

认知无线电中能效优化的子载波匹配策略

赵澄¹ 郝茵茵² 华惊宇² 姚信威¹ 王万良¹

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)¹ (浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)²

摘要 针对协作认知无线电系统中的能量效率问题,提出一种以最大化能量效率为目标的资源联合分配算法。在满足服务质量要求和功率约束的情况下,首先通过一种能量效率优先的启发式方案对子载波进行匹配,再引入基于拉格朗日对偶算法对其中的功率分配问题进行非线性优化,从而最大限度地提高整个系统的能量效率。仿真实验结果表明,所提算法的能量效率得到显著提升,验证了所提方案的有效性。

关键词 认知无线电,子载波匹配,功率分配,能量效率

中图分类号 TN929 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.06.019

Subcarrier Pairing Strategy for Energy Efficiency Optimization in Cognitive Radio

ZHAO Cheng¹ HAO Yin-yin² HUA Jing-yu² YAO Xin-wei¹ WANG Wan-liang¹

(College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)¹

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)²

Abstract To improve the energy efficiency in cooperative cognitive radio system, a joint resource allocation algorithm was proposed. Firstly, a heuristic scheme with energy efficiency in priority is considered for subcarrier pairing, QoS and power constraint are satisfied. Then, the power allocation is optimized with the Lagrangian dual algorithm to maximize the system energy efficiency. Simulation results demonstrate a significant enhancement in the energy efficiency and the validity of the proposed algorithm.

Keywords Cognitive radio, Subcarrier pairing, Power allocation, Energy efficiency

1 引言

近年来,无线多媒体业务的爆炸式增长导致无线网络吞吐量的需求快速增加,频谱资源供求矛盾的问题备受关注。而认知无线电技术(Cognitive Radio, CR)的提出可以有效缓解频谱资源紧张的问题。其核心思想是在不影响主用户正常工作的前提下,允许认知用户动态接入授权频段,有效提高频谱的利用效率^[1-2]。在认知无线电系统中,为了提高移动通信系统的性能,通常需要采集分集技术来获得分集增益,但一般的分集技术需要在发射端和接收端配备多个天线。然而,许多无线设备只配置单个天线,为了保证天线数受限的终端用户也能获得分集增益,提出了协作通信的概念。协作通信可以通过提高频谱效率、扩大覆盖范围来优化通信网络的性能。本文采用协作通信技术与CR技术相结合的方式设计系统模型,当主用户不能达到其目标速率时,认知用户可以帮助主用户达到其目标速率,这时认知用户被允许接入主用户的频谱,认知用户利用接入频谱中的一分子载波来传输主用户

的数据,然后利用剩余的子载波发送自己的信息。这种模型可以广泛应用于无线 Mesh 网络、微波中继通信及 5G 等通信网络中。

具有高效的频谱利用率和抗多径衰落性能的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是高速无线多用户通信网络多址的首选方案,并广泛应用于 IEEE802.11, IEEE802.16 和 3GPP 等通信标准中。OFDM 可以根据瞬时信道质量,应用于认知无线网络中来分配子载波和功率传输。为了利用频谱和发射功率,基于 OFDM 的认知无线网络的资源分配(Resource Allocation, RA)已经成为研究重点。

对于以性能最大化为目标函数的认知无线网络资源分配问题,国内外学者已经做了大量研究并取得了一定的成果。Ren 等人^[3]提出一种在一定传输速率限制的比例下基于 OFDM 系统的低复杂度的资源分配算法。文献^[4]提出了一种基于子载波选择匹配及功率分配的优化算法,通过匈牙利算法的规划方案实现子载波选择匹配。文献^[5]提出了多中

到稿日期:2017-01-07 返修日期:2017-03-29 本文受浙江省自然科学基金(LQ14F020005),国家自然科学基金(61379123, 61402414),国家科技十二五支撑计划(2012BAD10B01),浙江省教育厅公益基金(Y201431815)资助。

赵澄(1985—),男,博士,主要研究方向为认知无线电, E-mail: zhaoc@zjut.edu.cn; 郝茵茵(1992—),女,硕士生,主要研究方向为认知无线电, E-mail: 2111403080@zjut.edu.cn; 华惊宇(1978—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线通信理论与技术, E-mail: eehjy@zjut.edu.cn; 姚信威(1986—),男,副教授,主要研究方向为无线网络通讯、太赫兹通讯, E-mail: xwyao@zjut.edu.cn; 王万良(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为人工智能、无线网络, E-mail: wwl@zjut.edu.cn。

继的 OFDM 系统选择性的子载波和功率分配算法,降低了系统的复杂度并提高了功率效率。文献[6]提出了一种基于非合作博弈的资源分配策略,利用博弈论的方法在资源分配的公平性和数据传输率方面达到了很好的折中。文献[7]研究了多用户 OFDM 系统下行链路的资源分配算法,利用注水算法分配子载波及贪婪功率分配算法来最大化指定用户数据传输速率并提高功率利用率,但牺牲了一定的系统总速率。

现有研究大多集中于协作 OFDM 系统的吞吐量最大化问题,然而爆炸式增长的数据传输和无处不在的接入需求引发了能量需求升级。为了满足未来 5G 通信相对现有网络容量的提升和绿色通信的需求,以及传感器网络对网络生命时间的要求,高能量效率(Energy-Efficiency, EE)的绿色通信已成为下一代无线网络的主要考虑设计的因素之一。文献[8]以最大化放大转发(Amplify and Forward, AF)中继系统的总能量效率(能效)为目标,提出了一种基于能效的中继选择和功率分配联合方案,该方案利用凸规划得到最优功率分配。文献[9]在认知无线电下行链路系统中提出一种联合调度和子载波分配与功率分配的最大化能效的方案。文献[10]探讨了以认知用户能效为目标时,通过参数法、匈牙利法和对偶法得出的有效迭代资源分配算法。文献[11]考虑了基于子载波匹配的 OFDM 系统,利用包含内循环和外循环的 Dinkelbach 方法来寻求最佳解决方案,提高了系统能量效率,但它对协作通讯节点的利用还不够充分,其资源分配并不是很合理且算法复杂度较高。

对比先前学者的工作,本文致力于研究基于子载波匹配情况下的系统能效优化问题,主要贡献如下:

(1)提出了一种启发式的子载波匹配算法来解决能效最大化问题,以较低的代价获得较高的能效。与文献[7, 11]中提出的算法相比,所提算法可以根据子载波匹配指标的大小来进行子载波间的匹配,简化了算法复杂度。

(2)通过改进型的注水算法对能效问题进行建模,并利用拉格朗日对偶算法进行优化。与经典的注水算法采用传输功率作为水面有所不同,本文选择将主用户的目标速率作为水面,可以只用一个参数(水面高度)来表示各个信道功率分配,求得能效最优时对应的每个子载波的速率。

(3)将所提算法和现有算法进行仿真比较,仿真结果说明,相同的环境下,在系统稳定性与整体能效方面,本文所提算法要好于现有算法,优化了系统的性能。

本文第 2 节介绍系统模型及优化目标;第 3 节提出以优化能效为目标的资源分配算法,包括子载波匹配方法、功率分配和子载波分配的联合资源分配方案;第 4 节仿真验证所提算法的性能,并对仿真结果进行分析;最后总结全文。

2 系统模型

本文考虑了一个基于 OFDM 的认知无线电系统,如图 1 所示。该通信系统包括两个通信对:主用户对和认知用户对。主用户对,包括一个主用户发送端(PT)和主用户接收端(PR)。认知用户对包括认知用户发送端(CT)和认知用户接收端(CR),其中 CT 支持中继转发功能。假设系统中存在 K 个子载波组成的授权频段,其中 N 个子载波用于中继传输主

用户的信息,剩下的 $K-N$ 个子载波传输认知用户的信息。信道链路 PT→PR 和 PT→CT 的子载波 k 上的信道衰落系数分别为 $h_{1,k}, h_{2,k}$;信道链路 CT→PR 和 CT→CR 的子载波 k' 上的信道衰落系数分别表示为 $h_{3,k'}, h_{4,k'}$,且均服从瑞利平坦衰落分布。

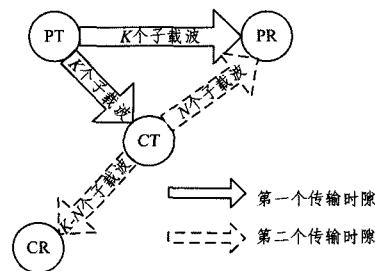


图 1 系统模型

本系统中,信息的发送过程分为两个时长相等的时隙。在第一个时隙中,PT 通过 K 个子载波广播信息给 CT 和 PR。在第二个时隙中,CT 利用子载波 k' ($k' \in G_s$) 与第一个时隙中的子载波 k ($k \in G_p$) 相匹配来接收信息,然后 CT 将信号放大转发给 PR。此时 CT 作为中继传输主用户的信息,利用剩余的子载波来发送自己的信息。其中 G_p, G_s 分别表示链路 PT→CT 与链路 CT→PR 上的子载波集合, $|G_s| = |G_p| = N$ 。这里假设 G_s, G_p 的子载波是一一对应的,即 G_p 的一个子载波最多只与 G_s 的一个子载波匹配, G_s 中的一个子载波也最多被 G_p 中的一个子载波所中继。

系统中主要变量的定义如表 1 所列。

表 1 主要变量

G_p, G_s	链路 PT→CT 和 CT→PR 上用于传输主用户信息的子载波集合
$h_{1,k}, h_{2,k}, h_{3,k'}, h_{4,k'}$	链路 PT→PR 和 PT→CT、CT→PR 和 CT→CR 分别在子载波 k 和 k' 上的信道衰落系数
$P_{p,k}, P_{sp,k'}, P_{ss,k'}$	分别表示 PT 分配给子载波 k 、CT 分配给子载波 k' 用于中继以及发送自己信息的功率
R_T	主用户的目标速率
$R_{p,k'}, R_p$	主用户通过子载波对获得的速率和总速率
$R_{\alpha-pr,k'}, R_{pr-ct,k}$	链路 CT→PR 在第 k' 个子载波上、链路 PT→CT 在第 k 个子载波上的速率
$\rho_{k,k'}$	子载波匹配指标
$\rho_{k,k'}^*, P_{p,k'}^*, P_{sp,k'}^*, P_{ss,k'}^*, P_{ss,k'}^*, G_p^*, P_p, P_s$	最优的子载波配对、功率分配与子载波集合
λ_1, λ_2	主用户和次级用户的发送功率
	拉格朗日因子

链路 PT→CT 的第 k 个子载波上的速率为:

$$R_{p-ct,k} = \frac{1}{2} B \ln(1 + P_{p,k} r_{2,k}) \quad (1)$$

其中, $P_{p,k}$ 表示 PT 分配给子载波 k 的功率, $r_{2,k} = \frac{|h_{2,k}|^2}{N_0}$, N_0 是单边功率谱密度的加性高斯白噪声, B 表示信道带宽。

链路 CT→PR 的第 k' 个子载波上的速率为:

$$R_{\alpha-pr,k'} = \frac{1}{2} B \ln(1 + P_{sp,k'} r_{3,k'}) \quad (2)$$

其中, $P_{sp,k'}$ 是 CT 分配给子载波 k' 用于中继传输的功率。 $r_{3,k'} = \frac{|h_{3,k'}|^2}{N_0}$ 。由于主用户的速率由两跳中继中速率最小的那一跳决定,可知:

$$R = \min(R_{pr-ct,k}, R_{pr-pr,k'}) \quad (3)$$

通过 PR 在两个时隙接受信息的最大比合并^[12], 主用户在子载波 k 上通过中继 CT 在子载波 k' 的帮助获得的可达到的速率可以表示为:

$$R_{k,k'}^p = \frac{1}{2} B \ln(1 + P_{p,k} r_{1,k} + \frac{P_{p,k} r_{2,k} P_{sp,k'} r_{3,k'}}{1 + P_{p,k} r_{2,k} + P_{sp,k'} r_{3,k'}}) \quad (4)$$

其中, $r_{1,k} = \frac{|h_{1,k}|^2}{N_0}$.

主用户可获得的总速率可以表示为:

$$R_p = \sum_{k \in G_p} \sum_{k'=1}^K \rho_{k,k'} R_{k,k'}^p + \frac{1}{2} B \sum_{k \in G_p} \ln(1 + P_{p,k} r_{1,k}) \quad (5)$$

其中, $\bar{G}_p$ 是 G_p 的补集, $\rho_{k,k'} \in \{0, 1\}$, 表示子载波匹配指标。 $\rho_{k,k'} = 1$ 表示第一个时隙的子载波 k 与第二个时隙的子载波 k' 匹配。

认知用户发送自己的信息的速率为:

$$R_s^c = \frac{1}{2} B \sum_{k' \in \bar{G}_s} \ln(1 + P_{ss,k'} r_{4,k'}) \quad (6)$$

其中, $\bar{G}_s$ 是 G_s 的补集, $P_{ss,k'}$ 表示 CT 分配给第 k' 个子载波用于发送自己信息的速率, $r_{4,k'} = \frac{|h_{4,k'}|^2}{N_0}$.

系统能效^[13]表达式如下:

$$EE(\rho_{k,k'}, P_{p,k}, P_{sp,k'}, P_{ss,k'}, G_p) = \frac{R_s^c + R_p}{\sum_{k=1}^K P_{p,k} + \sum_{k' \in \bar{G}_s} P_{sp,k'} + \sum_{k' \in \bar{G}_s} P_{ss,k'}} \quad (7)$$

本文优化的目标是通过优化子载波匹配和功率联合分配来提高系统能效。因此, 最优资源分配问题的描述如式(8)所示, 其中, $\rho_{k,k'}^*$, $P_{p,k}^*$, $P_{sp,k'}^*$, $P_{ss,k'}^*$, G_p^* 分别表示最优子载波匹配指标、主用户最优功率分配、认知用户最优功率分配和最优子载波分配集合。 P_s 和 P_p 分别是认知用户和主用户的总功率约束。 R_T 是主用户的目标速率。

$$\begin{aligned} & \rho_{k,k'}^*, P_{p,k}^*, P_{sp,k'}^*, P_{ss,k'}^*, G_p^* = \\ & \arg \max EE(\rho_{k,k'}, P_{p,k}, P_{sp,k'}, P_{ss,k'}, G_p) \\ & \text{s. t. } \begin{cases} R_p \geq R_T \\ \sum_{k=1}^K P_{p,k} \leq P_p \\ \sum_{k' \in \bar{G}_s} P_{sp,k'} + \sum_{k' \in \bar{G}_s} P_{ss,k'} \leq P_s \\ P_{p,k} > 0, \forall k \in G_p \\ P_{sp,k'} > 0, \forall k' \in G_s \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

上述优化问题中存在非线性限制条件, 是一个复杂的非凸优化问题, 因此对载波匹配和功率分类进行联合优化的方法复杂度较高, 实现起来比较困难。

3 基于能源效率的资源分配

现有研究结果表明, 子载波匹配和子载波、功率分配联合优化问题相互独立, 可以分步优化^[8]。本文先利用启发式方法求解子载波匹配, 然后在已知子载波匹配的情况下进行子

载波与功率联合分配。

3.1 子载波匹配

以实际信道的增益为依据来选择相互匹配的子载波, 可以提高系统的能量效率。因此, 本文提出了一种低复杂度的启发式方法来进行子载波匹配。 $\rho_{k,k'}$ 表示链路 PT→CT 上的子载波 k 与 CT→PR 上的子载波 k' 的匹配指标, $\rho_{k,k'}$ 越大说明子载波匹配度越高, 系统的性能也随之提高。故可以以求解 $\rho_{k,k'}$ 的方式获得系统较优的子载波匹配。首先, 假设 G_p 已经确定, 且对所有的子载波等功率分配:

$$P_{p,k} = \frac{P_p}{K}, P_{sp,k'} = P_{ss,k'} = \frac{P_s}{K} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 化简可得优化问题表示如下:

$$\begin{aligned} & \rho_{k,k'}^* = \\ & \arg \min \left\{ -\frac{\sum_{k \in G_p} \sum_{k'=1}^K (\rho_{k,k'} R_{k,k'}^p + \frac{1}{2} B \ln(1 + \rho_{k,k'} \frac{P_s}{K} r_{4,k'}))}{P_s + P_p} - \right. \\ & \left. \frac{B}{2(P_s + P_p)} (\sum_{k=1}^K \ln(1 + \frac{P_s}{K} r_{4,k'}) + \sum_{k' \in \bar{G}_p} \ln(1 + \frac{P_p}{K} r_{1,k'})) \right\} \\ & \text{s. t. } \begin{cases} R_p \geq R_T \\ \rho_{k,k'} \in (0, 1] \\ \sum_{k=1}^K \rho_{k,k'} \leq 1 \end{cases} \quad (10) \end{aligned}$$

为了保证式(10)是线性连续优化问题, 把子载波指标 $\rho_{k,k'}$ 的约束条件放松, 使得 $\rho_{k,k'}$ 可以取 0~1 之间的任意实数。直观上, $\rho_{k,k'}$ 越大意味着认知用户在子载波 k 和 k' 的匹配率越高。所以求得 $\rho_{k,k'}$ 的所有值后, 将拥有最大 $\rho_{k,k'}$ 值相对应的子载波 k 与 k' 匹配, 从而达到优化能效的目的。

观察式(10)可知, 求解子载波匹配问题只与第一项有关, 约束条件表明它是非凸优化问题, 即 NP 难题。根据文献[14]可知, 当优化问题具有足够多的子载波数且满足分时条件时, 可以用对偶方法来等效解决非凸优化问题。

对式(10)构建拉格朗日对偶函数如式(11)所示, 其中 λ_1 , λ_2 是拉格朗日因子:

$$\begin{aligned} & L(\rho_{k,k'}, \lambda_1, \lambda_2) = \\ & -\frac{\sum_{k \in G_p} \sum_{k'=1}^K (\rho_{k,k'} R_{k,k'}^p + \frac{1}{2} B \ln(1 + \rho_{k,k'} \frac{P_s}{K} r_{4,k'}))}{P_s + P_p} + \lambda_1 (\frac{1}{2} \\ & B \sum_{k \in G_p} \sum_{k'=1}^K \rho_{k,k'} \ln(1 + \frac{P_p}{K} r_{1,k} + \frac{P_p}{2K} r_{2,k}) + \frac{1}{2} B \sum_{k' \in \bar{G}_s} \ln(1 + \\ & \frac{P_p}{K} r_{1,k}) - R_T) + \lambda_2 (\sum_{k=1}^K \rho_{k,k'} - 1) \quad (11) \end{aligned}$$

$$\text{由 } \frac{\partial^2 L}{\partial \rho_{k,k'}^2} = \frac{1}{4K} \frac{-\frac{P_s}{K} r_{4,k'}}{(1 + \rho_{k,k'} \frac{P_s}{K} r_{4,k'})^2} < 0 \text{ 可知 } L \text{ 是关于 } \rho_{k,k'} \text{ 的}$$

凸函数, 即所求优化问题是凸优化问题, 应用 KKT 条件^[15], 可求得解析解如式(12)所示:

$$\rho_{k,k'}^* = \left[\frac{\frac{1}{2} B}{\left[\frac{1}{2} B \lambda_1 \sum_{k \in G_p} \sum_{k'=1}^K \ln(1 + \frac{P_p}{K} (r_{1,k} + \frac{1}{2} r_{2,k})) + \lambda_2 \right] P - \sum_{k \in G_p} \sum_{k'=1}^K R_{k,k'}^p} - \frac{1}{\frac{P_s}{K} r_{4,k'}} \right]^+ \quad (12)$$

其中, $[x]^+ = \max(0, x)$, $\lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0$ 。且 λ_1, λ_2 的值可

以由式(13)确定:

$$\begin{cases} \lambda_1 (R_T - \frac{1}{2} B \sum_{k \in G_p} \sum_{k'=1}^K \rho_{k,k'} \ln(1 + \frac{P_p}{K} r_{1,k} + \frac{P_p}{2K} r_{2,k}) + \\ \frac{1}{2} B \sum_{k \in G_s} \ln(1 + \frac{P_p}{K} r_{1,k})) = 0 \\ \lambda_2 (\sum_{k=1}^K \rho_{k,k'} - 1) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

用 k^* 表示与第 k 个子载波匹配的最优子载波,可以表示为:

$$\begin{cases} k^* = \arg \max_k \rho_{k,k'}, \forall k' \\ \rho_{k,k^*} = 1 \\ \rho_{k,k' \neq k^*} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中, ρ_{k,k^*} 表示所求 k^* 与 k' 是同一条子载波时子载波 k 与 k' 的匹配指标, $\rho_{k,k' \neq k^*}$ 表示 k^* 与 k' 不是同一条子载波时子载波 k 与 k' 的匹配指标。

3.2 功率及子载波分配

将 3.1 节中求得的子载波匹配结果 $\rho_{k,k'}^*$ 代入优化问题,表示如下:

$$\begin{aligned} & \rho_{k,k'}^*, P_{p,k}, P_{sp,k'}, P_{ss,k'}, G_p \\ & = \arg \max_{(\rho_{k,k'}^*, P_{p,k}, G_p)} \frac{R_s + R_p}{\sum_{k=1}^K P_{p,k} + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'} + \sum_{k' \in G_s} P_{ss,k'}} \end{aligned} \quad (15)$$

首先假设 PT 的所有子载波全部用于给 CT 发送信息,即 $G_p = U_p$ 。由于求解认知用户能效最优时含有多个变量,联合计算复杂度较高,因此本文把优化问题分解为两部分,即对主用户和认知用户分别进行优化。

假设认知用户发射速率确定时,主用户系统能效最大时表示如下:

$$\begin{aligned} & \rho_{k,k'}^*, P_{p,k}, P_{sp,k'}, P_{ss,k'}, G_p \\ & = \arg \max_{(\rho_{k,k'}^*, P_{p,k}, G_p)} \frac{R_p}{\sum_{k=1}^K P_{p,k} + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'} + \sum_{k' \in G_s} P_{ss,k'}} \\ & \text{s. t.} \begin{cases} R_p \geq R_T \\ \sum_{k=1}^K P_{p,k} \leq P_p \\ \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'} \leq P_s \\ P_{p,k} > 0, \quad \forall k \in G_p \\ P_{sp,k'} > 0, \quad \forall k' \in G_s \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

通过反证法可知,当系统能效最优时,主用户能够获得的速率等于目标速率,即 $R_p = R_T$ 。且任意子载波 k 上两跳链路的速率相等,即 $R_{\alpha-p,k} = R_{\mu-\alpha,k}$,可得如下等式:

$$\begin{aligned} & \frac{B \frac{1}{2} \sigma^2 \Gamma r_{4,k'} (\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))}{1 + \sigma^2 \Gamma r_{4,k'} (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}})} \\ & \frac{\partial L_1}{\partial \mu} = \frac{(\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))^2}{(\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))^2} - \frac{\frac{1}{2} B \sum_{k' \in G_s} \ln(1 + \sigma^2 \Gamma r_{4,k'} (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}})) \cdot \sigma^2 \Gamma}{(\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))^2} \\ & \frac{\partial^2 L_1}{\partial \mu^2} = -\frac{\sigma^2 \Gamma}{2} \cdot r_{4,k'} \left[\frac{\sigma^2 \Gamma r_{4,k'} (\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^*)}{[1 + \sigma^2 \Gamma r_{4,k'} (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}) (\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))]^2} + \right. \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k \in G_p} \frac{1}{2} B \ln(1 + P_{p,k} r_{1,k} + \frac{P_{p,k} r_{2,k}}{2}) + \sum_{k \in G_p} \frac{1}{2} B \ln(1 + \\ & P_{p,k} r_{1,k}) = R_T \end{aligned} \quad (17)$$

本文采用一种改进型注水算法建模并利用和拉格朗日对偶算法进行优化,与传统注水算法采用传输功率作为水面有所不同,本文选择主用户目标速率作为水面。且传统注水算法无法求得能效最优时每个子载波对应的速率,通过改进,可以只用一个参数(水面高度)来表示各个信道功率分配,大大减少了计算量。

算法 1 链路 PT→CT 的功率 $P_{p,k}$ 及子载波分配算法

1. 设 $G_p = U_p$, 即所有子信道都用于传输主用户数据;
2. while $G_p \neq \emptyset$
3. 利用改进的注水算法,根据 R_T 确定水面高度 λ ;
4. 求得每个子载波对的发射功率 $P_{p,k}$ 和 $P_{s,k}$;
5. If $\sum_{k=1}^K P_{p,k} \leq P_p$ 且 $\sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'} + \sum_{k' \in G_s} P_{ss,k'} \leq P_s$, 即能量在约束范围内
6. 分别计算每个子载波对能效和系统总能效;
7. 选取能效最低的子载波对 k 分配给认知用户,并且 $G_p = G_p - k$;
8. else
9. 退出循环;
10. end if
11. end while
12. 从所有子载波分配方案中选择能效最高的一个,作为分配结果。

然后对认知用户进行能效优化,优化问题表示如下:

$$\begin{aligned} & P_{p,k}^*, P_{sp,k'}^*, P_{ss,k'}^* = \arg \max_{(P_{p,k}^*, P_{sp,k'}^*, P_{ss,k'}^*)} L_1 \\ & \text{s. t.} \sum_{k' \in G_s} P_{ss,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* \leq P_s \end{aligned} \quad (18)$$

其中,

$$\begin{aligned} L_1 & = \frac{R_s}{\sum_{k=1}^K P_{p,k} + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'} + \sum_{k' \in G_s} P_{ss,k'}} \\ & = \frac{\frac{1}{2} B \sum_{k' \in G_s} \ln(1 + P_{ss,k'} r_{4,k'})}{\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{ss,k'}} \end{aligned} \quad (19)$$

由注水算法可得:

$$P_{ss,k'} = \sigma^2 \Gamma [\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}]^+ \quad (20)$$

其中,常数 μ 要满足 $\sum_{k' \in G_s} P_{ss,k'} + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'} \leq P_s$ 。

把式(20)代入 L_1 可得:

$$L_1 = \frac{\frac{1}{2} B \sum_{k' \in G_s} \ln(1 + r_{4,k'} \sigma^2 \Gamma [\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}]^+)}{\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma [\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}]^+} \quad (21)$$

L_1 的导数及二阶导数,如式(22)和式(23)所示:

$$\begin{aligned}
& \frac{\sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma(\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}) + \sigma^4 \Gamma^2 r_{4,k'} (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}})}{[1 + \sigma^2 \Gamma r_{4,k'} (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}) (\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma(\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))]^2}] - \frac{\sigma^2 \Gamma r_{4,k'} (\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma(\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))^2}{1 + \sigma^2 \Gamma r_{4,k'} (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}})} + \\
& \frac{(\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma(\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))^4}{(\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma(\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))^4} + \\
& (\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma(\mu - \frac{1}{r_{4,k'}})) \cdot \frac{2\sigma^2 \Gamma \sum_{k' \in G_s} \ln(1 + \sigma^2 \Gamma r_{4,k'} (\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))}{(\sum_{k=1}^K P_{p,k}^* + \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}^* + \sum_{k' \in G_s} \sigma^2 \Gamma(\mu - \frac{1}{r_{4,k'}}))^4} \quad (23)
\end{aligned}$$

当 $\mu > \frac{1}{r_{4,k'}}$, $\sum_{k' \in G_s} \mu \leq \frac{P_s - \sum_{k' \in G_s} P_{sp,k'}}{\sigma^2 \Gamma} + \sum_{k' \in G_s} \frac{1}{r_{4,k'}}$ 时, 式(23)小于 0, 即上述优化问题是凸优化问题。此时, 能效最优问题可以看作是对含单个参数 μ 的函数求极值的问题。又知对 μ 求导等于 0 时, 在取值区间内目标函数可以取得最大值。令式(22)为 0, 算出 μ 的值。结合 μ 的极值点, 计算它们各自的能效并从中选出能效为最大值时所对应的 μ , 即为最优解。相应地可得认知用户功率分配的最优解 $P_{ss,k'}^*$ 。

4 仿真结果

为了验证所提算法的有效性, 对其进行实验仿真; 同时, 将所提算法与文献[7]的算法、文献[11]的算法进行比较, 证明本文所提算法的优越性。本文所用算法的复杂度是求解优化问题乘以总的迭代次数, 从而所提算法的计算复杂度主要来自求解优化问题。对于具有 K 个子载波的功率优化, 由于本文采用改进的注水算法, 根据文献[16]可知, 使用二分法时其迭代次数一般在 $O(10K \log_2)$ 内, 每次迭代需要计算每条子载波的发射功率, 故其算法复杂度为 $O(10K \log_2 K)$ 。而文献[11]通过包含内循环和外循环的 Dinkelbach 的方法, 也就是使用两次迭代来求解优化问题, 可知其算法复杂度为 $O(K^2)$, 且高于本文算法的计算复杂度。而文献[7]和本文使用类似的注水算法对子载波功率进行分配, 故其具有与本文算法相同的复杂度 $O(10K \log_2 K)$ 。

本文使用 MATLAB 进行仿真实验, 在理想状态下建立系统模型。在认知无线电系统中, 假设所有的噪声都是功率为 1 的加性高斯白噪声。信道增益 $r_{1,k}, r_{2,k}, r_{3,k}, r_{4,k}$ 遵循瑞利平坦衰落分布, 且任意两个节点间的信道都经历瑞利衰落。实验中的设置条件与参数如表 2 所列。

表 2 仿真参数

参数名称	参数值
子载波总数目 M	32
单个子载波带宽 B	1
主用户目标速率 R_T	5
主用户最大发送功率 P_s	1500
认知用户最大发送功率 P_s	1500
PT 到 PR 的距离 d_1	1.3
PT 到 CT 的距离 d_2	0.9
CT 到 PR 的距离 d_3	0.95
CT 到 CR 的距离 d_4	1.2

如图 2 所示, 当 CT 的最大发射功率 P_s 极小时, 由于 3 种算法都无法满足主用户的基本传输, 因此协作中继无法正常进行, 能量效率为 0。由图 2 可知, 本文提出的算法通过更合理的子载波匹配方案和功率优化算法, 可以在 P_s 相对较小

时, 实现系统的正常传输, 而文献[7]和文献[11]的算法在 CT 发射功率更大时才能实现。随着 P_s 的增大, 能量效率也会不断提高。本文所提算法会首先使得能量效率达到极值, 并维持稳定不变的状态。文献[11]的算法所求能量效率随后达到极值, 但是低于本文算法。文献[7]使用传统注水算法对功率进行分配。由于注水算法是吞吐量最优化算法, 会使得实际发射功率尽可能接近最大发射功率。因此当最大发射功率增大时, 开始能效会随之提高, 但达到峰值后, 能效会随发射功率的增大而降低。本文算法和文献[11]的算法在能效达到最优后均不再增大发射功率, 所以能效不会随着功率极值的增大而降低。

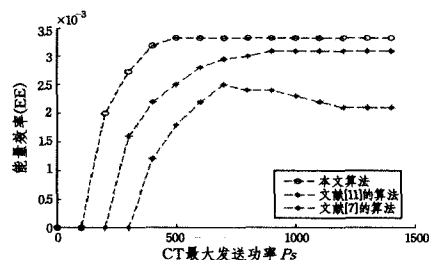


图 2 系统能效随 CT 最大发送功率的变化

图 3 是主用户目标速率 R_T 与系统能效的关系图。从图中可以看出, 在 R_T 较大时, 由于主用户占用资源比例较高, 可以进行优化的网络资源较少, 以至于 3 种算法的系统能效很接近。当 R_T 逐渐减少时, 剩余的网络资源也越来越多, 本文提出的算法会通过对于子载波和功率的优化, 不断提高网络的能量效率。文献[11]中的 Dinkelbach 方法也可以提升能量效率, 但和本文算法仍然存在差距, 且随着网络剩余资源的增多, 差距不断变大。文献[7]的算法由于缺少对能效的优化, 且利用以发射功率作为水面高度的注水算法分配功率, 与 R_T 关联不大, 故其能效不随 R_T 的改变发生变化。

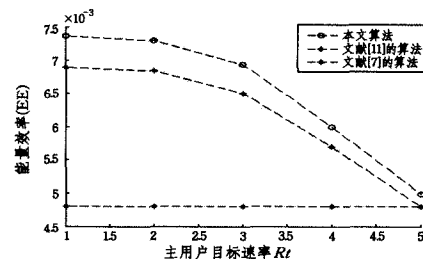


图 3 系统能效随主用户目标速率的变化

从图 4 可以看出, 随着认知用户发送功率的增大, 认知用户用于发送自己的信息分配的资源也增多。由于 P_s 的增大, 认知用户的功率占用比可以达到 90%, 信道占用比可以达到

70%左右。这说明在功率分配、子载波匹配与分配的联合优化下,主用户能够很容易地达到目标速率,剩余用于发送认知用户的资源增多,资源得到了合理的分配,从而大幅度地提高了整个系统的能量效率。

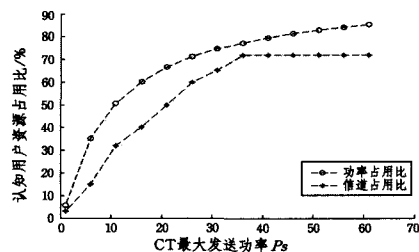


图4 认知用户资源占用比随CT最大发送功率的变化

结束语 本文提出了基于OFDM的认知无线电系统能效最大化的子载波匹配、子载波分配和功率分配的资源分配联合优化方案。由于它是混合整数优化问题,很难得到最优解。为了降低问题的复杂度,我们提出了启发式方案来进行子载波选择匹配。并利用KKT条件及改进型注水算法和拉格朗日对偶算法结合的算法推导出该系统的资源分配算法。将提出的算法与文献[7]的算法、文献[11]的算法进行了仿真与分析。仿真结果表明,本文提出的算法可以在较低的代价下让系统获得较高的能量效率。该算法把子载波匹配应用到提高能效上,在改善无线网络能效上具有良好的效果,可以应用到机器通信(Machine-To-Machine, M2M)、IT基础设施方面,如多媒体子系统服务器、计费服务器,并且在智能电网和智能交通系统中有着广泛的应用。

参考文献

- [1] WILDEMEERSCH M, QUEK T Q S, SLUMP C H, et al. Cognitive Small Cell Networks: Energy Efficiency and Trade-Offs [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 4016-4029.
- [2] JUNGnickel V, MANOLAKIS K, ZIRWAS W, et al. The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 44-51.
- [3] REN Z, CHEN S, HU B, et al. Energy-Efficient Resource Allocation in Downlink OFDM Wireless Systems With Proportional Rate Constraints [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(5): 2139-2150.
- [4] FENG L. Multi-hop relay OFDM system based on subcarrier selection pairing and optimal power allocation [J]. Computer Science, 2015, 42(10): 92-94. (in Chinese)
冯亮. 基于子载波选择配对及功率优化分配的多跳中继系统研究[J]. 计算机科学, 2015, 42(10): 92-94.
- [5] BEDEER E, AMIN O, DOBRE O, et al. Energy-Efficient Power Loading for OFDM-based Cognitive Radio Systems with Channel Uncertainties [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64: 1-1.
- [6] YANG F, ZHANG X S, MING Y. Research on Resource Allocation Based on Noncooperation Game for OFDMA-WLAN System [J]. Computer Science, 2016, 43(s1): 319-321, 347. (in Chinese)
- [7] 杨帆, 张小松, 明勇. 基于非合作博弈的 OFDMA-WLAN 系统资源分配算法研究 [J]. 计算机科学, 2016, 43(s1): 319-321, 347.
- [7] TANG L M, CAO H Y, LI J, et al. Resource Allocation Algorithm for the Downlink of Multi-User OFDM System with Optimized Fairness [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 58-63. (in Chinese)
- 汤丽梅, 曹海燕, 李君, 等. 优化公平性的多用户 OFDM 系统下行链路资源分配算法 [J]. 电信科学, 2015, 31(12): 58-63.
- [8] CHEN Y, FANG X M, HUANG B. Energy efficiency resource allocation scheme for AF relay downlink system [J]. Journal of Communication, 2014, 35(9): 122-132. (in Chinese)
- 陈煜, 方旭明, 黄博. AF 中继下行链路系统的能效资源分配方案 [J]. 通信学报, 2014, 35(9): 122-132.
- [9] XU D, LI Q. Energy efficient joint scheduling and resource allocation for downlink cognitive radio networks [C] // International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Nanjing, IEEE Press, 2015: 1-5.
- [10] LI Q, XU D. Energy efficient resource allocation for multiple primary and secondary users in cognitive radio networks with limited primary users' cooperation [C] // International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Nanjing: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [11] ZHOU Z, ZHU Q. Joint energy-efficient power allocation and subcarrier pairing in orthogonal frequency division multiple-based multi-relay networks [J]. Iet Communications, 2015, 9(5): 649-657.
- [12] TANG M, XIN Y. Energy efficient power allocation in cognitive radio network using coevolution chaotic particle swarm optimization [J]. Computer Networks, 2016, 100: 1-11.
- [13] LIANG X, ZHU Q. Energy efficient joint power and subcarrier assignment scheme in OFDM relay system [J]. Journal of China Universities of Posts & Telecommunications, 2015, 22(5): 56-62.
- [14] SHEN Z, ANDREWS J G, EVANS B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2726-2737.
- [15] BOYD, VANDENBERGHE, FAYBUSOVICH. Convex Optimization [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(11): 1859-1859.
- [16] 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.