

基于能效的认知无线电频谱接入算法

陈明

(西南大学数学与统计学院 重庆 400715) (遵义师范学院数学与计算科学学院 遵义 563002)

摘要 认知无线电(CR)技术和能效(EF)通信设计这两种技术已经使得系统分别达到较高的频谱效率(SE)和能源利用效率(EE)。然而在认知无线电系统中,既要保持较高的频谱效率,又要使得能源利用效率相对较高的问题,始终少有研究。针对此问题,在正交频分复用(OFDM)认知无线网络的基础上考虑平均能效和频谱效率折中的频谱接入方案,提出了一种低复杂度的次优启发式算法。仿真结果表明,所提算法相对于其他已有算法能够显著节约能量,并且在性能和复杂度方面具有较大优势。

关键词 认知无线电,能效,频谱接入,正交频分复用

中图分类号 TN929.53 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.07.038

Cognitive Radio Spectrum Access Energy Efficiency Algorithm

CHEN Ming

(School of Mathematics and Statistics, Southwestern University, Chongqing 400715, China)

(Department of Mathematics, Zunyi Normal College, Zunyi 563002, China)

Abstract Cognitive radio technology and energy efficiency communication design have made system to respectively achieve high spectrum efficiency (SE) and energy efficiency (EE). However in the cognitive radio system, there is little research about not only keeping high spectrum efficiency, but also making the relatively high energy efficiency. Aiming at this problem, based on the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) cognitive radio network, considering the average energy efficiency and spectrum access scheme in spectrum efficiency to fold, this paper proposed a low complexity suboptimal heuristic algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm can significantly save energy compared with other existing algorithms, and has a larger advantage in terms of performance and complexity.

Keywords Cognitive radio, Energy efficiency, Spectrum access, OFDM

由于频谱资源的短缺,认知无线电技术应运而生,认知无线电技术可以机会地接入次用户,使得次用户可以利用授权的频谱进行通信,当然是在保证对主用户的干扰不超过一定的界限[1]。次用户如何进行频谱接入,即频谱接入问题成为认知无线电实用化的关键问题,同时也成为研究的热点问题。许多关于次用户频谱接入的标准和方案被相继提出,其优化的目标函数不同,包括干扰、功率、吞吐量、时延等[2]。

近年来,基于能效的通信传输机制也是研究的热点问题,无疑基于能效的认知无线电系统的频谱接入问题成为实际应用的的首要问题。OFDM在无线通信系统中广泛应用,如WiMAX、LTE和LTE-A[3]。OFDM的多接入技术能够动态地分配子载波、高效地利用频谱,然而其子信道的信道状态是随机的,所以次用户接入的子信道也是随机的。相关的研究有基于OFDM的认知无线网络中能效的序列检测。在上行的OFDMA系统中,存在基于能效的频谱接入机制优化的研究,其优化的目标函数是最大化最小能量利用率。然而这些工作均是在次用户为一个的场景下进行推导的,在多个次用户存在的认知无线电OFDM系统中,能效和频谱利用率之间的折中问题以及多目标优化的频谱接入问题的研究较

少。

从以往的基于能效的研究中可以看出,其优化的能效一般分为两类:优化最差能效和优化平均能效。从系统论的角度来看,优化最差能效只能保证整个系统的一个用户或者几个用户的能效利用率的提高,而优化平均能效可以对系统中的所有用户进行综合的考虑,故本文采用优化平均能效这个优化指标。

在OFDM的认知无线电的分配资源研究中,文献[4]主要研究的是子载波的分配方案,而文献[5]主要集中在功率分配方面的研究,文献[6]提出了子载波和功率的联合分配方案,而文献[7]在多天线的认知无线电系统中提出了去除干扰的波束成形算法,文献[8]从最差能效的优化角度首次提出了频谱接入策略,这也是本文主要对比的对象。本文继续沿着绿色通信认知无线网络构建的思路,对OFDM的认知无线电系统的频谱接入策略进行了深入的计算和优化,提出了优化平均能耗的频谱接入策略。

本文首先描述系统的模型,以及其相关的数学模型;在此基础上给出对应此模型的能源效率的定义,并建立优化问题;根据优化问题求解并建立频谱接入的机制;最后仿真验证本

到稿日期:2013-07-28 返修日期:2013-11-20 本文受贵州省科学技术基金项目(黔科合J字LKZS[2012]12号),遵义师范学院科研基金资助项目(11ZYJ020)资助。

陈明(1961-),男,副教授,主要研究方向为随机过程理论,E-mail:2272930612@qq.com。

文所提方案的优势。其中在优化问题的求解中,优化问题为非凸优化问题,需要对优化问题进行转化。

1 系统模型

类似文献[9]考虑基于 OFDM 的认知无线电系统,其主用户也是以 OFDM 为调制方式的认知无线网络。设有 K 个次用户,定义所有的次用户集为 $\{1, 2, \dots, K\}$,将总的可用带宽分为各个子载波,每个子载波之间是不重叠的,每个子载波的带宽为 W 。为了保护主用户,次用户接入时必须保证主用户没有占用这个子载波信道。可以采用频谱感知的方法去检测子载波信道是否被主用户占用。设一共有 N 个子载波信道,每个子载波信道可以标号为 $\{1, 2, \dots, N\}$ 。

为了避免次用户间的干扰,本文所建立的频谱接入机制均是每个子载波在同一时间只能由一个次用户所占用。然而,每个次用户可以同时占用多个子载波信道。定义 $\mu_{i,k} \in \{1, 0\}$ 为子载波信道分配的指数,当其为 1 时,表示子载波信道被占用,为 0 时,表示子信道没有被占用。可以定义分配信道其实就是定义分配子载波信道的指数,其应该满足

$$\mu \in \mu \triangleq \{(\mu_{i,k})_{i,k=1}^{N,K} \mid \sum_{k \in K} \mu_{i,k} \leq 1, \forall i \in N; \mu_{i,k} \in \{1, 0\}, \forall i \in N\} \quad (1)$$

对于式(1)也有另一个等价形式:

$$\bigcup_{k=1}^K S_k \subseteq N \text{ 并且 } S_i \cap S_{k'} = \emptyset, k \neq k' \quad (2)$$

其中, S_k 是分配给次用户 k 的子信道的集合。

次用户 k 在子信道 i 发送的功率为 $p_{i,k}$ 。根据其物理意义, $p_{i,k} > 0$ 。则在次用户 k 需要发送的功率为

$$p_k = \sum_{i \in S_k} p_{i,k} \quad (3)$$

其中,发送功率不能超过最大的发送功率 p_{\max} 。

在频谱监测中误检测概率和虚警概率的存在会造成对主用户的干扰,但干扰只要不超过一定的门限,是可以接受的。其数学表示为

$$\sum_{k \in K} p_{i,k} h_k \leq I_{th} \quad (4)$$

其中, h_k 是从次用户 k 到主用户接收端的信道平均的功率衰减系数增益。 I_{th} 是平均最大可以容忍的干扰值,即干扰门限。根据式(4)可以定义参量 θ_k ,则可以看出发送的功率必须满足以下条件,才不会对主用户接收端产生影响。

$$p_{i,k} \leq \frac{I_{th}}{h_k} \triangleq \xi_k \quad (5)$$

对于任意可能的功率分配方案,可以定义矩阵形式为

$$P \in P \triangleq \{(p_{i,k})_{i,k=1}^{N,K} \mid [p_{1,k}, \dots, p_{N,k}]^T, \sum_{k \in K} p_{i,k} h_k \leq I_{th}\} \quad (6)$$

则每个次用户 k 在子载波信道 n 上的平均传输速率可以根据香农公式求得

$$R_{n,k} = \mu_{n,k} W \log_2(1 + p_{n,k} \beta_{n,k}) \quad (7)$$

其中,按照 $1-q$ 的误检测概率计算,并且 $\beta_{n,k} \triangleq \frac{h_{n,k}}{\sigma^2}$, $h_{n,k} > 0$ 是接收的信道增益与噪声的比值和次用户 k 在信道 n 上的增益。可以得到用户 k 的平均传输速率为

$$R_k = \sum_{n=1}^N R_{n,k} \quad (8)$$

对于能量效率,根据以往文献的定义,可以定义次用户 k 的能量效率为

$$\psi(\mu_k, p_k) \triangleq \frac{R_k}{p_c + \rho p_k} = \frac{\sum_{n \in N} q W \mu_{n,k} \log_2(1 + p_{n,k} \beta_{n,k})}{p_c + \rho \sum_{n \in N} p_{n,k}} \quad (9)$$

其中, p_c 是次用户发送端电路本身消耗的能量, $1/\rho$ 代表次用户发送端功率放大效率。在一些应用的场景中,考虑到能效和性能的关系,可以考虑加权的能效,它可表示为

$$\psi(\mu_k, p_k) = \min_{k \in K} w_k \psi_k(\mu_k, p_k) \quad (10)$$

其中, w_k 为加权系数。所以,可以优化加权系数和功率分配矩阵,得到不同优化标准的最优解。

2 基于平均能效的频谱接入算法

根据系统模型的方法,能够确定优化问题可以总结为

$$(\mu_0, p_0) \triangleq \arg \max_{\mu, p} \psi(\mu_k, p_k) \quad (11)$$

其中, μ_0 和 p_0 为最优的子载波信道的功率分配与子载波分配矩阵和最优的平均能效矩阵。

为了解决式(11)的优化问题,可以将其转化为凸优化问题。为建立等价的关系,本文定义两组变量向量,分别为 $\alpha \triangleq [\alpha_1, \dots, \alpha_K]^T$, $\varphi \triangleq [\varphi_1, \dots, \varphi_K]^T$, 根据空间的定义,可以定义 K 为子空间。

$$D \triangleq M_1^{(D)} \times M_2^{(D)} \times \dots \times M_K^{(D)} = \{(\alpha, \varphi) \mid (\alpha_k, \varphi_k) \in M_k^{(D)}\} \quad (12)$$

并且定义每个变量的取值范围,使得其在特定的区域,这个区域为

$$M_k^{(D)} \triangleq \{(a_k, \varphi_k) \mid 0 \leq a_k \leq p_k^{\max}, 0 \leq \varphi_k \leq r_k^{\max}\} \quad (13)$$

其中, $r_k^{\max} \triangleq \max_{p_k \in P_{k,n=1}^N} q W \log_2(1 + p_{n,k} \beta_{n,k})$ 。

根据以上的定义,可以将优化问题转化为以下问题:

$$(\lambda_0, \mu_0, p_0, \alpha_0) = \arg \max_{\lambda, \mu, p, \alpha} \sum_{k=1}^K \frac{w_k \mu_k}{p_c + \rho \alpha_k} \quad (14)$$

$$\text{当 } \sum_{n=1}^N q W w_k \log_2(1 + \frac{p_{n,k} \beta_{n,k}}{\varphi_{n,k}}) \geq \psi_k \quad (15)$$

$$p \in P, (\alpha, \varphi) \in D \quad (16)$$

根据以上的优化问题的转化,可以得到最优解的处理过程为:

第 1 步 初始化每个次用户的子载波信道分配集和能效矩阵,将其初始化为空集或者置零。

第 2 步 对于每个次用户 k 去寻找最优的子载波信道分配方案;计算最大的加权能效问题,分配给其最优的子载波信道,并将其分配集中的相应因素置 1。

第 3 步 重复第 2 步,直到所有的子载波分配给相应的次用户,从而得到相应的子载波分配集和功率分配矩阵。

具体实施步骤为:

步骤 1(边界处理) 对于每个残存的分支,如果问题(13)对于这个分支是可行的,那么通过解决问题(13)计算上边界和下边界,通过合成算法得到参数的初始化值。否则,标记这个分支是不可行的。标记最初的残存分支是 $D^{(0)}$ 。

步骤 2(修剪处理) 删除不可行的分支和那些上边界比所有分支中最低的边界还小的分支。

步骤 3(分支处理) 在附加的能量中,根据分支处理策略再把每个残支(e. g., D)细分为两个分支。

步骤 4 重复步骤 1)–3)直到收敛或者满足停止条件。输出合成的子信道和功率分配矩阵 $\Phi_0^{(D^{(0)})}$ 和 $P_0^{(D^{(0)})}$,把它作为解决这个问题的近似最佳方法(对于上边界)。

步骤 5 把子信道分配矩阵 $\Phi_0^{(D^{(0)})}$ 修成一个可行的方案。重新计算每个用户的传输功率矢量,从而最大化它们各

自的能量效率。

虽然最优方案能够得到最优的能效和性能的折中,但是因其为穷搜法,其计算复杂度会非常大,从而在实际中不会被应用。故需要降低计算复杂度,相应地得到次优的算法。

对于给定的次用户子载波信道分配的集合为 μ , 其平均能量效率为

$$\psi(\mu_k, p_k) = \psi_k(\mu_k, p_k) \quad (17)$$

其是一个半凸优化问题,从而存在最优解,其平均能源效率的最大化等于每个独立的最大化的能源效率的加权和,即

$$\psi(\mu_k, p_k) = \frac{\sum_{n \in N} q W \mu_{n,k} \log_2(1 + p_{n,k} \beta_{n,k})}{p_c + \max_{n \in N} p_{n,k}} \quad (18)$$

根据以上的理论,经过迭代算法,直到所有的子载波信道分配给不同的所有的次用户。每次给最大的能效的次用户分配信道增益的子载波信道(未分配的信道)。其迭代方法如下:

第 1 步 初始化每个次用户的子载波信道分配集和能效矩阵。

第 2 步 按照式(18)计算相关的次用户的能源效率,找到最大的能源效率的次用户,然后分配信道增益最大的信道。

第 3 步 重复第 2 步的步骤,直到分配完所有的子载波信道。最后得到相关的功率分配矩阵和子载波分配矩阵。

具体实施步骤为:

步骤 1 分别对每一个 SU 初始化子信道集和能效使其成为空集和零, i. e., $S_k \leftarrow \emptyset$ 和 $\epsilon_k \leftarrow 0, \forall k \in \kappa$ 。设置初始的未赋值的子信道集作为所有可用的子信道集,即 $N_w \leftarrow N$ 。

步骤 2 对于每一个 SU, $k \in \kappa$, 在所有未赋值的子信道中找到最适合它的子信道,即 $n_k^* \leftarrow \arg \max_{n \in N_w} \gamma_{n,k}$, 同时在约束条件(3)和增加子信道 n_k^* 下计算出它的最大权重能效,对于拥有最大权重能效增量的 SU, i. e., $SU k^* \leftarrow \arg \max_{k \in \kappa} (\omega_k \epsilon_{k,o}^{(S_k \cup \{n_k^*\})} - \epsilon_k)$, 更新它的能效和分配最适合它的子信道,即 $\epsilon_k^* \leftarrow \omega_k \epsilon_{k,o}^{(S_k^* \cup \{n_k^*\})}$ 和 $S_{K^*} \leftarrow S_{K^*} \cup \{n_k^*\}$ 。从没有赋值的子信道集移除子信道 n_k^* , 即 $N_w \leftarrow N_w \setminus \{n_k^*\}$ 。

步骤 3 重复步骤 2)直到所有的子信道都被赋值, i. e., $N_w = \emptyset$ 。然后输出合成的子信道集和功率分配矩阵,即 $\{S_k\}$ 和 P , 作为次优的解决方案。

通过对比可以发现次优算法大大减少了计算复杂度,其复杂度如表 1 所列。

表 1 复杂度对比	
最优解	$O(NK^3)$
次优解	$O(NK)$

3 仿真结果

本部分,主要通过仿真来验证所提算法在能效方面和性能方面的优势,在仿真场景的设置方面,采用每个相邻的子载波的间隔频率为 15kHz。对于每一个次用户,设其发送最大功率为 100mW,电路功率为 50mW,并且功率放大电路的效率为 45%。假设所有次用户到主用户之间的信道均服从独立的瑞利衰落,其干扰门限在 10mW,其误检测率为 5%。为了比较方便,所有的方案仿真均建立在以上条件下,并且其子载波信道的数量为 256,次用户数量为 8 个。在仿真中,主要考虑本方案和已有方案的对比,以及本方案中最优算法和次

优算法的对比。为了方便对比,在仿真图中,对于所提方案,采用“所提方案-最优”和“所提方案-次优”为标识,主要对比的已有方案的优化最差能源效率^[10],记为“优化最差能效”。

在第一个场景中,考虑两个次用户模型,其传输速率采用等加权计算,即($\omega_1 = \omega_2 = 1$),将其接入 10 个子载波信道,信道的实现为独立的瑞利衰落,从图 1 可以看出,所提的次优方案相对于优化最差能效的方案有 2dBm 的提高。而所提方案的次优算法相对于最优方案有 0.3dBm 的差距。

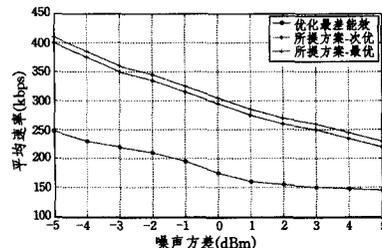


图 1 平均速率的对比

在第二个场景中,考虑所能应用的子载波信道为 40 个。信道的实现是单位瑞利衰落。考虑等加权的方式,即($\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 1$),从图 2 可以看出,所提方案次优算法的能源效率相对于优化最差能源效率方案比有 1Mbits/J 的提升,但与最优化的所提方案比性能相差不大。

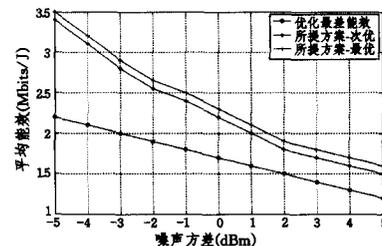


图 2 方案能效的对比

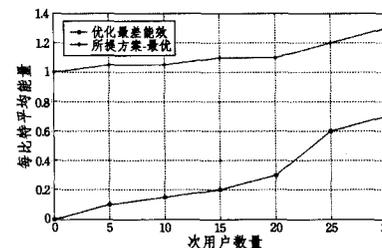


图 3 方案中次用户数量 vs. 每比特平均能效

图 3 对比了在系统中次用户数量不同的情况下,每比特平均能效性能。在对比中可以看出,优化平均能效的方案,即本文所提最优方案在整个次用户数量变化区域具有鲁棒性,而文献[10]所提方案仅仅在次用户数达到 30 个时性能才有所提升,说明了本方案具有次用户数量方面的鲁棒性。

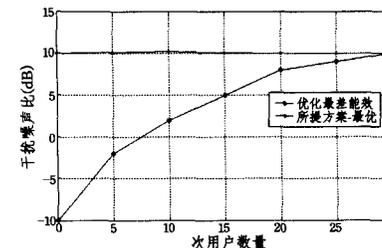


图 4 方案中次用户数量 vs. 干扰噪声比

Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004). IEEE, 2004, 2: 1414-1424

[5] Agrawal R, Imieliński T, Swami A. Mining association rules between sets of items in large databases[J]. ACM SIGMOD Record, ACM, 1993, 22(2): 207-216

[6] Chen J, Meng X, Guo Y, et al. Modeling and predicting future trajectories of moving objects in a constrained network[C]//7th International Conference on Mobile Data Management, 2006 (MDM 2006). IEEE, 2006: 156-156

[7] Zhang J, Papadias D, Mouratidis K, et al. Spatial queries in the presence of obstacles[M]//Advances in Database Technology-EDBT 2004. Springer Berlin Heidelberg, 2004: 366-384

[8] Gao Y, Zheng B. Continuous obstructed nearest neighbor queries in spatial databases[C]//Proceedings of the 2009 ACM SIGMOD International Conference on Management of data. ACM, 2009: 577-590

[9] Li C, Gu Y, Li F, et al. Moving k-nearest neighbor query over obstructed regions[C]//Web Conference (APWEB), 2010 12th International Asia-Pacific. IEEE, 2010: 29-35

[10] Li Z, Gao Y, Lu Y. Continuous obstructed range queries in spatio-temporal databases[C]//2011 International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization (ICSEM). IEEE, 2011, 2: 267-270

[11] 李传文, 谷峪, 李芳芳, 等. 一种障碍空间中不确定对象的连续最

近邻查询方法[J]. 计算机学报, 2010, 8: 006

[12] Liu Q, Deng M, Shi Y. Adaptive spatial clustering in the presence of obstacles and facilitators[J]. Computers & Geosciences, 2013, 56: 104-118

[13] Gao Y, Yang J, Chen G, et al. On efficient obstructed reverse nearest neighbor query processing[C]//Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems. ACM, 2011: 191-200

[14] Gao Y, Zheng B, Chen G, et al. Continuous nearest-neighbor search in the presence of obstacles[J]. ACM Transactions on Database Systems (TODS), 2011, 36(2): 9

[15] 于晓楠, 谷峪, 张天成, 等. 一种障碍空间中的反 k 最近邻查询方法[J]. 计算机学报, 2011, 10: 1917-1925

[16] De Berg M, Van Kreveld M, Overmars M, et al. Computational geometry[M]. Springer, 1997: 305-315

[17] Pfoser D, Theodoridis Y. Generating semantics-based trajectories of moving objects[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2003, 27(3): 243-263

[18] 王志良, 杨溢, 杨扬, 等. 一种周期时变马尔可夫室内位置预测模型[J]. 智能系统学报, 2009, 4(6): 521-527

[19] Tran K, Phung D, Adams B, et al. Indoor location prediction using multiple wireless received signal strengths[C]//Proceedings of the 7th Australasian Data Mining Conference-Volume 87. Australian Computer Society, Inc., 2008: 187-192

(上接第 186 页)

图 4 对比了在系统中次用户数量不同的情况下的干扰噪声比性能。在对比中可以看出, 优化平均能效的方案, 即本文所提最优方案在整个次用户数量变化区域具有鲁棒性, 具有很强的抑制干扰的能力, 而文献[10]所提方案仅仅在次用户数达到 30 时性能才能够达到本方案的水平, 说明了本方案具有次用户数量方面的鲁棒性。

结束语 本文提出了考虑平均能效的认知无线电次用户频谱接入方案, 此方案对子载波信道和各个子载波信道的功率进行了分配, 同时优化了系统的平均能效和传输速率, 提出的次优算法虽然在性能上有一定的损失, 但实现较为方便, 运算复杂度低。

参 考 文 献

[1] Fu L, Zhang Y J, Huang J. Energy efficient transmissions in MIMO cognitive radio networks[C]//Proc. Conference on Information Sciences and Systems (CISS). Princeton, New Jersey, USA, Mar. 2012

[2] Huang Y, Li Q, Ma W-K, et al. Robust multicast beamforming for spectrum sharing-based cognitive radios[J]. IEEE Trans. Signal Process., 2012, 60(1): 527-533

[3] Miao G, Li G Y, Talwar S. Low-complexity energy-efficient scheduling for uplink OFDMA[J]. IEEE Trans. Commun.,

2012, 60(1): 112-120

[4] Xiong C, Li G Y, Zhang S-Q, et al. Energy efficient resource allocation in OFDMA networks[J]. IEEE Trans. Commun., 2012, 60(12): 3767-3778

[5] Yang J, Ullukus S. Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system[J]. IEEE Trans. Commun., 2012, 60(1): 220-230

[6] Tutuncuoglu K, Yener A. Optimum transmission policies for battery limited energy harvesting nodes[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2012, 11(3): 1180-1189

[7] Dhillon H S, Li Y, Nuggeshalli P, et al. Fundamentals of base station availability in cellular networks with energy harvesting[C]//Proc. 2013 IEEE Globecom. 2013

[8] Park S, Kim H, Hong D. Cognitive radio networks with energy harvesting[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2013, 12(3): 1386-1397

[9] Park S, Heo J, Kim B, et al. Optimal mode selection for cognitive radio sensor networks with RF energy harvesting[C]//Proc. 2012 IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. 2012: 2155-2159

[10] Sultan A. Sensing and transmit energy optimization for an energy harvesting cognitive radio[J]. IEEE Wireless Commun. Lett., 2012, 1(5): 500-503