming for Cognitive OFDM Network[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 79(2): 1591-1607.
- [8] ZHANG D M, XU Y Y, CAI Y M. Linear water filling power allocation algorithm in OFDMA system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(6): 1286-1289. (in Chinese)
张冬梅, 徐友云, 蔡跃明. OFDMA系统中线性注水功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1286-1289.
- [9] WU J, YANG L X, LIU X. Subcarrier and Power allocation in OFDM Based Cognitive Radio Systems[C]//International Conference on Intelligent Computation Technology & Automation. 2011: 728-731.
- [10] YAN S C, REN P Y, LV F S. Power allocation algorithms for OFDM-based cognitive radio system[C]//Proc. WiCOM 2010. 2010: 1-4.
- [11] ZHAO Q, SADLER B M. A Survey of Dynamic Spectrum Access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [12] ALMALFOUH S M, STUBER G L. Interference-aware radio resource allocation in OFDMA-based cognitive radio networks[J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2011, 60(4): 1699-1713.
- [13] LI W, ZHANG Y, SO A, et al. Slow adaptive OFDMA systems through chance constrained programming[J]. IEEE Trans. Signal Process., 2010, 58(7): 3858-3869.
- [14] DANIELS R. Approximation methods for electronic filter design[M]. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [15] GOLDSMITH A, CHUA S. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(10): 1218-1230.
- [16] BANSAL G, HOSSAIN M J, BHARGAVA V K. Adaptive Power Loading for OFDM-Based Cognitive Radio Systems with Statistical Interference Constraint[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(9): 2786-2791.
- (上接第19页)
- [3] LIN M, YU Z Y, ZHANG D, ZHU Y M, et al. Retargeting the Open64 Compiler to PowerPC Processor[C]//Proceedings of Embedded Software and Systems Symposia, 2008. San Francisco: IEEE Computer Society Press, 2008: 152-157.
- [4] ALLEN R, KENNEDY K. Optimizing Compilers for Modern Architectures[M]. California: Morgan Kaufmann Publisher, 2005.
- [5] RADHIKA D. Venkatasubramanyam. Array Access Analysis in Open64[D]. Houston: University of Houston, 2004.
- [6] ZHAO Q, BRUENING D, AMARASINGHE S. Umbra: efficient and scalable memory shadowing[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Code Generation and Optimization (CGO). 2010: 22-31.
- [7] NETHERCOTE N, SEWARD J. How to shadow every byte of memory used by a program[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Virtual Execution Environments (VEE). 2007: 65-74.
- [8] BERLIN D, EDELSON D. High-level loop optimizations for GCC[C]//Proceedings of the Gcc Developers Summit. 2004: 37-54.
- [9] ZENG Y L, YANG C Q, HUANG C. Analysis and Improvement of the GCC 4.1 Data Dependence Analyzer[J]. Computer Engineering & Science, 2006, 28(10): 104-106. (in Chinese)
曾利永, 杨灿群, 黄春. GCC 4.1 数据依赖分析器的分析与改进[J]. 计算机工程与科学, 2006, 28(10): 104-106.
- [10] ZHANG Q S, LI Y, FAN Z D, et al. Automatic Parallelization for Loops Carried Data Dependence Between Iterations[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014(6): 1293-1297. (in Chinese)
张琼声, 李莹, 范志东, 等. 含有跨迭代数据依赖关系循环的自动并行化[J]. 小型微型计算机系统, 2014(6): 1293-1297.
- [11] KUMAR S S, CHAHAR A, VAN LEUKEN R. Cit: A GCC Plugin for the Analysis and Characterization of Data Dependencies in Parallel Programs[J/OL]. http://cas.et.tudelft.nl/pubs/kumar_DCIS_2013.pdf.